

Федеральное агентство связи Российской Федерации
ГОУ ВПО «Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»

С.Н. Архипов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по курсу
«РАДИОАВТОМАТИКА»

*Методические указания к лабораторным работам
с применением программы MicroCap*

Для студентов дневного обучения

Новосибирск 2010

УДК 681.(076)

С.Н. Архипов

Лабораторный практикум по курсу «Радиоавтоматика». Методические указания к лабораторным работам с применением программы MicroCap

Методические указания предназначены для студентов дневного обучения, обучающихся по специальностям «Радиотехника», «Аудиовизуальная техника», «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». Данные методические указания содержат рекомендации по выполнению цикла лабораторных работ в рамках дисциплин: «Радиоавтоматика» и «Основы автоматизации и систем автоматического управления» с применением программы компьютерного моделирования «MicroCap». Приводятся задания для выполнения контрольной работы и предварительного расчета к лабораторным работам, вопросы для самопроверки, а также необходимый теоретический и справочный материал по методикам исследования, расчета и работе с программой компьютерного моделирования линейных систем радиоавтоматики.

Кафедра беспроводных информационных систем и сетей

Илл. - 24

Рецензент: Чухров А.С.

Для специальностей 210312, 210300, 210200

Утверждено редакционно-издательским советом СибГУТИ в качестве методических указаний.

© ГОУ ВПО «Сибирский государственный»
университет телекоммуникаций и информатики, 2010.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Лабораторная работа №1 «Изучение типовых динамических звеньев»	4
2. Лабораторная работа №2 «Исследование устойчивости линейных систем автоматического регулирования»	15
3. Лабораторная работа №3 «Исследование ошибки регулирования при детерминированных воздействиях	22
Приложение 1 Задания для контрольной работы по курсу «Радиоавтоматика»	29
Приложение 2 Критерии устойчивости линейных стационарных САР	32
Приложение 3 Метод коэффициентов ошибки	36

Лабораторная работа №1

Изучение типовых динамических звеньев

1. Цель работы

Ознакомление с методами исследования линейных стационарных систем автоматического регулирования (САР), способами представления моделей типовых динамических звеньев, структурных преобразований систем, а также методами исследования влияния параметров звеньев на частотные и переходные характеристики.

2. Описание лабораторной установки

Исследование линейных систем автоматического регулирования (САР) производится методом компьютерного моделирования с применением программы Micro Cap (v.9.0). Студенческая Демо-версия распространяется свободно через сеть Internet (spectrum-soft.com).

Для теоретического анализа САР и получения количественной оценки показателей качества необходимо составить математическую модель системы в виде соединения элементарных структурных элементов. С физической точки зрения функциональные устройства, входящие в САР, независимо от их физической природы, конструкции и принципа действия, имеют одинаковые динамические характеристики. При составлении математической модели такие устройства могут иметь одинаковое математическое описание, которое сводится к обыкновенному линейному дифференциальному уравнению или передаточной функции не выше второго порядка, причем коэффициенты уравнений непосредственно связаны с конструктивными параметрами устройства.

Такие элементы называют *типовыми динамическими звеньями*. Выделяют 7 основных типовых динамических звеньев:

- 1. Инерционное (апериодическое).**
- 2. Безынерционное (усилительное, пропорциональное, масштабирующее).**
- 3. Интегрирующее.**
- 4. Дифференцирующее.**
- 5. Форсирующее.**
- 6. Колебательное**
- 7. Постоянного (чистого) запаздывания.**

В отличие от 1 – 5 звеньев, колебательное звено описывается передаточной функцией второго порядка, а звено постоянного запаздывания – иррациональной функцией. Передаточные функции типовых звеньев показаны в таблице 1.1.

Следует подчеркнуть, что структурное типовое звено или автоматическая система может быть *физически реализуема* только в том случае, если порядок числителя передаточной функции больше порядка знаменателя. Таким образом, как следует из таблицы 1.1, физически невозможно реализовать идеальное дифференцирующее или форсирующее звено. На практике не существует такого реального элемента, в котором на выходе точно воспроизводилась бы производная от любого входного сигнала. При реализации такого звена всегда найдется

инерционность, при которой порядок знаменателя передаточной функции будет не меньше порядка числителя. Таким образом, можно дополнительно выделить **реальное типовое дифференцирующее** звено как последовательное соединение идеального дифференцирующего и инерционного звеньев, а также **интегро-дифференцирующее** звено как последовательное соединение форсирующего и инерционного звеньев.

Таблица 1.1 – Элементарные типовые динамические звенья первого порядка

№ звена	Название типового звена	Передаточная функция
1	Инерционное	$K(p) = \frac{k}{1 + pT}$
2	Безынерционное	$K(p) = k$
3	Интегрирующее	$K(p) = \frac{k}{p} = \frac{1}{pT}$
4	Дифференцирующее	$K(p) = kp = \frac{p}{T}$
5	Форсирующее	$K(p) = k(1 + pT)$
6	Реальное дифференцирующее	$K(p) = \frac{kp}{1 + pT}$
7	Интегро-дифференцирующее	$K(p) = \frac{1 + pT_1}{1 + pT_2}$
8	Колебательное	$K(p) = \frac{k}{1 + 2T\xi p + T^2 p^2}$
9	Постоянного запаздывания	$K(p) = e^{-\tau p}$

* p – оператор Лапласа, T – постоянная времени, k – коэффициент передачи.

В данной работе предполагается исследовать частотные и переходные характеристики некоторых типовых звеньев, а также характеристики системы, состоящей из последовательного соединения нескольких типовых звеньев. Вид общей структуры системы показан на рисунке 1.1, типы звеньев и их параметры заданы в приложении (таблице П1 задания для контрольной работы по курсу «Радиоавтоматика»).

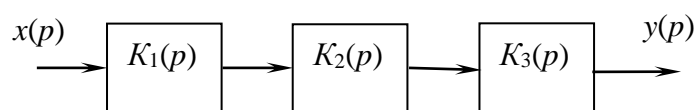


Рисунок 1.1 – Структурная схема САР

Таким образом, в ходе данной лабораторной работы, помимо исследования частотных и переходных характеристик отдельных звеньев проверяется правильность построения частотных характеристик, требуемых в задании №1 контрольной работы.

Модель структурного элемента, заданная в виде передаточной функции, в среде Micro Cap описывается с помощью зависимого источника напряжения, управляемого напряжением E1, в котором функциональная связь между входной и выходной переменной задается преобразованием Лапласа.

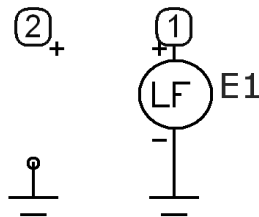


Рисунок 1.2 – Модель зависимого источника, описываемого с применением преобразования Лапласа

Передаточная функция, выраженная через преобразование Лапласа, задается в окне параметров Laplace Sources, которое открывается двойным щелчком мыши на изображении зависимого источника, показанного на рисунке 1.2.

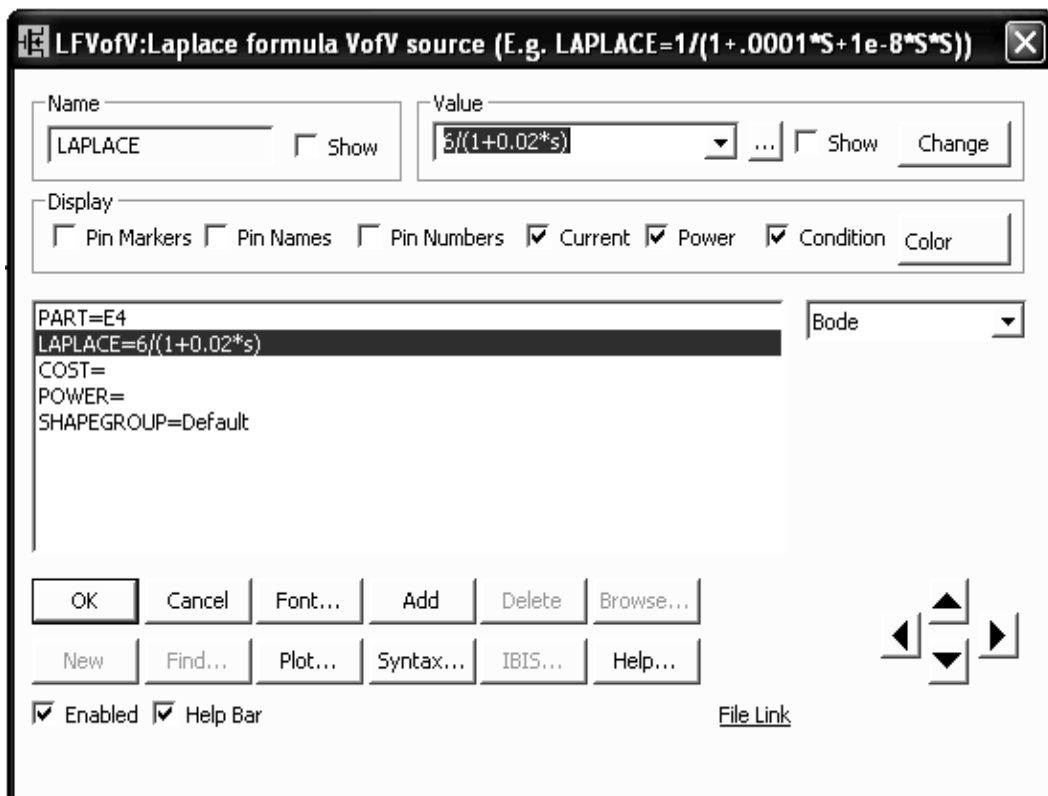


Рисунок 1.3 – Окно установки параметров передаточной функции

При выборе опции «LAPLACE=» записывается заданная передаточная функция, которая автоматически дублируется в ячейке «Value», как показано на рисунке 1.3.
Примечание: что параметр Лапласа в формате Micro Cap, обозначается как

«S» в отличие от электронных лекций и данных методических указаний, где он обозначается через «P».

Функции в ячейке «Value» записываются в текстовом формате, при этом можно использовать знак возведения в степень «^» например, передаточную функцию вида $\frac{p(1+pT_1)}{(1+pT_2)^4}$, где $T_1 = 0.2$, $T_2 = 1.5$,

можно представить как $s*(1+s*0.2)/(1+s*1.5)^4$.

Следите за парностью скобок и приоритетом выполнения математических операций!

Схема лабораторной установки в формате MicroCap изображена на схеме 1.4.

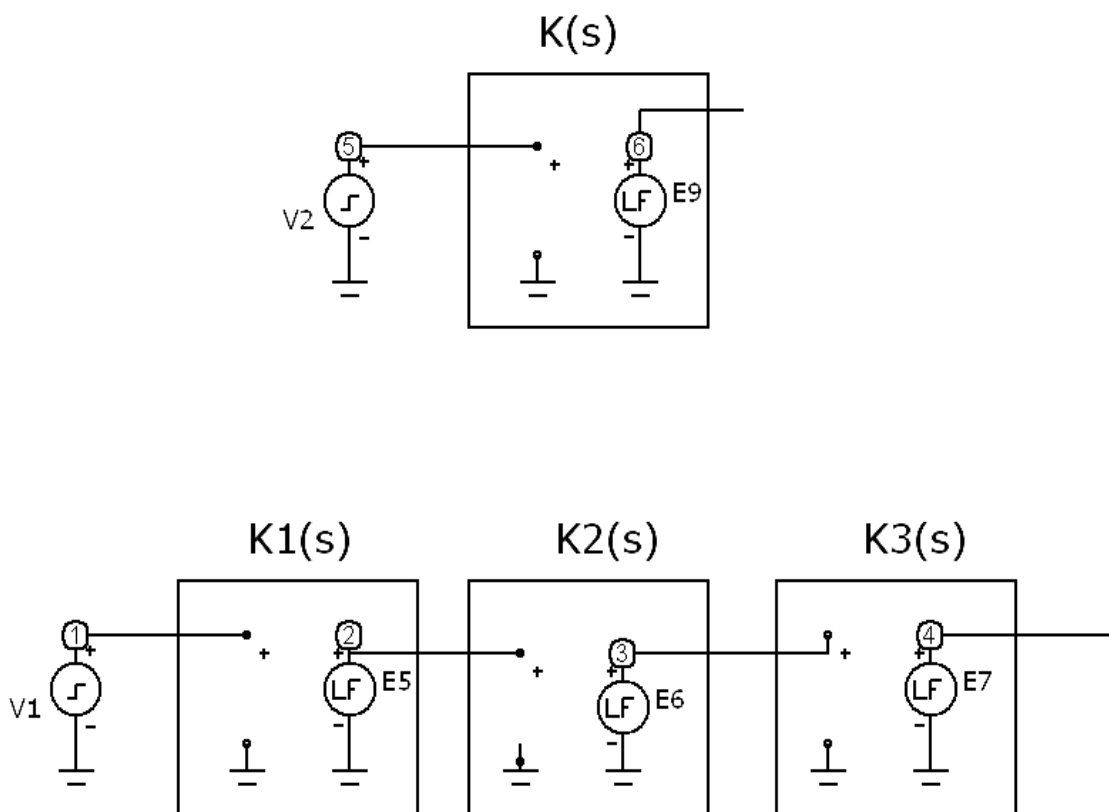


Рисунок 1.4 – Схема лабораторной установки в формате MicroCap

Для исследование **одного** типового динамического звена используется структурный элемент с передаточной функцией $K(s)$, на вход которого подается входное воздействие от источника $V2$. Схема, состоящая из последовательного соединения звеньев $K1(s)$, $K2(s)$, $K3(s)$ предназначена для исследования результирующих характеристик **системы в целом**. Схема содержит источник входного воздействия $V1$, а также три структурных элемента, соединенных последовательно и заданных своими передаточными функциями.

Для **временного анализа** (построения переходных характеристик) на вход системы подается входное воздействие от генератора импульсного сигнала ($V1$ или $V2$), параметры которого задаются в специальном окне после двойного щелчка

левой кнопки мыши на изображении импульсного генератора. Вид окна показан на рисунке 1.5б. С помощью данного генератора можно, в частности, получить сигналы прямоугольной формы.

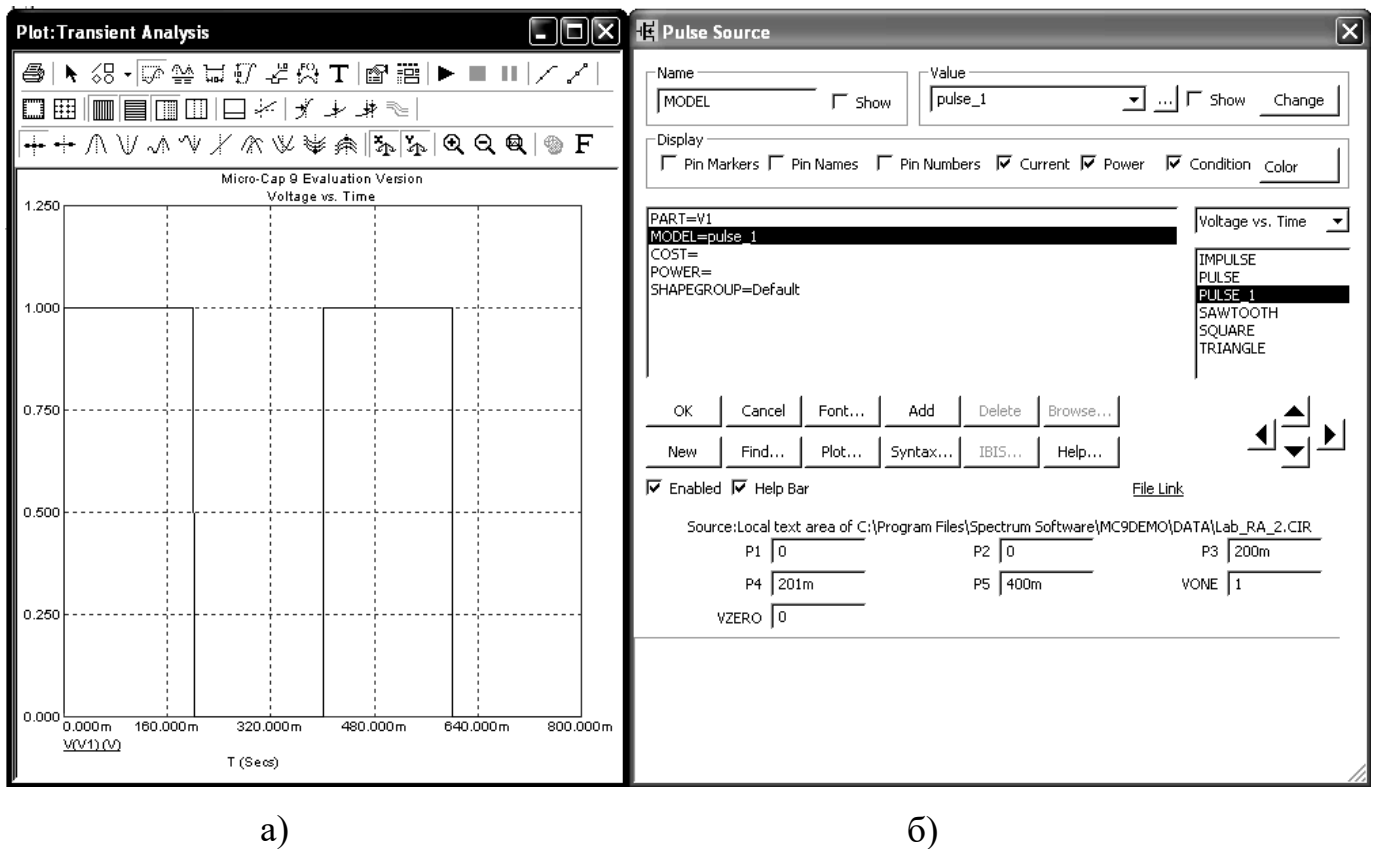


Рисунок 1.5 – Окно установки параметров прямоугольного сигнала

На первом этапе при выборе опции «MODEL=» необходимо задать (или выбрать в правом окне Pulse Source) имя модели импульсного генератора, после чего становится доступна установка параметров сигнала в следующих ячейках:

P1 – задержка сигнала относительно нулевого момента времени;

P2 – время перехода от уровня нуля (VZERO) до уровня единицы (VONE) – длительность переднего фронта импульса;

P3 – время окончания плоской части импульса;

P4 – время перехода от уровня единицы (VONE) до уровня нуля (VZERO) – длительность заднего фронта импульса;

P5 – период следования импульсов;

VONE – максимальный уровень сигнала (уровень «единицы»);

VZERO – минимальный уровень сигнала (уровень «нуля»).

Форму сигнала можно проконтролировать, щелкнув левой кнопкой мыши на кнопке «Plot». В этом случае появится дополнительное окно с демонстрацией формы полученного сигнала (рисунок 1.5а).

Временной анализ производится выбором в основном меню опции «Analysis» и «Transient». В этом случае появляется окно пределов анализа, изображенное на рисунке 1.6.

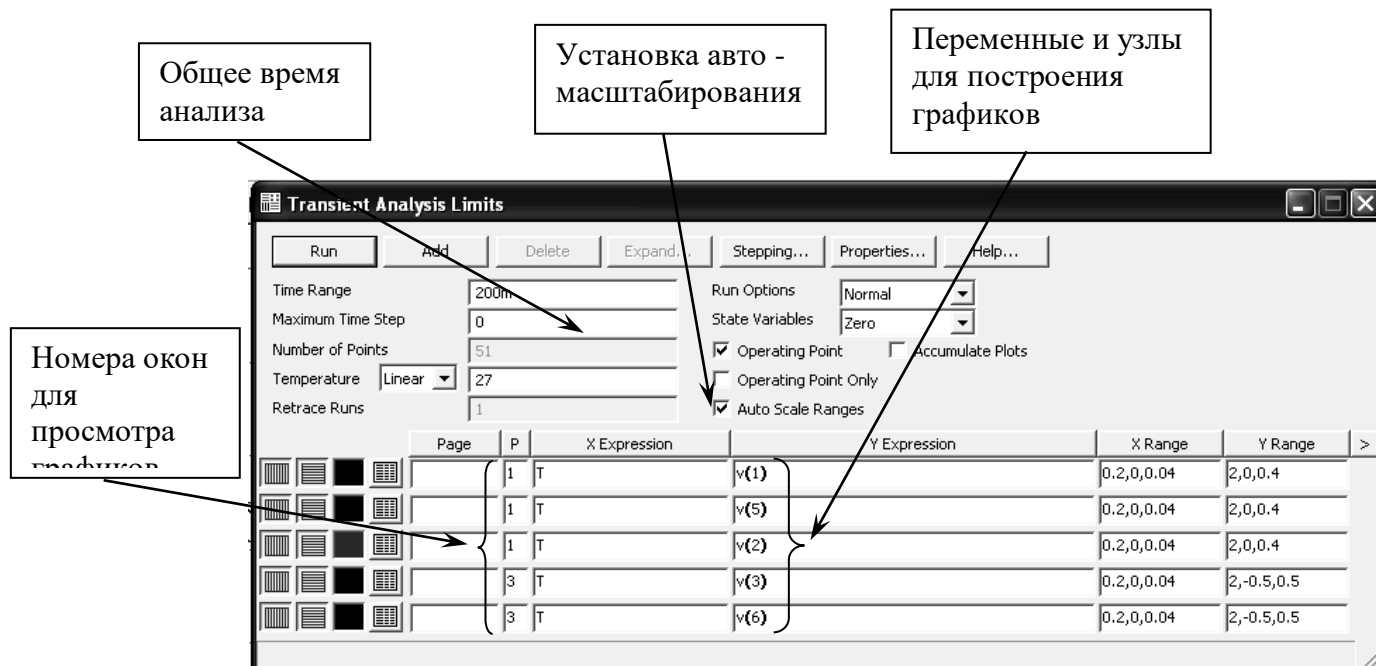


Рисунок 1.6 – Окно установки пределов временного анализа

Запуск временного анализа выполняется щелчком левой кнопки мыши на кнопке «Run». После этого появляются графики временных характеристик. В одном окне можно одновременно вывести несколько графиков, если для выбранных узлов указываются одинаковые номера окон (столбец «P»).

Частотный анализ производится выбором в основном меню опции «Analysis» и «AC». В этом случае появляется окно пределов анализа, изображенное на рисунке 1.7.

В ячейке «Frequency Range» через запятую указываются сначала верхняя, затем нижняя частота для анализа. В результате частотного анализа могут быть построены различные частотные характеристики. Для этого указывается выходное напряжение (для данного примера $V(4)$), к которому могут быть добавлены различные приставки:

$db(v(4))$ – коэффициент передачи в децибелах;

$ph(v(4))$ – фаза в градусах;

$Re(v(4))$ – реальная часть функции;

$Im(v(4))$ – мнимая часть функции; и ряд других.

В ячейках «X Expression» и «Y Expression» указываются переменные по оси абсцисс и ординат. Так, при построении логарифмической амплитудно-частотной характеристики (строка 1) по оси X указана частота (F), а по оси Y – напряжение в узле (4), выраженное в [дБ]. В крайнем левом квадрате по данной строке указан логарифмический масштаб по оси X. Соответственно, во второй строке указана фазо-частотная характеристика Масштаб по осям выбирается автоматически, если выбрана опция «Auto Scale Range» (автоформат).

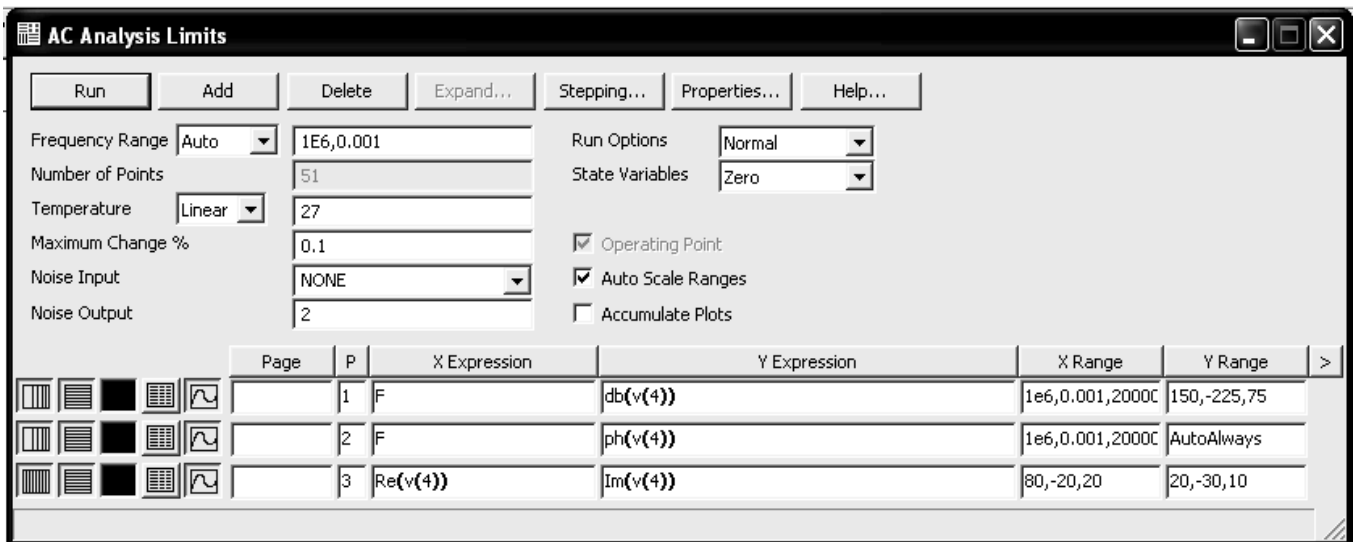


Рисунок 1.7 – Окно установки пределов частотного анализа

В ячейках «X Expression» и «Y Expression» указываются переменные по оси абсцисс и ординат. Так, при построении логарифмической амплитудно-частотной характеристики (строка 1) по оси X указана частота (F), а по оси Y – напряжение в узле (4), выраженное в [дБ]. В крайнем левом квадрате по данной строке указан логарифмический масштаб по оси X. Соответственно, во второй строке указана фазо-частотная характеристика Масштаб по осям выбирается автоматически, если выбрана опция «Auto Scale Range» (автоформат).

В третьей строке указаны переменные для построения амплитудно-фазовой частотной характеристики (годографа). В этом случае по оси X указывается реальная часть функции, а по оси Y – мнимая часть. В одном окне можно построить только один годограф.

В столбце «P» указан номер графика (если номера разные, графики изображаются в разных окнах, если одинаковые, то графики изображаются в одном окне). Если в столбце «P» ничего не стоит, соответствующий график не будет построен, а остальные графики будут изображены в большем масштабе.

Запуск частотного анализа выполняется щелчком левой кнопки мыши на кнопке «Run». После этого появляются графики частотных характеристик.

Графики для каждого узла схемы выделяются разным цветом и соответствующими обозначениями в нижней части графика.

Логарифмические частотные характеристики изображаются в большом диапазоне частот, например, как показано на рисунке 1.7, в ячейке «Frequency Range» указана максимальная частота [Гц]: 1Еб (символ «Е» означает десять в степени), и минимальная – 0.001 Гц (или 1Е-3).

В некоторых случаях необходимо изменить диапазон частот для более детального исследования годографов. Например, если в передаточной функции есть интегрирующие звенья, на низких частотах коэффициент передачи сильно возрастает, что при выборе опции «Автомасштаб» нормирует значения по оси «Y» (или «X») так, чтобы характеристика полностью вошла в пределы экрана. Таким образом, годограф вырождается в прямые линии и исследование поведения

годографа не представляется возможным. Поэтому в ячейке «Frequency Range» рекомендуется взять большую нижнюю частоту, например $1E5,2E1$. Для примера, на рисунке 2.8 показаны годографы комплексного коэффициента передачи для системы, состоящей из одного интегрирующего и двух инерционных звена. График 1.8а изображен в масштабе $1E6, 0.001$. Таким образом, нижняя частота составляет 0.001 Гц. Как видно из графика, модуль вектора на нижней частоте составляет сотни тысяч, и после нормировки форма годографа выродилась в прямые линии. График 1.8б построен в масштабе $1E6, 1E2$, что позволяет оценить форму годографа. Если после изменения масштаба и запуска режима частотного анализа форма кривой будет не плавной, а кусочно-ломаной, можно повторно запустить частотный анализ (Run), после чего масштаб будет автоматически пересчитан и форма кривой сгладится.

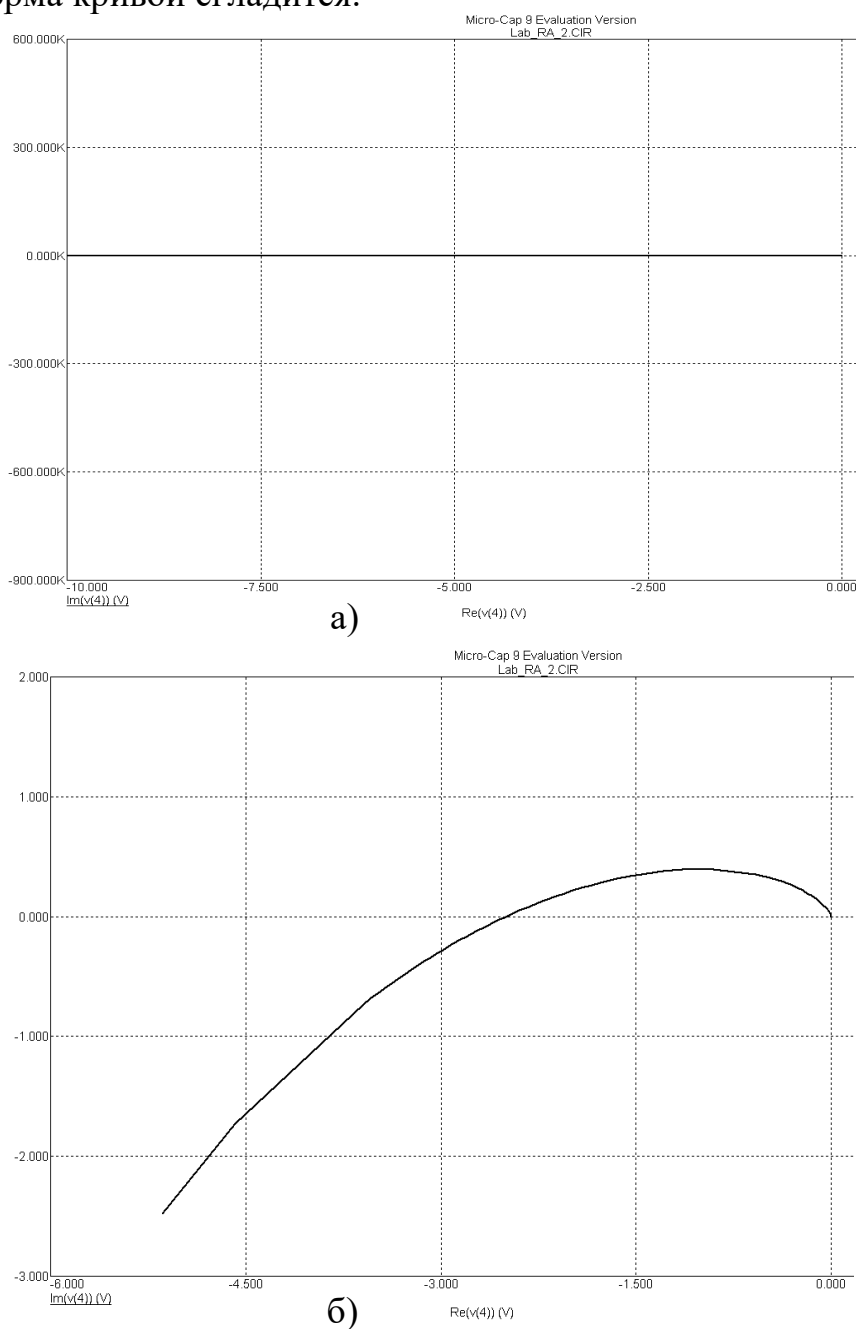


Рисунок 1.8 – Пример построения годографа Найквиста для астатической системы при различном диапазоне частот

3. Подготовка к работе

3.1. Ознакомиться с методами анализа линейных стационарных систем радиоавтоматики, представлением моделей типовых структурных звеньев их описанием и типовыми характеристиками, а также методами структурных преобразований. Подробнее см. в электронном конспекте лекций (Лекции 3 – 6).

3.2. Выбрать из таблицы П1.1 контрольной работы вариант структуры системы по номеру варианта (по последней цифре студенческого билета). По выбранной структуре (параметрам) системы записать передаточную функцию в дробно-рациональной форме и в текстовом формате с учетом заданных коэффициентов. Для этой передаточной функции записать дифференциальное уравнение, изобразить ДАЧХ и ЛФЧХ, а также построить АФЧХ (годограф).

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запустить программу Micro Cap (по указанию преподавателя), открыть файл lab_RA_1, после чего на экране должна появиться схема лабораторной установки, показанная на рисунке 1.4.

4.2. Исследовать частотные и переходные характеристики *отдельно для каждого* из трех типовых звеньев, указанных в таблице 1.2 для заданного варианта (по номеру бригады).

Таблица 1.2 – Параметры типовых линейных звеньев для анализа

№ вар.	Наименование типового звена	K	T_1	T_2	ξ
1	Инерционное	10	0.01	–	–
	Интегрирующее	1	0.01	–	–
	Дифференцирующее	10	0.01	–	–
2	Инерционное	10	0.01	–	–
	Колебательное	100	0.01	–	0.1
	Постоянного запаздывания	1	0.1	–	–
3	Безынерционное	100	–	–	–
	Колебательное	20	0.01	–	0.01
	Интегро-дифференцирующее	1	0.01	0.1	–
4	Интегро-дифференцирующее	1	0.1	0.01	–
	Колебательное	200	0.1	–	0.1
	Форсирующее	10	0.01	–	–
5	Инерционное	50	0.001	–	–
	Дифференцирующее	1	0.1	–	–
	Реальное дифференцирующее	10	0.01	–	–
6	Интегрирующее	1	0.01	–	–
	Интегро-дифференцирующее	10	0.001	0.1	–
	Реальное дифференцирующее	10	0.01	–	–
7	Инерционное	5	0.01	–	–
	Форсирующее	20	0.001	–	–

	Колебательное	40	0.001	–	0.2
8	Реальное дифференцирующее	200	0.01	–	–
	Интегро-дифференцирующее	1	0.1	0.001	–
	Колебательное	20	0.01	–	0.5
9	Форсирующее	80	0.001	–	–
	Интегрирующее	1	1	–	–
	Инерционное	50	0.001	–	–
10	Интегро-дифференцирующее	1	0.01	0.004	–
	Колебательное	20	0.01	–	0.05
	Форсирующее	20	0.01	–	–

Для этого последовательно, для каждого звена отдельно, ввести передаточную функцию для элемента $K(s)$, выполнить:

- - анализ переходной характеристики;
- - анализ логарифмических амплитудно-частотной (ЛАЧХ) и фазо-частотной (ЛФЧХ) характеристик;
- - анализ амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ или годограф).

Все полученные осциллограммы входного и выходного напряжений, а также частотные характеристики, привести в отчете.

4.3. Исследовать частотные характеристики (ЛАЧХ, ЛФЧХ, АФЧХ) *системы* из последовательного соединения типовых звеньев, указанных в таблице П1.1 контрольной работы. Каждый студент в бригаде зарисовывает полученных частотные характеристики для своего варианта (таблица П1.1). Все полученные частотные характеристики привести в отчете, сравнить с результатами предварительного расчета.

5. Содержание отчета

- 5.1. Цель работы.
- 5.2. Таблицы вариантов параметров.
- 5.3. Передаточные функции исследуемых звеньев, а также системы звеньев, причем для каждого звена (или системы) записать дифференциальное уравнение и привести пример схемной реализации (преимущественно на базе идеального операционного усилителя).
- 5.4. Результаты временного и частотного анализа в виде осциллограмм и частотных характеристик.

6. Вопросы для защиты

- 6.1. Что такое типовое линейное динамическое звено? Каким требованиям оно должно удовлетворять?
- 6.2. Перечислить методы анализа систем радиоавтоматики. Какие преимущества и недостатки имеют эти методы?
- 6.3. Что такое переходная и импульсная характеристики? Привести примеры для произвольного типового звена (в одном временном масштабе).

- 6.4. Суть частотного анализа. Преобразования Фурье и Лапласа: основные формулы, отличия. Виды и определения частотных характеристик.
- 6.5. Что такое “годограф” типового звена (или системы звеньев)? Как построить годограф звена, зная его передаточную функцию? Привести примеры.
- 6.6. Как связаны между собой основные характеристики звеньев: передаточная функция, дифференциальное уравнение, переходная и импульсная характеристики?
- 6.7. В чем отличие функциональных схем от структурных? Какие преимущества и недостатки имеют функциональные и структурные схемы?
- 6.8. На чем основаны правила структурных преобразований? Перечислить эти правила. Цель структурных преобразований?

Лабораторная работа №2

Исследование устойчивости линейных систем автоматического регулирования

1. Цель работы

Ознакомление с методами исследования устойчивости линейных стационарных систем автоматического регулирования (САР). Исследование влияния структуры системы автоматического регулирования и параметров ее звеньев на устойчивость.

2. Описание лабораторной установки

Исследование устойчивости замкнутых САР производится методом компьютерного моделирования с применением программы Micro Cap (v.9.0). Студенческая Демо-версия распространяется свободно через сеть Internet (spectrum-soft.com).

Поскольку определение устойчивости замкнутой системы путем определения корней характеристического уравнения затруднено, применяют косвенные методы оценки – критерии устойчивости. Эти методы позволяют определить знаки действительных частей корней характеристического уравнения косвенным путем с применением частотных и алгебраических критериев.

Данная работа посвящена исследованию частотных критериев устойчивости Михайлова и Найквиста.

Критерий устойчивости Найквиста основан на анализе *комплексного коэффициента передачи* (годографа Найквиста) на комплексной плоскости.

Передаточная функция разомкнутой системы $K(p)$ может быть представлена в дробно-рациональном виде:

$$K(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{b_0 + b_1p + b_2p^2 + \dots + b_m p^m}{a_0 + a_1p + a_2p^2 + \dots + a_n p^n}, \quad (2.1)$$

где b_i и a_i - коэффициенты полиномов числителя и знаменателя, определяемые через параметры звеньев системы.

Анализ устойчивости замкнутой системы по критерию Михайлова производится с помощью ее характеристического уравнения $G(p) = 0$, где $G(p)$ – знаменатель передаточной функции замкнутой системы. Характеристический полином $G(p)$ может быть получен из выражения для передаточной функции разомкнутой системы (2.1) следующим образом:

$$G(p) = A(p) + B(p), \quad (2.2)$$

поскольку передаточная функция замкнутой следящей системы:

$$\Phi(p) = \frac{K(p)}{1 + K(p)} = \frac{\frac{B(p)}{A(p)}}{1 + \frac{B(p)}{A(p)}} = \frac{B(p)}{A(p) + B(p)} = \frac{B(p)}{G(p)}.$$

Функция $G(p)$ может быть представлена в виде полинома

$$G(p) = c_0 + c_1 p + c_2 p^2 + \dots + c_n p^n \quad (2.3)$$

Структурная схема замкнутой автоматической системы приведена на рисунке 2.1

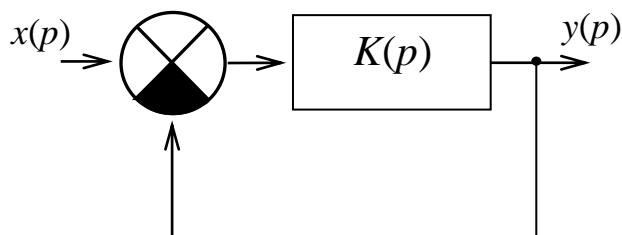


Рисунок 2.1 – Замкнутая автоматическая система

Модель структурного элемента, заданная в виде передаточной функции (рисунок 2.1), в среде Micro Cap описывается с помощью зависимого источника напряжения, управляемого напряжением E1, в котором функциональная связь между входной и выходной переменной задается преобразованием Лапласа.

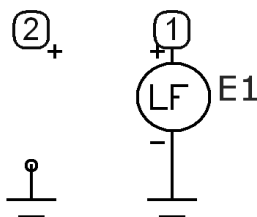


Рисунок 2.2 – Модель зависимого источника, описываемого с применением преобразования Лапласа

Этот элемент обозначается как Laplace Sources и его описание сводится к уравнению, записанному через оператор Лапласа в окне параметров элемента.

Поскольку исследование устойчивости замкнутой системы производится с помощью различных критериев (анализируются различные функции), то целесообразно исследовать:

1. свойства элемента, описывающего передаточную функцию разомкнутой системы (для исследования устойчивости по критерию Найквиста);
2. свойства элемента, описывающего характеристическое уравнение замкнутой системы (для исследования устойчивости по критерию Михайлова);
3. Свойства замкнутой системы в целом (передаточная функция замкнутой системы).

Все эти исследования можно произвести по одной схеме (рисунок 2.3), задавая различные формулы.

Источник импульсного напряжения на входе схем а и в для проведения частотного анализа стоит формально, для исключения ошибки топологии. Он

задает соответствующий входной узел для построения частотных характеристик выходного параметра относительно входа. Источник импульсного напряжения на входе схемы *б* может применяться для исследования вида переходного процесса замкнутой системы.

Параметры импульсного генератора в схеме лабораторной установки заданы и в процессе работы не меняются (более подробно об источнике импульсного напряжения см. в работе №1,3).

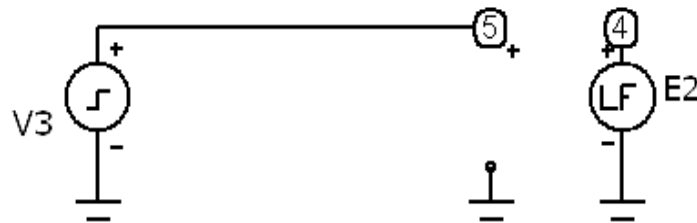


Рисунок 2.3 – Схема лабораторной установки.

Передаточные функции или характеристические полиномы, выраженные через преобразование Лапласа, задается в окне параметров Laplace Sources, см. указание к работе №1.

Запуск частотного анализа выполняется щелчком левой кнопки мыши на кнопке «Run». После этого появляются графики частотных характеристик, примерный вид которых показан на рисунках 2.4, 2.5.

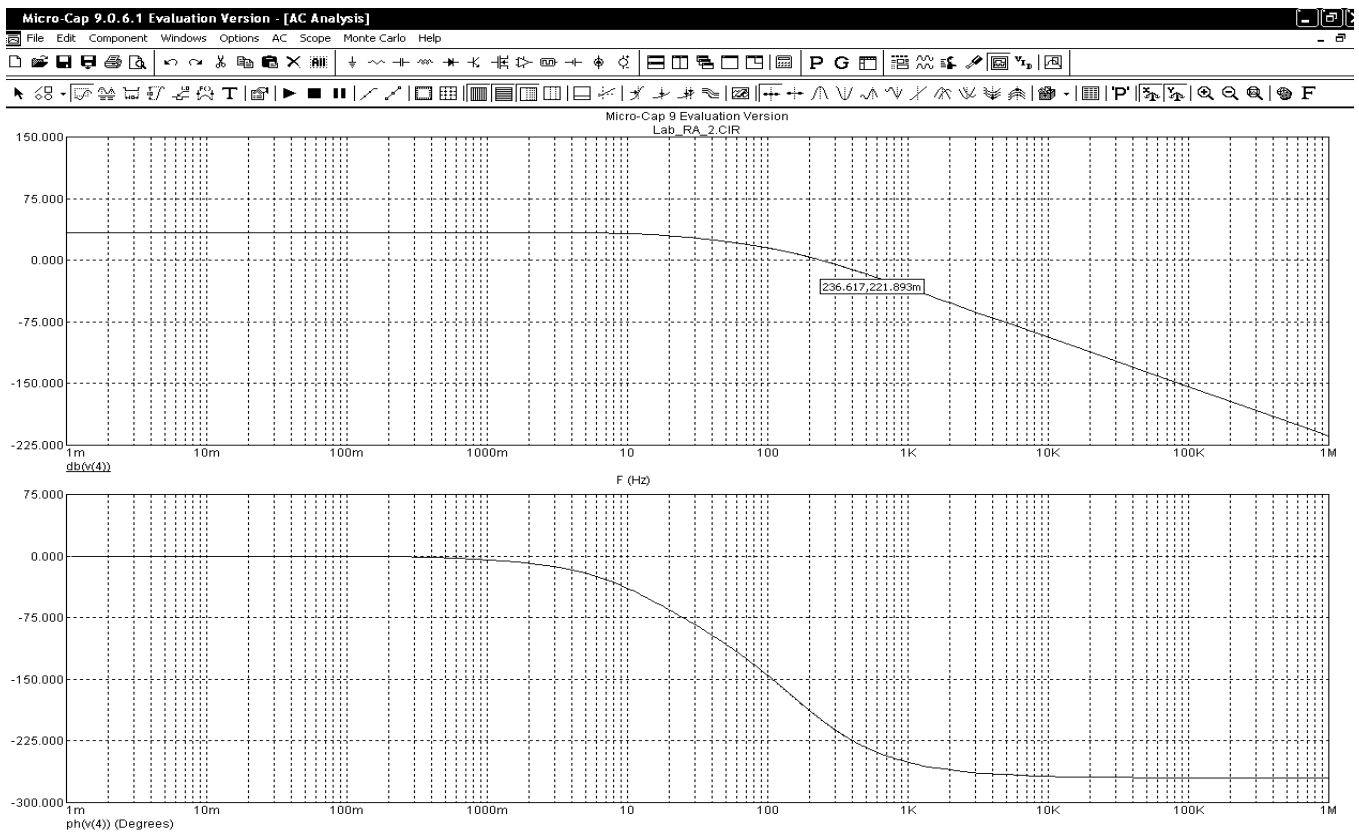


Рисунок 2.4 – Пример построения логарифмических частотных характеристик

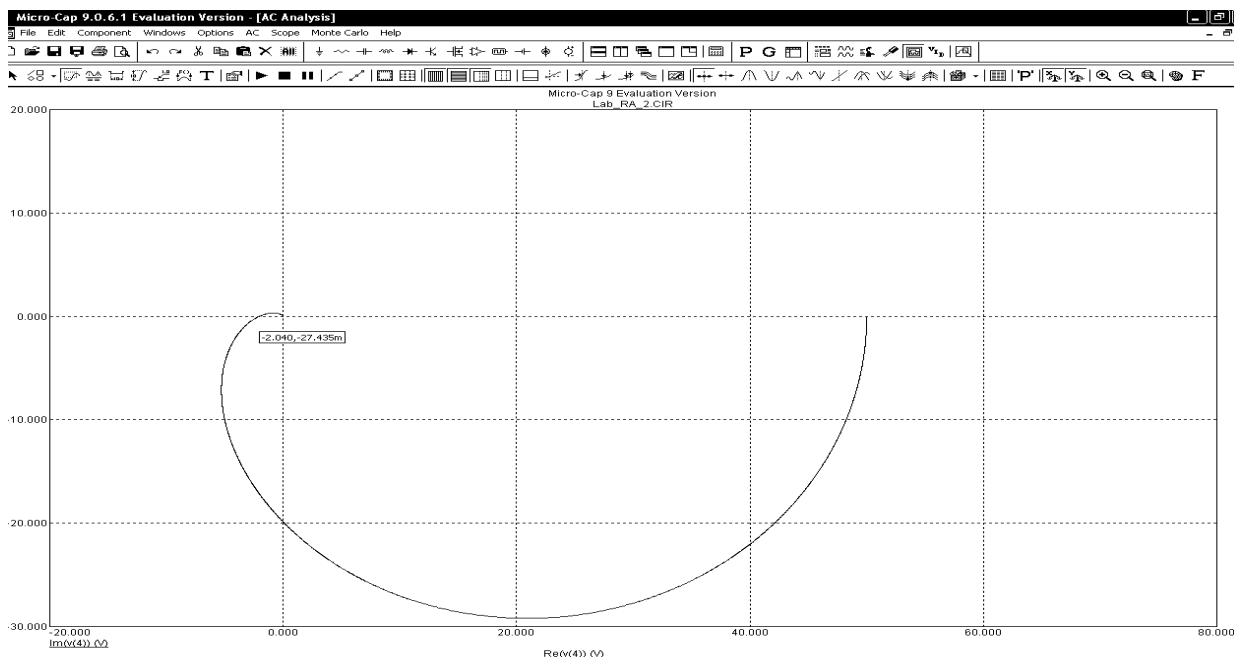


Рисунок 2.5 – Пример построения амплитудно-фазовой частотной характеристики (годографа)

Определение параметров частотного анализа (например, запасов устойчивости по годографу Найквиста) производится непосредственно по графикам частотных характеристик. Подводя курсор мыши к любой точке графика, около курсора появится небольшое окно с указанием параметров, соответственно, по оси X и по оси Y, как показано на рисунке 2.6. Графики для каждого узла схемы выделяются разным цветом и соответствующими обозначениями в нижней части графика.

3. Подготовка к работе

- 3.1. Ознакомиться с методами анализа устойчивости замкнутой системы с помощью частотных и алгебраических критериев, а также определения запасов устойчивости по годографу и логарифмическим частотным характеристикам. Краткие сведения по критериям устойчивости приведены в приложении 2, а также в электронном конспекте лекций (Лекция 10).
- 3.2. Для автоматической замкнутой следящей системы, состоящей из трех последовательно соединенных инерционных звеньев, определить (с помощью метода Гурвица (либо через выражения для амплитудно - частотной $A(\omega)$ и фазо - частотной $\varphi(\omega)$ характеристик) критический коэффициент передачи $K_{кр}$, соответствующий границе устойчивости при одинаковых постоянных времени звеньев $T_1=T_2=T_3$. Поскольку форма годографа Найквиста при одинаковых постоянных времени не зависит от их абсолютных значений, можно принять $T_1=T_2=T_3 = 1$.
- 3.3. Выбрать из таблицы П2 приложения 1 вариант структуры системы по номеру варианта (последняя цифра студенческого билета). По выбранной структуре (параметрам) системы записать передаточную функцию

разомкнутой системы с учетом вычисленных коэффициентов a_i и b_i для трех вариантов параметров.

3.4. Для выбранного варианта структуры системы (таблица 2.1) записать характеристическое уравнение замкнутой системы с учетом коэффициентов c_i трех вариантов параметров.

Таблица 2.1 – Варианты структуры и параметров систем

№ вар.	Передаточная функция разомкнутой системы	Параметры системы		
		1 вариант	2 вариант	3 вариант
1.	$\frac{K(1+pT_1)}{p^2(1+pT_2)}$	K=10; T ₁ =0.1 с; T ₂ =1.0 с;	K=10; T ₁ =0.5 с; T ₂ =1.0 с;	K=80; T ₁ =1.0 с; T ₂ =0.5 с;
2.	$\frac{K}{p(1+pT_1)^2(1+pT_2)}$	K=10; T ₂ =0.5 с; T ₃ =1.5 с	K=20; T ₂ =0 с; T ₃ =1 с	K=30; T ₂ =0 с; T ₃ =0.2 с
3.	$\frac{K(1+pT_1)}{(1+pT_2)^3(1+pT_3)}$	K=12; T ₁ =0.1 с; T ₂ =0.2 с; T ₃ =0.2 с	K=12; T ₁ =1.2 с; T ₂ =0.2 с; T ₃ =0.1 с	K=20; T ₁ =1.2 с; T ₂ =0.2 с; T ₃ =0.1 с
4.	$\frac{p^2(1+pT_1)}{(1+pT_2)^4}$	K=8; T ₁ =0.2 с; T ₂ =1.5 с	K=120; T ₁ =0.2 с; T ₂ =1.5 с	K=120; T ₁ =0.2 с; T ₂ =0.2 с
5.	$\frac{Kp}{(1+pT_1)^4}$	K=8; T ₁ =0.5 с	K=8; T ₁ =0.05с	K=20; T ₁ =1.5 с
6.	$\frac{Kp(1+pT_1)}{(1+pT_2)^4}$	K=10; T ₁ =0.5 с; T ₂ =1.5 с	K=10; T ₁ =2.0 с; T ₂ =1 с	K=50; T ₁ =2.0 с; T ₂ =0.5 с
7.	$\frac{Kp(1+pT_1)}{(1+pT_2)^3}$	K=10; T ₁ =0.5 с; T ₂ =1.5 с	K=10; T ₁ =2.0 с; T ₂ =1 с	K=50; T ₁ =2.0 с; T ₂ =0.5 с
8.	$\frac{K(1+pT_1)}{p(1+pT_2)^2(1+pT_3)}$	K=6; T ₁ =0.5 с; T ₂ =1.0 с; T ₃ =0.2 с;	K=15; T ₁ =0.5 с; T ₂ =1.0 с; T ₃ =0.2 с;	K=15; T ₁ =0.02 с; T ₂ =1.0 с; T ₃ =2.0 с;
9.	$\frac{K(1+pT_1)^2}{(1+pT_2)^2(1+pT_3)}$	K=100; T ₁ =2.0 с; T ₂ =0.1 с; T ₃ =0.2 с	K=100; T ₁ =0.5 с; T ₂ =1.0 с; T ₃ =0.8	K=10; T ₁ =0.5 с; T ₂ =1.0 с; T ₃ =0.8
0.	$\frac{K(1+pT_1)}{(1+pT_2)^4}$	K=1; T ₁ =0.002 с; T ₂ =0.02 с	K=10; T ₁ =0.02 с; T ₂ =0.002 с	K=10; T ₁ =0.002с; T ₂ =0.02 с

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запустить программу Micro Cap (по указанию преподавателя), открыть файл lab_RA_2, после чего на экране должна появиться схема лабораторной установки, показанная на рисунке 2.3.

4.2. Исследовать устойчивость замкнутой следящей системы, состоящей из трех последовательно соединенных инерционных звеньев. Для этого:

- При $T_1=T_2=T_3=1$, меняя коэффициент передачи системы (рекомендуемый диапазон изменения $K = 2 \div 20$), получить:

- Годографы Найквиста для систем: устойчивой, неустойчивой и находящейся на границе устойчивости. Зарисовать полученные годографы в отчет. Для устойчивой системы определить запас устойчивости Найквиста. Запас устойчивости можно определить либо по годографу, либо по логарифмическим частотным характеристикам (приложение 2). При коэффициенте усиления, соответствующем устойчивой системе, изменить (увеличить или уменьшить) постоянную времени одного из звеньев (например, $T_1 = T_2 = 1$, $T_3 = 0.2$), соответственно изменив коэффициенты передаточной функции. Определить, как при этом изменился запас устойчивости?

- Годографы Михайлова для систем: для устойчивой, неустойчивой и находящейся на границе устойчивости (для тех же параметров звеньев).

4.3. Исследовать устойчивость системы по заданной передаточной функции (см. п. 3.3). Для этого ввести либо передаточную функцию разомкнутой системы, либо характеристическое уравнение замкнутой системы. Для этих функций исследовать, соответственно, годографы Найквиста и Михайлова, сделать вывод об устойчивости и определить запасы устойчивости (для устойчивых систем по годографу Найквиста). Годографы необходимо зарисовать для отчета.

4.4. Повторить исследования по п.4.3 для других вариантов параметров, указанных в таблице 2.1.

Указание: В некоторых случаях необходимо изменить диапазон частот для более детального исследования годографа Михайлова или годографа Найквиста. Как правило, поведение годографа Михайлова вблизи точки $(0, j0)$ можно увидеть более подробно на низких частотах. Поэтому для ответа на вопрос: «Будет ли система устойчива, охватывает ли годограф точку $(0, j0)$, последовательно обходя квадранты комплексной плоскости?» в ячейке «Frequency Range» рекомендуется взять меньшую верхнюю частоту, например $1E3,0.001$ или даже $1E2,0.001$ (оптимальный подбор определяется экспериментальным путем).

Поведение годографа Найквиста вблизи точки $(-1, j0)$ более подробно можно исследовать на высоких частотах, особенно для годографов разомкнутого типа, когда в передаточной функции есть одно или несколько интегрирующих звеньев. В этом случае на низких частотах коэффициент передачи сильно возрастает, что при выборе опции «Автомасштаб» нормирует всю характеристику так, чтобы она полностью вошла в пределы экрана. Таким образом, исследование поведения годографа вблизи единичной окружности не представляется возможным. Поэтому для ответа на вопрос: «Будет ли система устойчива, охватывает ли годограф точку $(-1, j0)$, если нет, то с каким запасом устойчивости?» в ячейке «Frequency Range» рекомендуется взять большую нижнюю частоту, например $1E6,1E2$.

Для примера, на рисунке 1.8 показан годограф комплексного коэффициента передачи, содержащего одно интегрирующее и два инерционных звена. Левый график изображен в масштабе $1E6, 0.001$. Таким образом, нижняя частота составляет 0.001 Гц. Как видно из графика, модуль вектора на нижней частоте составляет сотни тысяч, и после нормировки форма годографа выродилась в прямые линии. Правый график построен в масштабе $1E6, 1E2$. Форма годографа позволяет исследовать устойчивость вблизи точки $(-1, j0)$. Если после изменения масштаба и запуска режима частотного анализа форма кривой будет не плавной, а

кусочно-ломаной, можно повторно запустить частотный анализ (Run), масштаб будет автоматически пересчитан и форма кривой сгладится.

5. *Содержание отчета*

5.1. Цель работы.

5.2. Структурные схемы исследуемых систем автоматического регулирования, представленные в виде соединения типовых динамических звеньев, с указанием вариантов параметров.

5.3. Результаты предварительных расчетов:

- вывод значения $K_{кр}$, выполненный по методу Гурвица, или через выражения для $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$;
- таблица рассчитанных значений коэффициентов для заданных вариантов передаточной функции.

5.4. Годографы Найквиста и Михайлова для исследуемых систем. Запасы устойчивости, определенные по экспериментальным данным (для устойчивых систем).

5.6. Выводы, объясняющие влияние структуры системы и ее параметров на устойчивость замкнутой системы автоматического регулирования.

5.7. Письменные ответы на вопросы, приведенные в п.6.

6. *Вопросы для защиты*

В процессе выполнения работы и оформления отчета необходимо ответить на следующие вопросы.

1. Что такое устойчивость замкнутой системы? Перечислите методы определения устойчивости.
2. Какое следствие теоремы Ляпунова положено в основу всех критериев устойчивости? Что такое критерий устойчивости?
3. Какая связь между корнями характеристического уравнения и видом переходного процесса?
4. В чем суть алгебраических критериев устойчивости? Как сформировать матрицу Гурвица по характеристическому уравнению замкнутой системы?
5. Сформулируйте критерии устойчивости Михайлова и Найквиста. Приведите примеры годографов Михайлова и Найквиста для устойчивых и неустойчивых систем.
6. В чем суть метода чередующихся корней?
7. Что такое запас устойчивости? Как определить запас устойчивости Найквиста по АФХ? по ЛАЧХ и ЛФЧХ?

Лабораторная работа №3

Исследование ошибки регулирования при детерминированных воздействиях

1. Цель работы

Исследование влияния структуры и параметров замкнутой линейной стационарной САУ на величину ошибки регулирования и параметры переходного процесса при детерминированных воздействиях.

2. Описание лабораторной установки

Исследование качества регулирования при детерминированных воздействиях производится методом компьютерного моделирования с применением программы Micro Cap (v.9.0). Структурная схема исследования замкнутой следящей системы автоматического регулирования приведена на рисунке 3.1.

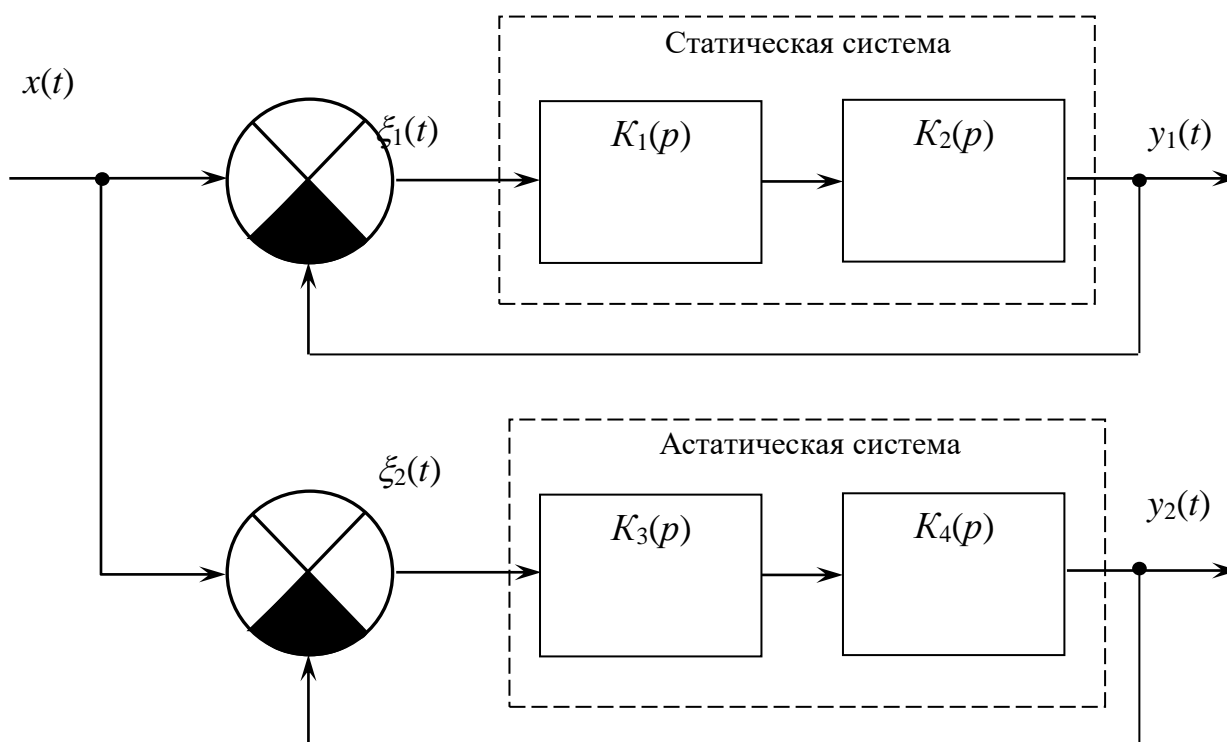


Рисунок 3.1 - Структурная схема исследования качества регулирования

Для сравнения, свойства статической и астатической систем исследуются одновременно, при одном входном воздействии $x(t)$. Математическая модель задается передаточной функцией, соответственно, $K_1(p)$, $K_1(p)$ для статической системы; $K_3(p)$, $K_3(p)$ для астатической системы. Структура систем и передаточные функции для различных вариантов построения указаны в таблице 3.1.

Модель элемента, заданная в виде передаточной функции (рисунок 3.2), в среде Micro Cap описывается с помощью зависимого источника напряжения, управляемого напряжением $E1$, в котором функциональная связь между входной и выходной переменной задается с применением преобразования Лапласа.

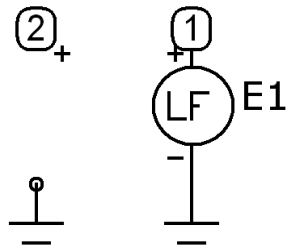


Рисунок 3.2 – Модель зависимого источника, описываемого с применением преобразования Лапласа.

Этот элемент обозначается как Laplace Sources и его описание сводится к уравнению, записанному через оператор Лапласа в окне параметров элемента.

Таким образом, схема лабораторной установки, изображенная в стандарте Mi-co Cap, может быть представлена в следующем виде:

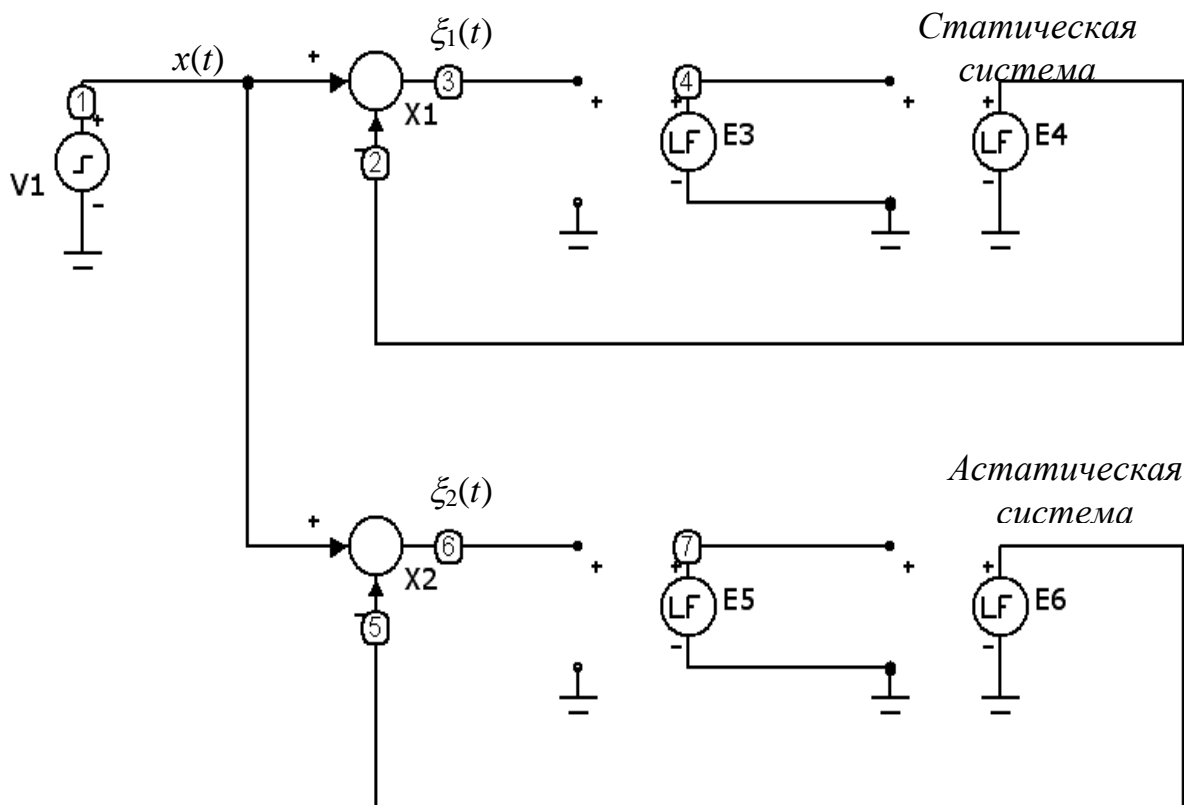


Рисунок 3.3 – Схема лабораторной установки.

Как видно из рисунка, каждая система состоит из двух звеньев: E3, E4 – для статической системы и E4, E5 – для астатической. Ошибка регулирования $\xi(t)$ определяется, соответственно, в узлах (2) и (6). Следует отметить, что в зависимости от точки снятия выходного параметра, исследуемая замкнутая система будет являться либо **системой слежения** (выходной узел, соответственно 2 или 5), либо **системой стабилизации** (выходной узел, соответственно 4 или 7). Следящая система должна как можно точнее отслеживать изменение входного параметра (стремиться к нему в установившемся режиме), для чего применяется 100%-я отрицательная обратная связь. Система стабилизации предназначена для

устранения нестабильности входного параметра, то есть в установившемся режиме изменение выходного параметра должно стремиться к нулю. Независимо от назначения системы, ошибка регулирования на выходе вычитателя должна стремиться к нулю.

В отличие от статической системы, астатическая система должна содержать хотя бы одно интегрирующее звено, причем количество интегрирующих звеньев определяет порядок астатизма системы. С повышением порядка астатизма уменьшается (либо устраняется) ошибка регулирования, даже при сложных функциях входного воздействия, но ухудшается устойчивость замкнутой системы (вследствие дополнительных фазовых сдвигов, вносимых интегрирующими звеньями), то есть без применения специальных корректирующих звеньев система может самовозбудиться. В данной работе исследуется система с астатизмом первого порядка.

Для временного анализа процессов и ошибки регулирования на вход системы подается сигнал от генератора импульсного сигнала V1. Параметры сигнала задаются в специальном окне, которое открывается после двойного щелчка левой кнопки мыши на изображении импульсного генератора. Вид окна показан на рисунке 3.4. С помощью генератора импульсного сигнала можно получить сигналы либо прямоугольной, либо пилообразной формы.

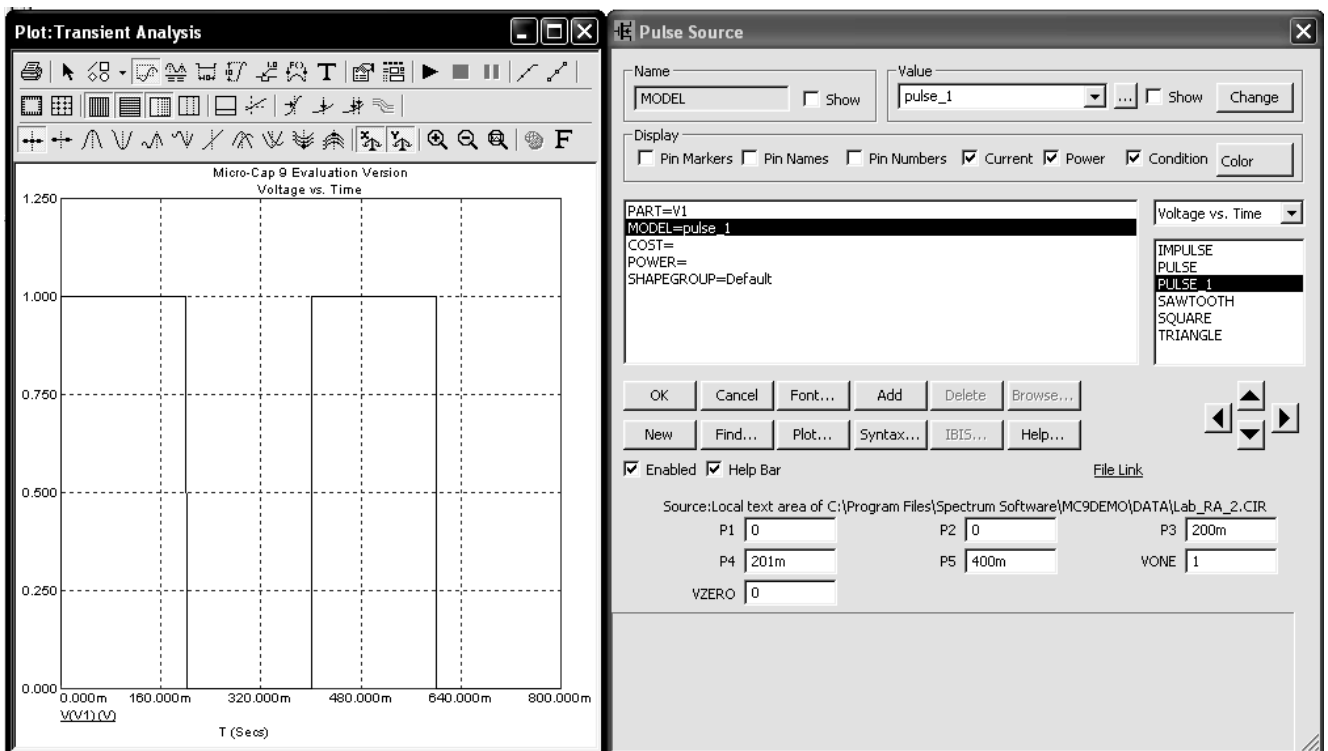


Рисунок 3.4 – Окно установки параметров прямоугольного сигнала

Прямоугольный импульсный сигнал применяется для исследования воздействия скачка напряжения постоянной амплитуды на качество регулирования и параметры переходного процесса (переходная характеристика).

Для получения сигнала, описываемого линейно возрастающей функцией, формируется пилообразное напряжение, для чего время перехода от уровня нуля

до уровня единицы (P2) берется равным длительности импульса, как показано на рисунке 3.5.

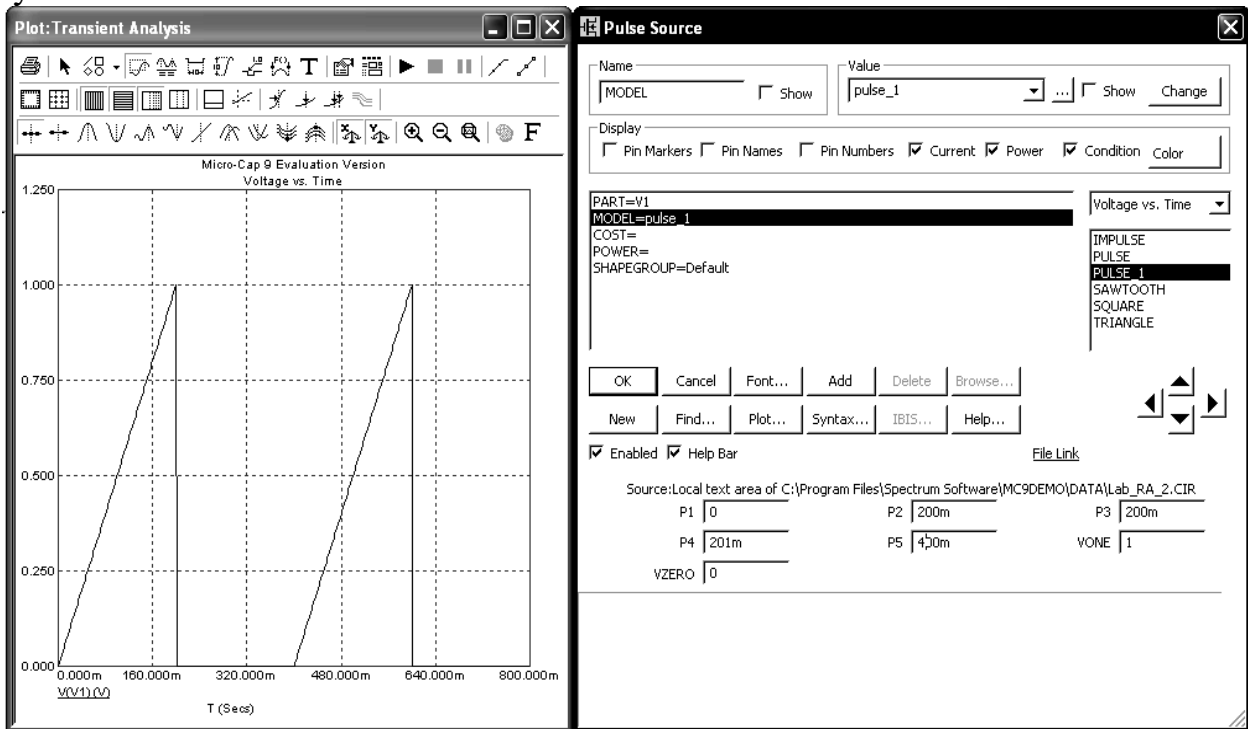


Рисунок 3.5 – Окно установки параметров пилообразного сигнала

Передаточная функция, выраженная через преобразование Лапласа задается в окне параметров Laplace Sources, которое открывается двойным щелчком мыши на изображении зависимого источника, показанного на рисунке 3.2 (см. пояснения к работе №1).

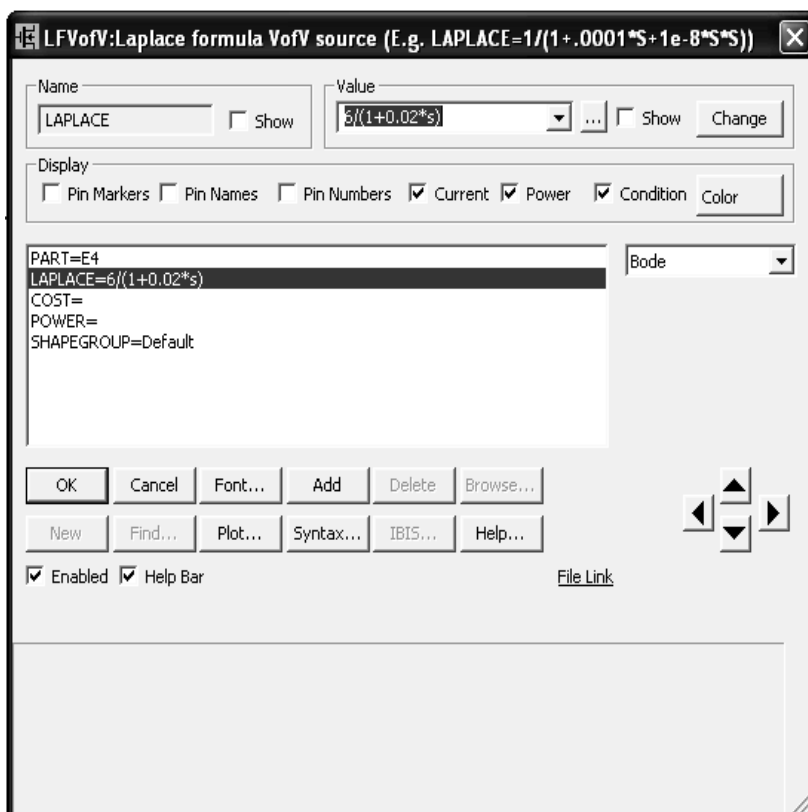


Рисунок 3.6 – Окно установки параметров передаточной функции

Напоминаем, что параметр Лапласа в формате Micro Cap и ряде учебников обозначается как «S» в отличие от электронных лекций и данных методических указаний, где он обозначается через «P». При выборе опции «LAPLACE=» в ячейке «Value» записывается заданная передаточная функция, как показано на рисунке 3.6. За исключением параметра «s», все остальные параметры должны вводиться в виде числовых значений.

Временной анализ производится выбором в основном меню опции «Analysis» и «Transient». В этом случае появляется окно пределов анализа, изображенное на рисунке 1.6.

Запуск временного анализа выполняется щелчком левой кнопки мыши на кнопке «Run». После этого появляются графики временных характеристик, примерный вид которых показан на рисунке 3.7.

Определение параметров переходного процесса производится непосредственно по графику. Подводя курсор мыши к любой точке графика, около курсора появится небольшое окно с указанием временных и амплитудных параметров, как показано на рисунке 3.8. Графики для каждого узла схемы выделяются разным цветом и соответствующими обозначениями в нижней части графика.

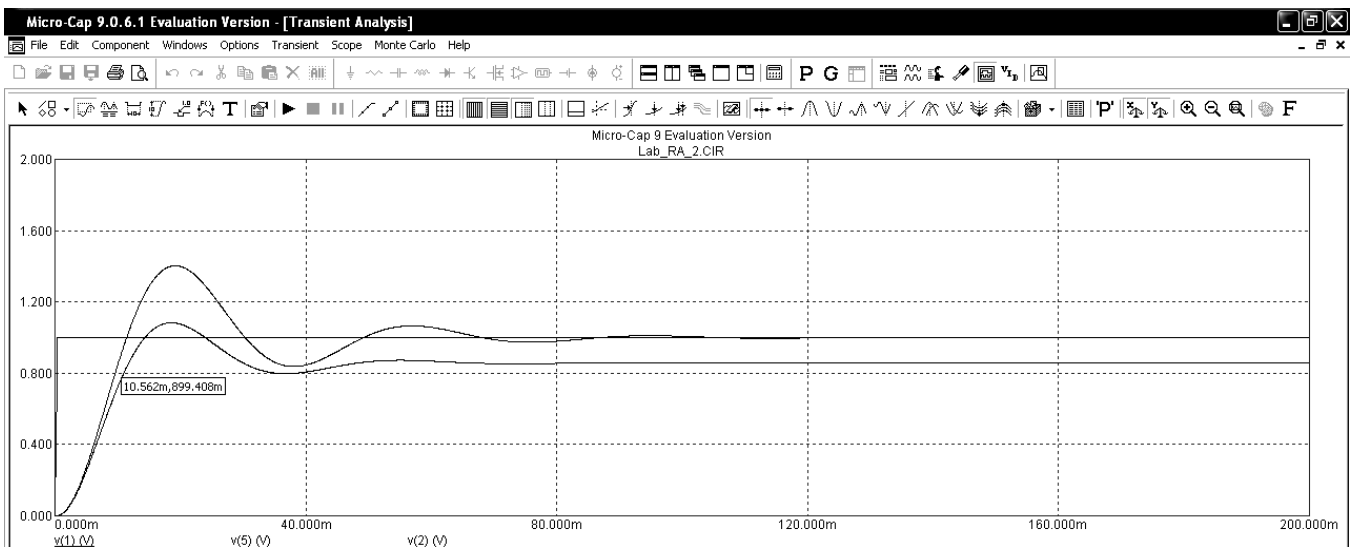


Рисунок 3.7 – Окно временного анализа

3. Подготовка к работе

3.1. Выбрать структуру статической и астатической системы в соответствии с таблицей 3.1.

Таблица 3.1 – Варианты исследования качества регулирования

№ вар.	Статическая система		Астатическая система	
	$K_1(s)$	$K_2(s)$	$K_3(s)$	$K_4(s)$
1	6	$1/(1+0.02*s)$	6	$1/(0.02*s)$

2	$1/(1+0.01*s)$	$2/(1+0.001*s)$	$1/(1+0.01*s)$	$2/(0.001*s)$
3	$2/(1+0.02*s)$	$1/(1+0.02*s)$	$2/(1+0.02*s)$	$1/(0.02*s)$
4	7	$1/((1+0.02*s)*(1+0.005*s))$	7	$1/(0.02*s*(1+0.005*s))$
5	$2/(1+0.1*s)$	$2/(1+0.001*s)$	$2/(1+0.1*s)$	$2/(0.001*s)$
6	4	$1/(1+0.01*s)$	4	$1/(0.01*s)$
7	$1/(1+0.02*s)$	$3/(1+0.001*s)$	$1/(1+0.02*s)$	$3/(0.001*s)$
8	$2/(1+0.03*s)$	$3/(1+0.01*s)$	$2/(1+0.03*s)$	$3/(0.01*s)$
9	5	$1/((1+0.02*s)*(1+0.005*s))$	5	$1/(0.02*s*(1+0.005*s))$
0	$1/(1+0.15*s)$	$5/(1+0.002*s)$	$2/(1+0.15*s)$	$2/(0.002*s)$

3.2. Записать передаточную функцию разомкнутой системы.

3.3. Записать характеристическое уравнение замкнутой системы и передаточную функцию ошибки регулирования (лекция 11).

3.4. Определить коэффициенты ошибки и вывести формулу оригинала ошибки регулирования для двух вариантов входного воздействия: $x(t)=1$ и $x(t)=0.2t$ (лекция 11, приложение 3).

3.5. Построить временную зависимость установившейся ошибки.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запустить программу Micro Cap (по указанию преподавателя).

4.2. Открыть файл **lab_ra_3.cir**.

4.3. Описать функциональные блоки Laplace Sources в соответствии с заданным вариантом, для чего открыть окно установки параметров зависимых источников (E1, E2, E3, E4) и записать заданные передаточные функции (см. п.2).

4.4. Установить ступенчатое напряжение на генераторе V1 (параметры сигнала и методика установки параметров прямоугольных импульсов изложены в п.2).

4.5. Исследовать временные функции ошибки регулирования для статической и астатической системы:

- привести полученные осциллограммы в отчете;
- определить характер ошибки регулирования;
- определить все возможные параметры переходного процесса, используя прямые методы оценки качества (лекция 12).

4.6. Установить линейно нарастающее напряжение на генераторе V1 (параметры сигнала и методика установки параметров изложены в п.2).

4.7. Исследовать временные функции ошибки регулирования для статической и астатической системы при линейно нарастающем напряжении:

- привести полученные осциллограммы в отчете;
- определить характер ошибки регулирования.

5. Содержание отчета

- 5.1. Цель работы.
- 5.2. Структурная схема исследуемой системы автоматического регулирования и схема лабораторной установки в формате Micro Cap.
- 5.3. Результаты предварительных расчетов.
- 5.4. Временные зависимости ошибки регулирования для статической и астатической систем при различных входных воздействиях.
- 5.5. Результаты определения параметров переходного процесса для статической и астатической систем.
- 5.5. Сравнение предварительных расчетов и результатов моделирования, выводы по работе.

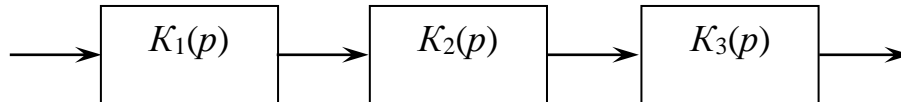
6. Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

- 6.1. Дать определение понятиям: ошибка регулирования, коэффициент передачи по ошибке.
- 6.2. Перечислить методы определения ошибки регулирования и дать им краткую характеристику.
- 6.3. Чем отличаются статические системы автоматического регулирования от астатических?
- 6.4. Какой порядок астатизма необходимо ввести в следящую автоматическую систему, чтобы обеспечить значение установившейся ошибки $\xi(t)=0$, если задающее воздействие описывается ограниченно дифференцируемой функцией?
- 6.5. Покажите качественную связь между переходной характеристикой, годографом и ЛАЧХ автоматической системы минимально-фазового типа. Можно ли по виду ЛАЧХ разомкнутой системы судить об устойчивости замкнутой системы?

ЗАДАНИЯ

для контрольной работы по курсу «Радиоавтоматика»

1. Для разомкнутой системы, состоящей из последовательного соединения трех типовых звеньев:

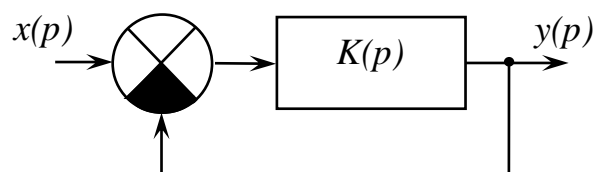


- a) записать общую передаточную функцию;
- b) записать дифференциальное уравнение;
- c) изобразить ЛАЧХ и ЛФЧХ;
- d) построить АФЧХ (годограф).

Таблица П1.1 – Типы и параметры системы, состоящей из последовательно соединенных типовых динамических звеньев.

№ вариант а	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$K_1(p)$	инерц	интегр	форси р	инерц	инерц	форсир	интегр	дифф	форсир	инерц
	$T_1=0.1$		$T_1=0.01$	$T_1=0.1$	$T_1=0.1$	$T_1=0.1$			$T_1=0.1$	$T_1=0.01$
	$K_1=1$	$K_1=10$	$K_1=1$	$K_1=1$	$K_1=1$	$K_1=1$	$K_1=10$	$K_1=10$	$K_1=10$	$K_1=1$
$K_2(p)$	инерц	форси р	инерц	инерц	инерц	форсир	интегр	инерц	инерц	инерц
	$T_2=0.001$	$T_1=0.1$	$T_1=0.1$	$T_1=0.001$	$T_1=0.01$	$T_1=0.01$	$T_1=1$	$T_1=0.1$	$T_1=0.01$	$T_1=0.001$
	$K_2=10$	$K_1=1$	$K_1=10$	$K_1=10$	$K_1=10$	$K_1=1$		$K_1=1$	$K_1=10$	$K_1=10$
$K_3(p)$	интегр	инерц	интегр	форсир	дифф	колебат	инерц	колебат	интегр	форсир
	$T_3=0.1$	$T_1=0.01$	$T_1=1$	$T_1=0.01$		$T_1=0.001$	$T_1=0.01$	$T_1=0.01$	$K_1=10$	$T_1=0.1$
		$K_1=10$		$K_1=1$	$K_1=10$	$K_1=10,$ $\xi=1$	$K_1=10$	$K_1=10,$ $\xi=0.1$		$K_1=1$

2. Исследовать устойчивость замкнутой следящей системы:



- a) с применением критерия Гурвица;
- b) с применением критерия Найквиста;

с) с применением критерия Михайлова (используя метод чередующихся корней)

Структура замкнутой системы для анализа устойчивости с применением заданного критерия устойчивости приведена в таблице П1.2.

Таблица П1.2 – Типы и параметры звеньев замкнутой системы

№ варианта	Структура системы	Критерий	Параметры
1	$K(p) = \frac{K}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)(1 + pT_3)}$	Гурвица	$K=25; T_1=0,01; T_2=0,1; T_3=0,05$
2	$K(p) = \frac{K}{p(1 + pT_1)(1 + pT_2)}$	Гурвица	$K=50; T_1=0,01; T_2=0,1;$
3	$K(p) = \frac{pK}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)^2}$	Михайлова	$K=200; T_1=0,01; T_2=0,1; T_3=0,05$
4	$K(p) = \frac{K(1 + pT_1)}{p(1 + pT_2)(1 + pT_3)^2}$	Михайлова	$K=50; T_1=0,5; T_2=0,1; T_3=0,05$
5	$K(p) = \frac{K}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)(1 + pT_3)}$	Найквиста	$K=125; T_1=0,5; T_2=0,1; T_3=0,05$
6	$K(p) = \frac{K}{p(1 + pT_1)(1 + pT_2)}$	Найквиста	$K=150; T_1=0,04; T_2=0,2;$
7	$K(p) = \frac{pK}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)^2}$	Гурвица	$K=20; T_1=0,02; T_2=0,2; T_3=0,04$
8	$K(p) = \frac{K(1 + pT_1)}{p(1 + pT_2)(1 + pT_3)^2}$	Михайлова	$K=50; T_1=0,1; T_2=0,5; T_3=0,05$
9	$K(p) = \frac{K}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)(1 + pT_3)}$	Найквиста	$K=25; T_1=0,2; T_2=0,1; T_3=0,5$
0	$K(p) = \frac{K}{p(1 + pT_1)(1 + pT_2)}$	Гурвица	$K=5; T_1=0,01; T_2=1;$

Указание:

- При использовании критерия Гурвица сделать вывод об устойчивости замкнутой системы, а также определить критический коэффициент передачи, при котором система находится на границе устойчивости.
- При использовании критерия Михайлова найти (используя метод чередующихся корней) точки пересечения годографом Михайлова вещественных и мнимых осей, сделать вывод об устойчивости замкнутой системы, изобразить примерный вид годографа Михайлова.
- При использовании критерия Найквиста анализ устойчивости замкнутой системы можно выполнить либо графически, путем построения ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы (с анализом выполнения условий самовозбуждения) и определения запасов устойчивости (для устойчивой системы), либо используя

результатирующие выражения для модуля и фазы комплексного коэффициента передачи (найти частоту, для которой выполняется баланс фаз и определить, будет ли модуль коэффициента передачи на данной частоте больше или меньше единицы).

□ Примеры решения задач с использованием критериев устойчивости приведены в конспекте лекций.

3. Определить ошибку регулирования для детерминированного воздействия (используя метод коэффициентов ошибок). Построить временные зависимости задающего воздействия и ошибки регулирования.

Таблица П1.3 – Типы и параметры звеньев замкнутой следящей системы

№ варианта	Передаточная функция разомкнутой системы	Задающее воздействие	Параметры
1	$K(p) = \frac{K}{(1 + pT_1)}$	$x(t) = 2 + 0,1t$	$K=25; T_1=0,01$
2	$K(p) = \frac{K}{p(1 + pT_1)}$	$x(t) = 2t$	$K=50; T_1=0,01$
3	$K(p) = \frac{K}{p^2(1 + pT_1)}$	$x(t) = 1 + 0,5t^2$	$K=200; T_1=0,01$
4	$K(p) = \frac{K}{(1 + pT_1)^2}$	$x(t) = 10 + 0,2t$	$K=50; T_1=0,5$
5	$K(p) = \frac{K}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)}$	$x(t) = 2$	$K=125; T_1=0,5; T_2=0,1$
6	$K(p) = \frac{K}{(1 + pT_1)}$	$x(t) = 1 + 0,2t$	$K=150; T_1=0,04$
7	$K(p) = \frac{K}{p(1 + pT_1)}$	$x(t) = 10 + 0,2t$	$K=20; T_1=0,02$
8	$K(p) = \frac{K}{p^2(1 + pT_1)}$	$x(t) = 1 + 0,2t$	$K=50; T_1=0,1$
9	$K(p) = \frac{K}{(1 + pT_1)^2}$	$x(t) = 2t$	$K=25; T_1=0,2$
0	$K(p) = \frac{K}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)}$	$x(t) = 10 + 0,2t$	$K=5; T_1=0,1; T_2=1;$

Критерии устойчивости линейных стационарных САР

Одним из основных требований, предъявляемых к качеству функционирования систем автоматического регулирования, является требование устойчивости. *Линейная система называется устойчивой, если при выведении ее внешним воздействием из состояния равновесия она возвращается в него после прекращения этого воздействия.*

Анализ устойчивости САР выполняется путем решения характеристического уравнения

$$G(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0, \quad (\text{П.2.1})$$

где a_i - коэффициенты полинома знаменателя передаточной функции замкнутой системы, и анализа расположения корней этого уравнения на комплексной плоскости.

В соответствии с теоремой А.М. Ляпунова для устойчивости линеаризованной САР необходимо и достаточно, чтобы корни характеристического уравнения находились в левой половине плоскости комплексного переменного, т.е. вещественные части корней были отрицательными.

Из-за сложности решения характеристических уравнений высоких порядков важное значение приобретают так называемые *критерии устойчивости*, под которыми понимаются специальные правила, позволяющие выполнить анализ расположения корней характеристического уравнения, минуя вычисление самих корней.

Все известные критерии устойчивости основаны на теореме Ляпунова и делятся на две большие группы: алгебраические и частотные.

Алгебраические критерии, к которым относятся, например, критерии Рауса, Гурвица, Лъенара - Шипара и другие, основаны на анализе характеристического уравнения системы.

Так, наиболее распространенный критерий Гурвица (1895г.) основан на построении из коэффициентов характеристического уравнения (П.2.1) специальной квадратной матрицы ($n \times n$):

$$\begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_0 \end{vmatrix}, \quad (\text{П.2.2})$$

которая заполняется по следующему правилу:

1. По главной диагонали в порядке убывания индексов вписываются все коэффициенты уравнения (П.1) от a_{n-1} до a_0 .

2. Каждый из столбцов дополняется вверх - коэффициентами с убывающими индексами, вниз - с возрастающими.
3. На место отсутствующих коэффициентов ставят нули.

В соответствии с **критерием Гурвица система будет устойчива, если при $a_0 > 0$ определитель матрицы Гурвица и определители всех ее диагональных миноров положительны. В противном случае система неустойчива.** Таким образом, алгоритм Гурвица состоит из следующих основных этапов:

1. Составление определителя Гурвица.
2. Вычисление диагональных определителей.
3. Анализ условия положительности этих определителей.

Частотные критерии, к которым относятся критерии Михайлова и Найквиста, позволяют определить устойчивость САР с помощью аналитического или экспериментального исследования частотных характеристик элементов этой системы.

Оригинальный графоаналитический критерий устойчивости САР предложил А.В. Михайлов (1938г.). Согласно **критерию Михайлова, для устойчивости системы с характеристическим многочленом (П.1.) необходимо и достаточно, чтобы при изменении частоты ω от 0 до ∞ изменение аргумента функции $G(j\omega)$ равнялось $n\pi/2$.** Это означает, что годограф $G(j\omega)$ должен пройти против часовой стрелки последовательно n квадрантов, охватывая точку $(0, j0)$. Если последовательность обхода нарушается, то система будет неустойчива. Примеры кривых Михайлова, соответствующих устойчивым (а, б, в, г) и неустойчивым (д, е, ж) системам, показаны на рис. П.2.1.

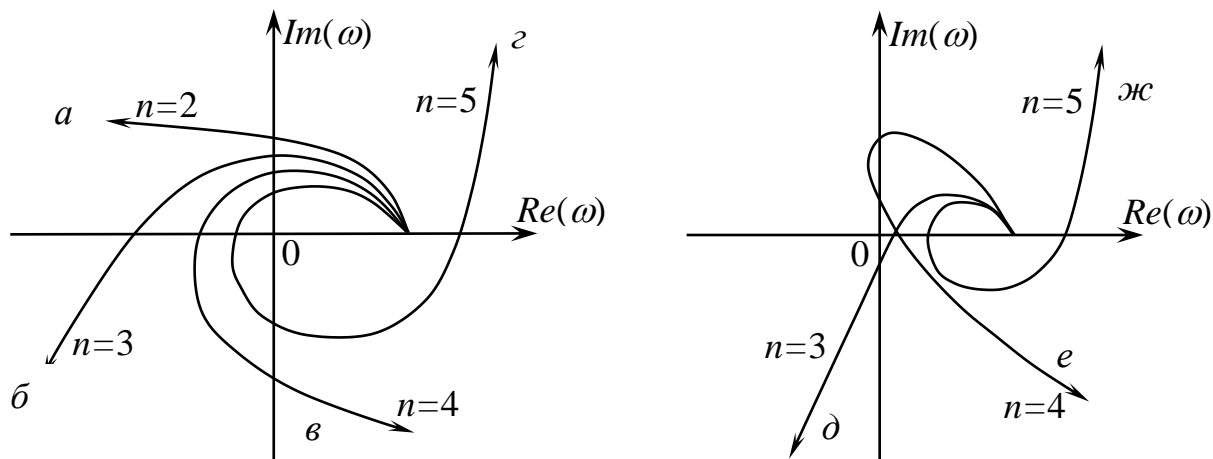


Рисунок П.2.1 – Пример построения годографов Михайлова для устойчивых (а) и неустойчивых (б) систем при различном порядке характеристического уравнения

Алгоритм оценки устойчивости по критерию Найквиста (1932г.) позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по виду комплексного коэффициента передачи разомкнутой системы (1).

В соответствии с **критерием Найквиста, если разомкнутая САР устойчива, то замкнутая САР (с отрицательной обратной связью) также будет устойчива, если годограф разомкнутой САР не охватывает точку с координатами $(-1, j0)$ по часовой стрелке.**

На рисунке П.2.2 изображены примеры годографов разомкнутых САР, соответствующие устойчивым ($a, б$) и неустойчивым ($в, з$) системам.

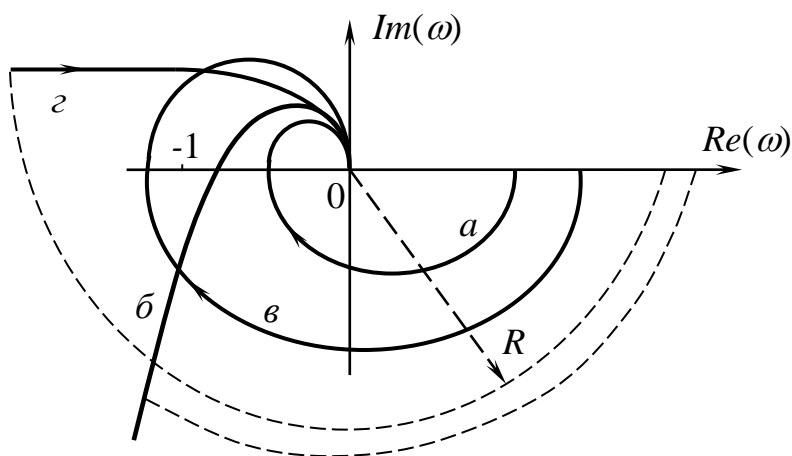


Рисунок П.2.2 – Примеры годографов комплексного коэффициента передачи разомкнутой системы $K(j\omega)$: ($a, б$) – система устойчива; ($в, з$) – система неустойчива.

Для астатических систем при $\omega \rightarrow 0$ может возникнуть неопределенность при определении устойчивости системы, поскольку в этом случае фаза вектора комплексного коэффициента передачи $\varphi(\omega) \rightarrow -\pi/2$, а модуль $|K(j\omega)| \rightarrow \infty$ (рисунок П.2.2 б, з). Чтобы избежать неопределенности, можно провести мысленный эксперимент, соединив окружностью бесконечно большого радиуса (R) действительную ось с началом годографа астатической системы, а затем применить критерий Найквиста.

Для устойчивых систем можно определить **запасы устойчивости** по модулю и по фазе, характеризующие степень удаленности системы от неустойчивого состояния. Запасы устойчивости могут быть определены как по годографу Найквиста, так и по логарифмическим частотным характеристикам.

На рисунке П.2.3 показаны примеры определения запасов устойчивости по модулю h и по фазе $\Delta\varphi(\omega)$.

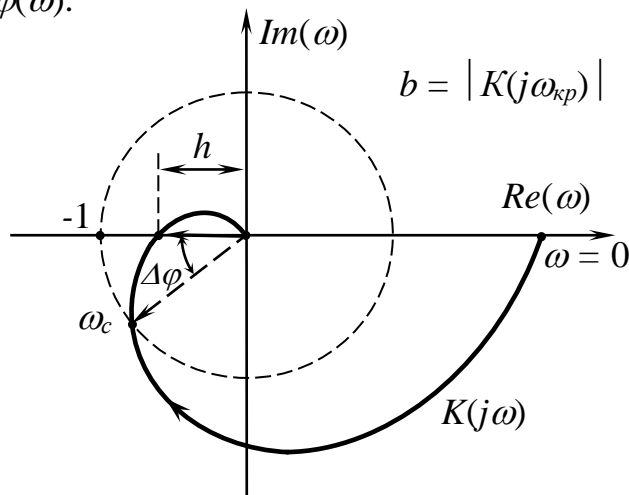


Рисунок П.2.3 – Определение запасов устойчивости по амплитудно-фазовой характеристике разомкнутой системы

Запас устойчивости по модулю (З.У.М.) определяется на частоте, где фаза вектора $\varphi(\omega_1) = -180^\circ$ и показывает, во сколько раз модуль комплексного коэффициента передачи h отличается от единицы: $\text{З.У.М} = 1/h$. Запас устойчивости по фазе З.У.Ф., равный $\Delta\varphi$, определяется на частоте, где модуль вектора $A(\omega_2)=1$ (точка пересечения годографа с окружностью единичного радиуса) и показывает, на сколько градусов фаза вектора отличается от -180° . Недостатком определения запасов устойчивости по годографу является сложность построения амплитудно-фазовой характеристики. Значительно проще провести анализ устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам, используя приведенные выше определения.

На рисунке П.4 показаны примеры определения запасов устойчивости по модулю $\Delta L = 20 \lg h$ и по фазе $\Delta\varphi$ с применением ЛАЧХ и ЛФЧХ.

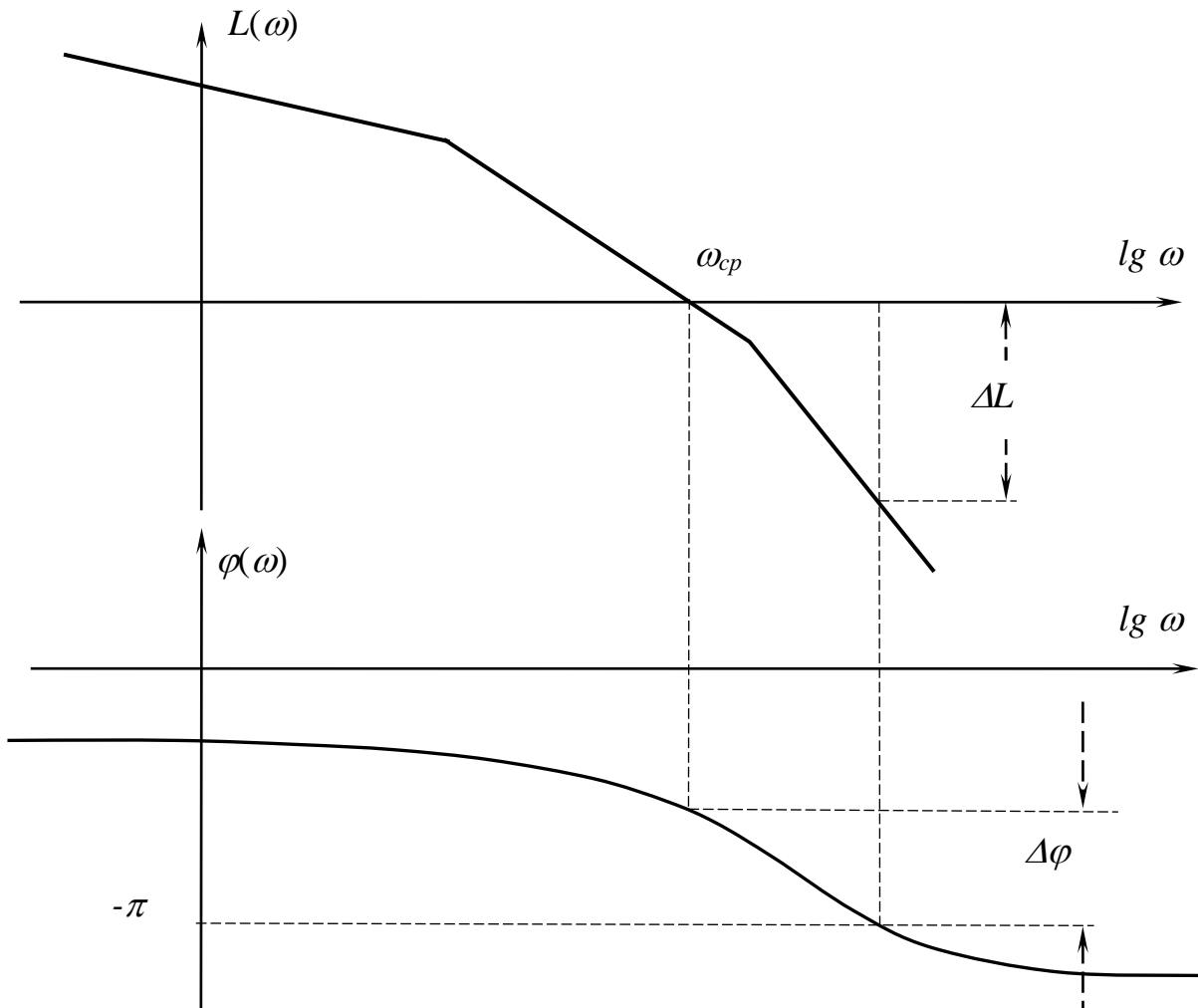


Рисунок П.2.4 – Определение запасов устойчивости по ЛАЧХ и ЛФЧХ

Метод коэффициентов ошибки

Качество работы любой автоматической системы в конечном итоге определяется величиной ошибки $\xi(t)$, равной разности между требуемым и действительным значением регулируемой величины. В следящих автоматических системах:

$$\xi(t) = x(t) - y(t) \quad (\text{П.3.1})$$

Различают ошибки в установившемся и переходном режимах. Одним из методов анализа качества регулирования в установившемся режиме при детерминированных входных воздействиях является метод коэффициентов ошибки. Суть метода заключается в следующем.

Пусть на входе системы действует задающее воздействие, записанное в операторной форме $x(p)$, тогда ошибка регулирования определяется с помощью соотношения:

$$\xi(p) = x(p) K_{\xi}(p), \quad (\text{П.3.2})$$

где $K_{\xi}(p)$ - коэффициент передачи по ошибке регулирования, устанавливающий взаимосвязь изображения ошибки и сигнала, обусловившего эту ошибку.

Разложив функцию $K_{\xi}(p)$ в ряд по возрастающим степеням p в окрестности точки $p = 0$, что соответствует значению установившейся ошибки при $t \rightarrow \infty$, можно записать:

$$K_{\xi}(p) = S_0 + S_1 p + S_2 p^2 + \dots + S_k p^k, \quad (\text{П.3.3})$$

где S_i - коэффициенты ошибки ($i = 0 \dots k$), определяемые из соотношения

$$S_i = \left. \frac{\partial^i K(p)}{\partial p^i} \right|_{p \rightarrow 0} \quad (\text{П.3.4})$$

Поскольку передаточная функция по ошибке $K_{\xi}(p)$ представляет собой дробно-рациональную функцию

$$K_{\xi}(p) = \frac{1}{1 + K(p)} = \frac{A(p)}{G(p)} = \frac{c_0 + c_1 p + c_2 p^2 + \dots + c_n p^n}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n}, \quad (\text{П.3.5})$$

где $A(p)$ - характеристический полином разомкнутой системы; $G(p)$ - характеристический полином замкнутой системы, то разложение $K_{\xi}(p)$ в ряд можно осуществить просто делением числителя на знаменатель, располагая члены полинома в порядке возрастания степеней.

Тогда коэффициенты ошибки находятся по следующим формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_0 = \frac{c_0}{a_0} \\ S_1 = \frac{1}{a_0} \left(c_1 - a_1 \frac{c_0}{a_0} \right) = \frac{1}{a_0} (c_1 - a_1 S_0) \\ S_2 = \frac{1}{a_0} \left[c_2 - a_2 \frac{c_0}{a_0} - \frac{a_1}{a_0} \left(c_1 - \frac{a_1 c_0}{a_0} \right) \right] = \frac{1}{a_0} (c_2 - a_2 S_0 - a_1 S_1) \\ S_3 = \frac{1}{a_0} (c_3 - a_3 S_0 - a_2 S_1 - a_1 S_2) \\ S_4 = \frac{1}{a_0} (c_4 - a_4 S_0 - a_3 S_1 - a_2 S_2 - a_1 S_3) \\ \dots \end{array} \right. \quad (\text{П.3.6})$$

Таким образом, все последующие коэффициенты S_i находятся через предыдущие и через параметры системы, причем, во всех слагаемых S_i в числителе присутствуют коэффициенты c_i , которые исчезают при наращивании астатизма системы. Таким образом, **при увеличении порядка астатизма системы ошибка регулирования будет уменьшаться**. Анализируя выражения (11.18), можно вывести общую формулу для определения i – го коэффициента ошибки:

$$S_i = \frac{1}{a_0} \left(c_i - \sum_{k=0}^{i-1} a_{i-k} S_k \right) = \frac{1}{a_0} \left(c_i - \sum_{k=1}^i a_k S_{i-k} \right) \quad (\text{П.3.7})$$

причем, $c_i \equiv 0$ и $a_k \equiv 0$ при $i, k > n$.

Оригинал ошибки регулирования определяется из дифференциального уравнения:

$$\xi(p) = S_0 x(t) + S_1 \frac{dx(t)}{dt} + \dots + S_k \frac{d^k x(t)}{dt^k}, \quad (\text{П.3.8})$$

причем, функция, описывающая задающее воздействие $x(t)$, может быть либо ограниченно дифференцируемой, то есть иметь ограниченное число производных (например, функция вида at^2), либо абсолютно дифференцируемой (например, функции вида $\sin(x)$, $\ln(x)$, e^x).

Если функция ограниченно дифференцируемая, то есть имеет m – производных, то ошибку регулирования можно уменьшить до нуля, если обеспечить порядок астатизма системы, равный $(m+1)$.

Если функция абсолютно дифференцируемая, то есть для нее существуют все производные, то при возрастании индекса i величина S_i быстро убывает (примерно по закону факториала).

Из соотношений (П.5 - П.8) видно, что все последующие коэффициенты S_i находятся через предыдущие и через параметры системы, причем, во всех слагаемых S_i в числителе присутствуют коэффициенты c_i , которые исчезают при

наращивании порядка астатизма системы. Таким образом, при увеличении порядка астатизма ошибка регулирования будет уменьшаться.

Предположение, что коэффициенты ошибок представляют собой постоянные числа, обуславливает применение этого метода для сравнительно медленно меняющихся входных воздействий $x(t)$, когда можно пренебречь переходной составляющей процесса и рассматривать только вынужденное движение системы.