Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)
Кафедра “Автотранспортная и техносферная безопасность”

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ДАТЧИКИ И ПРИБОРЫ»
(ЧАСТЬ 1)

Составитель:
П.С. Сабуров

Владимир 2016

УДК 658.012
ББК 32.965

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и электронные системы автомобилей» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ)

Веселов О.В.

Методические указания для лабораторных работ по дисциплине «Автоматическое управление, датчики и приборы» (часть 1) / Сост. П.С. Сабуров., Владим. гос. ун-т., Владимир, 2014. – с. 48.

Подготовлено в соответствии с рабочей программой дисциплины «Автоматическое управления, датчики и приборы», содержит материал для выполнения лабораторных работ.

Предназначены для инженерно–технических специальностей Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых.

Ил. 43. Библиогр. 4 назв.

УДК 658.012
ББК 32.965

Аннотация

Данные методические указания для лабораторных работ предназначены для студентов III курса, обучающихся по дисциплине «Автоматическое управление, датчики и приборы». В методических указаниях разобрана система автоматизированного моделирования «SamSim», приведены основные теоретические положения о типовых звеньях и регуляторах систем автоматического управления, индивидуальные задания для исследования звеньев и регуляторов, получение передаточной функции объекта на примере RLC цепи, получение передаточной функции из дифференциальных уравнений, получение матричной передаточной функции, исследование устойчивости систем с помощью критериев Гурвица и Раусса др.

Лабораторная работа №1
СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ “SAMSIM”.

Цель работы: изучить назначение программы автоматизированного моделирования «SamSim», её интерфейс, основные возможности, и получить практические навыки её использования.

Назначение программы SamSim.

Программа предназначена для моделирования линейных и нелинейных цепей в системах автоматического управления. Работает с моделями, которые можно представить в форме блок-схем.

Программа имеет 48 типовых блоков. С помощью этой программы возможно:

- построение любых схем моделей из библиотек элементов;
- задание параметров интегрирования и параметров элементов;
- сохранение в файле и считывание из файла модели;
- построение зависимостей от времени в любых точках схемы;
- построение фазовых портретов для любых схем;
- построение частотных характеристик для любых линейных схем;
- вывод результатов расчёта в графической и табличной форме;
- вывод на печать схемы и её параметров, результатов расчёта.

Общий вид программы «SamSim» показан на рисунке 1.

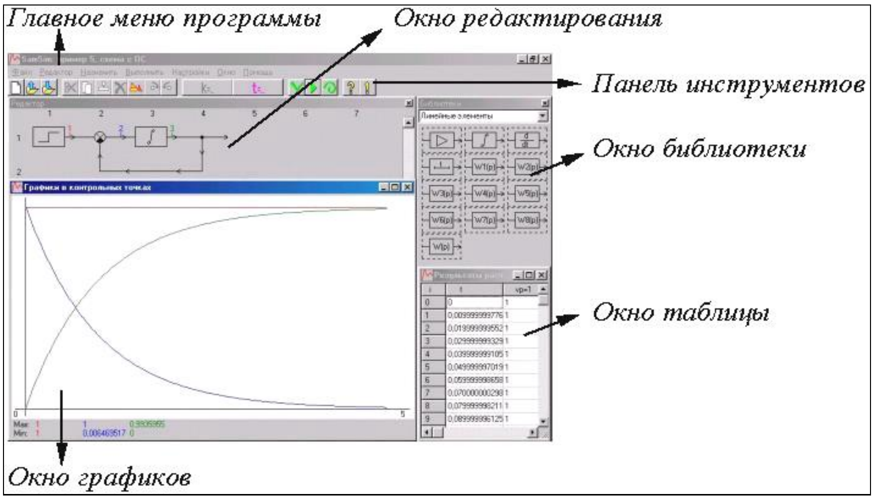


Рис.1. Общий вид программы «SamSim»

Вид главного меню программы и команд, входящих в меню, показан на рисунке 2. Главное меню состоит из следующих элементов: «Файл», «Редактор», «Назначить», «Выполнить», «Настройки», «Окно», «Помощь».

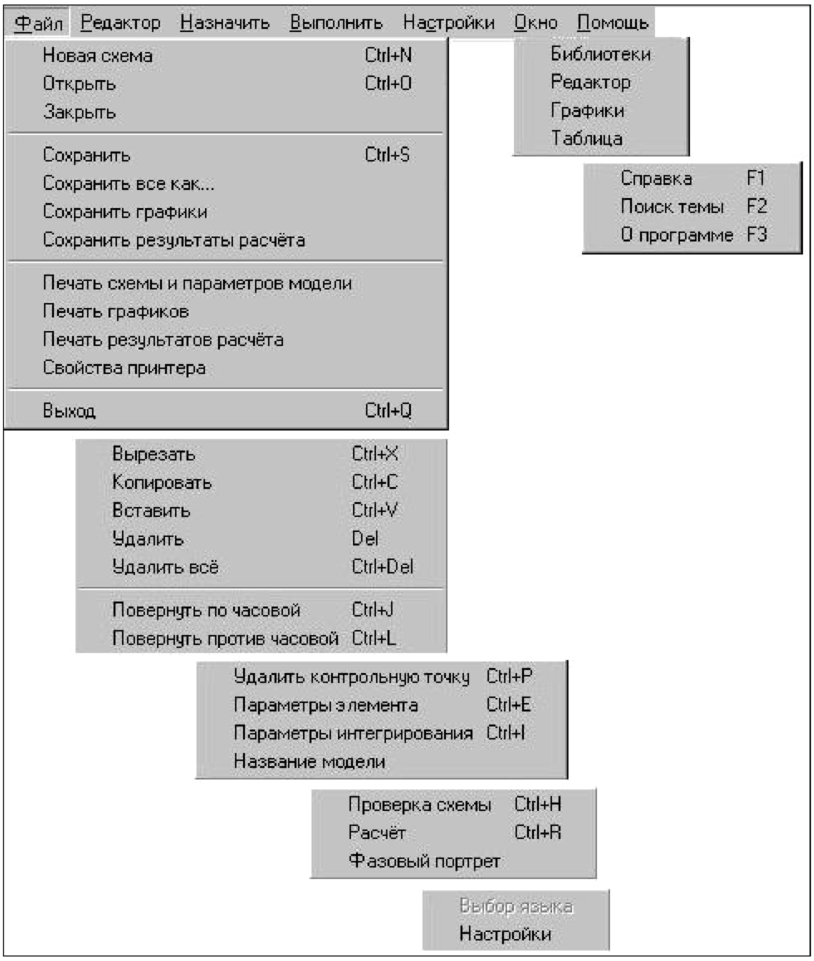


Рис.2. Вид главного меню программы «SamSim»

Настройки программы.

Для вызова диалогового окна настроек программы необходимо выбрать пункт меню “Настройки”.

На вкладке «Вид и поведение» можно задать окно программы, положение окна Библиотек относительно окна Редактора (слева или справа в главном окне), вывод результатов расчетов. Вкладка «Вид и поведение» показана на рисунке 3.

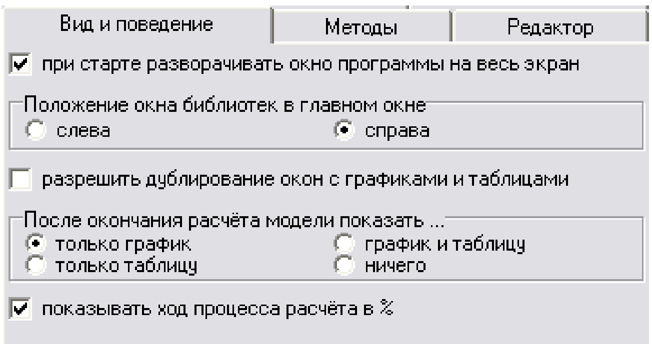


Рис.3. Вкладка «Вид и поведение»

Задание 1. Установить положение компонентов программы, как показано на рисунке 3.

На вкладке «Методы» можно задать некоторые численные методы, используемые при расчёте схемы. Используются следующие методы численного интегрирования: для интегрирующего звена - формула трапеций; для дифференциальных уравнений - метод Адамса 2-го порядка и метод Адамса-Мултона 4-го порядка.

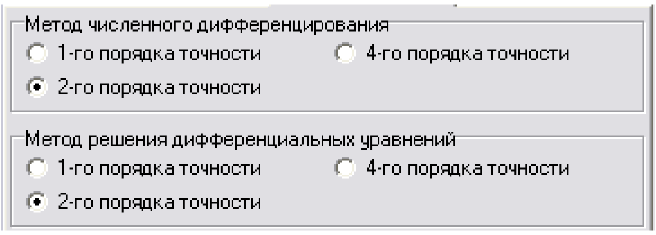


Рис.4. Вкладка «Методы»

Задание 2. Установить параметры численных методов, используемых при расчетах, как показано на рисунке 4, а так же вывод частотных характеристик установите в радианах. Остальные настройки - по Вашему предпочтению.

Поле редактора.

Поле редактора разбито на ячейки, в которых могут быть расположены только элементы схемы. На одном поле могут размещаться несколько независимых однотипных схем. Размер поля редактора ограничен размером 5000 на 5000 ячеек.

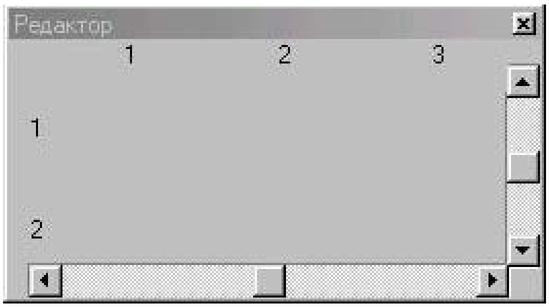


Рис.5. Поле редактора

Слева и сверху поля редактора расположены индексы ячеек. Индексы предназначены для индикации положения элементов схемы в поле редактора. После открытия модели из файла модель помещается в поле Редактора так, что левая верхняя ячейка наименьшего прямоугольника, накрывающего всю схему, имеет индекс (1,1).

Справа и снизу поля редактора расположены полосы прокрутки, с помощью которых можно передвинуть схему в любую сторону. Если движок полосы прокрутки мигает, это означает, что он теперь может реагировать на клавиши со стрелками (расположены справа на клавиатуре).

При нажатии левой кнопки мышки по полю редактора выделяется соответствующая ячейка прямоугольником синего цвета. Если выделена пустая ячейка, то в неё можно поместить элемент схемы двойным щелчком левой кнопки мышки по необходимому элементу в окне библиотеки или вставить из буфера памяти после копирования или вырезания. Если выделена ячейка с элементом, то возможно его вырезание, копирование, удаление, задание параметров элемента, если они есть.

Элементы схемы можно перетаскивать по полю редактора, их можно разворачивать в любом направлении соответствующими кнопками  на панели инструментов программы.

Открытие (загрузка с диска) имеющейся модели.

Если у Вас уже имеется готовая схема модели, сохраненная в файле, то открыть ее можно следующим образом: в главном меню программы выбираем пункт «Файл» > «Открыть» или кнопку  на панели инструментов, и в открывшемся диалоговом окне выбрать данный файл.

Вы можете также открыть и посмотреть уже готовые схемы моделей в качестве примеров, которые находятся в файлах программы Demo*.sam.

Расчёт схемы.

Для расчёта схемы выберите в главном меню пункт «Выполнить» > «Расчёт» или нажмите соответствующую кнопку на  панели инструментов. Если расчёт возможен, то он производится, и по его результатам будут построены графики в заданных контрольных точках схемы. Вид графика (зависимость от времени или частотные характеристики) зависит от типа входного элемента, задающего сигнал.

Для проведения расчёта схемы должна быть установлена хотя бы одна контрольная точка. Цвет кривой на графике соответствует цвету номера контрольной точки. Под графиками, соответствующим цветом, выводятся минимальные и максимальные значения изображаемой величины.

Установка/удаление контрольной точки.

Контрольная точка устанавливается на выходе элемента с помощью двойного щелчка левой кнопки «мыши» по этому элементу схемы, а также через пункты главного или всплывающего меню. Повторные двойные щелчки по этому же элементу снимают контрольную точку.

Номер контрольной точки устанавливается автоматически. Каждому номеру соответствует свой цвет. В схеме допускается не более 12-ти контрольных точек.

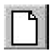
Если контрольная точка не устанавливается, то этому могут быть следующие объяснения:

- на выбранном элементе невозможно установить контрольную точку в принципе (это элементы – соединения и разветвления и, значит, точку можно установить на выходе предыдущего или следующего элемента);
- вы не выбрали никакого элемента или щёлкаете по пустому месту схемы;
- в схеме уже установлено максимальное число контрольных точек.

Задание 3.

1. *Загрузите схему Demo0.sam.*
2. *Поставьте контрольные точки на выходах всех блоков.*
3. *Установите амплитуду входного сигнала и задержку, равными (N+10)/10, где N – Ваш номер в списке студентов группы.*
4. *Вычислите графики контрольных точек.*
5. *Сохраните графики в файл.*
6. *Сохраните в файл Вашу схему (программу) с именем DemoN-1*

Создание новой модели

Для создания новой схемы модели необходимо выбрать в главном меню программы пункт «Файл» > «Новая схема» или нажать кнопку  на панели инструментов. Выбрав библиотеку элементов в окне Библиотеки, перетаскиваем мышкой из неё элементы в поле Редактора или, выбрав будущее положение элемента в поле Редактора (после щелчка мышью будущее место расположения элемента выделяется синим прямоугольником), дважды щёлкнуть левой кнопкой мышки по нужному элементу в окне Библиотеки. С помощью операций перетаскивания в поле редактора, разворота элементов, копирования-вставки и удаления элементы выстраиваются в схему.

Доступ к операциям редактирования возможен как из пунктов главного меню, так и из «под-меню», «всплывающего» по щелчку правой кнопки «мышки», или с помощью кнопок на панели инструментов, или с помощью «горячих» клавиш.

Задание 4.

7. *Составьте новую схему типа схемы Demo0.sam, но не с параллельным, а последовательным соединением элементов.*

8. *Поставьте контрольные точки на выходах всех блоков.*

9. *Установите амплитуду входного сигнала и задержку, равными (N+10)/10, где N – Ваш номер в списке студентов группы.*

10. *Вычислите графики контрольных точек и сохраните их в файл.*

11. *Сохраните схему с именем DevoN-2 в файл.*

Задание названия модели.

Для задания названия модели необходимо выбрать пункт меню «Задать» (или «Назначить») > «Название модели». Длина названия не должна превышать 50 символов («лишние» отсекаются).

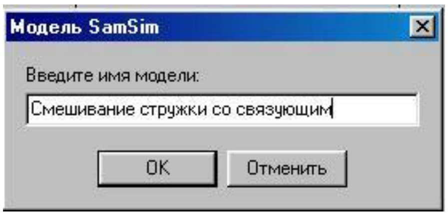


Рис.6. Окно задания названия модели

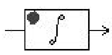
Название модели отображается в верхней полосе главного окна программы после имени файла модели.

Задание 5. Задайте название Вашей модели DemoN-2.sam, и перезапишите файл.

Задание параметров элементов схемы.

Пока не заданы параметры для всех элементов схемы (у которых параметры имеются), расчёт схемы невозможен. Задание параметров элементов схемы производится через пункт главного меню «Задать» > «Параметры элемента» или через соответствующий пункт меню, всплывающего по нажатию правой кнопки, или с помощью кнопки  на панели инструментов.

Задание 6. Задайте в модели DemoN-2.sam, более длинный временной интервал, посмотрите и сохраните графики.

Если для элемента схемы можно задать параметры, но они не заданы, то этот элемент помечается значком  (сиреневая звёздочка или чёрный кружок, в зависимости от текущей цветовой палитры экрана и его разрешения) в левом верхнем углу изображения элемента на схеме.

После нажатия кнопки «Принять» в диалоговом окне задания параметров происходит автоматическая проверка корректности введённых значений. В случае некорректности принятие заданных значений не происходит. В некоторых случаях программа может предупредить о возможных проблемах при расчёте, но заданные значения будут приняты.

При задании параметров линейного звена общего вида: для подстройки размеров таблицы задания коэффициентов и начальных условий необходимо перейти (щёлкнуть «мышкой») с одного поля ввода порядка числителя/знаменателя на другое (с “n” на ”m” и наоборот). При изменении размеров таблицы содержание всех её ячеек устанавливается по умолчанию.

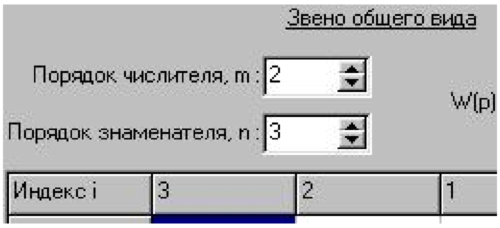


Рис.6. Окно задания параметров линейного звена общего вида

После сохранения модели в файле все заданные параметры элементов также сохраняются в этом файле.

Задание параметров интегрирования (моделирования).

Задание параметров интегрирования производится через пункт главного меню «Задать» > «Параметры интегрирования» или с помощью соответствующей кнопки  на панели инструментов.

Задание параметров интегрирования необязательно, если подходят значения установленные программой по умолчанию, равные от 0 до 5 с шагом 0.01.

После сохранения модели в файле параметры интегрирования также сохраняются в этом файле.

Задание 7. Измените в модели DemoN-2.sam, в одном из блоков параметры интегрирования, посмотрите и сохраните графики.

Проверка схемы.

После составления схемы и задания всех параметров элементов можно проверить ее на корректность составления, для чего выбираем в главном меню пункт «Выполнить» > «Проверка схемы» или нажатием кнопки  на панели инструментов. Результат проверки будет сообщён.

Проверка также производится автоматически (если она не была сделана) перед началом выполнения расчёта схемы. Необходимые условия корректности схемы: в ней есть хотя бы один источник сигнала и параметры всех элементов заданы.

Задание 8. Загрузить модель Demo2.sam, разорвать цепь обратной связи и проверить схему.

Фазовый портрет (фазовая траектория).

Для построения фазового портрета выберите пункт главного меню «Выполнить» > «Фазовый портрет» или нажмите кнопку  на панели инструментов.

Для построения фазового портрета в схеме должно быть установлено чётное число контрольных точек. Один фазовый портрет строится по паре контрольных точек (нечётной и чётной), по оси “*X*” будут откладываться результаты расчёта в контрольных точках с нечётными номерами, по оси “*Y*” - с чётными номерами.

Если на вход нелинейного элемента подать синусоидальный сигнал достаточной амплитуды и назначить здесь контрольную точку 1, а на выходе этого нелинейного элемента поставить контрольную точку 2, то построение фазового портрета приведёт к построению статической характеристики этого нелинейного элемента.

Стрелка на фазовом портрете указывает направление развития процесса (соответствует возрастанию времени).

Задание 9. Пример фазовой траектории посмотреть на модели Demo2.sam,.

Частотные характеристики.

Для построения частотных характеристик на входе схемы должен стоять генератор качающейся частоты (ГКЧ), расчёт производится через пункт главного меню «Выполнить» > «Расчёт» или с помощью соответствующей кнопки на панели инструментов. Для расчёта схемы должна быть установлена хотя бы одна контрольная точка.

Частотный диапазон и тип(ы) характеристик (АЧХ, ФЧХ, ЛЧХ, ФЧХ), выводимых на экран в графическом виде, задаются как параметры входного элемента – ГКЧ.

В таблицу с результатами расчёта выводятся значения и для амплитуды (АЧХ или ЛЧХ), и для фазы, независимо от того, какой график выбран для отображения.

Задание 10. Пример построения частотной характеристики посмотреть на модели Demo0.sam,.

Годограф (АФЧХ).

Для построения годографа (АФЧХ) на входе схемы должен стоять генератор качающейся частоты (ГКЧ), расчёт производится через пункт главного меню «Выполнить» > «Расчёт» или с помощью соответствующей кнопки на панели инструментов. Для расчёта схемы должна быть установлена хотя бы одна контрольная точка.

Частотный диапазон и вид характеристики – годограф задаются как параметры входного элемента – ГКЧ. Выбор масштаба характеристики (линейный, логарифмический), как параметра ГКЧ, не влияет на вид годографа.

Задание 11. Пример построения годографа посмотреть на модели Demo0.sam,.

Просмотр результатов расчёта в таблице.

Для просмотра результатов расчёта в таблице необходимо выполнить сначала сам расчёт, а затем выбрать пункт меню «Окно» > «Таблица». Таблица появится в отдельном окне.

При работе с таблицей возможно: прокручивание её по столбцам и строкам; изменение ширины столбцов; изменение размеров окна с таблицей.

Таблицу с результатами, всю или только часть, можно сохранить в текстовом файле и/или распечатать.

Печать модели.

Перед тем как распечатывать схему модели необходимо задать область печати, так как на печать выводится только видимое поле окна Редактора. Задание области печати происходит путём изменения размера окна программы и с помощью прокруток в окне Редактора.

Для вывода на печать заданной области Редактора необходимо выбрать пункт меню «Файл» > «Печать модели». После выбора принтера, задания ориентации листа бумаги и числа копий нажмите “OK”.

На печать выводится имя файла (если есть), название модели (если есть), время печати, заданная область со схемой, параметры интегрирования, список элементов всей модели, имеющих параметры, и значения этих параметров (если они заданы). Справа от названия элемента выводится его координата в поле Редактора в формате (№ строки, № столбца).

Печать результатов расчёта и графиков.

Печать результатов расчёта и графиков (как и их сохранение в отдельном файле) возможна только при открытых соответствующих окнах (с таблицей или графиками).

При проведении нескольких последовательных расчётов и при открытии нескольких окон с таблицей или графиками на печать выводятся результаты только последнего расчёта (независимо от того, какое из окон было активно последним).

"Горячие" клавиши программы:

Ctrl+N - Создание новой модели;
Ctrl+O - Открытие модели из файла;
Ctrl+S - Сохранение модели в файл;
Ctrl+Q - Выход из программы;
Ctrl+X - Вырезать выделенный элемент из схемы;
Ctrl+C - Скопировать выделенный элемент из схемы;
Ctrl+V - Вставит элемент в выделенную позицию;
Del - Удалить выделенный элемент из схемы;
Ctrl+Del - Удалить все элементы схемы;
Ctrl+J - Поворот выделенного элемента по часовой стрелке;
Ctrl+L - Поворот выделенного элемента против часовой стрелки;
Ctrl+P - Установить/удалить контрольную точку;
Ctrl+E - Задать параметры выделенного элемента схемы;
Ctrl+I - Задать параметры интегрирования;
Ctrl+H - Выполнить проверку схемы;
Ctrl+R - Выполнить расчёт;
F1 - Вызов справки;
F2 - Вызов тематической справки;
F3 - О программе.

Лабораторная работа №2
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ
Часть 1

Цель работы: изучение временных и частотных характеристик типовых динамических звеньев и приобретение практических навыков определения параметров передаточных функций этих звеньев по полученным экспериментальным переходным характеристикам.

Общие указания.

Экспериментально-исследовательская часть работы проводится на компьютерах с использованием пакета «SamSim».

Динамические свойства систем автоматического управления и их звеньев могут быть однозначно определены переходной и импульсной (весовой) временными характеристиками. Для получения указанных характеристик на вход системы (звена) подают определенного вида воздействие x(t) и исследуют реакцию системы (звена) y(t) на это воздействие.

В данной и последующих лабораторных работах свойства звена системы анализируются при помощи входного скачкообразного сигнала (ступенчатое воздействие):

$X(t) = 1(t) = 0, \quad t \le 0; \quad X(t) = 1(t) = 1, \quad t > 0.$

Реакцию анализируемого звена системы на единичное ступенчатое воздействие 1(t) в математической форме описывает переходная функция H(t), которую иногда называют кривой разгона.

До приложения единичного воздействия звено или система находится в состоянии покоя. Предполагается, что единица имеет ту же размерность, что и физическая переменная на входе системы. В реальных условиях подобное воздействие соответствует быстрому включению задающего сигнала. Основой классификации элементарных звеньев являются их динамические характеристики. Функциональные блоки различной физической природы могут быть представлены в виде одинаковых динамических звеньев, если их динамические свойства описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями (не выше второго порядка).

В зависимости от свойств, все звенья можно разбить на три группы: статические (пропорциональные), дифференцирующие и интегрирующие.

В лабораторных работах исследуются временные характеристики пяти типовых линейных динамических звеньев: безынерционного (масштабирующего, усилительного при К>1, или ослабительного при К<1), колебательного, апериодического, интегрирующего и реального дифференцирующего.

<u>Задание:</u>

Исследовать характеристики описанных ниже звеньев.

<u>1. Безынерционное (пропорциональное, усилительное) звено.</u> В любой момент времени выходная величина звена пропорциональна входной с коэффициентом пропорциональности k (рис. 7):

y(t) = k u(t).

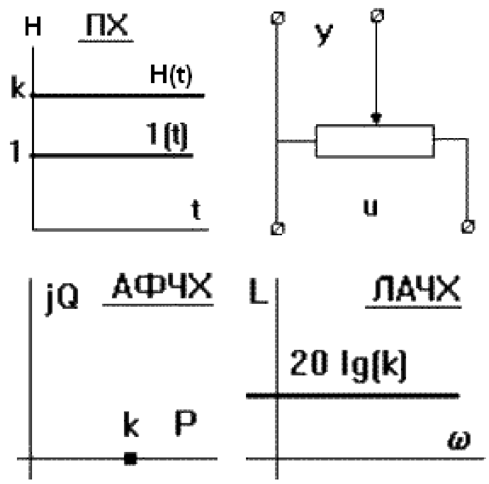


Рис.7. Характеристики безынерционного звена

Безынерционное звено передаст сигнал без искажения и сдвига во времени, но измененный в k раз. Реальные звенья могут быть отнесены к данному типу условно, так как всегда обладают инерционностью. Однако, если переходный процесс в звене протекает за время, малое по сравнению со временем переходного процесса системы в целом, то эти звенья могут считаться безынерционными.

Переходная характеристика повторяет ступенчатое входное воздействие 1(t), измененное в k раз:

$H(t) = k \cdot 1(t)$.

Передаточная функция звена равна коэффициенту k:

$W(p) = k$.

Весовая функция имеет площадь, равную k: $h(t) = k\,\delta(t)$.

Амплитудно-фазо-частотная характеристика АФЧХ: $W(j\omega) = k$.

АЧХ: $A(\omega) = k$. ФЧХ: $\varphi(\omega) = 0$. ЛАЧХ: $L(\omega) = 20 \lg k$.

Звено пропускает все частоты одинаково с увеличением амплитуды в k раз и без сдвига по фазе.

Интегрирующее (астатическое) звено. Идеальное интегрирующее звено описывается дифференциальным уравнением первого порядка: dy/dt = k u(t).

Общее решение: $y(t) = y(0) + \int_0^t k\, u(\tau)\, d\tau$. Передаточная функция звена: $W(p) = k/p$.

Переходная характеристика при $u(t) = 1(t)$ и нулевых начальных условиях (рис. 8):

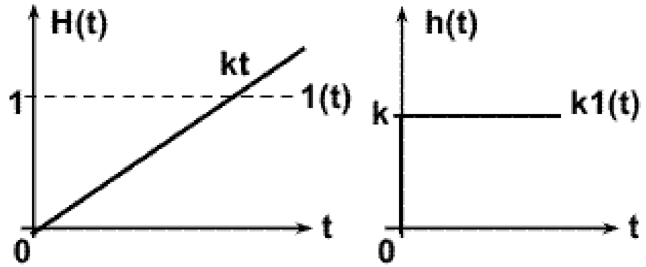


Рис.8. Переходные характеристики интегрирующего звена

$H(t) = k\, t(t) = k \int_0^t 1(\tau)\, d\tau$. $H(p) = k/p^2$.

Весовая функция при $u(t) = \delta(t)$ и нулевых начальных условиях: $h(t) = k\, 1(t)$. $h(p) = k/p$.

АФЧХ интегратора: $W(j\omega) = k/j\omega = -jk/\omega = k \exp(-j\pi/2)/\omega$.

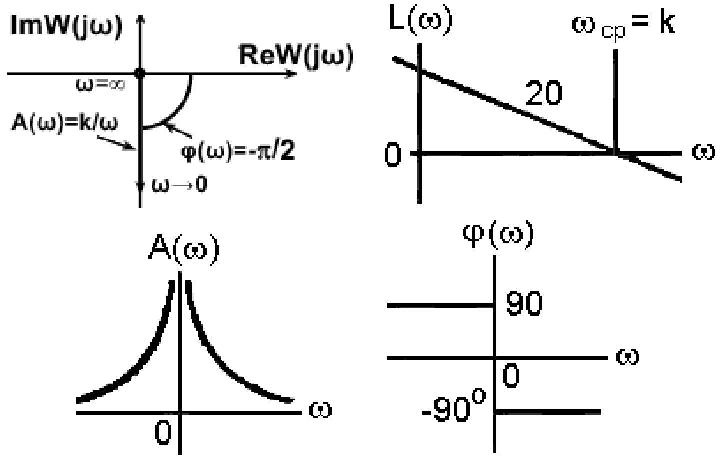


Рис.9. Частотные характеристики интегрирующего звена

Интегратор ослабляет высокие частоты пропорционально частоте и неограниченно усиливает низкие частоты. Годограф АФЧХ (рис. 3.) расположен вдоль отрицательной мнимой оси. Фазово-частотная характеристика для положительных частот имеет постоянное значение $-\pi/2$, т.е. все частоты звено пропускает с запаздыванием по фазе на 90°. Радиус - вектор АЧХ при изменении частоты от 0 до ∞ монотонно убывает от значения ∞, стремясь к 0. Коэффициент усиления бесконечно малых частот теоретически неограничен.

ЛАЧХ интегратора:

$L(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)| = 20 \lg k - 20 \lg \omega$.

Логарифмическая характеристика представляет собой прямую с отрицательным наклоном 20 дБ/дек, которая проходит через точку 0 дБ на частоте $\omega = k$.

Апериодическое инерционное звено первого порядка описывается дифференциальным уравнением: $T\ dy/dt + y(t) = k\ u(t)$. Передаточная функция звена: $W(p) = k/(Tp+1)$.

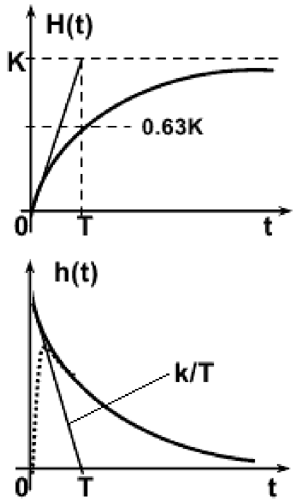


Рис.10. Переходные характеристики апериодического инерционного звена первого порядка

Динамические свойства определяются значениями двух величин k и T. T – постоянная времени, k – коэффициент передачи (усиления) звена. Переходная функция:

$H(p) = W(p)\ 1(p) = k/[p(Tp+1)]$.

$H(t) = k\ (1\text{-}\exp(-t/T)$

Переходный процесс инерционного звена экспоненциальный (рис. 4). При $t\to\infty$ сигнал достигает установившегося значения $k1(t)$. Весовая функция находится дифференцированием переходной характеристики:

$h(t) = (k/T) \exp(-t/T)\ 1(t)$.

По переходной характеристике можно определить передаточный коэффициент k, равный установившемуся значению H(t), и постоянную времени T по точке пересечения касательной к кривой в начале координат с ее асимптотой. Касательная при t=0 равна k/T, а при t=T значение H(t) = 0.63k. Чем больше T, тем больше длительность переходного процесса. Практически обычно принимают, что переходной процесс заканчивается при t порядка 3T, что соответствует 95% установившегося значения. Характерен скачок амплитуды в начальный момент времени, возникающий из-за наличия на входе δ-функции. Так как идеального скачка быть не может, то будет наблюдаться процесс, обозначенный на рисунке 10 пунктиром.

АФЧХ инерционного звена показана на рисунке 11:

$W(j\omega) = k/(Tj\omega+1) = k(Tj\omega-1) /[(Tj\omega+1)(Tj\omega-1)] =$

$= k\ [1/(\ T^2\omega^2 +1) - jT\omega/(\ T^2\omega^2 +1)] = k\ \exp(-j\ \mathrm{arctg}\ T\omega) / \sqrt{T^2\omega^2+1}$.

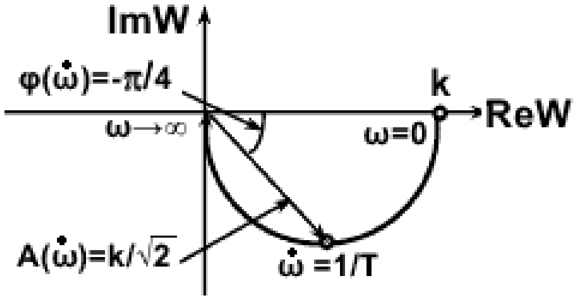


Рис.11. АФЧХ инерционного звена

Годограф описывает полуокружность с наинизшей точкой на частоте 1/T, при этом фазовый сдвиг равен -π/4, коэффициент усиления АЧХ равен 0.707k. При изменении частоты от 0 до ∞ радиус-вектор АЧХ монотонно убывает от значения k до 0. Полная АФЧХ для положительных и отрицательных частот представляет собой окружность. ЛАЧХ и ЛФЧХ инерционного звена:

$L(\omega) = 20\ \lg |W(j\omega)| = 20\ \lg k – 10\ \lg(T^2\omega^2+1)$.

Чем меньше инерционность звена (меньше T), тем шире полоса пропускания.

<u>Порядок выполнения работы</u>

1. Запустить на компьютере пакет моделирования SamSim.
2. Составить исследуемую модель в виде функциональной структуры.
3. Задать численные значения параметров исследуемых звеньев К и Т равными: К = 1-(N/50), T=0.2+(K/2), задержка входного сигнала 1-T, N – ваш номер в списке группы.
4. Получить переходную характеристику звена при заданных па-

раметрах.

5. Проанализировать влияние параметров К и Т на переходную характеристику, изменяя Т в 2, 4 раза при постоянном значении К и изменяя К в 3 раза при постоянном значении Т.

6. Зарегистрировать выходные сигналы звена на входные сигналы типа меандра и белого шума.

7. С генератором качающейся частоты (ГКЧ) оценить частотные характеристики звена.

Содержание отчета.

1. Краткая теория.
2. Графики передаточных и частотных характеристик с указанием параметров звеньев К и Т.
3. Реакция звеньев на меандр и шум.
4. Выводы по динамическим и частотным параметрам.

Лабораторная работа №3
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ
Часть 2

Цель работы: изучение временных и частотных характеристик типовых динамических звеньев и приобретение практических навыков определения параметров передаточных функций этих звеньев по полученным экспериментальным переходным характеристикам.

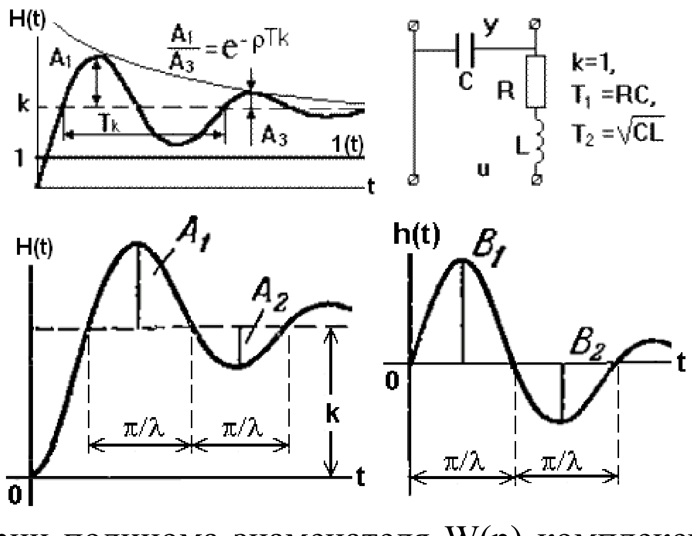
Общие указания.

Экспериментально-исследовательская часть работы проводится на компьютерах с использованием пакета «SamSim».

Задание:

Исследовать характеристики описанных ниже звеньев.

Колебательное звено относится к звеньям второго порядка и описывается дифференциальным уравнением: T^2 y''(t) + 2□Ty'(t) + y(t) = k u(t). Передаточная функция звена: W(p) = 1/(T^2p^2 + 2□ Tp + 1). Корни полинома $p_{1,2}$ = (-□ ± $\sqrt{\rho^2-1}$)/T. Звено будет апериодическим второго порядка, если корни вещественные, или колебательным, если корни комплексные.



При □<1 корни полинома знаменателя W(p) комплексно сопряженные. Переходная характеристика представляет собой выражение, характеризующее затухающий колебательный процесс с затуханием □□(возможные значения от 0 до 1) и частотой □□□= 1/T, т.е. переходный процесс представляет собой затухающие колебания относительно установившегося значения (рис. 1). Передаточный коэффициент k равен установившемуся значению переходной функции. Примерами колебательного звена могут служить пружина, имеющая успокоительное устройство, электрический колебательный контур с активным сопротивлением и т.п.

При □ = 0 колебания носят незатухающий характер.

Аналитическая формула переходной характеристики звена (рис. 1):

H(t) = k[1-exp(-□t) (cos □t+(□/□) sin □t)] 1(t),

□□□□□□□□ ln (A_1/A_2), □□= □/$□_o$, □= $□_□ \sqrt{1-\rho^2}$.

Импульсная функция:

h(t) = (k$□_0^2$/□) exp(-□t) sin(□t) 1(t).

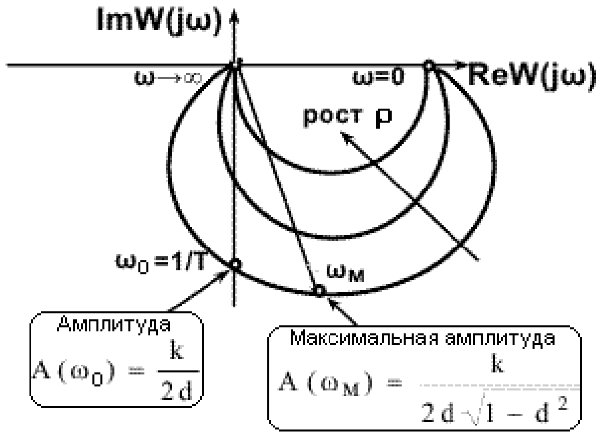
Зная характеристики реального устройства можно определить его параметры как колебательного звена. Постоянная времени T и коэффициент затухания:

$T = T_k / \sqrt{4\pi^2 - \ln^2(A_1/A_3)}$, □ = $\ln(A_1/A_3) / \sqrt{4\pi^2 - \ln^2(A_1/A_3)}$,

где T_k – период колебаний, A_1 и A_3 – амплитуды двух соседних полуколебаний одного знака относительно установившегося значения (см. рис. 1).

АФЧХ колебательного звена:

W(j□) = k/[-$T^2$$□^2$ + 2□ Tj□ +1].



Годограф приведен на рис. 2. На частоте ω_0 имеется фазовый сдвиг -π/2, но максимум амплитуды достигается на меньшей частоте $□_м$ = $\omega_0 \sqrt{1-2\rho^2}$.

ЛАЧХ колебательного звена (см. лекцию, тема 3):

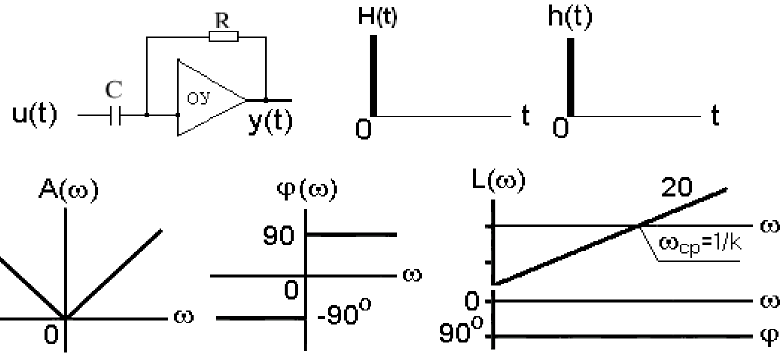
L(□) = 20 lg k – 10 lg((1-T^2 $□^2$)^2 + 4$□^2T^2□^2$).

При □<0.707 амплитудная частотная характеристика звена имеет резонансный пик на частоте $□_m$ = $□_0 \sqrt{1-2\rho^2}$. Высота пика тем больше, чем меньше параметр затухания:

A(□$_m$) = k/[2□ $\sqrt{1-\rho^2}$].

Дифференцирующее звено. Выходная величина идеального дифференцирующего звена пропорциональна производной от входной величины, а уравнение динамики имеет вид: y(t) = k du(t)/dt. Передаточная функция: W(p) = kp. При k = 1 звено осуществляет чистое дифференцирование W(p) = p.

Идеальное дифференцирующее звено реализовать невозможно, так как величина всплеска выходной величины при подаче на вход единичного ступенчатого воздействия всегда ограничена, а должна быть бесконечно большой. Близок к идеальному звену операционный усилитель в режиме дифференцирования (рис. 3).



Характеристики звена:

H(t) = k1'(t) = k □(t).

h(t) = k d□(t)/dt.

W(j□) = kj□.

На практике используют реальные дифференцирующие звенья, осуществляющие приближенное дифференцирование входного сигнала. Реальное звено является последовательным соединением двух звеньев - идеального дифференцирующего kp и инерционного 1/(Tp+1). При малых T звено можно рассматривать как идеальное дифференцирующее.

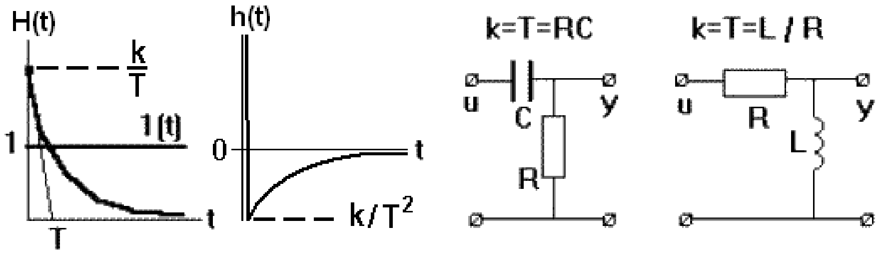
Звено описывается уравнением: T dy(t)/dt + y(t) = k du(t)/dt. Передаточная функция: W(p) = kp /(Tp+1).

Переходная характеристика:

H(t) = (k/T) exp(-t/T) 1(t).

Импульсная характеристика:

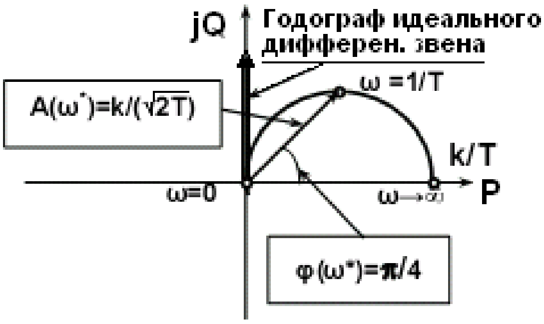
h(t) = [k□(t)/T – (k/T^2) exp(-t/T)] 1(t).



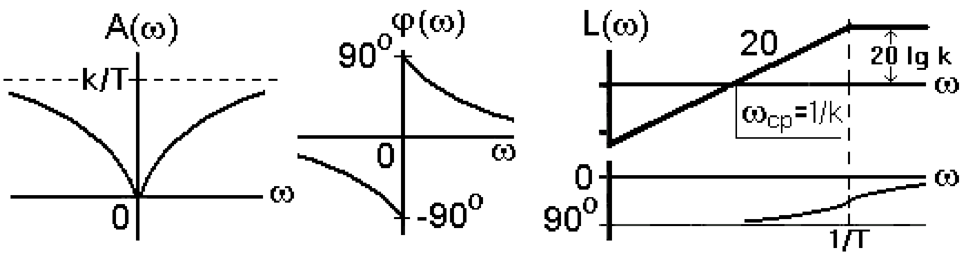
По переходной характеристике, имеющей вид экспоненты (рис. 4), можно определить передаточный коэффициент k и постоянную времени T. Примерами звеньев являются четырехполюсники из сопротивления и емкости или сопротивления и индуктивности. Дифференцирующие звенья применяются для улучшения динамических свойств САУ.

Частотная передаточная функция:

$W(j\omega) = kj\omega/(j\omega T+1)$.



Годограф звена (рис. 5) описывает полуокружность с радиусом, стремящимся к бесконечности, при $T\rightarrow 0$. При этом годограф прижимается к положительной мнимой полуоси и стремится к годографу идеального дифференцирующего звена. Частота $\omega=1/T$ считается максимальной, до которой реальное звено может приниматься за близкое к идеальному.



Частотные характеристики звена приведены на рис. 6. В области высоких частот реальное звено пропускает сигнал хуже, чем идеальное. При $\omega \rightarrow \infty$ коэффициент передачи звена стремится к k/T. Фазовые сдвиги, вносимые звеном, являются наибольшими при низких частотах. На высоких частотах фазовый сдвиг стремится к нулю при $\omega \rightarrow \infty$.

<u>Запаздывающее звено</u>. Передаточная функция звена:

$W(p) = \exp(-Tp)$,

где T – время чистого запаздывания. Это звено передаст сигнал без искажения, но сдвинутым во времени на величину T. Переходная характеристика звена:

$H(t) = 1(t - T)$.

<u>Порядок выполнения работы</u>

1. Запустить на компьютере пакет моделирования SamSim.
2. Составить исследуемую модель в виде функциональной структуры.
3. Задать численные значения параметров исследуемых звеньев К и T равными: $К = 1\text{-}N/50$, $T=0.2+K/2$, задержка входного сигнала 1-T, N – ваш номер в списке группы.
4. Получить переходную характеристику звена при заданных параметрах.
5. Проанализировать влияние параметров К и T на переходную характеристику, изменяя T в 2, 4 раза при постоянном значении К и изменяя К в 3 раза при постоянном значении T.
6. Зарегистрировать выходные сигналы звена на входные сигналы типа меандра и белого шума.
7. С генератором качающейся частоты (ГКЧ) оценить частотные характеристики звена.

<u>Содержание отчета.</u>

1. Краткая теория.
2. Графики передаточных и частотных характеристик с указанием параметров звеньев К и T.
3. Реакция звеньев на меандр и шум.
4. Выводы по динамическим и частотным параметрам.

Работа 4. Исследование характеристик типовых соединений звеньев.

Цель работы:

Изучение способов соединения типовых динамических звеньев, определение передаточных функций, приобретение практических навыков определения передаточных функций по экспериментальным переходным характеристикам.

Общие указания.

Возможны три способа соединения звеньев: последовательное, параллельное и встречно-параллельное или с ОС (обратной связью).

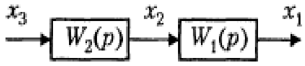


Рис. 1.

Последовательным называют соединение звеньев, при котором выходная величина предыдущего звена является входной для последующего (рис. 1). При известных передаточных функциях звеньев:

$$W(p) = W_1(p)\, W_2(p).$$

Таким образом, систему из неограниченного количества звеньев, включенных последовательно, можно заменить одним эквивалентным звеном с передаточной функцией W(p) равной произведению передаточных функций звеньев.

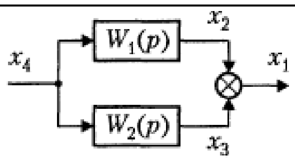


Рис. 2.

Параллельным называют соединение, когда на входы звеньев подается одна и та же величина, а выходная величина равна сумме выходных величин отдельных звеньев (рис. 2).

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

Параллельное соединение звеньев эквивалентно одному звену с переходной характеристикой, равной сумме переходных функций входящих в соединение звеньев: $H(t) = \sum_{i=0}^{n} H_i(t)$.

Построение переходной характеристики параллельного соединения заключается в построении переходных характеристик отдельных звеньев на одном графике и суммировании их ординат для одних и тех же значений времени.

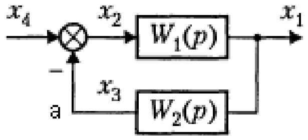


Рис. 3.

Система с отрицательной обратной связью. На вход звена кроме входной подается выходная величина через звено обратной связи. На рис. 3. звено $W_1(p)$ составляет прямую цепь, которая охвачена ОС - звеном $W_2(p)$. При отрицательной обратной связи сигнал x_3 вычитается из входного сигнала x_4. Передаточная функция

$$W(p) = W_1(p) /(1+ W_1(p)W_2(p)).$$

Полученная передаточная функция может интерпретироваться как передаточная функция последовательно соединенных звеньев с передаточной функцией $W_1(p)$ и системы с передаточной функцией: $\Phi(p) = 1/(1+W_{pc})$, где $W_{pc} = W_1(p)W_2(p)$ - передаточная функция разомкнутой системы, например, в точке “а”.

При охвате любого звена единичной ОС (т.е. при $W_2(p) = 1$) разомкнутая система преобразуется в замкнутую с передаточной функцией: $W(p) = W_1(p) /(1+ W_1(p))$.

С другой стороны, если обеспечить высокий коэффициент усиления в цепи прямой связи ($W_1(p) \to \infty$), то 1 в знаменателе передаточной функции можно пренебречь и свойства звена определяются только свойствами цепи ОС:

$$W(p) = 1/W_2(p).$$

Задание:

1. Исследовать последовательное соединение звеньев, изученных в работах 2 и 3, с интегрирующим звеном.
2. Аналогично исследовать последовательное соединение звеньев с апериодическим звеном.

Порядок выполнения работы

8. Составить исследуемую модель в виде функциональной структуры (При работе в Mathcad задать программу источника сигнала и составить алгоритмы работы звена).
9. Задать численные значения параметров исследуемых звеньев К и Т равными: К = 1-N/50, Т=0.2+К/2, задержка входного сигнала 1-Т, N – ваш номер в списке группы.

10.Получить переходную характеристику системы при заданных параметрах.
11.Проанализировать влияние параметров К и Т на переходную характеристику.
12.Зарегистрировать выходные сигналы звена на входные сигналы типа меандра и белого шума.
13.Оценить частотные характеристики системы.

Содержание отчета.

5. Краткая теория.
6. Графики передаточных и частотных характеристик с указанием параметров звеньев К и Т.
7. Реакция звеньев на меандр и шум.
8. Выводы по динамическим и частотным параметрам.

Работа 5. Исследование динамических характеристик типовых законов регулирования.

<u>Часть 1.</u>

<u>Цель работы:</u>

Изучение динамических характеристик типовых законов регулирования, определение динамических параметров при вариации настроенных параметров регуляторов.

<u>Общие указания.</u>

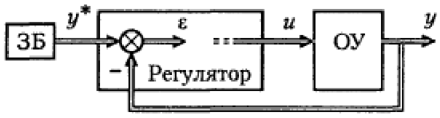


Рис. 1.

Регулятором называется блок (алгоритм), рассчитывающий управляющее воздействие u(t) с целью решения локальной задачи управления. Алгоритмом управления называется набор аналитических выражений, используемых для расчета управляющих воздействий, или система операций, выполняемых по определенным правилам. Типовой алгоритм управления, это математическая зависимость между выходным регулирующим воздействием u(t) и входным отклонением ε регулируемой величины y от заданного значения y*.

В практике принято рассматривать три типовых закона регулирования: пропорциональный П, интегрирующий И, дифференцирующий Д. На базе этих законов в регуляторах реализуют более сложные алгоритмы, являющиеся комбинацией основных, которые приведены ниже.

Уравнения типовых регуляторов:

- П - пропорциональный (статический):

$$u(t) = k_п \varepsilon(t), \quad W(p) = k_п.$$

- И - интегральный (астатический):

$$u(t) = k_и \int_0^t \varepsilon(\tau)\, d\tau, \quad W(p) = k_и/T_и p.$$

- ПИ - пропорционально-интегральный (изодромный):

$$u(t) = k_п \varepsilon(t) + (k_и/T_и) \int_0^t \varepsilon(\tau)\, d\tau, \quad W(p) = k_п + k_и/(T_и p).$$

- ПД - пропорционально-дифференциальный:

$$u(t) = k_п \varepsilon(t) + k_д T_и\, d\varepsilon(t)/dt, \quad W(p) = k_п + k_д T_д p.$$

- ПИД - пропорционально-интегрально-дифференциальный:

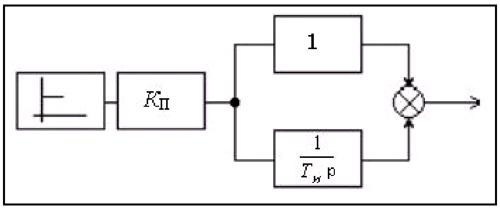
$$u(t) = k_п \varepsilon(t) + k_д T_д\, d\varepsilon(t)/dt + (k_и/T_и)\int_0^t \varepsilon(\tau)\, d\tau \qquad W(p) = k_п + k_д T_д p + k_и/(T_и p).$$

где $k_п$, $k_д$, $k_и$ - постоянные коэффициенты.

<u>Задание:</u>

Исследовать ПИ-, ПД- законы регулирования.

<u>Порядок выполнения работы</u>



14. Ввести модель ПИ-закона регулирования.
15. Задать численные значения параметров исследуемых звеньев К и Т равными: К = 1-N/50, T=0.2+K/2, задержка входного сигнала 1-Т, N – ваш номер в списке группы.
16. Исследовать переходный процесс (переходную характеристику) ПИ-закона при вариации настроенных параметров $К_п$ и $К_и = 1/Т_и$.
17. Исследовать условия, при которых ПИ-закон переходит в П-закон.
18. Исследовать условия перехода ПИ-закона в И-закон. Исследование должно подтверждаться графиками и переходными характеристиками с определением их динамических параметров.
19. Ввести модель ПД-закона.
20. Исследовать переходный процесс ПД-закона регулирования при вариациях $К_п$ и $Т_д$.
21. Исследовать ПД-закон при настроечных параметрах, превращающих этот закон в П-закон.
22. Ввести модель ПИД-закона.
23. Исследовать переходный процесс ПИД-закона при изменении настроечных коэффициентов $К_п$, $К_и$, $Т_д$.
24. Установить настроечные параметры для перехода ПИД-закона в П-закон, в ПИ-закон, в ПД-закон, и исследовать эти переходные характеристики.
25. Оценить частотные характеристики систем регулирования.

<u>Содержание отчета.</u>

9. Краткая теория.
10. Графики передаточных и частотных характеристик с указанием параметров звеньев.
11. Реакция звеньев на меандр и шум.

12.Выводы по динамическим и частотным параметрам.

Работа 6. Исследование динамических характеристик типовых законов регулирования.

<u>Часть 2.</u>

<u>Цель работы:</u>

Изучение динамических характеристик типовых законов регулирования, определение динамических параметров при вариации настроенных параметров регуляторов.

<u>Общие указания.</u>

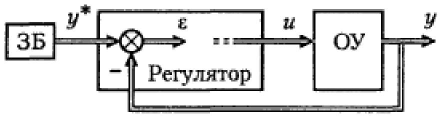


Рис. 1.

Регулятором называется блок (алгоритм), рассчитывающий управляющее воздействие u(t) с целью решения локальной задачи управления. Алгоритмом управления называется набор аналитических выражений, используемых для расчета управляющих воздействий, или система операций, выполняемых по определенным правилам. Типовой алгоритм управления, это математическая зависимость между выходным регулирующим воздействием u(t) и входным отклонением ε регулируемой величины y от заданного значения y*.

В практике принято рассматривать три типовых закона регулирования: пропорциональный П, интегрирующий И, дифференцирующий Д. На базе этих законов в регуляторах реализуют более сложные алгоритмы, являющиеся комбинацией основных, которые приведены ниже.

Уравнения типовых регуляторов:

- П - пропорциональный (статический):

$$u(t) = k_п \cdot \varepsilon(t), \quad W(p) = k_п.$$

- И - интегральный (астатический):

$$u(t) = k_и \int_0^t \varepsilon(\tau)\, d\tau, \quad W(p) = k_и/T_и p.$$

- ПИ - пропорционально-интегральный (изодромный):

$$u(t) = k_п \varepsilon(t) + (k_и/T_и) \int_0^t \varepsilon(\tau)\, d\tau, \quad W(p) = k_п + k_и/(T_и p).$$

- ПД - пропорционально-дифференциальный:

$$u(t) = k_п \varepsilon(t) + k_д T_и\, d\varepsilon(t)/dt, \quad W(p) = k_п + k_д T_д p.$$

- ПИД - пропорционально-интегрально-дифференциальный:

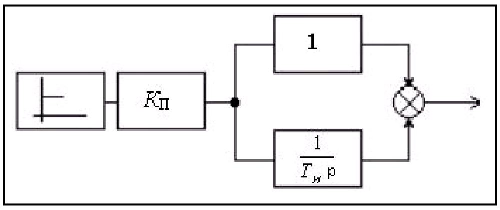
$$u(t) = k_п\square(t)\square\square\ k_дT_д\ d\square(t)/dt\ \square\ (k_и/T_и)\int_0^t \square(\square)\ d\square\square \quad W(p) = k_п + k_дT_дp + k_и/(T_иp).$$

где $k_п$, $k_д$, $k_и$ - постоянные коэффициенты.

Задание:

Исследовать ПИД- законы регулирования.

Порядок выполнения работы



26. Ввести модель ПИ-закона регулирования.
27. Задать численные значения параметров исследуемых звеньев К и Т равными: К = 1-N/50, Т=0.2+К/2, задержка входного сигнала 1-Т, N – ваш номер в списке группы.
28. Исследовать переходный процесс (переходную характеристику) ПИ-закона при вариации настроенных параметров $К_п$ и $К_и = 1/Т_и$.
29. Исследовать условия, при которых ПИ-закон переходит в П-закон.
30. Исследовать условия перехода ПИ-закона в И-закон. Исследование должно подтверждаться графиками и переходными характеристиками с определением их динамических параметров.
31. Ввести модель ПД-закона.
32. Исследовать переходный процесс ПД-закона регулирования при вариациях $К_п$ и $Т_д$.
33. Исследовать ПД-закон при настроечных параметрах, превращающих этот закон в П-закон.
34. Ввести модель ПИД-закона.
35. Исследовать переходный процесс ПИД-закона при изменении настроечных коэффициентов $К_п$, $К_и$, $Т_д$.
36. Установить настроечные параметры для перехода ПИД-закона в П-закон, в ПИ-закон, в ПД-закон, и исследовать эти переходные характеристики.
37. Оценить частотные характеристики систем регулирования.

Содержание отчета.

13. Краткая теория.
14. Графики передаточных и частотных характеристик с указанием параметров звеньев.
15. Реакция звеньев на меандр и шум.

16.Выводы по динамическим и частотным параметрам.

Работа 7. Исследование линейных систем автоматического регулирования.

Цель работы:

Изучение линейных САР с типовыми регуляторами, приобретение практических навыков определения устойчивости и качества САР.

Общие указания.

В практике автоматического регулирования параметров технологических процессов наиболее широко применяют САР с регулированием по отклонению. Объекты управления (регулирования) обладают определенными свойствами самовыравнивания и запаздывания реакции объекта на воздействия. Под самовыравниванием понимают способность объекта самостоятельно приходить в новое состояние равновесия при изменении управляющего или возмущающего воздействия. Способность объекта аккумулировать энергию вещества характеризуют емкостью. Сравнивая свойства типовых звеньев со свойствами наиболее распространенных объектов управления можно установить следующее:

Одноемкостной объект с самовыравниванием по динамическим свойствам представляет собой апериодическое звено. Иногда его записывают в виде:

$$T_{п}\, dy(t)/dt + \square\, y(t) = x(t),$$

где $\square = 1/k$ – коэффициент самовыравнивания, $T_{п} = T/k$. При $\square > 0$ объект имеет положительное самовыравнивание и называется устойчивым статическим. При $\rho < 0$ объект не обладает самовыравниванием и называется неустойчивым статическим. При $\square = 0$ объект астатический и описывается уравнением интегрирующего звена.

Многоемкостные объекты с самовыравниванием моделируют последовательным соединением апериодических звеньев. Если число последовательно соединенных звеньев достаточно велико, а их постоянные времени очень малы, система близка к запаздывающему звену. При последовательном соединении трех и более апериодических звеньев с большими постоянными времени, систему можно моделировать последовательным соединением апериодического и запаздывающего звеньев с соотношением $\square\square T$ в диапазоне $0.1 \leq \square/T \leq 1$. Передаточную функцию такой системы записывают в виде:

$$W(p) = k \exp(-\square p) /(Tp+1).$$

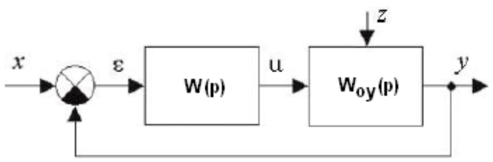


Рис. 1.

Если в структурной схеме САР измерительный преобразователь объединить устройством сравнения, а исполнительный механизм с регулирующим органом и объектом управления, то САР преобразуется к виду, представленному на рис.1, где: □ = x(t)-y(t), ε - отклонение управляемой величины y(t) от заданного значения x(t); W(p) – передаточная функция регулятора; $W_{oy}(p)$ – передаточная функция объекта управления.

Показатель ε(t) является показателем точности устойчивой системы. Устойчивая САР, выведенная из равновесия возмущающим воздействием, должна под действием регулятора приходить в исходное или новое состояние равновесия. Показатели точности и качества САР могут быть определены по переходной характеристике при единичном ступенчатом воздействии. Неустойчивые САР неработоспособны.

Задание:

Исследовать характеристики линейной САР.

Порядок выполнения работы

Рис. 2.

38. Ввести модель САР вида на рис. 2.
39. Исследовать П, И, ПИ, ПД и ПИД законы регулирования с статическим объектом без запаздывания. Получить переходные характеристики при постоянных параметрах ОУ.
40. Исследовать П, И, ПИ, ПД и ПИД законы регулирования с астатическим объектом регулирования без запаздывания. Получить переходные характеристики при постоянных параметрах ОУ.
41. Исследовать П, И, ПИ, ПД и ПИД законы регулирования с статическим объектом с запаздыванием. Получить переходные характеристики при постоянных параметрах ОУ.
42. Исследовать П, И, ПИ, ПД и ПИД законы регулирования с астатическим объектом регулирования с запаздыванием. Получить переходные характеристики при постоянных параметрах ОУ.

43. Для П, И, ПИ регуляторов провести анализ устойчивости по алгебраическим критериям.
44. Оценить частотные характеристики систем регулирования.

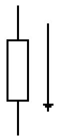
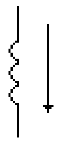
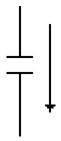
<u>Содержание отчета.</u>

17. Краткая теория.
18. Графики передаточных и частотных характеристик с указанием параметров звеньев.
19. По переходным характеристикам определить показатели качества и точности САР.
20. Реакция звеньев на меандр и шум.
21. Выводы по динамическим и частотным параметрам.

8 Получение передаточной функции объекта на примере RLC цепи

Получение передаточных функций наглядно представляется на примере электрической цепи. Для решения такого типа задач необходимо знать электрический импеданс элементов цепи, который приведен в таблице 1.

Таблица 1. Связь мгновенных значений напряжений и токов на элементах

Резистор  i_R	$u_R = Ri_R$	$i_g = Ru_R$
Катушка индуктивности  i_L	$u_L = L\dfrac{di_L}{dt}$	$i_L = \dfrac{1}{L}\int u_L dt$
Конденсатор  i_C	$u_C = \dfrac{1}{C}\int i_C dt$	$i_C = C\dfrac{du_C}{dt}$

Процедуру получения передаточной функции объекта можно разбить на следующие этапы:

1. получение дифференциальных уравнений системы;
2. запись уравнений в операторной форме;
3. запись передаточной функции.

1.1 Примеры

Пример 1.1

Записать уравнения математической модели, определить передаточную функцию для объекта, приведенного на рисунке 1.1, при $R_1 = R_2 = 1$ кОм, $R_3 = 2$ кОм, $C_1 = C_2 = 1$ мкФ:

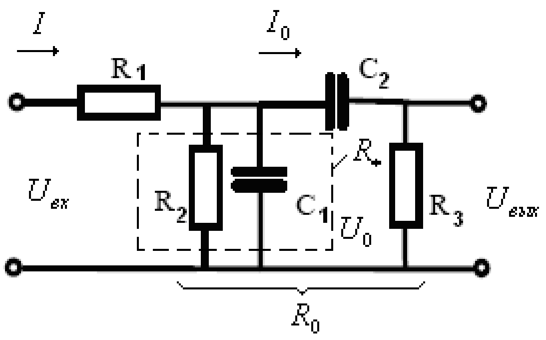


Рисунок 1.1. Эквивалентная схема объекта

1. Выходной величиной будем считать напряжение на выходе цепи, т.е. $y = U_{вых}$, входным воздействием – напряжение на входе $u = U_{вх}$. Физическими законами, в силу которых развиваются процессы в объекте, являются законы Киргофа и Ома.

2. Запишем дифференциальные уравнения, характеризующие процессы, протекающие в цепи, выразив сопротивления с помощью оператора дифференцирования, согласно таблице 1, заменяя операцию дифференцирования на *p*.

3. Запишем сопротивление R_* при параллельном соединении элементов:

$$R_* = \frac{R_2}{R_2 C_1 p + 1}.$$

Запишем сопротивление в контуре, считая, что R_* нам известно:

$$R_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_*} + \frac{1}{\frac{1}{C_2 p} + R_3}}.$$

Ток до разветвления по закону Ома равен:

$$I = \frac{U_{вх}}{R_1 + R_0} = \frac{U_{вх}((R_2 C_1 p + 1)(R_3 C_2 p + 1) + R_2 C_2 p))}{R_1 (R_2 C_1 p + (R_3 C_2 p + 1)(R_2 C_1 p + 1)) + R_2 (R_3 C_2 p + 1)},$$

Тогда напряжение в контуре будет равно:

$$U_0 = I R_0 = \frac{U_{вх} R_2 (R_3 C_2 p + 1)}{R_1 (R_2 C_1 p + (R_3 C_2 p + 1)(R_2 C_1 p + 1)) + R_2 (R_3 C_2 p + 1)},$$

Ток после разветвления равен:

$$I_0 = \frac{U_0}{\frac{1}{C_2 p} + R_3} = = \frac{U_{вх} R_2 C_2 p}{R_1 (R_2 C_1 p + (R_3 C_2 p + 1)(R_2 C_1 p + 1)) + R_2 (R_3 C_2 p + 1)},$$

Запишем выходное напряжение:

$$U_{вых} = I_0 R_3 = \frac{U_{вх} R_2 R_3 C_2 p}{R_1 (R_2 C_1 p + (R_3 C_2 p + 1)(R_2 C_1 p + 1)) + R_2 (R_3 C_2 p + 1)}.$$

4. Запишем окончательную передаточную функцию, как отношение входа к выходу и раскроем скобки в знаменателе:

$$\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_2 R_3 C_2 p}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 p^2 + (R_1 R_2 C_1 + R_1 R_2 C_2 + R_1 R_3 C_2 + R_2 R_3 C_2) p + R_1 + R_2}$$

5. Подставив численные значения, получим:

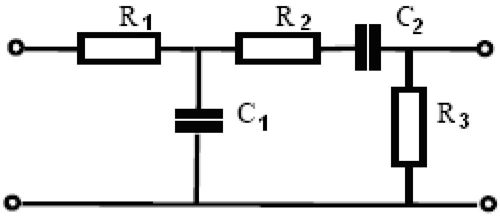
$$W(p) = \frac{2000 p}{2000 p^2 + 6000 p + 2000}.$$

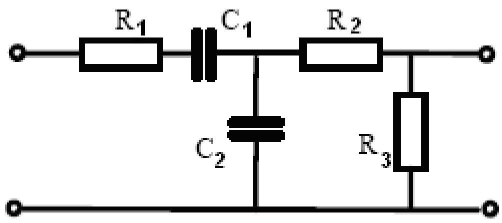
1.2 Задания на самостоятельную подготовку

Задача 1.1

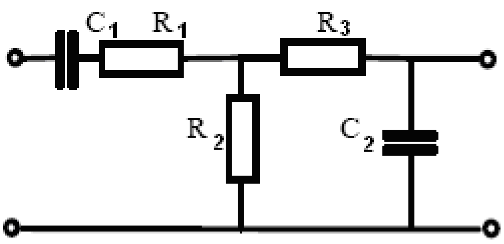
Записать уравнения математической модели, определить передаточную функцию для объекта, приведенного на рисунке 1.2, при $R_1 = R_2 = 1$ кОм, $R_3 = 2$ кОм, $C_1 = C_2 = 1$ мкФ, L_1=1 МГн:

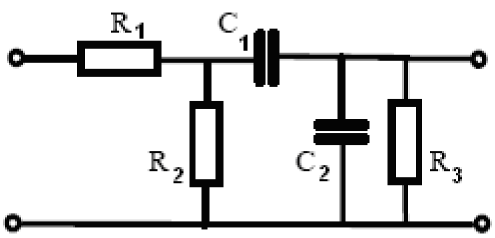
а) б)



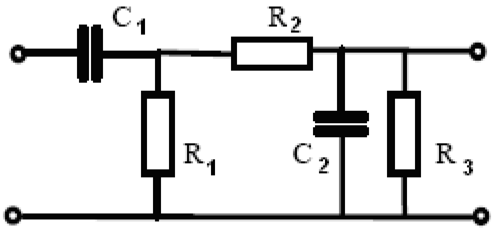


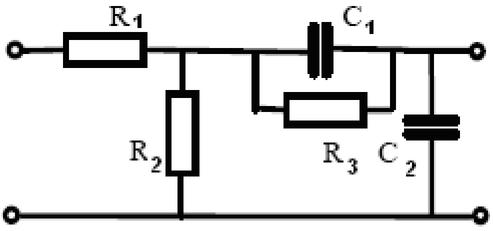
в) г)



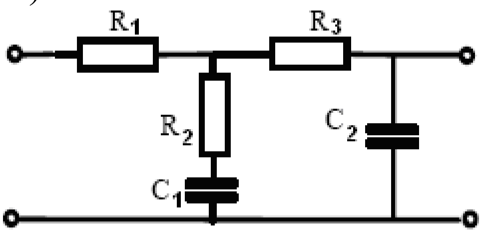


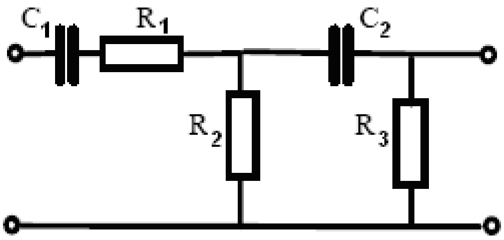
д) е)



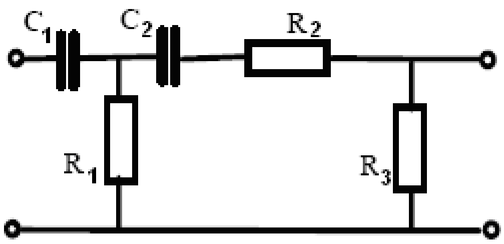


ж) з)





и) к)



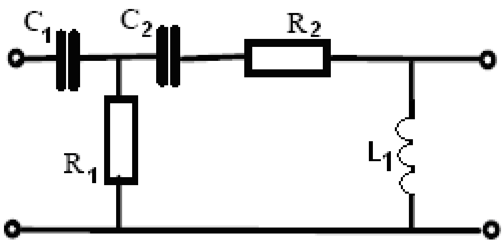


Рисунок 1.2. Эквивалентные схемы объекта

9. Получение передаточной функции из системы дифференциальных уравнений состояния объекта.

Рассмотрим способ получения передаточной функции из системы дифференциальных уравнений состояния. Для этого необходимо:

1. записать уравнения пространства состояния в операторной форме.
2. выразить все переменные *x* через *y* и *u*.
3. подставив значения *x* в последнее дифференциальное уравнение системы, записать передаточную функцию, как отношение *y* к *u*.

2.1 Примеры

Пример 2.1

Опередить передаточную функцию *W(p)*, если известны дифференциальные уравнения состояния объекта:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dot{x}_3 = -4x_1 - x_2 - x_3 + 6u, \\ y = x_1 + x_2 - x_3. \end{cases}$$

Решение:

Запишем уравнения состояния в операторной форме:

$$\begin{cases} px_1 = x_2, \\ px_2 = x_3, \\ px_3 = -4x_1 - x_2 - x_3 + 6u, \\ y = x_1 + x_2 - x_3. \end{cases}$$

Из третьего уравнения системы выразим x_3:

$$x_3 = \frac{-4x_1 - x_2 + 6u}{p+1}.$$

Из второго уравнения системы запишем $x_3 = px_2$, тогда

$$px_2 = \frac{-4x_1 - x_2 + 6u}{p+1}$$

Из второго уравнения системы запишем $x_2 = px_1$, тогда

$$p^2x_1 = \frac{-4x_1 - px_1 + 6u}{p+1},$$

или

$$x_1 = \frac{6u}{p^3 + p^2 + p + 4}$$

Поставив x_1 в первое уравнение системы, получим:

$$x_2 = \frac{6pu}{p^3 + p^2 + p + 4}$$

Поставив x_2 во второе уравнение системы, получим:

$$x_3 = \frac{6p^2u}{p^3 + p^2 + p + 4}$$

Из выражения $y = x_1 - 2x_2 - x_3$ найдем

$$y = x_1 - 2x_2 - x_3 = \frac{6u}{p^3 + p^2 + p + 4} - \frac{12pu}{p^3 + p^2 + p + 4} - \frac{6p^2u}{p^3 + p^2 + p + 4}.$$

Таким образом, искомая передаточная функция равна:

$$W(p) = \frac{y}{u} = \frac{-6p^2 + 12p + 6}{p^3 + p^2 + p + 4}$$

2.2 Задания на самостоятельную подготовку

Задача 2.1

Опередить передаточную функцию *W(p)*, если известны дифференциальные уравнения состояния объекта:

а) $\begin{cases} \dot{x}_1 = 2x_2, \\ \dot{x}_2 = 5x_3, \\ \dot{x}_3 = -4x_1 - 2x_2 - x_3 + 5u, \\ y = 0.1x_1. \end{cases}$

б) $\begin{cases} \dot{x}_1 = x_1 + x_2, \\ \dot{x}_2 = -5x_1 + x_3, \\ \dot{x}_3 = -3x_1 - 2x_2 - x_3 + 4u, \\ y = x_1. \end{cases}$

в) $\begin{cases} \dot{x}_1 = 3x_1 + 2x_2 + u, \\ \dot{x}_2 = 4x_1 + x_2 + 2u, \\ y = x_1 + 2x_2. \end{cases}$

г) $\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dot{x}_3 = -x_1 - 3x_2 - 7x_3 + u, \\ y = 2x_1 + x_2 - x_3. \end{cases}$

д) $\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + 2u, \\ \dot{x}_2 = x_3 + u, \\ \dot{x}_3 = -4x_1 - 0.5x_2 - 0.2x_3 + 3u, \\ y = x_1. \end{cases}$

е) $\begin{cases} \dot{x}_1 = -6x_1 + x_2 + 2u, \\ \dot{x}_2 = 2x_1 - 5x_2 - 3u, \\ y = x_1 + 2x_2. \end{cases}$

ж) $\begin{cases} \dot{x}_1 = 2x_2 - x_3, \\ \dot{x}_2 = -x_1 - x_2 - 3x_3, \\ \dot{x}_3 = -3x_1 - 2x_2 - x_3 + u, \\ y = 2x_1 + x_2. \end{cases}$

10. Получение матричной передаточной функции

Задачи на получение матричной передаточной функции часто сводятся к получению матрицы передаточных функций объекта из дифференциальных уравнений, передаточной функции, либо матриц объекта.

3.1 Примеры

Пример 3.1

Определить матричную передаточную функцию системы, описываемой следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} \ddot{y}_1 + 5\dot{y}_1 + 6y_1 = \ddot{u}_1 + 3\dot{u}_1 + 4\dot{u}_2 + 8u_2, \\ \dot{y}_2 + y_2 = \dot{u}_1 + 2\dot{u}_2 + 2u_2. \end{cases}$$

Запишем уравнения в операторной форме:

$$\begin{cases} (p^2 + 5p + 6)y_1 = (p^2 + p)u_1 + (4p + 2)u_2, \\ (p+1)y_2 = pu_1 + 2(p+1)u_2. \end{cases}$$

Или

$$\begin{cases} y_1 = \dfrac{p}{p+2}u_1 + \dfrac{4}{p+3}u_2, \\ y_2 = \dfrac{p}{p+1}u_1 + 2u_2. \end{cases}$$

Тогда матричная передаточная функция будет иметь вид:

$$W(p) = \begin{bmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{p}{p+2} & \dfrac{4}{p+3} \\ \dfrac{p}{p+1} & 2 \end{bmatrix}.$$

Пример 3.2

Определить матричную передаточную функцию, если известны матрицы A, B и C:

$$A=\begin{bmatrix}-1 & 2\\ -3 & -5\end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 2 & 0\end{bmatrix},\ C=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}.$$

Решение:

Исходя из матриц, запишем дифференциальные уравнения состояния объекта:

$$\begin{cases}\dot{x}_1=-x_1+2x_2+u_2,\\ \dot{x}_2=-3x_1-5x_2+2u_1,\\ y_1=x_1,\\ y_2=x_2.\end{cases}$$

Запишем уравнения в операторной форме:

$$\begin{cases}px_1=-x_1+2x_2+u_2,\\ px_2=-3x_1-5x_2+2u_1,\\ y_1=x_1,\\ y_2=x_2.\end{cases}$$

Из первого уравнения системы выразим x_1:

$$x_1=\frac{2x_2+u_2}{p+1}. \qquad (1)$$

Из второго уравнения системы выразим x_2:

$$x_2=\frac{-3x_1+2u_1}{p+5}. \qquad (2)$$

Для того, чтобы выразить x_1 через u_1 и u_2, подставим выражение (2) в выражение (1), получим:

$$x_1=\frac{4u_1+u_2(p+5)}{p^2+6p+5}.$$

Таким же образом подставляем (2) в (1) и получаем x_2 через u_1 и u_2:

$$x_2=\frac{u_1(2p^2+12p+10)+u_2(p+5)}{(p^2+6p+5)(p+5)}.$$

Так как $y_1=x_1$ и $y_2=x_2$ получим системы уравнений, в которой при переменных управления находятся искомые матрицы:

$$\begin{cases}y_1=\dfrac{4}{p^2+6p+5}u_1+\dfrac{p+5}{p^2+6p+5}u_2,\\ y_2=\dfrac{2(p+1)}{p^2+6p+5}u_1+\dfrac{1}{p^2+6p+5}u_2.\end{cases}$$

Матричная передаточная функция имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{4}{p^2+6p+5} & \dfrac{p+5}{p^2+6p+5} \\ \dfrac{2(p+1)}{p^2+6p+5} & \dfrac{1}{p^2+6p+5} \end{bmatrix}.$$

3.2 Задания на самостоятельную подготовку

Задача 3.1

Определить матричную передаточную функцию системы, описываемой следующими дифференциальными уравнениями:

а) $\begin{cases} \dddot{y}_1 + \ddot{y}_1 + \dot{y}_1 + y_1 = 2\ddot{u}_1 + 2\dot{u}_1 + 4\dot{u}_2 + 4u_2, \\ y_2 = 5u_1 + \dot{u}_2 + 5u_2. \end{cases}$ б) $\begin{cases} \dot{y}_1 + 2y_1 = 3\dot{u}_1 + 6u_1 + \dot{u}_2 + 3u_2, \\ \dddot{y}_2 + \ddot{y}_2 = \ddot{u}_1 + \dot{u}_1 + \ddot{u}_2. \end{cases}$

в) $\begin{cases} y_1 = \ddot{u}_1 + 8\dot{u}_1 + 4u_2, \\ y_2 = \dot{u}_1 + 3u_1 + 6u_2. \end{cases}$ г) $\begin{cases} \dot{y}_1 + 3y_1 = 3\dot{u}_1 + 8\ddot{u}_2 + 24\dot{u}_2, \\ y_2 = \dot{u}_1 + 6u_1 + \dot{u}_2 + 2u_2. \end{cases}$

д) $\begin{cases} \dot{y}_1 + y_1 = 7\dot{u}_1 + 7u_1 + u_2, \\ \dot{y}_2 + 3y_2 = \dot{u}_1 + \ddot{u}_2 + 7\dot{u}_2 + 12u_2. \end{cases}$ е) $\begin{cases} y_1 = 3\dot{u}_1 + 4\dot{u}_2, \\ \dot{y}_2 + 10y_2 = \dddot{u}_1 + 10\ddot{u}_1 + 8\dot{u}_1 + 80u_1 + \dot{u}_2. \end{cases}$

ж) $\begin{cases} \dot{y}_1 + 2y_1 = 6\dot{u}_1 + 12u_1 + \dot{u}_2, \\ \dot{y}_2 + 2y_2 = u_1 + \dot{u}_2 + 3u_2. \end{cases}$ з)

$\begin{cases} 2\dddot{y}_1 + 8\ddot{y}_1 + 2\dot{y}_1 + 8y_1 = 6\ddot{u}_1 + 24\dot{u}_1 + 2\dddot{u}_2 + 2\dot{u}_2, \\ y_2 = 3u_1 + \dot{u}_2 + u_2. \end{cases}$

и) $\begin{cases} \dot{y}_1 + 3y_1 = 5\ddot{u}_1 + 15\dot{u}_1 + u_2, \\ \dot{y}_2 + 3y_2 = \dot{u}_1 + 7\dot{u}_2 + 21u_2. \end{cases}$ к) $\begin{cases} \ddot{y}_1 + 7\dot{y}_1 + 12y_1 = \dot{u}_1 + 4u_1 + \dot{u}_2 + 3u_2, \\ \dot{y}_2 + 5y_2 = u_1 + \dddot{u}_2 + 5u_2. \end{cases}$

Задача 2.2

Определить матричную передаточную функцию, если известны матрицы A, B и C:

а) $A = \begin{bmatrix} -3 & 3 \\ -2 & 4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 3 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$

б) $A = \begin{bmatrix} -1 & 5 \\ -5 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 6 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$

в) $A = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ -2 & 3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 8 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$

г) $A = \begin{bmatrix} -4 & 2 \\ -8 & -3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$

д) $A = \begin{bmatrix} -5 & 10 \\ -6 & 3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix};$

е) $A=\begin{bmatrix}-2 & 8\\ -1 & 4\end{bmatrix}$, $B=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 3 & 0\end{bmatrix}$, $C=\begin{bmatrix}2 & 1\\ 0 & 2\end{bmatrix}$;

ж) $A=\begin{bmatrix}3 & 4\\ 4 & -5\end{bmatrix}$, $B=\begin{bmatrix}0 & 5\\ 6 & 0\end{bmatrix}$, $C=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 1 & 1\end{bmatrix}$;

з) $A=\begin{bmatrix}-5 & 7\\ -8 & 4\end{bmatrix}$, $B=\begin{bmatrix}0 & 3\\ 7 & 0\end{bmatrix}$, $C=\begin{bmatrix}2 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}$;

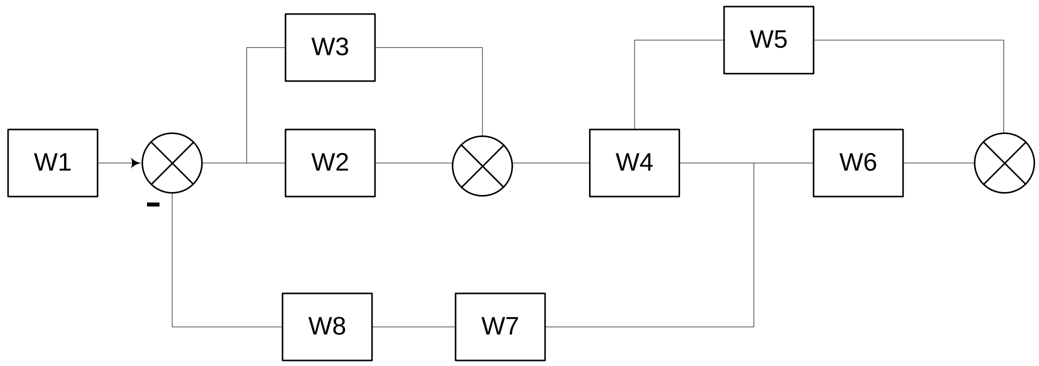
и) $A=\begin{bmatrix}9 & 8\\ -3 & 3\end{bmatrix}$, $B=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 3 & 0\end{bmatrix}$, $C=\begin{bmatrix}1 & 1\\ 0 & 1\end{bmatrix}$;

к) $A=\begin{bmatrix}-9 & 8\\ -5 & 1\end{bmatrix}$, $B=\begin{bmatrix}0 & 5\\ 1 & 0\end{bmatrix}$, $C=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 2\end{bmatrix}$;

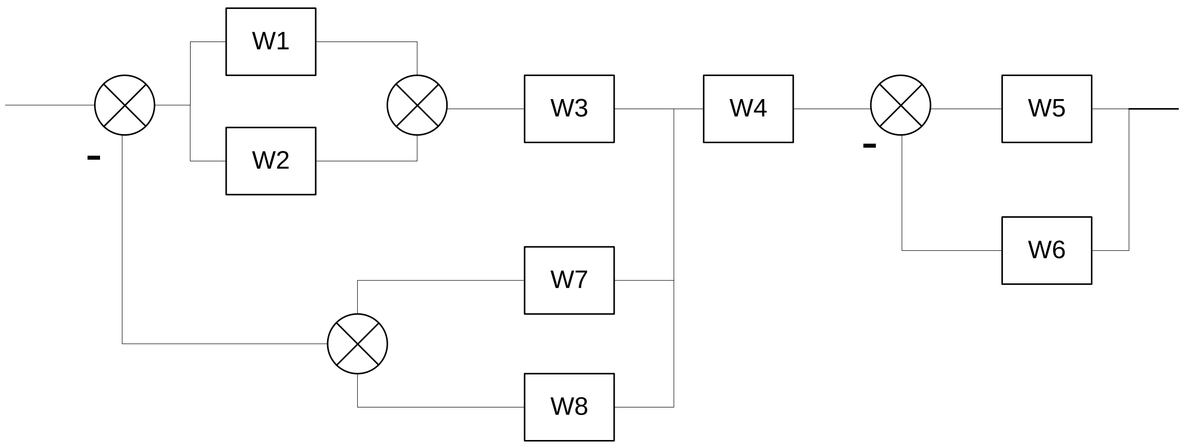
Лабораторная работа № 11. Получение разомкнутой передаточной функции структурной схемы автоматического управления.

Задание: произвести преобразование структурных схем в соответствии с правилами структурных и эквивалентных преобразований для получения разомкнутой передаточной функции.

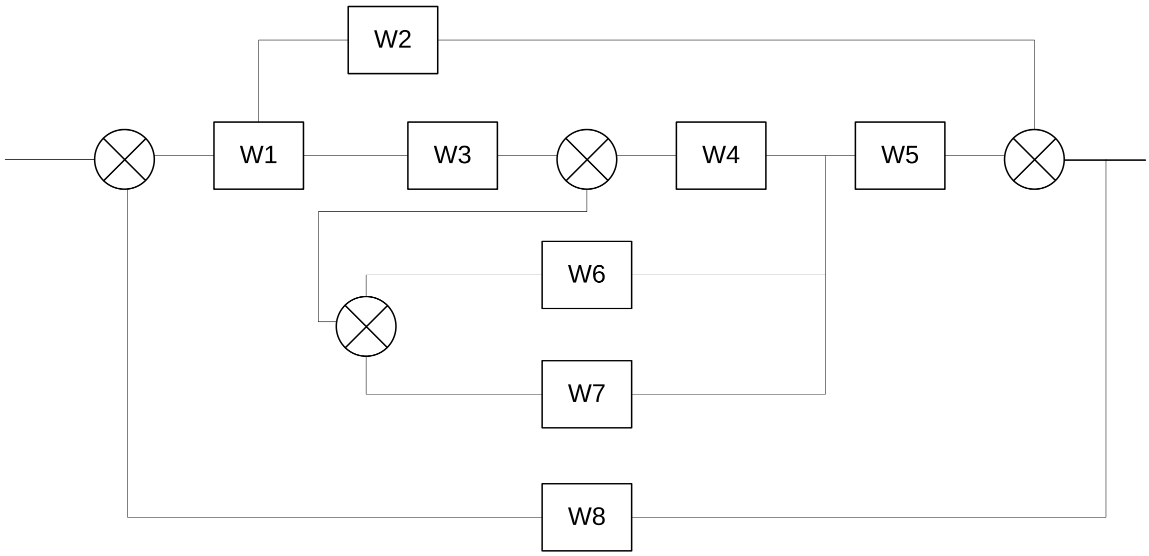
Вариант №1



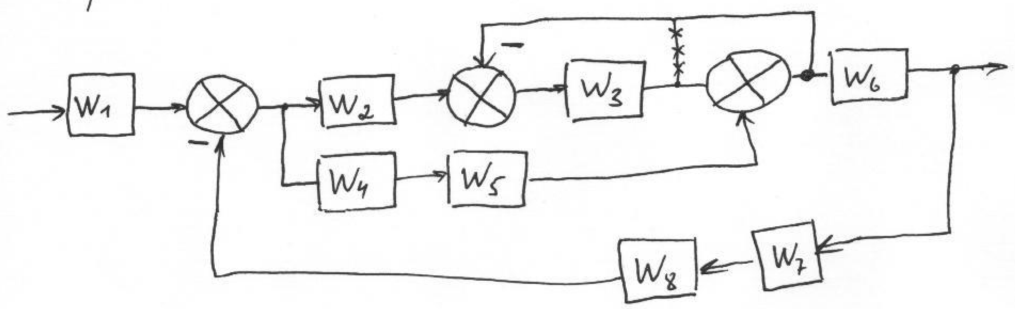
Вариант №2



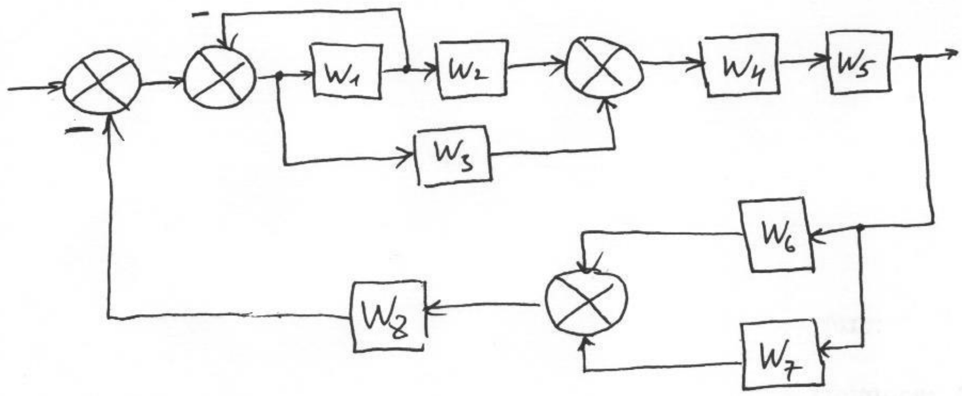
Вариант №3



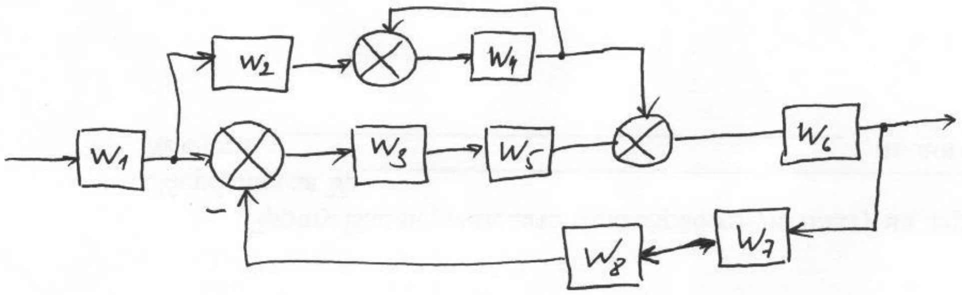
Вариант 4.



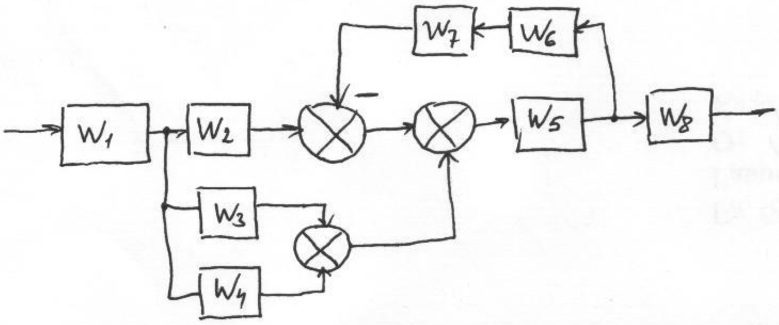
Вариант 5



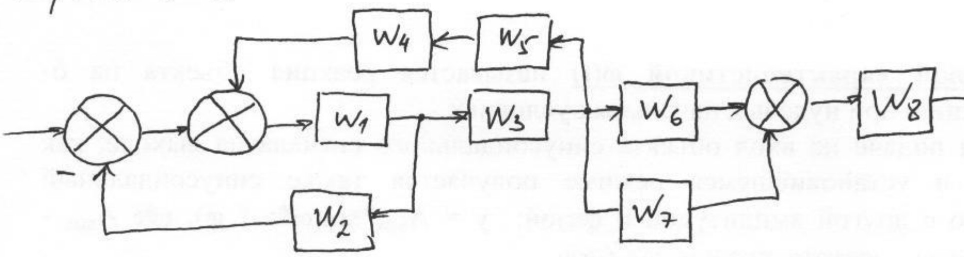
Вариант 6



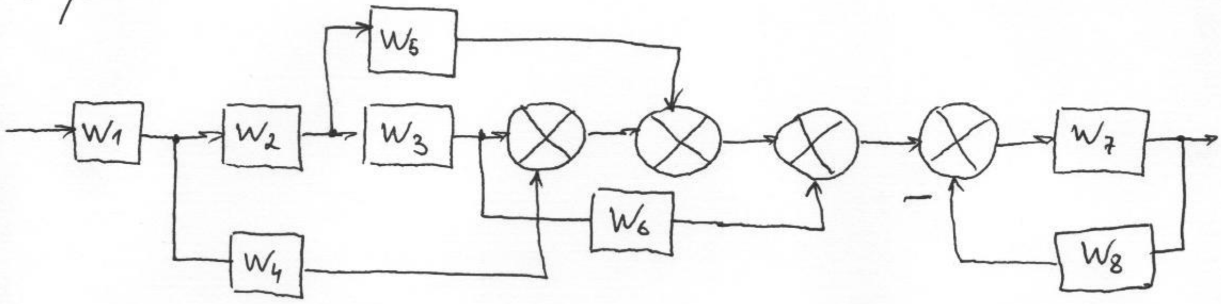
Вариант 7



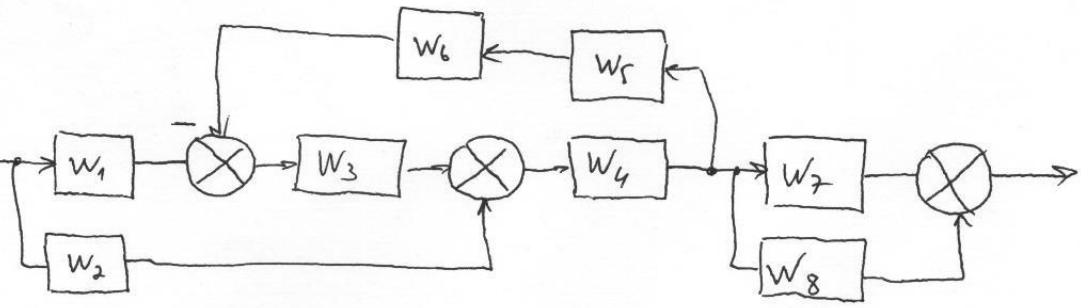
Вариант 8



Вариант 9



Вариант 10.



Лабораторная работа №12. Построение логарифмической амплитудной характеристики по передаточной функции.

Задание: построить логарифмическую амплитудную характеристику по передаточной функции по вариантам.

Вариант 1

$$W(p) = \frac{(0{,}1p+1)(0{,}03p^2+0{,}00026p+1)\ (0{,}00066p+1)}{p(0{,}25p+1)(0{,}0036p^2+0{,}000086p+1)}$$

Вариант 2

$$W(p) = \frac{25p(0{,}0029p^2+0{,}000012p+1)(0{,}00047p+1)}{(0{,}4p+1)(0{,}043p+1)(0{,}00074p^2+0{,}0000091p+1)}$$

Вариант 3

$$W(p) = \frac{p^2(0{,}71p+1)(0{,}064p+1)(0{,}0026p^2+0{,}00052p+1)}{(0{,}0048p+1)(0{,}000094p+1)}$$

Вариант 4

$$W(p) = \frac{18(0{,}02p+1)(0{,}048p^2+0{,}00021p+1)}{p(0{,}4p+1)(0{,}024p^2+0{,}00084p+1)(0{,}000046p+1)}$$

Вариант 5

$$W(p) = \frac{11p(0{,}9p+1)(0{,}22p^2+0{,}024p+1)}{(0{,}0012p^2+0{,}000083p+1)\cdot(0{,}06p^2+0{,}00041p+1)}$$

Вариант 6

$$W(p) = \frac{28(0{,}02p^2+0{,}00061p+1)(0{,}004p+1)}{p^2(0{,}1p+1)(0{,}00048p+1)}$$

Вариант 7

$$W(p) = \frac{49p(0{,}001p^2+0{,}000094p+1)(0{,}0063p+1)}{(0{,}29p+1)(0{,}044p+1)(0{,}00033p^2+0{,}000021p+1)}$$

Вариант 8

$$W(p) = \frac{(0{,}0091p+1)(0{,}0043p^2+0{,}00052p+1)}{p(0{,}051p+1)(0{,}22p^2+0{,}0034p+1)(0{,}22p+1)}$$

Вариант 9

$$W(p) = \frac{29p(0{,}071p+1)(0{,}17p+1)(0{,}0024p^2+0{,}00012p+1)}{(0{,}00084p+1)(0{,}0069p+1)}$$

Вариант 10

$$W(p) = \frac{p^2(0{,}0064p+1)(0{,}000021p^2+0{,}0000081p+1)}{(0{,}24p+1)(0{,}039p+1)(0{,}0001p^2+0{,}000012p+1)}$$

Лабораторная работа 13. Исследование систем управления на устойчивость.

Задание: в соответствии с вариантом выполнить расчет системы управления на устойчивость с помощью критериев Гурвица и Рауса.
В ответе должны быть приведены расчёты каждого коэффициента и т.п.

Вариант 1

$6x^4+3x^3+11x^2+2x+1=0$

Вариант 2

$12x^4+13x^3+1x^2+6x+1=0$

Вариант 3

$16x^4+13x^3+1x^2+7x+1=0$

Вариант 4

$5x^4+3x^3+13x^2+17x+1=0$

Вариант 5

$4x^4+23x^3+10x^2+9x+1=0$

Вариант 6

$4x^4+14x^3+18x^2+19x+1=0$

Вариант 7

$2x^4+13x^3+4x^2+6x+1=0$

Вариант 8

$12x^4+15x^3+18x^2+28x+1=0$

Вариант 9

$7x^4+2x^3+22x^2+9x+1=0$

Вариант 10

$17x^4+23x^3+13x^2+4x+1=0$

Вариант 11

$14x^4+13x^3+21x^2+5x+1=0$

Вариант 12

$9x^4+10x^3+11x^2+12x+1=0$

Вариант 13

$9x^4+13x^3+10x^2+12x+1=0$

Вариант 14

$1x^4+2x^3+3x^2+14x+1=0$

Вариант 15

$8x^4+7x^3+2x^2+12x+1=0$