

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Промышленная электроника»**

**Ю. Е. Котова, В. А. Хананов**

## **ЛИНЕЙНЫЕ НЕПРЕРЫВНЫЕ СИСТЕМЫ**

### **ПРАКТИКУМ**

**по дисциплине «Теория автоматического  
управления» для студентов специальности  
1-53 01 07 «Информационные технологии  
и управление в технических системах»  
дневной формы обучения**

**Гомель 2018**

УДК 681.5.01(075.8)  
ББК 32.965-01я73  
К73

*Рекомендовано научно-методическим советом факультета  
автоматизированных и информационных систем ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 11 от 27.06.2017 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Автоматизированный электропривод» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *В. С. Захаренко*

**Котова, Ю. Е.**  
К73 Линейные непрерывные системы : практикум по дисциплине «Теория автоматического управления» для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» днев. формы обучения / Ю. Е. Котова, В. А. Хананов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 82 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Предназначен для получения и закрепления знаний, требуемых в рамках учебной программы по дисциплине «Теория автоматического управления» на лабораторных занятиях и при самостоятельной работе.

Для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» дневной формы обучения.

УДК 681.5.01(075.8)  
ББК 32.965-01я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2018

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТАТИЧЕСКОЙ САУ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

**Цель работы:** научиться снимать статические характеристики звеньев САУ (систем автоматического управления), определять нелинейность статических характеристик, измерять сигнал рассогласования (ошибки), вычислять коэффициент передачи разомкнутой и замкнутой системы; исследовать, как влияют возмущения и помехи на изменение выходной величины в статической САУ.

#### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

##### 1.1. Понятие статической характеристики САУ

При математическом описании САУ различают статический и динамический режимы работы. *Статическим* (установившимся) режимом называется режим работы САУ, при котором ее характеристики не изменяются во времени.

Передаточные свойства элементов и САУ в статическом режиме описывают с помощью статических характеристик.

*Статическая характеристика элемента* – зависимость выходной величины  $y$  элемента от входной  $x$ :  $y = f(x) = y(x)$  в установившемся статическом режиме (например,  $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ )

Статическая характеристика конкретного элемента может быть задана в аналитическом виде (например,  $y = kx^2$ ) или в виде графика (рис.1.1.1).

Если на вход САУ подаются управляющее воздействие  $x$  и возмущающее воздействие  $z$ , то в общем виде уравнение статического режима работы САУ будет выглядеть следующим образом:  $y = f(x, z)$ , где  $y$  – управляемая величина.

Соответствующие этому уравнению графики называются статическими характеристиками. Когда возмущающее воздействие принимается равным 0, то статическая характеристика САУ по управляющему воздействию описывается уравнением  $y=f(x)$ , и наоборот, когда принимается равным 0 управляющее воздействие, то

статическая характеристика САУ по возмущающему воздействию описывается уравнением  $y = f(z)$ .

На рисунке 1.1.1 приведены статические характеристики различных функциональных элементов САУ.

На рисунке 1.1.1 а) приведена статическая характеристика усилителя. Уравнение статики для него имеет вид  $y = Kx$ . Коэффициент  $K = y/x$ , равный отношению выходной величины к входной называется *коэффициентом усиления* элемента. Если входная и выходная величины элемента имеют разную природу, его называют *коэффициентом передачи*.

Примеры статических характеристик таких элементов приведены на рисунках 1.1.1 б) (статическая характеристика пьезоэлектрического преобразователя давления в напряжение), 1.1.1 в) (статическая характеристика индуктивного датчика), 1.1.1 г) (статическая характеристика сельсина).

Когда на САУ одновременно с управляющим действует возмущающее воздействие, то статическая характеристика задается семейством линий  $y = f(x)$  при различных значениях  $z$ , или  $y = f(z)$  при различных  $x$ . Такой вариант статической характеристики представлен на рисунке 1.1.1б), где на показания датчика давления оказывает влияние температура окружающей среды.

САУ, в которых статические характеристики всех функциональных элементов линейны, называются *линейными*.

В реальных САУ часть составляющих элементов, как правило, имеют нелинейные статические характеристики. Если статическая характеристика хотя бы одного элемента САУ нелинейна, САУ называется *нелинейной*. Для них характерна зависимость коэффициента передачи от величины входного сигнала:  $K = \Delta y / \Delta u \neq const$ , которая может иметь сложную форму и не всегда может быть выражена какой-либо математической зависимостью. В таком случае она задается таблично или графически.

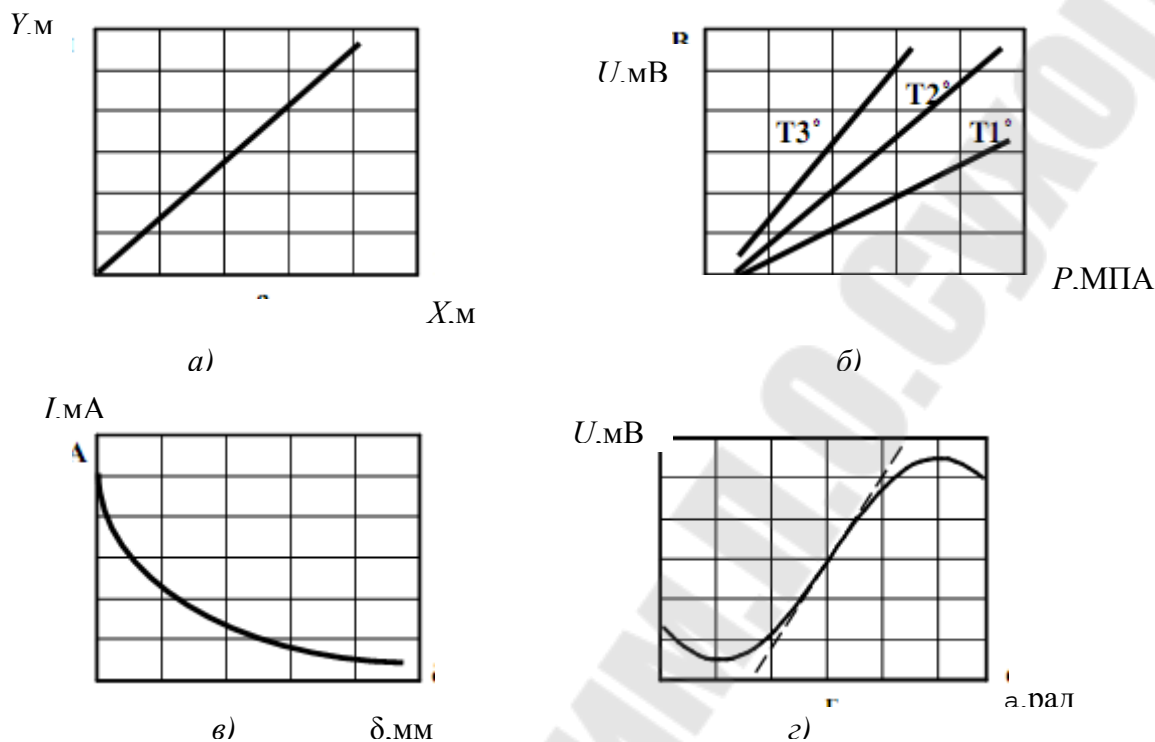


Рис.1.1.1. Примеры статических характеристик функциональных элементов САУ

Например, статическая характеристика индуктивного датчика перемещения (рисунок 1.1.1 в) или сельсинного преобразователя угла поворота в соответствующее напряжение (рисунок 1.1.1 г) существенно нелинейны.

В таких случаях либо производят линеаризацию статических характеристик, либо ограничивают диапазон работы элемента САУ линейной частью характеристики. Например, из-за того, что характеристика преобразования сельсина имеет синусоидальную форму, диапазон измеряемых углов поворота ограничивают  $\pm 10'$ , так как в этих пределах функция синуса близка к прямой линии.

## 1.2. Статическое и астатическое управление

По типу ошибки в статическом (установившемся) режиме САУ подразделяют на *статические* и *астатические*.

В астатических, после завершения переходного процесса, вызванного внешним воздействием, значение регулируемой величины устанавливается равным заданному, т.е. в установившемся режиме ошибка регулирования равна нулю.

В статических САУ регулируемая величина по окончании переходного процесса принимает значение, пропорциональное внешнему воздействию, при этом установившееся значение ошибки регулирования отлично от нуля (см. рис.1.1.2).

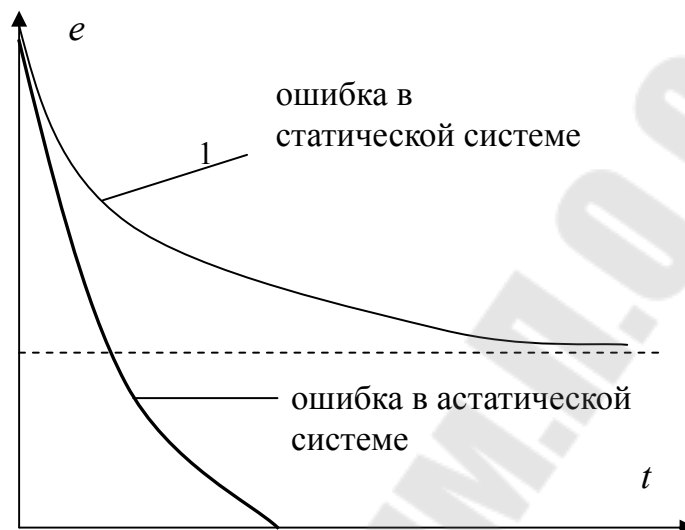


Рис.1.1.2. К пояснению статической ошибки системы

Ошибка в установившемся режиме, называемая статической, на основании теоремы преобразования Лапласа о конечном значении функции определится:

$$e_c = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pE(p) = \lim_{p \rightarrow 0} W_e(p)c.$$

Из этого выражения следует, что статическая ошибка равна нулю, если передаточная функция ошибки содержит множитель  $p$  (имеет нуль в точке  $p=0$ ), в противном случае статическая ошибка не равна нулю.

Передаточная функция ошибки системы с астатизмом порядка  $\nu$  содержит множитель  $p^\nu$ . В такой системе ошибка в установившемся режиме равна нулю при входном сигнале  $x(t) = ct^{\nu-1}$ .

Из формулы  $W_e(p) = \frac{1}{1+W_p(p)}$  следует, что система имеет порядок астатизма  $\nu$ , если передаточная функция разомкнутой системы содержит  $\nu$  интегрирующих звеньев (имеет полюс порядка  $\nu$  в точке  $p=0$ ).

Система автоматического регулирования будет *статической* по отношению к возмущающему воздействию, если при стремлении возмущающего воздействия к постоянной величине отклонения регулируемой величины также стремится к постоянной величине, отличной от нуля и зависящей от величины приложенного воздействия.

Систему автоматического регулирования можно назвать статической по отношению к управляющему воздействию, если при стремлении последнего к постоянной величине ошибка также стремится к постоянной, отличной от нуля, величине и зависит от значения приложенного воздействия.

Система автоматического регулирования будет *астатической* по возмущающему воздействию, если при стремлении возмущающего воздействия к постоянной величине отклонение регулируемой величины стремится к нулю и не зависит от величины приложенного воздействия.

Система автоматического регулирования будет астатической по отношению к управляющему воздействию, если при стремлении управляющего воздействия к постоянной величине ошибка стремится к нулю и не зависит от величины воздействия.

Для анализа и синтеза системы управления требуется ее математическое описание, которое бы связывало поведение координат системы - ее переменных величин в процессе работы, то есть во времени. Поведение координат системы во времени называется динамикой системы. Так как система состоит из взаимосвязанных функциональных элементов, то для получения ее математического описания необходимо получить математические описания отдельных элементов. Математическое описание элемента устанавливает связь во времени между его текущими значениями выходных  $y(t)$  и входных  $x(t)$  величин.

Динамика элемента, то есть поведение его координат во времени, описывается дифференциальными уравнениями. В динамике связь между координатами, то есть между входными и выходными величинами, меняется во времени. Динамика характеризуется переходным процессом.

При времени, стремящемся к бесконечности  $t \rightarrow \infty$ , текущие координаты  $y(t)$  и  $x(t)$  принимают постоянные установившиеся значения и наступает статика элемента, которая описывается алгебраическими уравнениями. В статике входные и выходные

величины элемента постоянные:  $x(\infty)=x_0=const$ ;  $y(\infty)=y_0=const$ . Эти постоянные величины называются установившимися. А процесс, соответствующий статике, называется установившимся процессом.

Теоретически статика наступает при  $t \rightarrow \infty$ , однако на практике принято считать, что статика наступает тогда, когда текущие координаты отличаются от своих установившихся значений не более чем на 5%.

В данной лабораторной работе рассматриваются САУ, представленные в виде структурных схем.

Структурной схемой системы управления называют графическое представление ее математической модели в виде соединений звеньев, изображаемых в виде прямоугольников или кругов (для сумматора), с указанием входных и выходных переменных. Обычно внутри прямоугольника указывается условное обозначение оператора изображаемого им звена, а сам оператор в виде передаточной функции или дифференциального уравнения задается вне структурной схемы.

В сумматоре входные переменные складываются (рис. 1.1.3), или вычитаются, если соответствующий вход помечен знаком «минус» (или заштрихован соответствующий сектор). Также встречается обозначение входа, значение по которому вычитается из результата в виде закрашенного сектора.

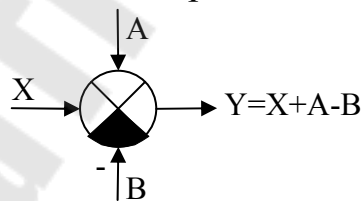


Рис.1.1.3 Изображение сумматора с вычитающим сектором

При последовательном соединении звеньев САУ (см. рис.1.1.4) передаточные функции отдельных звеньев перемножаются, и при преобразовании структурных схем цепочку из последовательно соединенных звеньев можно заменить одним звеном с эквивалентной передаточной функцией  $W_{\text{экв}}(p) = W_1(p)W_2(p)\dots W_n(p)$ .

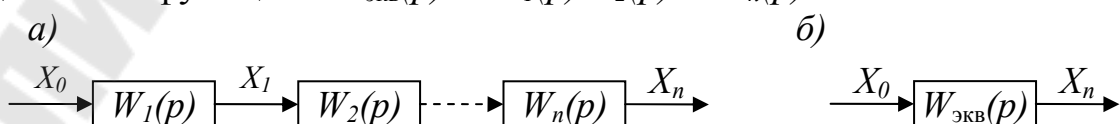


Рис. 1.1.4 Последовательное соединение звеньев



Встречно-параллельное соединением называется такое соединение звеньев, в котором имеется обратная связь.

Обратная связь может быть положительной (ПОС), если сигнал, снимаемый с выхода звена, суммируется с сигналом на входе, и отрицательной (ООС), если выходной сигнал вычитается. Кроме того, обратные связи могут быть жесткими и гибкими. Связь называется гибкой, если передаточная функция  $W_{oc}(p)$  в установившемся режиме равна нулю.

Рассмотрим простейшую структурную схему, представленную в общем виде на рис. 1.1.5.

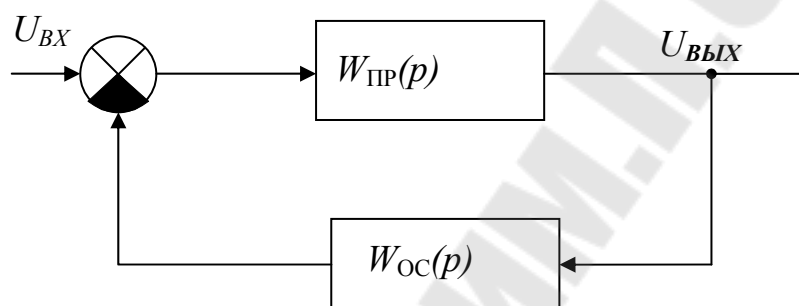


Рис. 1.1.5 Встречно-параллельное соединение звеньев (замкнутый контур с ООС).

Если в сумматоре сектор закрашен говорят об отрицательной обратной связи (ООС), в ином случае рассматривается положительная обратная связь (ПОС). Эквивалентная передаточная функция при таком соединении определится в виде:

$$W_{эkv} = \frac{W_{np}(p)}{1 + W_{np}(p) \cdot W_{oc}(p)} \quad \text{- для ООС;}$$

$$W_{эkv} = \frac{W_{np}(p)}{1 - W_{np}(p) \cdot W_{oc}(p)} \quad \text{- для ПОС}$$

Поэтому в каждом конкретном случае для нахождения передаточной функции замкнутого контура необходимо грамотно выделить прямую цепь передачи воздействия и цепь обратной связи.

В лабораторной работе исследуется влияние возмущений и помех в статических системах. Помехи – паразитный мешающий сигнал, имеющий физическую природу задающего воздействия. Чем ближе ко входу системы приложена помеха, тем более она влияет на выходную величину.

Вместо понятия передаточной функции в работе используется понятие коэффициента передачи, причем коэффициент замкнутой системы рассматривается как отношение выходного напряжения к входному:

$$K_3 = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$$

Возмущение – это внешнее воздействие на любой элемент (звено) системы управления, затрудняющее достижение цели управления. Влияние возмущений в статических называется коэффициентом статизма САУ (или просто статизмом) и оценивается по формуле:

$$\delta_{СТ} = \frac{I}{1 + K_P},$$

где  $K_P$  - коэффициент передачи разомкнутой системы (равен произведению коэффициентов передачи звеньев цепи прямого тракта), а коэффициент передачи замкнутой системы определяется при этом в виде:

$$K_3 = \frac{K_P}{1 + K_P} \cdot \frac{I}{K_{OC}},$$

где  $K_{OC}$  - коэффициент передачи звеньев цепи обратной связи.

## 2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Экспериментальное определение статической характеристики сумматора.

1.1. Собрать схему, изображенную на рис.1.2.1.

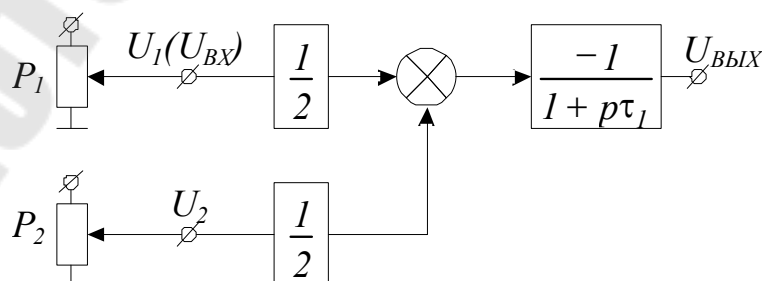


Рис.1.2.1. Схема для экспериментального определения статической характеристики сумматора

1.2. Измерить напряжение  $U_1, U_2, U_{ВЫХ}$  для разных положений движка потенциометров  $P_1$  и  $P_2$ .

1.3. Снять статическую характеристику сумматора  $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ . Напряжение  $U_2 = 2В$ . Диапазон изменения напряжения  $U_{ВХ}$  от  $-U_{ИМАХ}$  до  $+U_{ИМАХ}$  с шагом  $0,5В$ . Результаты свести в таблицу 1.2.1.

Таблица 1.2.1

Статическая характеристика сумматора  $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$

$U_2, В$	$2В$								
$U_{ВХ}, В$									
$U_{ВЫХ}, В$									

1.4. Построить полученную зависимость.

2. Определение коэффициента передачи звена №1

2.1. Собрать схему, представленную на рис. 1.2.2:

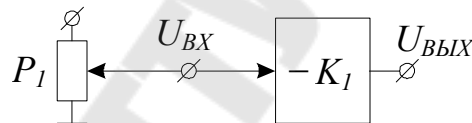


Рис.1.2.2. Схема для определения с коэффициента передачи звена  $K_1$

2.2. Определить коэффициент передачи звена на линейном участке для всех положений переключателя  $П_2$ . Результаты занести в таблицу 1.2.2. **Звено работает на линейном участке, если выходной сигнал звена не превышает  $\pm 10В$ .**

2.3. Результаты свести в таблицу 1.2.2.

Таблица 1.2.2

Коэффициенты передачи звена

положение $П_2$	$U_{ВЫХ}, В$	$U_{ВХ}, В$	$K_1$
I			
II			
III			

3. Экспериментальное исследование статической характеристики звена №2 с коэффициентом передачи  $\frac{K_2}{1 + p\tau_4}$ .

3.1. Собрать схему, представленную на рис.1.2.3.

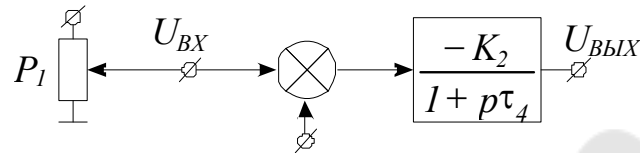


Рис.1.2.3 Схема исследования статической характеристики звена №2 с передаточной функцией  $\frac{K_2}{1 + p\tau_4}$

3.2. Переключатель  $П_4$  установить в положение III. Малые входные напряжения снимать с вспомогательного делителя (напряжение, обозначенное  $U_3$  на стенде). Диапазон изменения напряжения  $U_{ВЫХ}$  от  $-10В$  до  $+10В$  с шагом  $1В$ .

Определить коэффициент передачи звена на линейном участке:

$$K_2 = \frac{U_{ВЫХk}}{U_{ВХk}} - \text{линеаризованный коэффициент передачи звена.}$$

3.3. Результаты свести в таблицу 1.2.3.

Таблица 1.2.3  
Статическая характеристика звена  $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$

$U_{ВЫХ},$ $В$	-10	-9	-8	-7	...	7	8	9	10
$U_{ВХ},$ $В$									
$K_2$									

3.4. Построить полученную зависимость.

3.5. Определить нелинейность статической характеристики звена №1. Результаты занести в таблицу 1.2.4.

Таблица 1.2.4

## Нелинейность статической характеристики звена №1

$i...k$	$U_{BXi}, B$	$U_{BЫXi}, B$	$U_{BЫXpi}, B$	$\Delta U_i, B$	$\delta_{отн}, \%$	$\delta_{ПР}, \%$
1						
.						
.						
21						

Обозначения в таблице 1.2.4:

$U_{BXi}, U_{BЫXi}$  - входное и выходное напряжения, взятые из таблицы 1.2.3;

$i$  - номер точки;

$U_{BЫXpi} = K_2 U_{BXi}$  - расчетное выходное напряжение для  $i$ -ой точки;

$K_2 = \frac{U_{BЫXk}}{U_{BXk}}$  - линеаризованный коэффициент передачи звена,

вычисленный по конечной точке (индекс  $k$ );

$U_{BX.k}, U_{BЫX.k}$  - входное и выходное напряжения звена в конечной точке линейного участка статической характеристики при положительном выходном напряжении;

$\Delta U_i = U_{BЫXi} - U_{BЫXpi}$  - абсолютное отклонение статической характеристики звена №2 от линеаризованной в  $i$ -ой точке;

$\delta_{отн} = \frac{\Delta U_i}{U_{BЫXi}} \cdot 100\%$  - относительное отклонение (относительная

нелинейность) статической характеристики от линеаризованной в  $i$ -ой точке;

$\delta_{ПР} = \frac{\Delta U_i}{U_{BЫXk}} \cdot 100\%$  - приведенное отклонение

(приведенная нелинейность) статической характеристики от линеаризованной.

4. Экспериментальное исследование статической характеристики замкнутой САУ №1.

4.1. Собрать схему замкнутой статической САУ №1 в соответствии с рис.1.2.4:

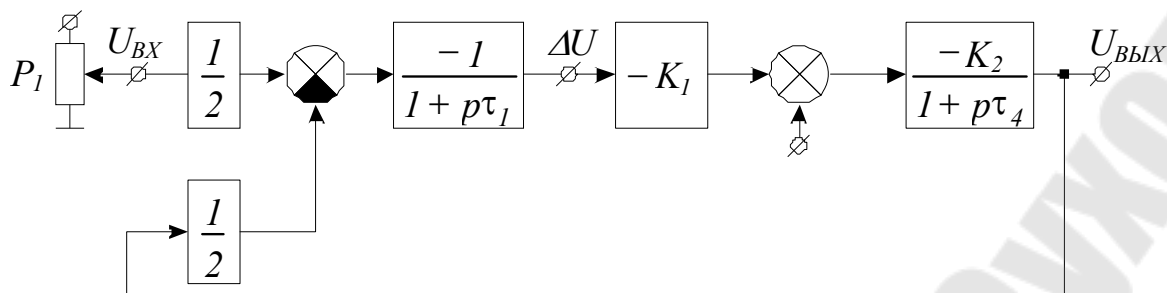


Рис.1.2.4 Схема замкнутой статической САУ №1

4.2. Снять статическую характеристику замкнутой САУ и зависимость ошибки  $\Delta U$  от входного сигнала ( $\Delta U = f(U_{BX})$ ) для двух положений переключателя  $\Pi_2$  (положения II и III). Переключатель  $\Pi_4$  устанавливается в положение III.

Напряжения  $U_{BX}, U_{ВЫХ}, \Delta U$  измерять для каждой точки статической характеристики поочередно.

Напряжение  $\Delta U$  может быть от нескольких милливольт до десятков милливольт; необходимо правильно выбирать предел измерения, чтобы использовались три значащие цифры шкалы вольтметра.

4.3. Вычислить для каждой точки коэффициент передачи разомкнутой системы  $K_{pi}$  по формуле:

$$K_{pi} = \frac{U_{ВЫХi}}{\Delta U_i} \cdot K_{BX} - 1 \approx \frac{U_{ВЫХi}}{\Delta U_i} \cdot K_{BX},$$

где  $K_{BX}$  - коэффициент передачи звена, стоящего между точкой приложения входного напряжения  $U_{BX}$  и входом сумматора.

4.4. Рассчитать теоретическое значение коэффициента передачи разомкнутой системы  $K_{p.p}$  ( $K_{p.p}$  определяется как произведение коэффициентов передачи звеньев прямого тракта САУ).

4.5. Результаты свести в таблицу 1.2.5.

Таблица 1.2.5

Статическая характеристика  $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ ,  
 $\Delta U = f(U_{ВХ})$ ,  $K_p = f(U_{ВХ})$  замкнутой САУ №1

$\Pi_4$	$\Pi_2$	$i...k$	1	2	3	...	17	18	19
III	II	$U_{ВХ}, B$	-4.5	-4	-3.5	...	3.5	4	4.5
		$U_{ВЫХ}, B$							
		$\Delta U, B$							
		$K_{pi}$							
		$K_{p.p}$							
	III	$U_{ВХ}, B$	-4.5	-4	-3.5	...	3.5	4	4.5
		$U_{ВЫХ}, B$							
		$\Delta U, B$							
		$K_{pi}$							
		$K_{p.p}$							

4.6. Построить полученные зависимости.

4.7. Определить нелинейность статической характеристики замкнутой САУ №1, для случая: переключатель  $\Pi_2$  в положении III, переключатель  $\Pi_4$  - в положение III.

Нелинейность статической характеристики определять с учетом смещения нуля в соответствии с приведенными ниже формулами:

$$U_{ВЫХpi} = \alpha + KU_{ВХi}$$

$\alpha = U_{ВЫХ}(0)$  - значение выходного напряжения при  $U_{ВХ} = 0$ ;

$K = \frac{U_{ВЫХk} - \alpha}{U_{ВХk}}$  - линеаризованный коэффициент передачи

замкнутой САУ.

4.8. Результаты свести в таблицу 1.2.6:

Таблица 1.2.6

## Нелинейность статической характеристики замкнутой САУ №1

$i$	$U_{BXi}, B$	$U_{BIXi}, B$	$U_{BIXp.i}, B$	$\Delta U, B$	$\delta_{OTH}, \%$	$\delta_{ПР}, \%$
1						
.						
.						
19						

4.9. Определить экспериментальный коэффициент передачи замкнутой САУ ( $K_3$ ) и сравнить его с теоретическим.

Экспериментально снятый коэффициент передачи замкнутой САУ определяется по формуле:

$$K_3 = \frac{U_{BIX.MAX}}{U_{BX.MAX}};$$

Теоретически вычисленный коэффициент передачи замкнутой САУ определяется по формуле:

$$K_3 = \frac{1/K_{OC}}{1 + 1/K_{p.p}} \cdot K_{BX},$$

где  $K_{p.p}$  - теоретическое значение коэффициента передачи разомкнутой системы;

$K_{OC}$  - коэффициент передачи звена, стоящего в обратной связи САУ;

$K_{BX}$  - коэффициент передачи звена, стоящего на входе (не включенного в обратную связь).

5. Экспериментальное исследование статической характеристики замкнутой САУ № 2.

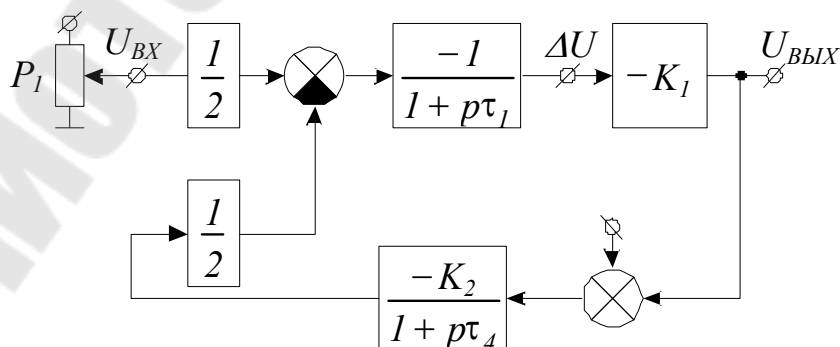


Рис. 1.2.5. Схема замкнутой статической САУ №2



5.1. Собрать схему замкнутой САУ №2 в соответствии с рис.1.2.5. Переключатель  $\Pi_2$  установить в положение  $I$ , переключатель  $\Pi_4$  - в положение  $III$ .

5.2. Снять статическую характеристику замкнутой САУ №2 и зависимость ошибки  $\Delta U$  от входного сигнала.

5.3. Вычислить для каждой точки коэффициент передачи разомкнутой системы  $K_{pi}$  и теоретическое значение коэффициента передачи разомкнутой системы  $K_{p.p}$ .

5.4. Результаты свести в таблицу 1.2.7.

Таблица 1.2.7

Статическая характеристика  $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ ,  
 $\Delta U = f(U_{ВХ})$ ,  $K_p = f(U_{ВХ})$  замкнутой САУ №2

$\Pi_2$	$\Pi_4$	$i$	1	2	3	...	17	18	19
$I$	$III$	$U_{ВХ}, В$	-4.5	-4	-3.5	...	3.5	4	4.5
		$U_{ВЫХ}, В$							
		$\Delta U, В$							
		$K_{pi}$							
		$K_{p.p}$							

5.6. Построить полученные зависимости.

5.7. Определить нелинейность статической характеристики замкнутой САУ №2.

Нелинейность статической характеристики определять с учетом смещения нуля (см.п.4.7).

5.8. Результаты свести в таблицу 1.2.8.

Таблица 1.2.8

Нелинейность статической характеристики  
замкнутой САУ №2

$i$	$U_{ВХi}, В$	$U_{ВЫХi}, В$	$U_{ВЫХp.i}, В$	$\Delta U, В$	$\delta_{ОТН}, \%$	$\delta_{ПР}, \%$
1						
·						
·						
19						

5.9. Определить экспериментальный коэффициент передачи замкнутой САУ №2 ( $K_3$ ) и сравнить его с теоретическим.

### 6. Исследование влияния помех

6.1. Собрать схему, представленную на рис.1.2.6. Переключатель  $\Pi_2$  установить в положение  $\Pi$ , переключатель  $\Pi_4$  в положение  $\text{III}$ .

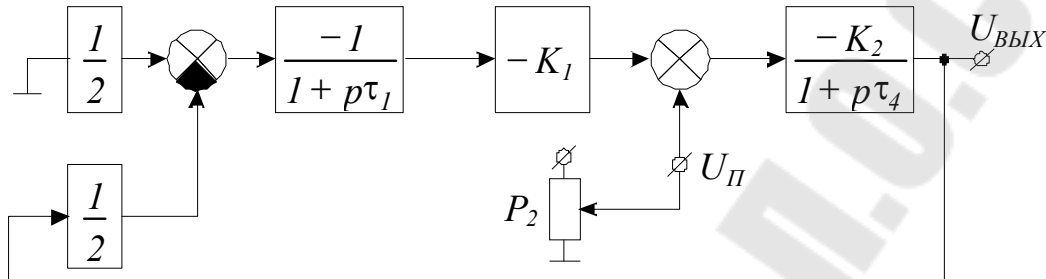


Рис.1.2.6. Исследования влияния помех в замкнутой САУ №1

6.2. Снять зависимость выходного напряжения от напряжения помехи  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{П}})$  при нулевом входном сигнале.

6.3. Рассчитать влияние напряжения помехи  $U_{\text{П}}$  на выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХр}}$  замкнутой САУ №1 по формуле:

$$U_{\text{ВЫХр}} = \frac{K_2 \cdot U_{\text{П}}}{2}, \text{ где } K_2 \text{ – коэффициент соответствующего звена}$$

прямого тракта САУ №1.

Результаты свести в таблицу 1.2.9.

Таблица 1.2.9

Переключатели: $\Pi_2$ в положении $\Pi$ , $\Pi_4$ в положении $\text{III}$											
$U_{\text{П}}, \text{В}$	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$											
$U_{\text{ВЫХр}}, \text{В}$											

6.4. Собрать схему, представленную на рис.1.2.7. Переключатель  $\Pi_2$  установить в положение  $\text{III}$ , переключатель  $\Pi_4$  в положение  $\text{III}$ .

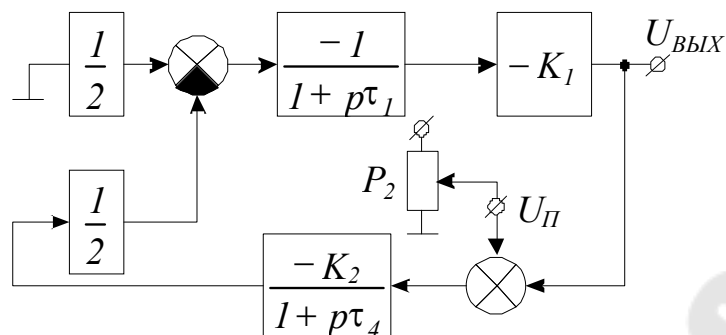


Рис. 1.2.7 Исследование влияния помех в замкнутой САУ №2

6.5. Снять и построить зависимость выходного напряжения от напряжения помехи  $U_{ВЫХ} = f(U_{П})$  при нулевом входном сигнале для САУ №2.

6.6. Рассчитать влияние напряжения помехи  $U_{П}$  на выходное напряжение  $U_{ВЫХр}$  замкнутой САУ №2 по формуле:

$$U_{ВЫХр} = \frac{K_1 \cdot K_2}{2 + K_1 \cdot K_2} \cdot U_{П}, \quad \text{где } K_1, K_2 - \text{коэффициенты}$$

соответствующих звеньев САУ №2.

Результаты свести в таблицу 1.2.10

Таблица 1.2.10

### Влияние помехи САУ

Переключатели: $П_2$ в положении III, $П_4$ в положении III											
$U_{П}, В$	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
$U_{ВЫХ}, В$											
$U_{ВЫХр}, В$											

### 3. ЗАДАНИЕ К ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Для системы автоматического управления представленной на рис.1.3.1, определить:

1. Коэффициент передачи разомкнутой системы  $K_p (K_i = K_{oi})$ .
2. Коэффициент передачи замкнутой системы  $K_3 (K_i = K_{oi})$ .
3. Статизм системы  $\delta_{СТ} (K_i = K_{oi})$ .
4. Влияние возмущений  $\Delta U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ} - U_{ВЫХ0}$ , где  $U_{ВЫХ}$  - абсолютное изменение выходного сигнала,  $U_{ВЫХ}$  - выходной сигнал с учетом возмущений,  $U_{ВЫХ0}$  - выходной сигнал без учета возмущений ( $U_{Пi} = 0, K_i = K_{oi}(1 + \delta_{Ki})$ ).

5. Влияние помех  $U_{ВЫХ}$  ( $U_{ВХ} = 0, K_i = K_{0i}$ ).

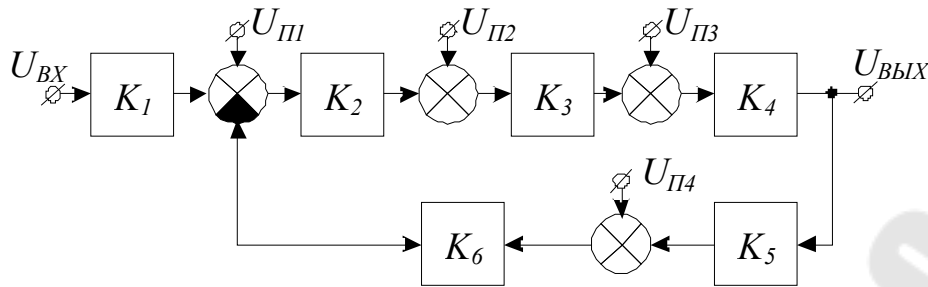


Рис. 1.3.1 Схема замкнутой статической САУ для защиты лабораторной работы №1

Исходные данные приведены в таблице 1.3.1:

Таблица 1.3.1.

Исходные данные к защите

№	$U_{ВХ},$ $B$	$K_{01}$	$K_{02}$	$K_{03}$	$\delta_{K_3}$	$K_{04}$	$K_{05}$	$\delta_{K_5}$	$K_{06}$	$U_{П1}$ $B$	$U_{П2}$ $B$	$U_{П3}$ $B$	$U_{П4}$ $B$
1	1	0.5	10	2	0.1	10	0.5	0.1	1	1	2	2	1
2	2	0.5	20	2	0.4	10	2		0.5				
3	5	0.5	10	5	0.1	10	0.1		2				
4	1	2	20	2	0.4	20	0.5		1				
5	2	2	10	5	0.1	20	0.2		0.5				
6	5	2	20	5	0.4	20	0.1		2				
7	1	5	5	10	0.1	4	0.5		1				
8	2	8	1	10	0.4	5	2		4				
9	5	4	5	1	0.1	5	2		2				
10	1	0.1	2	20	0.4	20	0.5		1				
11	2	0.1	5	1	0.1	20	2		0.5				
12	5	1.6	1	1	0.4	25	8		2				

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы исследуемых систем с результатами исследований в виде таблиц и графиков.
3. Выполненное задание к защите лабораторной работы
4. Выводы по результатам исследований.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается статическое и астатическое управление?
2. Что такое статические характеристики?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АСТАТИЧЕСКОЙ САУ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

**Цель работы:** исследование влияние возмущений и помех в астатических системах, ознакомление с нелинейной статической характеристикой типа «зона нечувствительности», присущей интегрирующим звеньям, усвоение навыков определения отклонения статической характеристики звеньев САУ от линеаризованной.

#### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

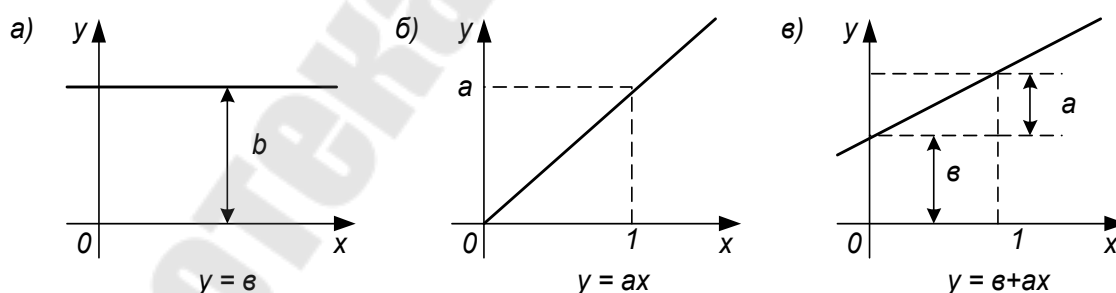
Линейных систем в природе не существует, так как характеристики реальных устройств нелинейные и некоторые из них не могут быть линеаризованы, например, характеристика логического элемента. Кроме того, есть системы, например, релейные, адаптивные, в которых принципиально необходимо учитывать нелинейности.

По виду статических характеристик все элементы разделяют на:

- линейные;
- нелинейные.

*Линейный элемент* – элемент, имеющий статическую характеристику в виде линейной функции (рис.2.1.1.):

Рис.2.1.1. Виды линейных функций



*Нелинейной системой* называется такая система, в состав которой входит хотя бы одно звено, описываемое нелинейным уравнением. Такое звено называется нелинейным звеном или *нелинейным элементом*.

Нелинейная статическая характеристика аналитически обычно выражается в виде степенных функций, степенных полиномов, дробных рациональных функций и более сложных функций (рис.2.1.2).

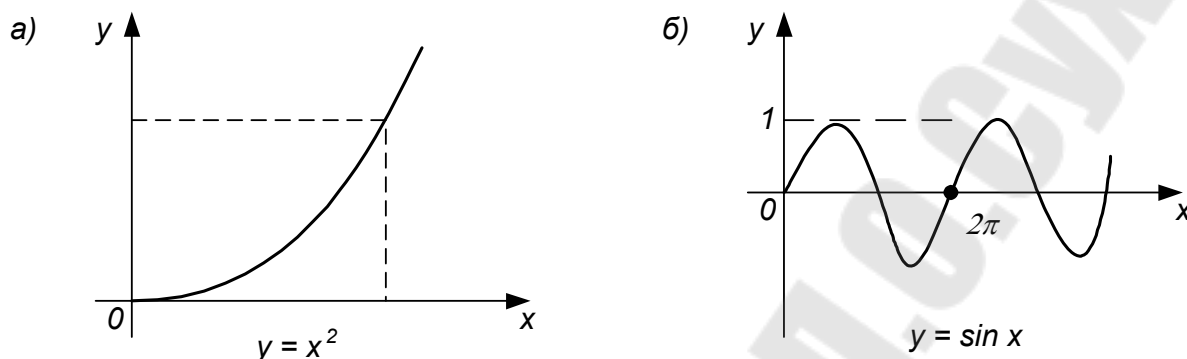


Рис.2.1.2. Виды нелинейных функций

Путем эквивалентного преобразования структурных схем и нелинейных звеньев большое число нелинейных систем можно представить в виде замкнутого контура с последовательным включением нелинейного элемента (НЭ) и линейной части (ЛЧ), как показано на рис.2.1.3.

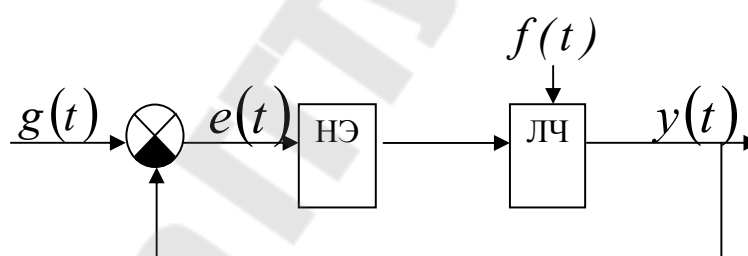


Рис.2.1.3. Функциональная схема нелинейной системы:  
НЭ - нелинейный элемент; ЛЧ - линейная часть

Нелинейные звенья классифицируются по различным признакам. Наибольшее распространение получила классификация по статическим и динамическим характеристикам, так как в системах чаще всего нелинейности приходится учитывать в виде характеристик. Эти характеристики могут быть как однозначными, так и двузначными (петлевыми), симметричными и несимметричными относительно начала координат.

Как правило, связь между входной и выходной величинами – однозначная. Элемент с такой связью называют *статическим (позиционным)* (рис. 2.1.4, а). Элемент с неоднозначной связью – *астатическим* (рис. 2.1.4, б).

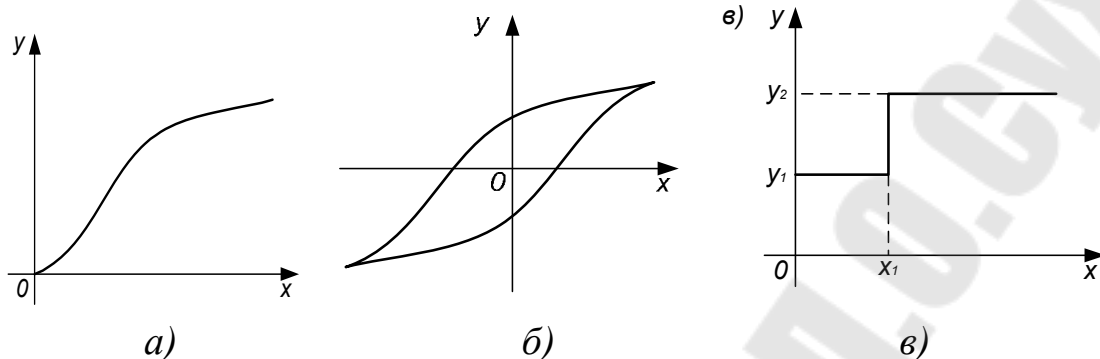


Рис.2.1.4. Виды статических характеристик:

- а) с однозначной связью между входной и выходной величинами;
- б) с неоднозначной связью между входной и выходной величинами;
- в) существенно нелинейная статическая характеристика

*Нелинейный элемент* – элемент, имеющий нелинейную статическую характеристику.

Нелинейные элементы в свою очередь подразделяют на:

- элементы с *существенно нелинейной* статической характеристикой;
- элементы с *несущественно нелинейной* статической характеристикой;

*Несущественно нелинейная статическая характеристика* – характеристика, описываемая непрерывной дифференцируемой функцией.

Практически это математическое условие означает, что график функции  $y = f(x)$  должен иметь гладкую форму (рис.2.1.4, а). В ограниченном диапазоне изменения входной величины  $x$  такая характеристика может быть приближенно заменена (аппроксимирована) линейной функцией. Приближенная замена нелинейной функции линейной называется *линеаризацией*. Линеаризация нелинейной характеристики правомерна, если в процессе работы элемента его входная величина меняется в небольшом диапазоне вокруг некоторого значения  $x = x_0$ .

*Существенно нелинейная статическая характеристика* – характеристика, описываемая функцией, имеющей изломы или разрывы.



Примером существенно нелинейной статической характеристики может служить характеристика реле (рис.2.1.4, в), которое при достижении входного сигнала  $x$  (ток в обмотке реле) некоторого значения  $x_1$  изменит выходной сигнал  $y$  (напряжение в коммутируемой цепи) с уровня  $y_1$  до уровня  $y_2$ . Замена такой характеристики прямой линией с постоянным углом наклона привела бы к *существенному* несоответствию между математическим описанием элемента и реальным физическим процессом, протекающим в элементе. Поэтому существенно нелинейная статическая характеристика линейризации не подлежит.

На рисунке 2.1.5 представлены кусочно-линейные характеристики нелинейных звеньев.

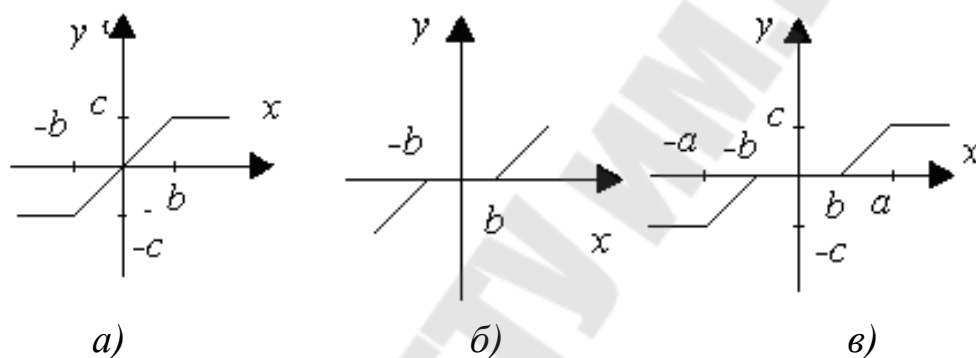


Рис.2.1.5 Кусочно-линейные характеристики нелинейных звеньев:

- а) - с насыщением; б) - с зоной нечувствительности;
- в) - с насыщением и зоной нечувствительности

Характеристика, изображенная на рис.2.1.5, а) отображает насыщение, характеристика на рис.2.1.5,б) – зону нечувствительности, а характеристика рис.2.1.5, в) соответствует звену, обладающему одновременно зоной нечувствительности и насыщением.

В лабораторной работе исследуется астатическая САУ, содержащая интегрирующий элемент, (который и делает систему астатической) характеристику которого можно рассматривать как кусочно-линейную с зоной нечувствительности.

## Влияние возмущений и помех

В астатической системе возмущения могут быть приложены до интегрирующего элемента или после него. Возмущения, приложенные после интегрирующего элемента, не сказывается на изменении выходной величины.

Усилитель в астатической системе вообще не нужен, т.к. его роль выполняет интегрирующий элемент, передаточная функция помех на нулевой частоте бесконечна.

В реальных астатических системах усилитель имеется из-за того, что в реальном интегрирующем элементе на основе двигателя обладает зоной нечувствительности.

Возмущение, приложенное после интегрирующего элемента, будет отбрасываться с точностью до зоны нечувствительности. А возмущение, приложенное до интегрирующего элемента в реальной системе, будет приводить к изменению зоны чувствительности приведенным по входу системы. Поэтому в астатической системе необходим коэффициент усиления усилителя (выбирают по заданному значению зоны нечувствительности).

Астатические системы второго порядка точно обрабатывают ступенчатый и линейно возрастающие сигналы. При обработке квадратичного сигнала имеет место ошибка  $\varepsilon_{yc} = \frac{a}{K}$ , которая пропорциональна ускорению  $a$  входного сигнала и обратно пропорциональна коэффициенту усиления разомкнутой системы  $K$ , который называется добротностью системы по ускорению, а сама ошибка - ошибка системы по ускорению.

С увеличением коэффициента усиления  $K$  разомкнутой системы установившиеся ошибки уменьшаются. Однако с возрастанием  $K$  ухудшается устойчивость автоматических систем, т.е. требование к точности противоречит требованию к устойчивости. При заданном относительно большом значении  $K$  улучшение устойчивости достигается включением в систему корректирующих устройств.

Порядок астатизма системы также влияет на точность системы. Чем выше астатизм, тем точнее система обрабатывает более сложные воздействия. Однако с увеличением порядка астатизма системы ее устойчивость ухудшается. Поэтому системы САУ с порядком астатизма более двух встречаются редко.

## 2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снять статическую характеристику нелинейного элемента с зоной нечувствительности.

1.1. Для этого собрать схему, представленную на рис.2.2.1:

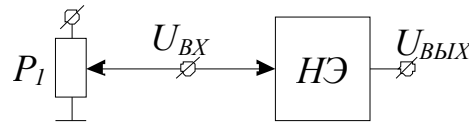


Рис.2.2.1. Схема экспериментального определения статической характеристики нелинейного элемента (НЭ)

1.2. Определить напряжения нечувствительности  $U_{НЕЧ}$  и  $-U_{НЕЧ}$ .

Для этого на вход НЭ подать напряжение и измерять его от нуля до момента появления на его выходе напряжения (момент появления напряжения определять по достижению выходным напряжением уровня 5мВ). Затем измерить входное напряжение НЭ, которое и будет напряжением нечувствительности.

1.3. Результаты измерений свести в таблицу 2.2.1.

1.4. Построить статическую характеристику нелинейного элемента по результатам эксперимента.

Таблица 2.2.1

Статическая характеристика нелинейного элемента

$U_{ВХ}, В$	5	4	3	2	1	$U_{НЕЧ}$	0	$-U_{НЕЧ}$	-1	-2	-3	-4	-5
$U_{ВЫХ}, В$													

2. Снять и построить статическую характеристику звена №1 с передаточной функцией  $\frac{-K_2}{1 + p\tau_4}$ .

2.1. Собрать схему, представленную на рис.2.2.2.

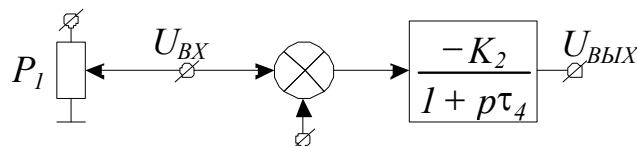


Рис.2.2.2. Схема экспериментального определения статической характеристики звена №1

2.2. Переключатель  $П_4$  установить в положение  $I$ . Снять зависимость  $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ . Диапазон изменения напряжения  $U_{ВХ}$  от  $-10В$  до  $+10В$  шагом  $1В$ .

2.3. Переключатель  $П_4$  установить в положение  $II$ . Повторить предыдущие измерения.

Результаты измерений свести в таблицу 2.2.2.

Таблица 2.2.2

Статическая характеристика звена №1

Переключатель $П_4$ в положении $I$									
$U_{ВХ}, В$	-10	-9	-8	-7	...	7	8	9	10
$U_{ВЫХ}, В$									
Переключатель $П_4$ в положении $II$									
$U_{ВХ}, В$	-10	-9	-8	-7	...	7	8	9	10
$U_{ВЫХ}, В$									

2.4. Определить нелинейность статической характеристики звена №1, используя полученные данные. Результаты свести в таблицу 2.2.3.

Таблица 2.2.3

Нелинейность статической характеристики звена №1

$П_4$	$i$	$U_{ВХi}, В$	$U_{ВЫХi}, В$	$U_{ВЫХр.i}, В$	$\Delta U_i, В$	$\delta_{ОТН}, \%$	$\delta_{ПР}, \%$	$K_1$
$I$	1							
	⋮							
	19							
$II$	1							
	⋮							
	19							

В таблице введены следующие обозначения:

$U_{ВХi}, U_{ВЫХi}$  - входное и выходное напряжения, взятые из таблицы 2.2.2;

$i$  – номер измерения;

$U_{ВЫХр.i} = KU_{ВХi}$  - расчетное выходное напряжение для  $i$ -ой точки;

$$K_1 = \frac{U_{ВЫХ.k}}{U_{ВЫХ.k}}$$

№1, вычисленный по конечной точке (индекс  $k$ );

$U_{ВХ.k}, U_{ВЫХ.k}$  - входное и выходное напряжения звена в конечной точке ( $k$ ) линейного участка статической характеристики при *положительном* выходном напряжении;

$\Delta U = U_{ВЫХi} - U_{ВЫХр.i}$  - абсолютное отклонение статической характеристики звена 4 от линеаризованной в  $i$ -ой точке;

$$\delta_{ОТН} = \frac{\Delta U_i}{U_{ВЫХi}} \cdot 100\%$$

- относительное отклонение (относительная нелинейность) статической характеристики от линеаризованной в  $i$ -ой точке;

$$\delta_{ПР} = \frac{\Delta U_i}{U_{ВЫХ.k}} \cdot 100\%$$

- приведенное отклонение (приведенная нелинейность) статической характеристики от линеаризованной.

### 3. Исследование замкнутой САУ №1 с НЭ в прямом тракте

3.1. Снять и построить статическую характеристику замкнутой САУ и зависимость ошибки  $\Delta U$  от входного сигнала:  $\Delta U = f(U_{ВХ})$ .

Собрать схему замкнутой астатической САУ №1, приведенную на рис. 2.2.3.

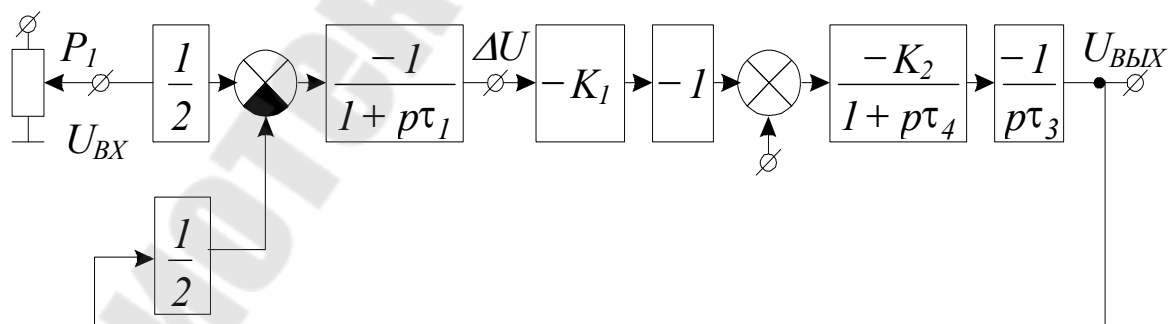


Рис.2.2.3. Схема замкнутой астатической САУ №1 с НЭ в прямом тракте

3.2. Переключатель  $P_4$  установить в положение II. Переключатель  $P_2$  устанавливается в положении II.

3.3. Напряжения  $U_{BX}, U_{ВЫХ}, \Delta U$  измерять для каждой точки статической характеристики поочередно. Так как напряжение  $\Delta U$  может быть от нескольких милливольт до десятков милливольт, необходимо правильно выбирать предел измерения вольтметра.

3.4. Переключатель  $P_2$  установить в положение I. Переключатель  $P_4$  устанавливается в положении II.

3.5. Произвести повторные измерения.

3.6. Результаты свести в таблицу 2.2.4.

Таблица 2.2.4

Статическая характеристика,  $\Delta U = f(U_{BX})$  замкнутой САУ №1

$P_4$	$P_2$	$i$	1	2	3	...	17	18	19
II	II	$U_{BX}, B$	-4.5	-4	-3.5	...	3.5	4	4.5
		$U_{ВЫХ}, B$							
		$\Delta U, B$							
II	I	$U_{ВЫХ}, B$							
		$\Delta U, B$							

3.7. Построить графики полученных зависимостей.

3.8. Определить по результатам нелинейность статической характеристики замкнутой САУ при разных положениях переключателей  $P_2$  и  $P_4$  с учетом смещения нуля в соответствии с нижеприведенными формулами:

$$U_{ВЫХр.i} = a + KU_{ВХi}$$

$a = U_{ВЫХ}(0)$  - значение выходного напряжения при  $U_{ВХ} = 0$ ;

$$K_{II} = \frac{U_{ВЫХ.k} - a}{U_{ВХ.k}} - \text{линеаризованный коэффициент передачи}$$

замкнутой САУ.

3.9. Результаты расчетов свести в таблицу 2.2.5.

Таблица 2.2.5

Нелинейность статической характеристики замкнутой САУ №1

$\Pi_2$	$\Pi_4$	$i$	$U_{ВХi},$ $B$	$U_{ВЫХi},$ $B$	$U_{ВЫХр.i},$ $B$	$\Delta U_i,$ $B$	$\delta_{ОТН},$ %	$\delta_{ПР},$ %	$K_{11}$
$\Pi$	$\Pi$	1							
		⋮							
		19							
$\Pi$	$I$	1							
		⋮							
		19							

4. Исследование замкнутой САУ №2 с НЭ в цепи обратной связи.

4.1. Снять и построить статическую характеристику и зависимость ошибки  $\Delta U$  от входного сигнала для замкнутой САУ №2, с НЭ в цепи обратной связи (ОС).

4.2. Собрать схему замкнутой астатической САУ №2, приведенную на рис.2.2.4:

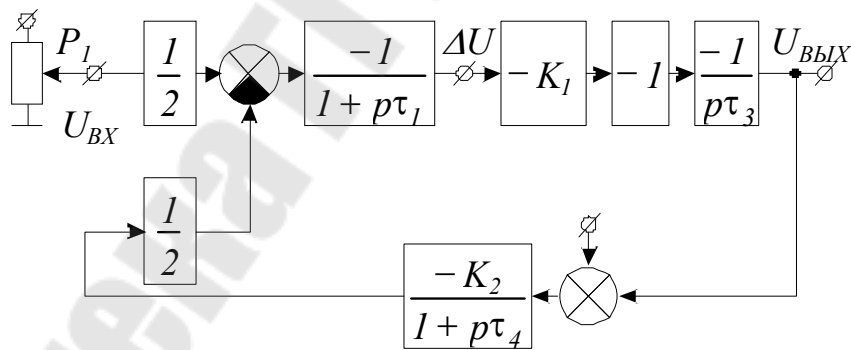


Рис.2.2.4. Схема замкнутой астатической САУ №2

4.3. Напряжения  $U_{ВХ}, U_{ВЫХ}, \Delta U$  измерять для каждой точки статической характеристики поочередно.

4.4. Результаты свести в таблицу 2.2.6.

Таблица 2.2.6

Статическая характеристика,  $\Delta U = f(U_{BX})$  замкнутой САУЗ

$\Pi_4$	$\Pi_2$	$i$	1	2	3	...	17	18	19
$\Pi$	$\Pi$	$U_{BX}, B$	-4.5	-4	-3.5	...	3.5	4	4.5
		$U_{ВЫХ}, B$							
		$\Delta U, B$							

4.5. Построить графики снятых зависимостей.

4.6. Определить по результатам нелинейность статической характеристики замкнутой САУ №2.

4.7. Результаты свести в таблицу 2.2.7.

Таблица 2.2.7

Нелинейность статической характеристики замкнутой САУ

$i$	$U_{BXi}, B$	$U_{ВЫХi}, B$	$U_{ВЫХp.i}, B$	$\Delta U_i, B$	$\delta_{ОТН}, \%$	$\delta_{ПР}, \%$	$K_{12}$
1							
.							
.							
19							

5. Исследование влияния помех в астатических САУ.

5.1. Собрать схему, представленную на рис.2.2.4. Переключатель  $\Pi_2$  установить в положение I, переключатель  $\Pi_4$  - в положение II.

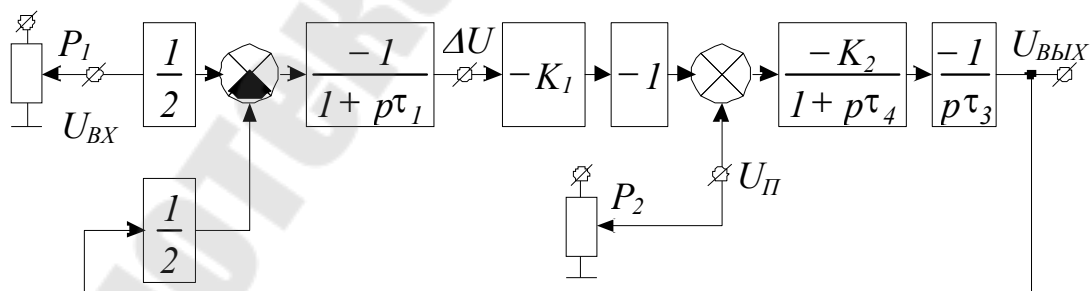


Рис.2.2.4. Схема исследования влияния помех в замкнутой САУ №1

5.2. Снять зависимость выходного напряжения от напряжения помехи  $U_{ВЫХ} = f(U_{\Pi})$  при нулевом входном сигнале.



5.3. Переключатель  $\Pi_2$  установить в положение  $I$ . Переключатель  $\Pi_4$  устанавливается в положении  $II$ . Повторить измерения.

5.4. Рассчитать влияние напряжения помехи  $U_{\Pi}$  при нулевом входном сигнале  $U_{ВЫХр}$  по формуле:

$$U_{ВЫХр} = U_{\Pi} \cdot \frac{K_{12}}{1 + \frac{1}{2} K_{11}}$$

5.5. Результаты свести в таблицу 2.2.6.

Таблица 2.2.6

Влияние помехи замкнутой САУ №1

	$U_{\Pi}, B$	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
$\Pi_2 - I,$ $\Pi_4 - II$	$U_{ВЫХ},$ $B$											
	$U_{ВЫХр},$ $B$											
$\Pi_2 - II$ $\Pi_4 - II$	$U_{ВЫХ},$ $B$											
	$U_{ВЫХр},$ $B$											

5.6. Построить полученные зависимости.

5.7. Собрать схему, представленную на рис.2.2.5 Переключатель  $\Pi_2$  установить в положение  $III$ , переключатель  $\Pi_4$  - в положение  $II$ .

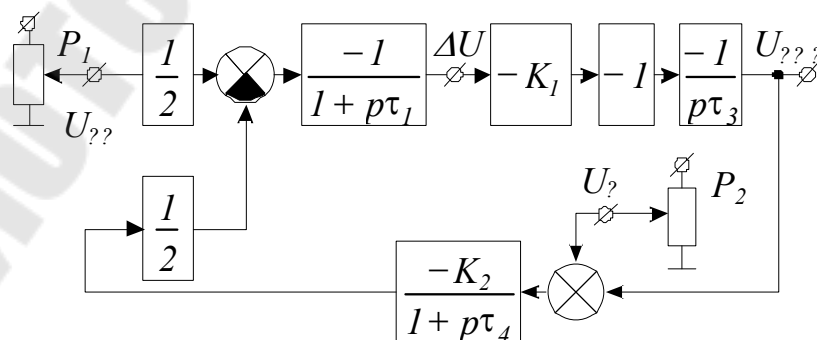


Рис.2.2.5. Схема исследования влияния помех в замкнутой САУ

5.8. Снять зависимость выходного напряжения от напряжения помехи  $U_{ВЫХ} = f(U_{П})$  при нулевом входном сигнале.

5.9. . Рассчитать влияние напряжения помехи  $U_{П}$  при нулевом входном сигнале  $U_{ВЫХр}$  по формуле:

$$U_{ВЫХр} = U_{П} \cdot \frac{K_1 \cdot K_{11}}{2 + K_{11}}$$

5.10. Результаты свести в таблицу 2.2.7.

Таблица 2.2.7

Влияние помехи замкнутой САУ №2

Переключатель $П_2$ - III, $П_4$ - II											
$U_{П}, В$	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
$U_{ВЫХ}, В$											
$U_{ВЫХр}, В$											

### 3. ЗАДАНИЕ К ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Для системы автоматического управления, представленной на рис.2.3.2, определить:

1. Абсолютную ошибку астатической системы  $\Delta U_{ACT}$  ( $U_{Пi} = 0, K_i = K_{0i}$ ).
2. Приведенную ошибку астатической системы  $\delta_{ACT.ПР}$ .
3. Приведенное изменение выходного сигнала под влиянием возмущений ( $U_{Пi} = 0, U_{ВХ} = U_{ВХmax}, K_i = K_{0i}(1 + \delta_{K_i})$ ).
4. Влияние помех  $U_{ВЫХ}$  ( $U_{ВХ} = 0, K_i = K_{0i}$ ).

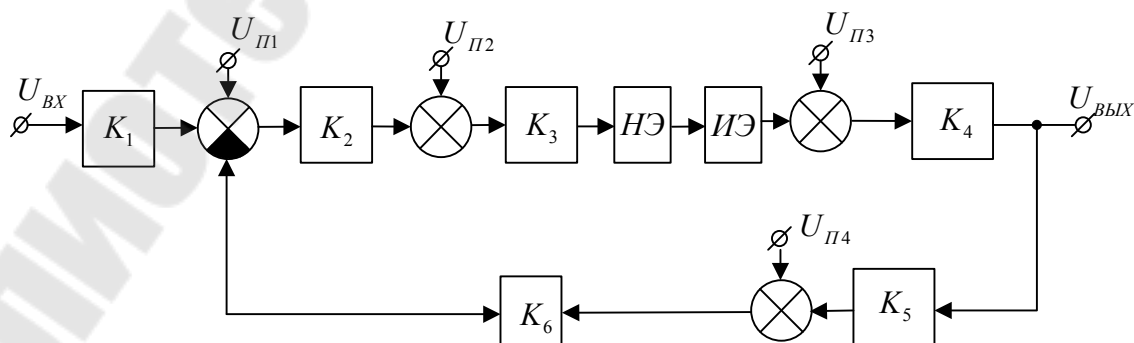


Рис. 2.3.2. Схема замкнутой астатической САУ

Исходные данные приведены в таблице 2.3.1:

Таблица 2.3.1.

Исходные данные к защите

№	$U_{BX,max}$	$K_{01}$	$K_{02}$	$K_{03}$	$\delta_{K_3}$	$K_{04}$	$K_{05}$	$\delta_{K_5}$	$K_{06}$	$U_{I_1}$ В	$U_{II_2}$ В	$U_{III_3}$ В	$U_{IV_4}$ В	$\pm U_{HE}$ В
1	1	0.5	10	2	0.1	10	0.5	0.1	1	1	2	2	1	0.5
2	2	0.5	20	2	0.4	10	2		0.5					0.4
3	5	0.5	10	5	0.1	10	0.1		2					0.6
4	1	2	20	2	0.4	20	0.5		1					0.2
5	2	2	10	5	0.1	20	0.2		0.5					0.3
6	5	2	20	5	0.4	20	0.1		2					0.5
7	1	5	5	10	0.1	4	0.5		1					0.4
8	2	8	1	10	0.4	5	2		4					0.6
9	5	4	5	1	0.1	5	2		2					0.7
10	1	0.1	2	20	0.4	20	0.5		1					0.2
11	2	0.1	5	1	0.1	20			0.5					0.3
12	5	1.6	1	1	0.4	25	8		2					0.6

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы исследуемых систем с результатами исследований в виде таблиц и графиков.
3. Выполненное задание к защите лабораторной работы
4. Выводы по результатам исследований.

#### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое нелинейный элемент? Перечислите виды нелинейности.
2. В чем отличие существенно нелинейной статической характеристики от несущественно нелинейной?
3. Для чего в реальных астатических системах применяется усилитель?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗВЕНЬЕВ САУ ПО ВРЕМЕННЫМ И ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

**Цель работы:** научиться определять свойства звеньев по временным и частотным характеристикам, снятым экспериментально.

#### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Математическое описание САУ начинают с разбиения ее на звенья и составления математических моделей этих звеньев. При этом передаточные функции, временные и частотные характеристики, которыми описываются звенья, не учитывают их физической природы, т.е. рассматривается его математическая модель, а не реальное конструктивное исполнение и принципы работы динамического звена. Очевидно, что при составлении математического описания системы целесообразно ориентироваться на математические модели звеньев стандартного вида, так называемые типовые звенья.

Под *динамическим звеном* понимается устройство любого физического вида и конструктивного оформления, но имеющее определенное математическое описание.

Динамические звенья, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями первого и второго порядка, называются *элементарными* или *типовыми динамическими звеньями*.

*Типовые динамические звенья* - это минимально необходимый набор звеньев для описания системы управления произвольного вида.

Типы звеньев систем управления различаются по виду их передаточной функции (или дифференциального уравнения), определяющей все их динамические свойства и характеристики.

*Характеристика звена* - это его реакция на определенное входное воздействие. Для линейных звеньев и линейных систем в целом характеристика полностью определяет их динамические свойства, так как к линейным звеньям и системам применим принцип суперпозиции, позволяющий по реакции линейного элемента на какое-либо известное воздействие найти его реакцию на воздействие произвольного вида.

В качестве *входных воздействий*, на которые ищется реакция звена, приняты воздействия, описываемые элементарными математическими функциями, то есть такими, на которые можно разложить любые произвольные функции. В теории управления в качестве элементарных функций используются  *типовые воздействия*  являющиеся математическими моделями наиболее часто встречающихся реальных воздействий:

- единичная импульсная или дельта-функция  $\delta(t)$ ;
- гармоническая функция  $X_0 \sin(\omega t)$ .

В качестве типовых используют следующие воздействия.

1. Ступенчатое воздействие: - единичная ступенчатая функция  $I(t)$

Единичное ступенчатое воздействие (*единичная ступенчатая функция, функция Хевисайда*) – это воздействие, которое мгновенно возрастает от нуля до единицы и далее остается неизменным. Единичное ступенчатое воздействие обозначается  $I(t)$  и может быть описано следующим выражением:

$$I(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0 \\ 1, & \text{при } t \geq 0 \end{cases}$$

2. Дельта-функция (*единичная импульсная функция, импульс Дирака*), которая обозначается  $\delta(t)$ , – это математическая идеализация предельно короткого импульсного сигнала бесконечно большой амплитуды, имеющего при этом единичную площадь. Математически дельта-функцию можно описать следующим образом:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & \text{при } t = 0 \\ 0, & \text{при } t \neq 0 \end{cases}$$

При этом, согласно определению:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1.$$

Дельта-функция связана с единичным ступенчатым воздействием:

$$\delta(t) = I'(t).$$

Это *обобщенная функция* – математический объект, представляющий собой идеальный сигнал, никакое реальное устройство не способно его воспроизвести. Эту физически также нереализуемую функцию можно представить как импульс бесконечно малой длительности и бесконечно большой амплитуды, т.е. как

предел, к которому стремится прямоугольный импульс с основанием  $\Delta t$  и площадью, равной единице, если  $\Delta t \rightarrow 0$  так, чтобы площадь импульса сохранялась равной единице.

### 3. Гармоническое воздействие :

$$x(t) = A_x \sin \omega t,$$

где  $A_x$  — амплитуда;  $\omega$  — угловая частота.

Синусоидальный гармонический сигнал можно представить как вращение вектора длиной  $A$  вокруг начала координат (рис.3.1.1, б) с некоторой угловой скоростью  $\omega$ , рад/с.

Гармонический сигнал характеризуется такими параметрами, как амплитуда –  $A$ ; период –  $T$ ; фаза –  $\varphi$ .

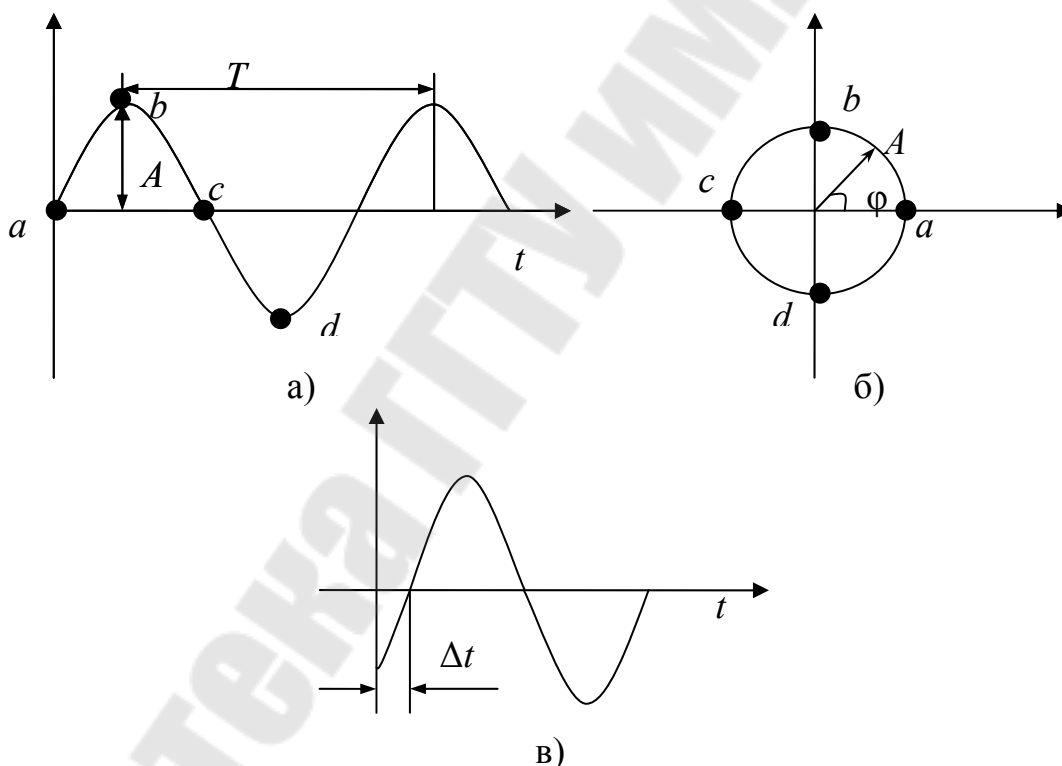


Рис.3.1.1. Гармонический сигнал:

- а) – обычный сигнал; б) – представление гармонического сигнала вращением вектора; в) – гармонический сигнал со сдвигом фазы

Между периодом и угловой скоростью справедливы соотношения

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ и } T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Если колебания начинаются не из нуля, то они характеризуются фазой колебаний (рис.3.1.1, в), которая во временной области характеризуется

отрезком  $\Delta t$ , но обычно фазу выражают в радианах –  $\varphi$  (рис. 3.1.1, б).  
Перевод осуществляется по формуле

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta t}{T}$$

Иногда используют и другие типовые воздействия.

Реакция системы (звена) на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях называется переходной функцией. Переходная функция обычно обозначается  $h(t)$  (см. рис.3.1.2). По ней судят о переходном процессе, вызванном входным сигналом в виде единичной функции.

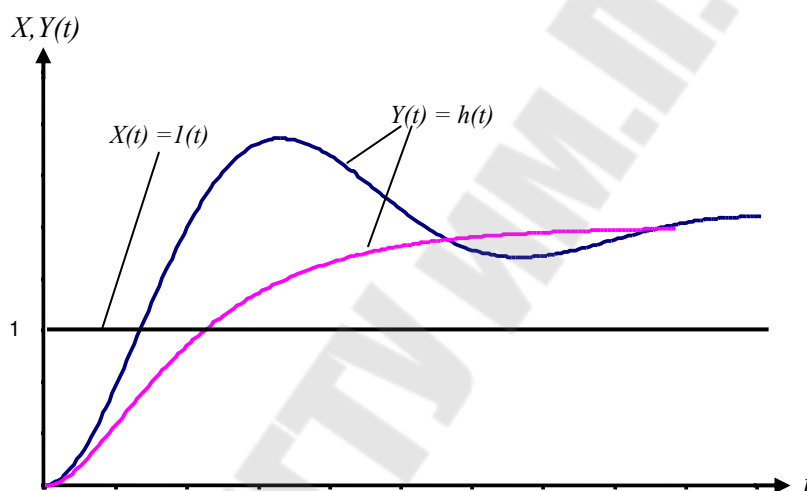


Рис.3.1.2. Возможный вид переходных функций

Если ступенчатое входное воздействие неединичное  $1(t) \cdot a$ , то ординаты переходной функции увеличиваются в  $a$  раз, что следует из принципа суперпозиции для линейных систем и звеньев.

Реакция системы (звена) на импульсное воздействие ( $\delta$ -функцию) при нулевых начальных условиях называется *импульсной функцией* или *функцией веса*.

Функция веса обычно обозначается  $g(t)$ .

Переходные функции и функции веса получают путем решения дифференциальных уравнений, описывающих системы (звенья) при ступенчатых и импульсных воздействиях, по их передаточным функциям и путем моделирования на ЭВМ. Они могут быть получены также экспериментально (импульсную переходную функцию получают как реакцию на короткий импульс). Возможный вид импульсных функций изображен на рис.3.1.3.

Связь между переходной и импульсной переходной функциями можно определить следующими выражениями:

$$g(t) = h'(t), \quad h(t) = \int_0^t g(t) dt$$

Учитывая, что изображение Лапласа  $L[\delta(t)] = 1$  следует взаимосвязь между импульсной переходной функцией, переходной функцией и передаточной функцией системы или звена:

$$L[g(t)] = W(p), \quad g(t) = L^{-1}[W(p)]$$

$$L[h(t)] = \frac{W(p)}{p}, \quad h(t) = L^{-1}\left[\frac{W(p)}{p}\right],$$

где  $L$  - прямое преобразование Лапласа;  $L^{-1}$  - обратное преобразование Лапласа.

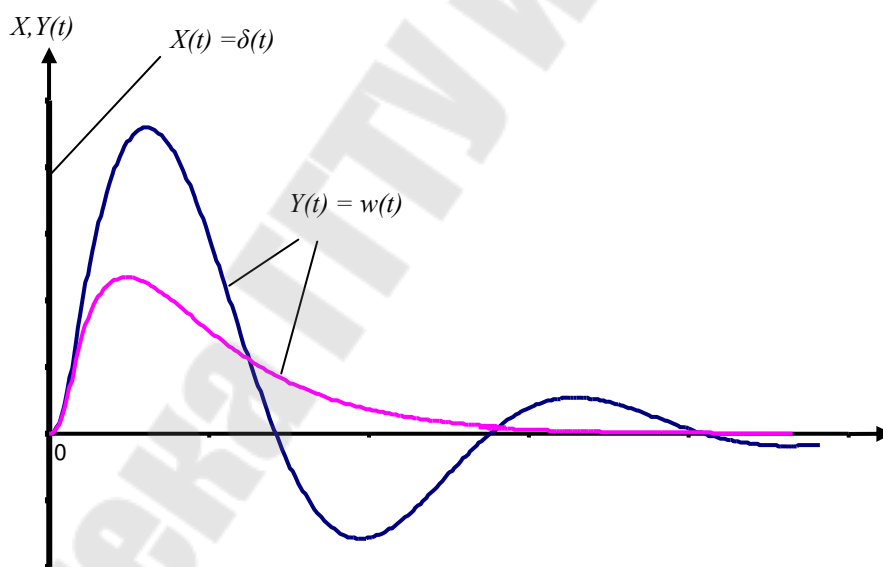


Рис.3.1.3. Возможный вид импульсных функций

### Частотные характеристики систем

Если на линейную систему (звено) подать гармоническое воздействие  $x(t) = A_x \sin \omega t$ , то после окончания переходного процесса на выходе звена установятся гармонические колебания  $y(t) = A_y \sin(\omega t + \varphi)$ , где  $A_y$  — амплитуда,  $\varphi$  — разность фаз между входным воздействием и выходной величиной (рис.3.1.4).



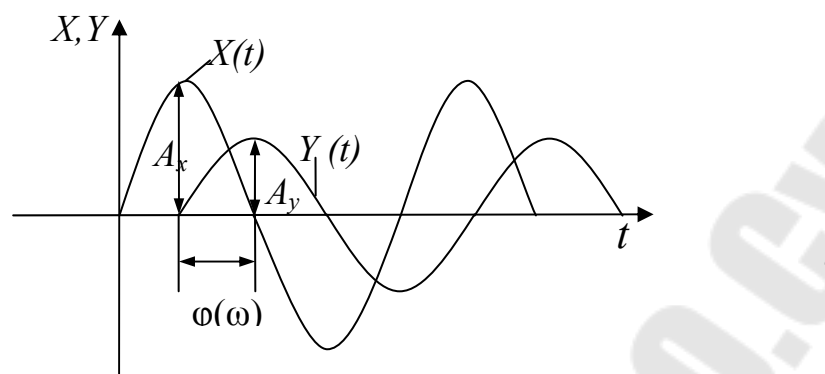


Рис.3.1.4. К определению частотных характеристик линейных звеньев

Свойства линейных систем (звеньев) таковы, что частоты входных и выходных сигналов одинаковы. Амплитуда выходного сигнала при постоянной амплитуде входного сигнала и разность фаз между входным и выходным сигналами зависит только от частоты.

Реакция системы (звена) на гармоническое воздействие характеризуется его частотными характеристиками.

*Частотными характеристиками* называются формулы и графики, характеризующие реакцию звена на гармоническое входное воздействие в установившемся режиме, т.е. вынужденные синусоидальные колебания звена.

Если на вход линейного звена подать гармоническое воздействие вида:

$$x(t) = X_0 \sin(\omega t),$$

где  $X_0$  - амплитуда,  $\omega$  - угловая частота, имеющая размерность [рад/с] или [с<sup>-1</sup>], то, как следует из необходимых и достаточных условий линейности, на выходе звена в установившемся режиме будет также гармоническая функция той же частоты, но, в общем случае, другой амплитуды  $Y_0$  и сдвинутая по фазе относительно входной величины на угол  $\varphi$ :

$$y(t) = Y_0 \sin(\omega t + \varphi).$$

Связь между выходной гармоникой и входной устанавливается с помощью *частотной передаточной функции звена*  $W(j\omega)$ .

Частотная характеристика получается из передаточной функции при подстановке в передаточную функцию комплексной переменной  $j\omega$ :

$$W(j\omega) = W(p) \Big|_{p=j\omega}.$$

Частотная передаточная функция  $W(j\omega)$  представляет собой комплексное число, которое можно записать как в полярной, так и декартовой системах координат:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = P(\omega) + jQ(\omega),$$

где

-  $A(\omega)$  - модуль или амплитуда частотной передаточной функции, представляющий собой отношение амплитуды выходной величины к амплитуде входной, т.е. коэффициент усиления звена  $k$  на частоте  $\omega$ ;

-  $\varphi(\omega)$  - аргумент или фаза частотной передаточной функции, показывает фазовый сдвиг выходной гармоники по отношению к входной на частоте  $\omega$ ;

-  $P(\omega) = \operatorname{Re} W(j\omega)$  - вещественная составляющая частотной передаточной функции;

$Q(\omega) = \operatorname{Im} W(j\omega)$  - мнимая составляющая частотной передаточной функции.

Данное выражение представляет собой *амплитудно-фазовую частотную характеристику* звена.

Выражение

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \operatorname{mod} W(j\omega) = \left. \frac{y(t)}{x(t)} \right|_{\omega=k}$$

называется *амплитудной частотной характеристикой* звена,

а выражение  $\varphi(\omega) = \operatorname{arg} W(j\omega)$  - *фазовой частотной характеристикой* звена.

$$\text{Соотношения } |W(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} \text{ и } \varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \left[ \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \right]$$

связывают между собой составляющие частотной передаточной функции.

Таким образом, частотная передаточная функция, определяющая реакцию звена на гармонические колебания всех

возможных частот, позволяет, пользуясь принципом суперпозиции, найти реакцию линейного звена на произвольное воздействие.

## 2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определить по переходным характеристикам постоянные времени инерционных звеньев, расположенных на лабораторном стенде ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ ).

1.1. Для определения постоянных времени необходимо собрать схему, приведенную на рис.3.2.1:

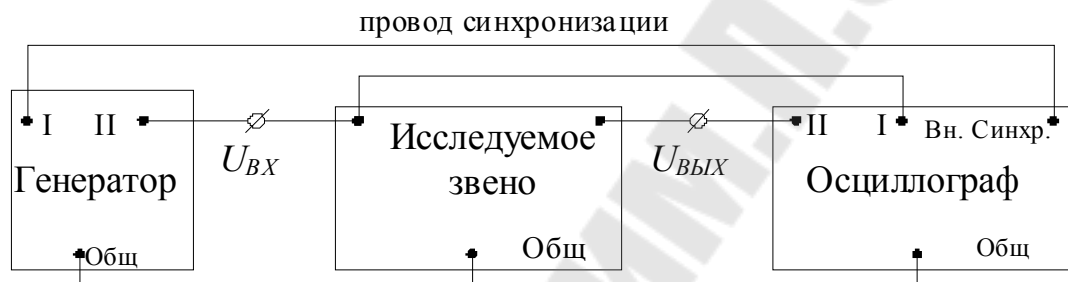


Рис.3.2.1. Схема для снятия переходной и частотной характеристик

1.2. Подать с генератора сигнал прямоугольной формы и получить на осциллографе переходные характеристики для всех исследуемых звеньев (переключатели устанавливаются во все возможные положения). Зафиксировать полученные характеристики для отчета.

1.3. Определить по полученным осциллограммам постоянные времени, как это показано на рис.3.2.2:

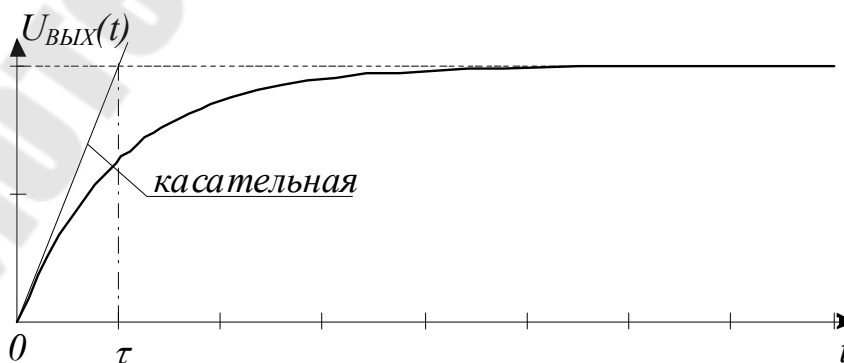


Рис. 3.2.2. Определение постоянной времени инерционного звена по переходной характеристике

1.4. Полученные результаты занести в таблицу 2.1:

Таблица 2.1

	Положение переключателя		
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>
$\tau_1, c$			
$\tau_2, c$			
$\tau_3, c$			
$\tau_4, c$			

2. При помощи операторного метода определить переходные характеристики для:

- интегро-дифференцирующего звена, собранного на операционном усилителе  $DA_1$  (лабораторный макет «Корректирующие контуры»);

- двух последовательно включенных форсирующих контуров, собранных на  $DA_2, DA_3$ ;

- реально-дифференцирующего звена, собранного на  $DA_4$ ;

- двух последовательно включенных реально-дифференцирующих звеньев, собранных на  $DA_4, DA_5$ ;

- двух последовательно включенных реально-дифференцирующих звеньев, собранных на  $DA_4, DA_5$  (соединенных перемычкой  $R_{11}$  и относительно выхода  $DA_5$ ).

3. Определить по частотным характеристикам постоянные времени инерционных звеньев, расположенных на лабораторном стенде ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ ).

3.1. Подать с генератора (см. рис.3.2.1) сигнал синусоидальной формы и получить на осциллографе частотные характеристики для всех исследуемых звеньев (переключатели устанавливаются во все возможные положения). Зафиксировать полученные характеристики для отчета.

3.2. Определить постоянные времени, как величину, обратную частоте сопряжения  $\tau = \frac{1}{\omega_{сопр}} = \frac{1}{2\pi f_{сопр}} \cdot f_{сопр}$  - это частота, на

которой фазовый сдвиг между входными и выходными напряжениями инерционного звена равен  $= -180^\circ - 45^\circ = 225^\circ (180^\circ$

учитывает фазовый сдвиг, вносимый схемой включения инерционного звена).

4. Сравнить полученные значения постоянных времени с результатами пункта 1.4 данной лабораторной работы.

5. Построить теоретические амплитудно-фазовые, логарифмические амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики для:

- интегро-дифференцирующего звена, собранного на операционном усилителе  $DA_1$  (лабораторный макет «Корректирующие контуры»);

- двух последовательно включенных форсирующих контуров, собранных на  $DA_2, DA_3$ ;

- реально – дифференцирующего звена, собранного на  $DA_4$ ;

- двух последовательно включенных реально-дифференцирующих звеньев, собранных на  $DA_4, DA_5$ ;

- двух последовательно включенных реально-дифференцирующих звеньев, собранных на  $DA_4, DA_5$  (для соединенных переключкой  $R_{11}$  и выхода  $DA_5$ ).

### 3. ЗАДАНИЕ К ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Данные выбираются из табл.3.3.1.

Таблица 3.3.1

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К ЗАЩИТЕ

№	Схема	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$C_1$	$C_2$
1	а	R	0.1R	10R	R	C	-
2	б	10R	R	R	-	0.01C	C
3	в	R	0.1R	0.9R	-	C	100C
4	г	R	0.1R	-	-	C	9C
5	а	10R	R	100R	10R	C	-
6	б	R	0.1R	0.1R	-	0.01C	C
7	в	10R	R	9R	-	C	100C
8	г	0.1R	0.01R	-	-	C	9C
9	а	0.1R	0.01R	R	0.1R	C	-
10	б	100R	10R	10R	-	0.01C	C
11	в	0.1R	0.01R	0.09R	-	C	100C
12	г	10R	R	-	-	C	9C

3.1. Для схем корректирующих звеньев, представленных на рис.3.3.1, построить при помощи операторного метода переходную характеристику. Номер варианта соответствует номеру по журналу группы (при №> 12, вариант выбирается как разность между количеством человек в группе и своим номером по журналу группы).

3.2. Для схем корректирующих звеньев, представленных на рис. 3.3.1, построить частотные характеристики: ЛАЧХ, ЛФЧХ. Характеристики АЧХ, АФХ изобразить условно.

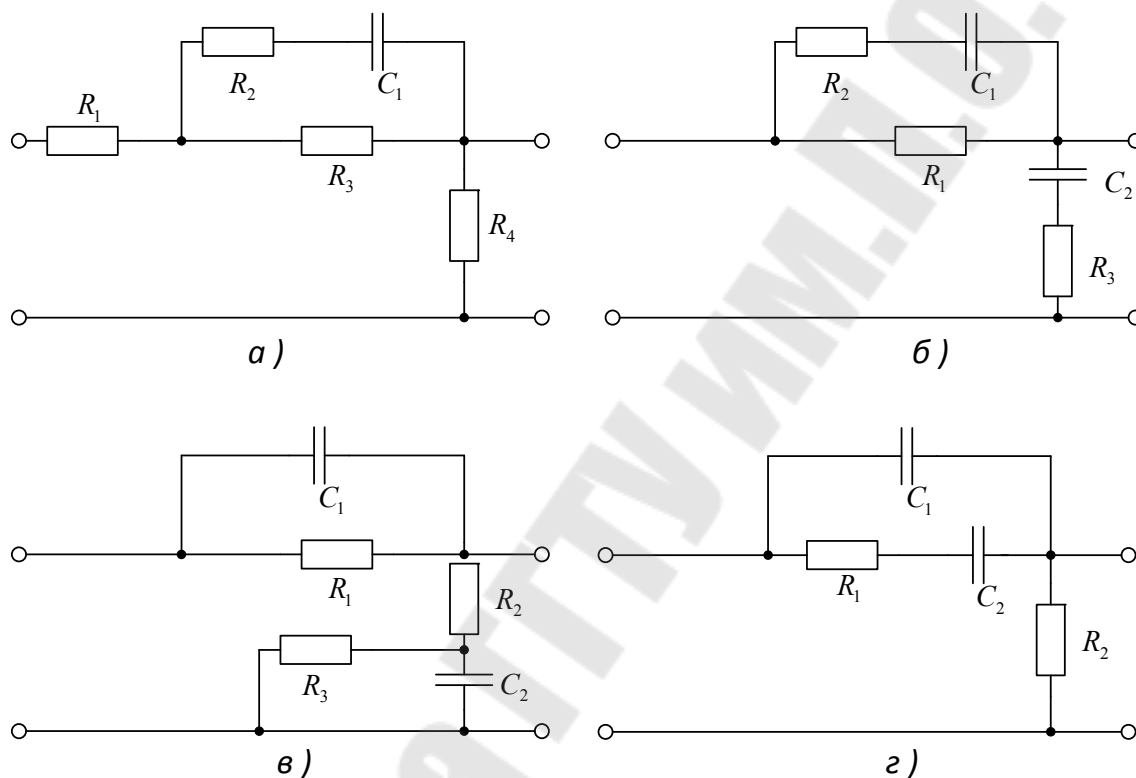


Рис. 3.3.1 Схемы корректирующих звеньев

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы исследуемых систем с результатами исследований в виде таблиц и графиков.
3. Выполненное задание к защите лабораторной работы
4. Выводы по результатам исследований.

#### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое переходная и импульсная переходная характеристика?
2. Что такое АЧХ и ФЧХ?
3. Что такое частота сопряжения и постоянная времени?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗОМКНУТОЙ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ СРЕДЫ SCILAB

**Цель работы:** освоение методов анализа одномерной линейной непрерывной системы с помощью среды SCILAB

#### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

##### 1.1. Модели линейных систем

Для описания линейных систем могут применяться несколько способов:

- дифференциальные уравнения
- модели в пространстве состояний
- передаточные функции
- модели вида «нули-полюса»

Первые два способа называются *временными*, поскольку описывают поведение системы во временной области и отражают внутренние связи между сигналами. Передаточные функции и модели вида «нули-полюса» относятся к *частотным* способам описания, так как непосредственно связаны с частотными характеристиками системы и отражают только входные и выходные свойства (то есть, описывают динамику не полностью).

Частотные методы позволяют применять для анализа и синтеза алгебраические методы, что часто упрощает расчеты. С другой стороны, для автоматических вычислений более пригодны методы, основанные на моделях в пространстве состояний, поскольку они используют вычислительно устойчивые алгоритмы линейной алгебры.

Исходные уравнения динамики объектов, которые строятся на основе законов физики, имеют вид нелинейных дифференциальных уравнений. Для приближенного анализа и синтеза обычно проводят их линеаризацию в окрестности установившегося режима и получают линейные дифференциальные уравнения.

Линейное уравнение  $\ddot{y} + 2\dot{y} + 3y = 4\dot{u} + 5u$  можно записать в операторной форме

$$(p^2 + 2p + 3)y = (4p + 5)u \text{ или } D(p)y = N(p)u$$

где  $u(t)$  – входной сигнал,  $y(t)$  – сигнал выхода,  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования,  $D(p) = p^2 + 2p + 3$  и  $N(p) = 4p + 5$  – операторные полиномы.

Передаточная функция  $W(s)$  линейной стационарной системы от комплексной переменной  $s$  определяется как отношение преобразования Лапласа выхода к преобразованию Лапласа входа при нулевых начальных условиях

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}, Y(s) = \int_0^{\infty} y(t)e^{-st} dt, U(s) = \int_0^{\infty} u(t)e^{-st} dt.$$

Передаточная функция звена, которое описывается приведенным выше уравнением, равна

$$W(s) = \frac{4s + 5}{s^2 + 2s + 3},$$

то есть, совпадает с отношением операторных полиномов  $N(p) / D(p)$  при замене переменной  $p$  на  $s$ .

Передаточная функция в среде *SCILAB* вводится в виде отношения двух многочленов (полиномов) от комплексной переменной  $s$ . Полиномы хранятся как массивы коэффициентов, записанных по возрастанию степеней. Например, передаточная

функция  $F(s) = \frac{2s + 4}{s^3 + 1.5s^2 + 1.5s + 1}$  будет вводиться следующим

образом<sup>1</sup>:

Вначале числитель:

--> n = poly([4 2], 's', 'coeff')

**n =**

**4 + 2s**

Второй параметр ('s') обозначает переменную, а третий ('coeff') показывает, что массив задаёт коэффициенты полинома (а не его корни). В отличие от *Matlab*, коэффициенты полинома вводятся в обратном порядке – от младшего к старшему. Затем знаменатель:

--> d = s^3 + 1.5\*s^2 + 1.5\*s + 1

**d =**

**1 + 1.5s + 1.5s^2 + s^3**

--> f = syslin('c', n, d)

**4 + 2s**

<sup>1</sup>

Обычным шрифтом обозначается ввод пользователя, жирным – ответ среды *SCILAB*.



$$1 + 1.5s + 1.5s^2 + s^3$$

или сразу, без предварительного построения числителя и знаменателя:

```
--> f = syslin('c', 2*s+4, s^3+1.5*s^2+1.5*s+1 );
```

Можно было использовать встроенную переменную %s:

```
--> s = %s
```

```
--> n = 2*s + 4
```

```
n =
```

$$4 + 2s$$

В памяти создается объект, описывающий передаточную функцию. Точка с запятой в конце команды подавляет вывод на экран.

С помощью функции *roots* можно найти нули и полюса передаточной функции:

```
--> z = roots ( n )
```

```
- 2.
```

```
--> p = roots ( d )
```

```
- 0.25 + 0.9682458i
```

```
- 0.25 - 0.9682458i
```

```
- 1.
```

*Нулями* называются корни числителя, *полюсами* – корни знаменателя. Эта функция имеет один нуль в точке  $s = -2$  и три полюса в точках  $s = -1$  и  $s = -0,25 \pm 0,9682i$ . Парe комплексных полюсов соответствует квадратный трехчлен.

Модель в пространстве состояний связана с записью дифференциальных уравнений в стандартной форме Коши (в виде системы уравнений первого порядка):

$$\dot{x} = A x + B u$$

$$y = C x + D u$$

Здесь  $x$  – вектор переменных состояния размера  $n \times 1$ ,  $u$  – вектор входных сигналов (вектор управления) размера  $m \times 1$  и  $y$  – вектор выходных сигналов размера  $p \times 1$ . Кроме того,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – постоянные матрицы. Согласно правилам матричных вычислений, матрица  $A$  должна быть квадратной размера  $n \times n$ , матрица  $B$  имеет размер  $n \times m$ , матрица  $C$  –  $p \times n$  и матрица  $D$  –  $p \times m$ . Для систем с одним входом и одним выходом матрица  $D$  – скалярная величина.

Для преобразования передаточной функции в модель в пространстве состояний используется команда

```
--> f_ss = tf2ss ( f )
```

```
f_ss(2) = A matrix =
```

```
x1 x2 x3
```

```
x1 -1.5 -0.1875 -0.03125
```

```
x2 8 0 0
```

```
x3 0 4 0
```

```
f_ss(3) = B matrix =
```

```
u1
```

```
x1 0.5
```

```
x2 0
```

```
x3 0
```

```
f_ss(4) = C matrix =
```

```
x1 x2 x3
```

```
y1 0 0.5 0.25
```

```
f_ss(5) = D matrix =
```

```
u1
```

```
y1 0
```

Это означает, что матрицы модели имеют вид

$$A = \begin{bmatrix} -1.5 & -0.1875 & -0.03125 \\ 8 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \quad 0.5 \quad 0.25], D = 0.$$

Модель в пространстве состояний можно построить не для всех передаточных функций, а только для *правильных*, у которых степень числителя не выше, чем степень знаменателя. Например, передаточная функция

$$W(s) = \frac{2s^2 + 3s + 1}{s + 5}$$

– неправильная, она не может быть преобразована в модель в пространстве состояний.

Используют также понятие *строго правильной функции*, у которой степень числителя *меньше*, чем степень знаменателя. Если построить модель в пространстве состояний для такой функции, матрица  $D$  будет равна нулю, то есть, прямая передача с входа на выход отсутствует (при скачкообразном изменении входа сигнал на выходе будет непрерывным).

## 1.2 Коэффициент усиления в установившемся режиме

Одна из важнейших характеристик линейной системы – коэффициент усиления в установившемся режиме или *статический коэффициент усиления (static gain, DC-gain)*. Его можно определить как установившееся значение сигнала выхода при постоянном входном сигнале, равном единице. Размерность этой величины равна отношению размерностей сигналов выхода и входа.

Рассмотрим дифференциальное уравнение

$$\ddot{y} + 2\dot{y} + 3y = 4\dot{u} + 5u.$$

Полагая все производные (в установившемся режиме) равными нулю, получаем

$$3y = 5u \Rightarrow y = \frac{5}{3}u.$$

Статический коэффициент усиления равен  $k_s = 5/3$ .

Если задана передаточная функция, для вычисления  $k_s$  надо подставить в нее  $s=0$ , поскольку переменная  $s$  соответствует оператору дифференцирования. Рассмотренному выше уравнению можно сопоставить передаточную функцию

$$W(s) = \frac{4s + 5}{s^2 + 2s + 3}.$$

Тогда

$$k_s = \lim_{s \rightarrow 0} W(s) = \frac{5}{3}.$$

Если система содержит интегрирующее звено (передаточная функция имеет полюс в точке  $s=0$ ), этот предел равен бесконечности, то есть, при постоянном сигнале выход бесконечно увеличивается или уменьшается, не достигая установившегося режима.

Тот же результат можно получить с помощью эквивалентной модели в пространстве состояний. С помощью среды SCILAB находим

$$A = \begin{bmatrix} -2 & -1.5 \\ 2 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [2 \quad 1.25], D = 0.$$

Полагая  $\dot{x}=0$ , получаем модель, определяющую установившийся режим

$$\begin{aligned} 0 = Ax + Bu &\Rightarrow x = -A^{-1}Bu \Rightarrow y = (-CA^{-1}B + D)u, \\ y = Cx + Du & \quad y = Cx + Du \end{aligned}$$

откуда следует

$$k_s = -C A^{-1} B + D.$$

Для нашей системы, как и раньше, получаем  $k_s = \frac{5}{3}$ .

Чтобы найти статический коэффициент усиления модели  $f$  в SCILAB, используется команда

```
--> k = horner ( f, 0 ) // подставить s = 0
```

### 1.3 Импульсная характеристика

*Импульсной характеристикой (весовой функцией)  $g(t)$* , как говорилось в предыдущей работе, называется реакция системы на единичный бесконечный импульс.

Второе название – *весовая функция* – связано с тем, что для произвольного входного сигнала  $u(t)$  выход системы  $y(t)$  вычисляется как свертка

$$y(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) g(t - \tau) d\tau = \int_0^{\infty} u(t - \tau) g(\tau) d\tau.$$

Здесь функция  $w(t)$  как бы «взвешивает» входной сигнал в подынтегральном выражении.

Импульсная характеристика отражает лишь соотношения вход-выход при *нулевых начальных условиях*, то есть, не может полностью описывать динамику системы.

Понятие импульсной характеристики используется главным образом для систем, передаточные функции которых *строго правильные*. Если передаточная функция правильная, но не строго правильная, коэффициент прямой передачи с входа на выход (матрица  $D$  модели в пространстве состояний) не равен нулю, поэтому бесконечный импульс на входе в момент  $t = 0$  передается на выход. Такую (бесконечную по величине) импульсную характеристику невозможно построить. Система SCILAB в этом случае строит импульсную характеристику для строго правильной части, принимая  $D = 0$ . Это один из тех случаев, когда компьютер выдает качественно неверный результат.

Если система не содержит интеграторов, импульсная характеристика стремится к нулю. Это следует из теоремы о предельном значении:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s W(s),$$

где  $W(s)$  – передаточная функция системы, которая является преобразованием Лапласа для  $g(t)$ . Импульсная характеристика системы с одним интегратором стремится к постоянной величине, равной статическому коэффициенту передачи системы без интегратора. Для системы с двумя интеграторами импульсная характеристика асимптотически стремится к прямой, с тремя интеграторами – к параболе и т.д.

#### 1.4 Переходная характеристика

*Переходной характеристикой* (переходной функцией)  $h(t)$  называется реакция системы (при нулевых начальных условиях) на единичный ступенчатый сигнал (единичный скачок)

$$1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0. \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

Импульсная и переходная функции связаны выражениями

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt}, \quad h(t) = \int_0^t g(\phi) d\phi.$$

Для систем без интеграторов переходная характеристика стремится к постоянному значению (рис.1.2).

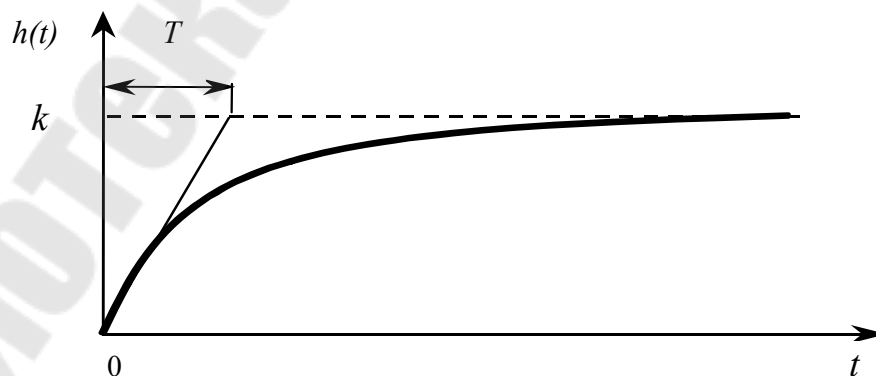


Рис. 4.1.1 Вид переходной характеристики для систем без интеграторов

Переходная характеристика системы с дифференцирующим звеном (числитель передаточной функции имеет нуль в точке  $s = 0$ ) стремится к нулю. Если система содержит интегрирующие звенья, переходная характеристика асимптотически стремится к прямой, параболе и т.д., в зависимости от количества интеграторов.

По определению предельное значение переходной функции  $h(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  есть статический коэффициент усиления:  $k_s = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$

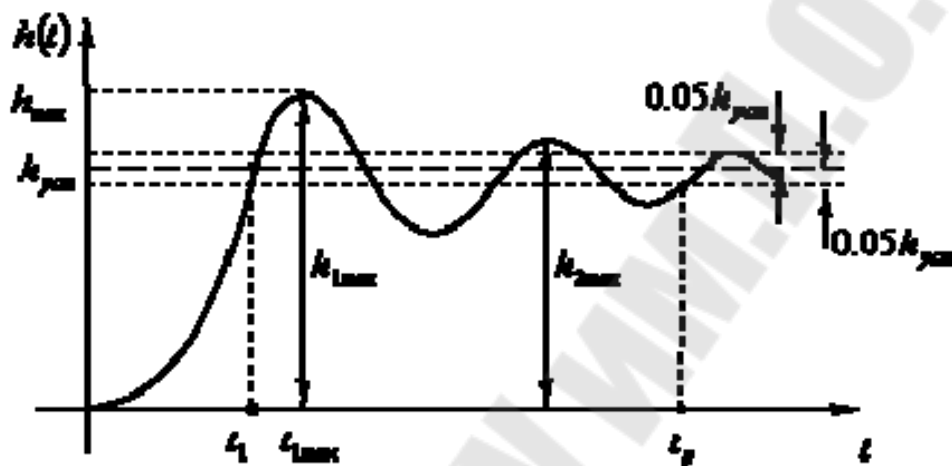


Рис.4.1.2 Определение показателей качества по переходной характеристике системы

По переходной характеристике можно найти важнейшие показатели качества системы – перерегулирование (*overshoot*) и время переходного процесса (*settling time*).

Перерегулирование определяется как

$$y = \frac{h_{max} - h_{\infty}}{h_{\infty}} \times 100,$$

где  $h_{max}$  – максимальное значение функции  $h(t)$ , а  $h_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$  – установившееся значение выхода.

Если установившееся значение отрицательное, при вычислении перерегулирования нужно выполнить «зеркальное отражение» сигналов – поменять знаки у  $h(t)$  и  $h_{\infty}$ . В формуле вместо максимального значения нужно взять минимальное:

$$y = \frac{h_{min} - h_{\infty}}{h_{\infty}} \times 100.$$

*Время переходного процесса* – это время, после которого сигнал выхода отличается от установившегося значения не более, чем на заданную малую величину, обычно около 5% .

### 1.5. Частотная характеристика

При подаче на вход линейной системы гармонического (синусоидального) сигнала  $u(t) = \sin \omega t$  с частотой  $\omega$  (она измеряется в радианах в секунду), на выходе будет также гармонический сигнал той же частоты, но другой амплитуды и фазы  $y(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ , где  $A$  – амплитуда и  $\varphi$  – сдвиг фазы.

Частотная характеристика определяется как реакция системы на комплексный экспоненциальный сигнал  $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$ . Для ее построения надо использовать подстановку  $s = j\omega$  в передаточной функции  $W(s)$ . Выражение  $W(j\omega)$  называется *частотной передаточной функцией* или *амплитудно-фазовой частотной характеристикой системы* (АФЧХ).

Зависимость модуля величины  $W(j\omega)$  от частоты называется *амплитудной частотной характеристикой* (АЧХ), а зависимость аргумента комплексного числа (фазы)  $W(j\omega)$  от частоты – *фазовой частотной характеристикой* (ФЧХ):

$$A(\omega) = |W(j\omega)|, \quad \arg W(j\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} W(j\omega)}{\operatorname{Re} W(j\omega)}.$$

АЧХ показывает, насколько усиливается амплитуда сигналов разных частот после прохождения через систему, а ФЧХ характеризует сдвиг фазы сигнала.

Реальные объекты имеют строго правильную передаточную функцию, поэтому их АЧХ убывает с ростом частоты и асимптотически стремится к нулю. Говорят, что такой объект обладает *свойством фильтра* – фильтрует (не пропускает) высокочастотные сигналы (помехи, шумы измерений). Это свойство служит основой для использования метода гармонического баланса.

Максимум АЧХ соответствует частоте, на которой усиление наибольшее. Значение АЧХ при  $\omega = 0$  равно усилению при постоянном сигнале, то есть, статическому коэффициенту усиления  $k_s$ . Это следует и из равенства

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} A(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow 0} |W(j\omega)| = \lim_{s \rightarrow 0} W(s) = k_s.$$

Для систем с интегрирующими звеньями частотная характеристика стремится к бесконечности при  $\omega \rightarrow 0$ . Это значит, что их выход бесконечно увеличивается или уменьшается при постоянном входном сигнале.

Частота, после которой значение АЧХ уменьшается ниже 0 дБ (коэффициент усиления меньше 1, сигнал ослабляется), называется *частотой среза* системы  $\omega_c$ .

Чтобы построить частотные характеристики в SCILAB, надо сначала создать массив частот в нужном диапазоне. Для этого можно использовать функции **linspace** (равномерное распределение точек по линейной шкале) и **logspace** (равномерное распределение точек по логарифмической шкале). Команда

```
>> w = linspace (0, 10, 100);
```

строит массив из 100 точек с равномерным шагом в интервале от 0 до 10, а команда

```
>> w = logspace (-1, 2, 100);
```

– массив из 100 точек с равномерным шагом по логарифмической шкале в интервале от  $10^{-1}$  до  $10^2$ .

Частотная характеристика на сетке **w** для линейной модели **f** (заданной как передаточная функция, модель в пространстве состояний или в форме «нули-полюса») вычисляется с помощью функции **repfreq**:

```
>> fResp = repfreq(f, w/(2*%pi));
```

Функция **repfreq** принимает два аргумента: модель системы и массив частот в герцах. Поскольку массив **w** – это угловые частоты ( $\omega = 2\pi f$ ), для получения массива «обычных» частот нужно разделить все значения на  $2\pi$ . Дальше можно найти модуль частотной характеристики:

```
>> Aw = abs(fResp);
```

Для вывода графика АЧХ на экран можно использовать команду SCILAB:

```
>> plot2d ("ln", w, Aw)
```

Первый аргумент «ln» говорит о том, что используется логарифмический масштаб по оси абсцисс (частот). Для вычисления фазы в градусах используется команда

```
>> phi = phasemag(fResp);
```

после чего можно строить ФЧХ, например:

```
>> plot2d ("ln", w, phi);
```



Частота, после которой значение АЧХ падает ниже -3 дБ от значения при  $\omega = 0$  (коэффициент усиления становится меньше  $\frac{1}{\sqrt{2}}k_s$ ), называется **полосой пропускания** системы  $\omega_b$ . Смысл этой величины в том, что коэффициент усиления сигнала этой частоты *по мощности* в 2 раза меньше, чем коэффициент усиления постоянного сигнала.

Найдем коэффициент усиления, равный -3 дБ:

**>> k3dB = 10^(-3/20);**

Найдём индексы массива значений АЧХ, для которых коэффициент усиления не меньше -3 дБ от значения  $A_w(1)$  (при нулевой частоте):

**>> ind = find(Aw >= k3dB\*Aw(1));**

Полосу пропускания вычислим как максимальную частоту, для которой коэффициент усиления больше или равен -3дБ:

**>> B = max( w(ind) );**

## 1.6. Полюса и нули

Многие динамические свойства системы (например, быстродействие и колебательность переходного процесса) определяются полюсами передаточной функции (или, что то же самое, собственными числами матрицы  $A$  модели в пространстве состояний).

Передаточную функцию можно записать как произведение передаточных функций элементарных звеньев первого и второго порядков. Таким образом, множество полюсов передаточной функции устойчивой системы составляют полюса передаточных функций двух типов простейших звеньев: апериодических и колебательных.

*Апериодическое* звено с передаточной функцией вида  $F(s) = \frac{1}{Ts + 1}$  имеет единственную характеристику – постоянную времени  $T$ . Начиная примерно с частоты<sup>2</sup>  $\omega_0 = 1/T$ , АЧХ такого звена начинает убывать, приближаясь к нулю.

<sup>2</sup> Значение  $\omega_0 = 1/T$  возвращается функцией **damp** как собственная частота для вещественного полюса.

Колебательное звено имеет передаточную функцию

$$F(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1},$$
 где  $T$  – постоянная времени и  $0 < \zeta < 1$ .

Частота  $\omega_0 = 1/T$  называется *собственной частотой* (*natural frequency*), а параметр  $\zeta$  – *параметром затухания* или *коэффициентом демпфирования* (*damping factor*). При уменьшении  $\zeta$  импульсная и переходная функции приобретают ярко выраженный колебательный характер, а на АЧХ появляется «горб» в районе частоты  $\omega_0$ . В предельном случае при  $\zeta = 0$  колебания становятся незатухающими, а звено называется *консервативным*. С другой стороны при  $\zeta = 1$  корни знаменателя становятся вещественными, и звено превращается в апериодическое звено второго порядка.

Для нахождения полюсов передаточной функции **f** можно использовать функцию

```
>> p = roots(denom(( f )))
```

Вызов функции `>> [w0,zeta,p] = damp ( f )` позволяет найти не только полюса **p**, но также соответствующие им собственные частоты **w0** и коэффициенты демпфирования **zeta** в виде массивов.

Нули передаточной функции **f** вычисляются как

```
>> z = roots( numer(( f )) );
```

Устойчивость системы не зависит от расположения нулей, но они существенно влияют на переходные процессы. Команда

```
>> plzr ( f );
```

строит карту расположения нулей (они обозначаются кружками) и полюсов (крестики) системы на комплексной плоскости.

## 2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получение численной модели передаточной функции системы.

1.1. Ввести модель системы в виде передаточной функции.

Для этого:

Очистить рабочее пространство Scilab (память).

Команда: `--> clear`

1.2. Очистить окно SCILAB.

Команда: `>> clc`

1.3.Посмотреть краткую справку по команде **syslin**.

Команда: **>> help syslin**

1.4. Ввести значение передаточной функции (коэффициенты функции выбираются из табл.4.1 по заданию преподавателя):

$$F(s) = \frac{n_2 s^2 + n_1 s + n_0}{s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0};$$

*Внимание!:* Коэффициенты полиномов в Scilab перечисляются от младшего к старшему!

Команда: **>> n = poly([n0 n1 n2], 's', 'coeff')  
d = poly([d0 d1 d2 1], 's', 'coeff')  
f = syslin ('c', n, d)**

*Проверьте,* как извлечь из этого объекта *числитель* и *знаменатель передаточной функции*.

Команда: **>> n1 = numer( f )  
d1 = denom( f )**

2. Построение эквивалентных моделей в пространстве состояний и в форме «нули-полюса».

2.1. Найдите нули и полюса передаточной функции.

Команда: **>> z = roots ( n )  
p = roots ( d )**

2.2. Построить модель системы в пространстве состояния.

Команда: **>> f\_ss = tf2ss ( f )**

3. Определение коэффициента усиления в установившемся режиме и полосы пропускания системы.

3.1. Найдите коэффициент усиления звена в установившемся режиме ( $k$ ).

Команда: **>> k = horner ( f, 0 )**

3.2. Изменить коэффициент прямой передачи звена на единичный ( $k1=1$ )

Команда: **>> f\_ss.D = 1**

3.3. Найти новый коэффициент усиления звена в установившемся режиме ( $k_1$ ).

Команда: **>> k1 = horner ( ss2tf(f\_ss), 0 )**

3.4. Объясните, как связаны коэффициенты  $k$  и  $k1$ ? Проверьте, какие переменные есть в рабочем пространстве. Выясните, что обозначают переменные **%e** и **%pi**?

4. Исследование расположения нулей и полюсов системы.

4.1. Построить на графике расположение нулей и полюсов системы.

Команда: `>> pzr(f)`

4.2 Определить по данному коэффициенты демпфирования и собственные частоты для всех элементарных звеньев (первого и второго порядка).

Команда: `>> [wc,ksi,p] = damp(f)`

Для копирования графика в отчёт используйте пункт верхнего меню «Файл – Копировать в буфер обмена» в окне графика.

5. Исследование импульсной характеристики.

5.1. Построить импульсную характеристику системы с заданной передаточной функцией.

Команда: `>> t = [0:0.05:30]  
yImp = csim('impuls', t, f)  
plot(t, yImp)`

При необходимости выберите подходящее конечное время моделирования.

5.2. Построить на том же графике импульсную характеристику системы с единичным коэффициентом передачи  $f_{ss}$

(в команде латинская буква 'r-' обозначает цвет линии: красная (red))

Команда: `>> yImp2 = ...  
plot(t, yImp2, 'r-')`

Скопируйте график для отчета. Объясните полученный результат.

6. Исследование переходной характеристики системы.

6.1. Построить переходную характеристику исходной системы.

Для этого открыть новое графическое окно:

Команда: `>> scf()`

Построить переходную характеристику исходной системы:

Команда: `>> yStep = csim('step', t, f)  
plot(t, yStep)`

6.2. По данной характеристике определите:

а) установившееся значение выхода (теоретически):

Команда: `>> yInf = ...`

б) перерегулирование в процентах:

```
Команда: >> ovr = max(yStep-yInf)/yInf*100
```

в) время переходного процесса (для коридора 5%):

```
Команда: >> err = abs(yStep-yInf)  
ind = find(err >= 0.05*yInf)  
set_time = t(max(ind)+1)
```

6.3. Построить на том же графике переходную характеристику системы **f\_ss**. Определить перерегулирование и время переходного процесса для системы **f\_ss**. Объяснить различие между переходными характеристиками двух систем.

7. Исследование частотных характеристик.

7.1. Создайте массив частот для построения частотной характеристики (100 точек в интервале от до рад/с с равномерным распределением на логарифмической шкале).

*Внимание!:* точка с запятой в конце команды подавляет вывод на экран результата выполнения. Это удобно при работе с большими массивами.

```
Команда: >> w = logspace(-1, 2, 100);
```

7.2. Рассчитать амплитудную частотную характеристику исходной системы (деление на  $2\pi$  – это переход к частоте в Гц!)

```
Команда: >> fResp = repfreq(f, w/(2*%pi));  
Aw = abs(fResp);
```

7.3. Создайте новое окно для вывода графика.

7.4. Построить АЧХ на осях с логарифмическим масштабом по оси абсцисс (первый параметр –«ln»).

```
Команда: >> plot2d ("ln", w, Aw )
```

7.5. Вычислить показатель колебательности системы.

```
Команда: >> M = max(Aw) / Aw(1)
```

7.6. Вычислить полосу пропускания системы (частоту при которой АЧХ снижается до -3дБ от значения при  $\omega=0$ ).

```
Команда: >> k3dB = 10^(-3/20);  
ind = find(Aw > k3dB*Aw(1));  
B = max( w(ind) );
```

Таблица 4.1.1

## Значения коэффициентов передаточной функции

Вариант	$n_2$	$n_1$	$n_0$	$d_2$	$d_1$	$d_0$
1.	1.0	1.10	0.100	3.0000	3.1600	1.2000
2.	1.1	1.54	0.495	2.8000	2.9200	1.2000
3.	1.2	1.08	0.096	2.3727	2.2264	0.9091
4.	1.3	1.04	0.091	2.1909	2.0264	0.9091
5.	1.4	-1.54	0.252	1.8333	1.5278	0.6944
6.	1.5	-0.90	-0.240	1.6667	1.3611	0.6944
7.	1.6	0.80	-0.224	1.3286	0.8959	0.4592
8.	1.7	1.36	0.204	1.1857	0.7673	0.4592
9.	1.8	-1.98	0.432	1.2000	0.7644	0.3556
10.	1.9	-0.76	-0.399	1.3333	0.8711	0.3556
11.	2.0	0.60	-0.360	1.2000	0.7406	0.2734
12.	2.1	1.68	0.315	1.3250	0.8281	0.2734
13.	2.2	-2.42	0.616	1.3059	0.7696	0.2076
14.	2.3	-0.46	-0.552	1.4235	0.8401	0.2076
15.	2.4	0.24	-0.480	1.3889	0.7531	0.1543
16.	2.5	2.25	0.500	1.5000	0.8086	0.1543
17.	2.6	0.26	-0.780	1.2421	0.6139	0.1108
18.	2.7	-0.27	-0.810	1.1368	0.5717	0.1108
19.	2.8	0.28	-0.840	0.8000	0.3700	0.0500

## 3. ЗАДАНИЕ К ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

3.1 Провести анализ одномерной линейной непрерывной системы с помощью среды SCILAB по заданию, выданному преподавателем на защите лабораторной работы.

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.

2. Результаты выполнения всех пунктов инструкции: результаты вычислений, графики, ответы на вопросы.
3. Выводы по результатам исследований.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как скопировать график из окна Scilab в другую программу?
2. Как ввести передаточную функцию

$$F(s) = \frac{2s + 3}{s^2 + 4s + 5} ?$$

3. Как влияет изменение коэффициента прямой передачи (матрицы  $D$  в модели в пространстве состояний) на статический коэффициент усиления?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ПАКЕТЕ XCOS

**Цель работы:** освоение моделирование систем управления в пакете XCOS

#### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

##### 1.1. Блоки для моделирования САУ

Пакет XCOS предназначен для моделирования систем. Вся модель строится из блоков, имеющих входы и выходы. Существует библиотека стандартных блоков, кроме того, можно создавать свои собственные блоки любой сложности.

Чтобы добавить надпись (например, название блока), нужно выполнить двойной щелчок мышью на поле. Появится рамка с многоточием, ее можно перетаскивать мышью. Двойной щелчок на тексте позволяет его изменить.

Каждый блок имеет свои настраиваемые свойства. Для их изменения надо дважды щелкнуть на блоке и изменить нужные значения в диалоговом окне.

Для того, чтобы повернуть блок на 90 градусов, надо выделить его и нажать клавиши **Ctrl+R**.

При нажатии правой кнопки мыши на блоке появляется контекстное меню. С помощью раздела **Формат - Правка** можно изменить цвета рамки, фона и текста в блоке.

Для выделения одного блока или соединительной линии надо щелкнуть ЛКМ по нужному элементу. Для того, чтобы выделить несколько блоков, надо «обвести» их при нажатой ЛКМ. Клавиша **Delete** удаляют выделенную часть. Чтобы скопировать блок (или выделенную часть), надо перетащить его при нажатой клавише **Ctrl**.

Блоки соединяются линиями связи, по которым распространяются сигналы. Для того, чтобы соединить блоки, надо «вытащить» линию из выходного порта и протащить её к о входу другого элемента. Для того, чтобы провести ломаную линию, нужно

- 1) «вытащить» линию из выходного порта блока и отпустить ЛКМ в первой точке излома
- 2) щелчками ЛКМ поставить остальные узлы
- 3) щелкнуть ЛКМ на входном порту другого блока.



Узлы ломаной (они изображаются квадратиками) можно перетаскивать мышью. Двойной щелчок на линии добавляет в этом месте новый узел. Двойной щелчок ЛКМ по узлу удаляет его.

Чтобы подать один сигнал на два блока (сделать «развилку»), надо сначала создать одну линию обычным способом. Чтобы провести вторую линию, следует нажать *левую или правую* кнопку мыши на линии в точке развилки и протащить линию ко второму блоку.

Модель можно сохранить в виде растрового рисунка. Для этого в окне модели надо выбрать в верхнем меню пункт **Файл – Экспортировать**. Схему лучше сохранять в формате **GIF**.


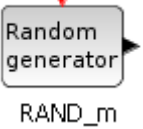

Для того, чтобы запустить моделирование, надо щелкнуть левой клавишей мышки по кнопке  на панели инструментов. Параметры моделирования (метод интегрирования, обработка ошибок) устанавливаются с помощью окна **Моделирование – Установка**. Самый важный параметр – это время моделирования (**Конечное время интегрирования**).

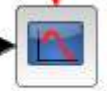
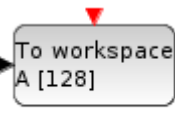
Таблица 5.1.1

Источники сигналов и воздействий

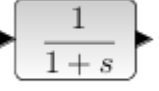
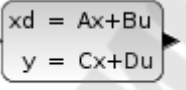
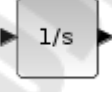
 CONST	<b>CONST</b> – сигнал постоянной величины.
 STEP_FUNCTION	<b>STEP_FUNCTION</b> – ступенчатый сигнал, меняется время скачка ( <b>Step Time</b> ), начальное ( <b>Initial Value</b> ) и конечное значение ( <b>Final Value</b> ).
 RAMP	<b>RAMP</b> – линейно возрастающий сигнал с заданным наклоном ( <b>Slope</b> ). Можно задать также время начала изменения сигнала ( <b>Start Time</b> ) и начальное значение ( <b>Initial Value</b> ).
 GENSQR_f	Генератор прямоугольных импульсов, задается амплитуда <b>M (Amplitude)</b> . Выход генератора изменяется с <b>M</b> на <b>-M</b> , когда на красный вход поступает сигнал (например, от часов).
 GENSIN_f	Синусоидальный сигнал, задается амплитуда ( <b>Amplitude</b> ), частота ( <b>Frequency</b> ), фаза ( <b>Phase</b> ).

 <p>Random generator RAND_m</p>	<p><b>Random generator</b> – случайные числа с равномерным или нормальным (гауссовым) распределением. Можно задать тип распределения (параметр <b>flag</b>: 0 – равномерное, 1 – нормальное). Для равномерного распределения параметр A – минимальное значение, параметр B – ширина диапазона; для нормального – параметр A – среднее значение (<b>Mean Value</b>), параметр B – среднеквадратическое отклонение.</p>
 <p>CLOCK_c</p>	<p><b>Часы (Источник событий)</b> – задаётся период повторяемости событий и время первого события.</p>

### Регистрирующие устройства



 <p>CSCOPE</p>	<p><b>Оциллограф</b> – фиксирует значение, когда на синхронизирующий (красный) вход приходит сигнал (от часов). График выводит в графическое окно.</p>
 <p>To workspace A [128] TOWS_c</p>	<p><b>To workspace</b> – передаёт информацию в рабочую область Scilab в виде массива с двумя полями:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>time</b> – набор временных отсчётов (когда приходил сигнал с часов);</li> <li>– <b>values</b> – массив соответствующих значений измеряемого сигнала.</li> </ul> <p>В параметрах задаются период обновления <b>Refresh period</b> (ширина диапазона по оси абсцисс), пределы по оси ординат <b>Ymin</b> и <b>Ymax</b>.</p>

### Системы с непрерывным временем




 <p><math>\frac{1}{1+s}</math> CLR</p>	<p>Передаточная функция, в параметрах задаются числитель (<b>Numerator</b>) и знаменатель (<b>Denominator</b>) в виде полиномов.</p>
 <p><math>\begin{cases} \dot{x}d = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}</math> CLSS</p>	<p>Модель в пространстве состояний, в параметрах задается четверка матриц, определяющих модель, и начальные условия для вектора состояния (<b>Initial conditions</b>).</p>
 <p>1/s INTEGRAL_f</p>	<p>Интегратор с возможностью установки начальных условий (<b>Initial state</b>).</p>

### Другие часто используемые блоки

#### Математические операции

	<p><b>Gain</b> – усилитель, задается коэффициент усиления (<b>Gain</b>).</p>
	<p><b>Sum</b> – сумматор, используется для сложения и вычитания входов. Параметр <b>Number of input or sign vector</b> задает количество входов и их знаки («+1» для сложения и «-1» для вычитания). Например, [1;-1].</p>

#### Маршрутизация сигналов

	<p><b>Manual Switch</b> – ручной переключатель, позволяет переключать выход на один из двух входных сигналов.</p>
	<p><b>Mux</b> – мультиплексор, объединяет несколько сигналов в один «жгут» (векторный сигнал), в параметрах задается число входов (<b>Number of Inputs</b>).</p>
	<p><b>Demux</b> – демультиплексор, позволяет «разбить» векторный сигнал на несколько скалярных, в параметрах задается число выходов (<b>Number of Outputs</b>).</p>

#### 1.2. Оформление графиков

Для создания нового окна для рисунка в SCILAB используется команда

```
--> scf()
```

В SCILAB есть возможность строить несколько графиков на одном рисунке. Иначе говоря, рисунок можно разбить на «клетки», в каждой из которых строится отдельный график. Для этого надо сделать активным нужный рисунок и применить команду

```
--> subplot(2, 1, 1);
```

Первое число в команде **subplot** показывает количество «строк» в такой матрице, второе – количество столбцов, третье – какой по счету график сделать активным (считая по строкам, справа налево и сверху вниз). Все дальнейшие команды (**plot**, **title**, **xlabel**, **ylabel**, **legend** и др.) относятся к этому «подграфику».

В командах можно передавать в качестве аргументов не целые массивы, а их части. Например, по команде

```
--> plot(x(1:20), y(11:30));
```

строится график, на котором по оси абсцисс откладываются значения элементов массива **x** с номерами от 1 до 20, а по оси ординат – соответствующие им значения из массива **y** с номерами от 11 до 30.

Двоеточие означает «все строки» или «все столбцы». Например, по команде

```
--> plot(x(:,1), x(:,2));
```

строится зависимость между первым и вторым столбцами массива **x** (здесь двоеточие вместо первого индекса обозначает «все строки»).

С помощью команды **plot** (а также **plot2d**) можно строить несколько линий на одном графике. Для этого среди аргументов перечисляются пары массивов:

```
--> plot(x, y, v, z);
```

Первая линия будет показывать зависимость **y** от **x**, а вторая – зависимость **z** от **v**. массивы в каждой паре должны быть одинаковой длины. При желании можно указать цвета для каждой линии, Например,

```
--> plot(x, y, 'b', v, z, 'g');
```

Первая линия (зависимость **y** от **x**) будет синей, вторая (зависимость **z** от **v**) – зеленой. Можно использовать следующие цвета

**b** синий (**blue**)

**g** зеленый (**green**)

**r** красный (**red**)

**c** голубой (**cyan**)

**m** фиолетовый (**magenta**)

**y** желтый (**yellow**)

**k** черный (**black**)

По умолчанию первая линия – синяя, вторая – зеленая и т.д. в порядке перечисления цветов в списке. Дополнительно можно указать тип линии

- сплошная

: точечная

-. штрих-пунктирная

-- штриховая

Например,

```
--> plot(x, y, 'b:', v, z, 'g--');
```

Первая линия – точечная синего цвета, вторая – штриховая зеленого цвета. По умолчанию все линии сплошные.

Для оформления графика также используются команды **title** заголовок графика

**xlabel** название оси абсцисс

**ylabel** название оси ординат

У всех этих команд обязателен один аргумент – текст в апострофах.

Команда **legend** служит для вывода легенды графика. Легенда нужна, если на графике есть несколько линий и надо показать, что обозначает каждая из них. Параметрами команды **legend** являются символьные строки, их должно быть столько, сколько построено линий.

В надписях можно использовать некоторые команды системы TeX. Например, греческие буквы записываются в виде «**\alpha**», «**\beta**» и т.д. Верхний индекс (степень) обозначается знаком «**^**», Например,  $a^2$  запишется как «**a^2**». Для обозначения индекса используют нижнее подчеркивание, например,  $a_{22}$  кодируется как «**a\_{22}**». Если в надписи используются обозначения TeX, в начале и в конце нужно ставить знак \$:

--> `ylabel('$\phi$, градусы$');`

### 1.3. Описание системы

В работе рассматривается система управления курсом. Ее структурная схема показана на рисунке.

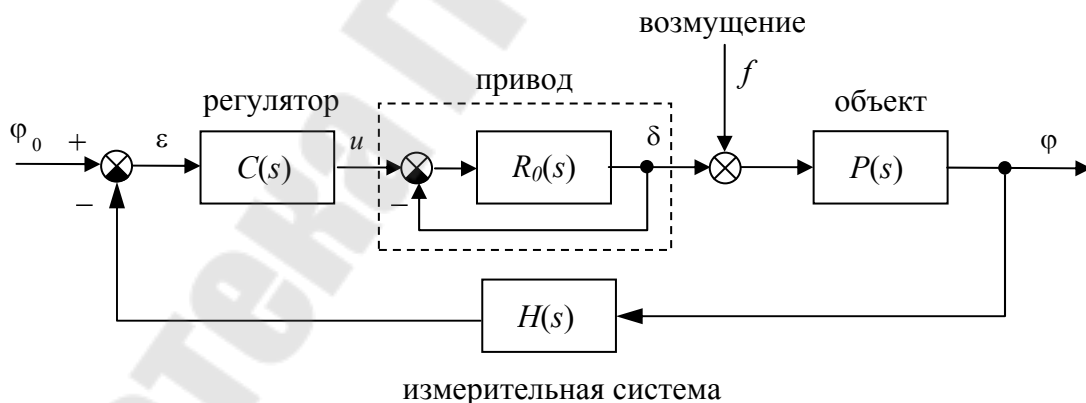


Рис.5.1.1. Структурная схема системы стабилизации управляемого объекта на курсе

Задача системы стабилизации – сохранять заданное значение выхода  $\varphi_0$  при действии возмущения  $f$  (ветра или недостаточного сцепления с покрытием).

Линейная математическая модель, описывающая небольшие отклонения от заданного курса вправо или влево, имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= \omega_y \\ \dot{\omega}_y &= -\frac{1}{T_s} \omega_y + \frac{K}{T_s} \delta\end{aligned}$$

где  $\varphi$  – угол отклонения от заданного курса,

$\omega_y$  – угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси,

$\delta$  – угол поворота вертикального руля относительно нейтрального положения,

$T_s$  – постоянная времени,

$K$  – постоянный коэффициент, имеющий размерность *рад/сек*.

Передаточная функция от угла поворота руля к углу отклонения от заданного курса запишется в виде

$$P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)}.$$

Рулевое управление моделируется в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией

$$R(s) = \frac{1}{T_R s + 1}.$$

Для измерения угла отклонения от заданного курса используется гирокомпас, математическая модель которого записывается в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией (Численные значения  $K$ ,  $T_s$ ,  $T_R$  и  $T_{oc}$  надо взять из таблицы в конце лабораторной работы).

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc} s + 1}.$$

Исследуются переходные процессы в системе при использовании ПД-регулятора


$$C(s) = K_c \left( 1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1} \right),$$

и ПИД-регулятора

$$C(s) = K_c \left( 1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1} \right) + \frac{1}{T_I s}.$$

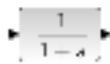
## 2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

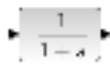
### 1. Построение модели управления

1.1. Для запуска пакета Xcos щелкните по кнопке  в командном окне SCILAB или введите команду **Xcos** в командной строке.

Команда: `>> xcos`

1.2. В палитре блоков откройте группу «Системы с непрерывным



временем» и перетащите блок  (передаточная функция) из библиотеки блоков в окно модели. Введите числитель и знаменатель передаточной функции модели объекта управления. Значения постоянных времени и коэффициентов возьмите из таблицы (см. ниже) для своего варианта.

Команда: `>>` **Двойной щелчок на блоке**  
– **Numerator** **K**  
– **Denominator** **Ts\*s^2+s**

1.3. Дайте блоку название **Объект**. Для нажмите на блоке на правую кнопку мыши, выберите пункт контекстного меню *Формат – Правка* и введите текст на вкладке *Настройки текста*.

1.4. Аналогично добавьте еще три передаточные функции, назовите их **Привод**, **Регулятор** и **Гирокомпас**, введите нужные параметры (см. таблицу в конце файла для вашего варианта). Заметьте, что передаточная функция привода должна быть  $R(s) = \frac{1}{T_R s + 1}$  с учетом внутренней обратной связи. Передаточная функция регулятора (для всех вариантов):

$$C(s) = \frac{13,53s + 0.7}{s + 1}$$

1.5. Сохраните модель в своей папке под именем **lab2.zcos**.

Команда: `>>`

Файл – Сохранить

1.6. Выделите блок **Гирокомпас** и разверните его в другую сторону.

Команда: `>>` **Нажать Ctrl+M.**

1.7. Выберите цвет блоков на свой вкус.

Команда: `>>` **ПКМ на блоке,**  
**Формат–Правка–Цвет заливки**

1.8. Перетащите в окно модели блок



из группы «Общепотребительные блоки» и установите его слева от регулятора.

Команда: >> **ЛКМ**

1.9. Сделайте так, чтобы второй вход учитывался в сумме со знаком минус (отрицательная обратная связь).

Команда: >> **Двойной щелчок на блоке, ввести [1;-1] в поле Input ports/signs/gain**

1.10. Перетащите в окно модели блок



из группы **Источники сигналов и воздействий** и установите его слева от сумматора. Дайте ему имя **Заданный курс**.

1.11. Установите время подачи сигнала 0 и величину сигнала 10 (исследуем поворот на 10 градусов).

Команда: >> **Двойной щелчок на блоке, 0 в поле Step time 10 в поле Итоговое значение**

1.12. Соедините все блоки нужным способом (см. рис. 5.1.1).

Команда: >> **С помощью ЛКМ вытянуть линию с выхода одного блока к входу другого, щелчок – точка излома.**

1.13. Перетащите в окно модели два блока



(осциллограф) из группы **Регистрирующие устройства** и установите их в правой части. Назовите их **Руль** и **Курс**.

1.14. Сделайте, чтобы на первый блок **CSCOPE** поступал сигнал управления (угол поворота руля, после блока **Привод**), а на второй – сигнал выхода (курс). Сохраните модель.

Команда: >> **Нажать ПКМ на линии в точке отбора сигнала, затем, не отпуская ПКМ, тащить линию к входу блока.**

Дополнительную точку перегиба линии можно поставить двойным щелчком на этой линии.



1.15. Добавьте часы – блок



из группы «Обработка событий», и соедините выход этого блока с красными (синхронизирующими) входами блоков-осциллографов.

1.16. Уменьшите окно до минимального размера, при котором видны все элементы, и сохраните картинку на диск в формате GIF. Затем вставьте её в отчёт.

Команда: >> **Файл - Экспортировать**

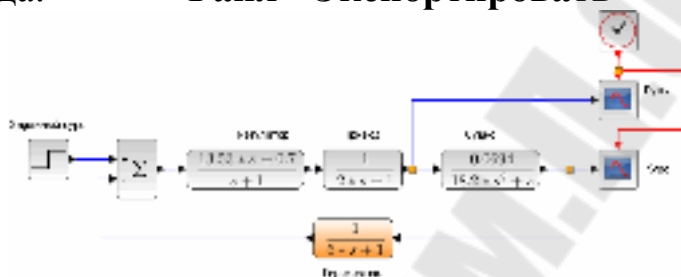


Рис.5.2.1. Структурная схема системы стабилизации управляемого объекта на курсе в системе моделирования XCOS

1.17. Установите для блока «часы» (таймера, генератора событий) интервал 0,1 с и время инициализации – 0 с.

Команда: >> **Двойной щелчок по блоку, свойства Period и Время инициализации.**

1.18. Установите время моделирования 100 секунд.

Команда: >> **Моделирование – Установка – Конечное время интегрирования = 100**

1.19. Установите для обоих блоков-осциллографов время обновления 100 с

Команда: >> **Двойной щелчок по блоку, свойство Refresh period**

1.20. Выполните моделирование.

Команда: >> **ЛКМ по кнопке  или Моделирование – Запустить**

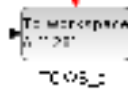
1.21. Посмотрите результаты моделирования в графических окнах и настройте пределы по оси Y.

Команда: >> **Двойной щелчок по блоку-осциллографу, свойства Ymin и Ymax**

1.22. Закройте графические окна и еще раз выполните моделирование. Добавьте полученные графики в отчёт.

## 2. Обработка данных из модели в рабочем пространстве Scilab

### 2.1. Замените блоки-осциллографы на блоки



из группы **Регистрирующие устройства**, которые позволяют передавать данные из модели в рабочее пространство Scilab.

2.2. Для блоков передачи данных в рабочее пространство (**TOWS\_c**) установите размер буфера 1000 (100 секунд, регистрация через 0,1 секунду).

Команда: >> **Двойной щелчок на блоке,  
Size of buffer**

2.3. Для блоков **TOWS\_c** установите имена переменных Scilab: **phi** для блока «Курс» и **delta** для блока «Руль»

Команда: >> **Двойной щелчок на блоке,  
Scilab variable name**

2.4. Выполните моделирование еще раз. Убедитесь, что в рабочем пространстве Scilab есть переменные **phi** и **delta**.

Команда: >> **phi  
delta**

2.5. Перейдите в командное окно SCILAB и создайте новое окно для графика. В одном окне далее будут построены две кривых на разных осях.

Команда: >> **scf()**

2.6. Разбейте окно на 2 части по вертикали и сделайте активным первый график. Первое число в команде **subplot** означает количество ячеек с графиками по вертикали, второе – по горизонтали, третье – номер ячейки, которую надо сделать активной. При вводе этой и следующих команд окно с графиком не появляется на экране. Чтобы увидеть изменения, надо вручную сделать его активным, щелкнув мышью на соответствующей кнопке в панели задач

Команда: >> **subplot(2, 1, 1);**

2.7. Постройте график изменения курса. В команде **plot** сначала указывают массив абсцисс, затем – массив ординат. Двоеточие означает, что используются все строки.

Команда: >> **plot(phi.time, phi.values);**

2.8. Введите заголовок графика.

Команда: >> **title('Курс');**

2.9. Введите названия осей координат. Если в начало и в конец строки добавить символ \$, внутри строки разрешается использовать команды LaTeX. Например, «\phi» означает греческую букву  $\phi$ , а «\delta» – букву  $\delta$ .

Команда: >> `xlabel('Время, сек');`  
`ylabel('\phi, градусы');`

2.10. Аналогично постройте во второй ячейке график изменения угла поворота руля, используя данные из массива **delta**, полученного в результате моделирования.

Команда: >> `subplot(2, 1, 2);`  
`plot(delta.time, delta.values);`  
`title('Угол поворота руля');`  
`xlabel('Время, сек');`  
`ylabel('\delta, градусы');`

2.11. Скопируйте построенный график в отчет.

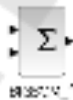
Команда: >> **Файл – Копировать в буфер обмена**

### 3. Исследование влияния возмущений

3.1. Удалите в окне модели связь между приводом и объектом.

Команда: >> **ЛКМ по линии, нажать Delete.**

3.2. Добавьте еще один блок



из группы **Общепотребительные операции** и установите его на освободившееся место.

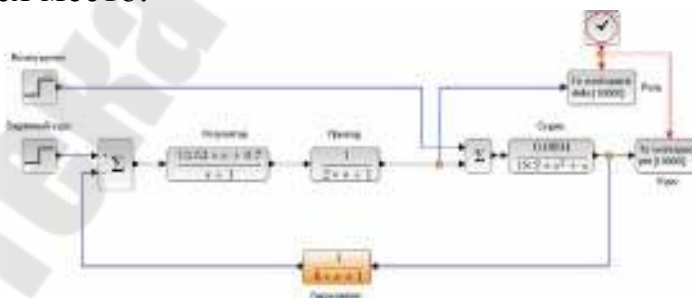


Рис.5.2.2. Структурная схема исследования влияния возмущений в системе моделирования XCOS

3.3. Исследуем реакцию системы на постоянный сигнал, приложенный непосредственно к входу объекта. Он может моделировать какое-то постоянное возмущающее воздействие, например, влияние ветра.

3.4. Скопируйте блок *Заданный курс*, перетащив его при нажатой клавише Ctrl, и установите для него величину скачка 2 градуса. Дайте ему название *Возмущение*. Подключите его выход к новому сумматору. Достройте нужные соединительные линии.

3.5. Сохраните модель.

3.6. Скопируйте полученную модель в отчет.

3.7. Увеличьте время моделирования до 500 и выполните моделирование. Проверьте, вышел ли объект управления на заданный курс 10 градусов.

Команда: >> **Моделирование – Установка –  
Конечное время интегрирования**

3.8. Постройте передаточную функцию по возмущению замкнутой системы с ПД-регулятором. С ее помощью объясните результат, полученный на предыдущем шаге. Численные значения  $T_s$ ,  $K$ ,  $T_R$  и  $T_{oc}$  возьмите из таблицы для своего варианта.

Команда: >> **s = %s;  
K = ...  
Ts = ...  
TR = ...  
Toc = ...  
P = syslin('c', K, Ts\*s^2+s)  
C0 = syslin('c', 13.53\*s+0.7, s+1);  
R = syslin('c', 1, TR\*s+1);  
H = syslin('c', 1, Toc\*s+1);  
Wf0 = P ./ (R\*C0\*H)**

3.9. Для этой передаточной функции вычислите коэффициент усиления в установившемся режиме. С его помощью рассчитайте установившееся значение сигнала выхода при заданном курсе 10 градусов и постоянном возмущении, эквивалентном 2 градусам поворота руля. Совпадает ли это число с результатами моделирования?

Команда: >> **k0 = horner ( Wex0, 0 )  
phiSt0 = 10 + ...**

3.10. Перейдите в командное окно SCILAB и запомните результаты моделирования в новых массивах. Они понадобятся для того, чтобы сравнить исходный и скорректированный варианты системы.

Команда: >> **phi0 = phi;  
delta0 = delta;**

3.11. Сохраните модель с другим именем. Теперь добавим к регулятору интегральный канал.

#### 4. Исследование ПИД регулятора

4.1. Чтобы регулятор компенсировал постоянную составляющую возмущения, надо добавить в него интегральный канал. Таким образом, получается ПИД-регулятор. Подключите параллельно регулятору интегрирующее звено с передаточной функцией  $\frac{1}{T_i s}$ ,  $T_i = 200$  сек. Сохраните модель и скопируйте ее в отчет.

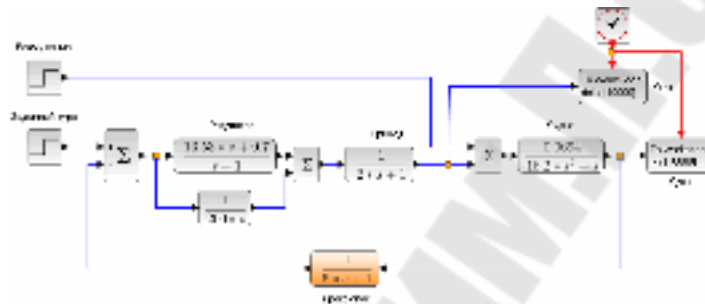


Рис.5.2.3. Структурная схема системы стабилизации управляемого объекта на курсе в системе моделирования XCOS

4.2. Выполните моделирование. Проверьте, вышел ли объект управления на заданный курс 10 градусов.

4.3. Постройте передаточную функцию ПИД-регулятора.

Команда: `>> C = C0 + syslin('c', 1, 200*s);`

4.4. Постройте передаточную функцию по возмущению замкнутой системы с ПИД-регулятором. С ее помощью объясните результат, полученный на предыдущем шаге.

Команда: `>> Wf = ...`

4.5. Для этой передаточной функции вычислите коэффициент усиления в установившемся режиме. С его помощью рассчитайте установившееся значение сигнала выхода. Совпадает ли это число с результатами моделирования?

Команда: `>> k = ...`

`phiSt = ...`

4.6. Постройте в верхней части графика 2 кривых – переходные процессы по курсу для ПД- и ПИД-регуляторов. В команде **plot** можно перечислять несколько пар массивов – первая пара соответствует первому графику, вторая – второму и т.д. Три точки в конце строки означают перенос команды на следующую строку.

Команда **legend** служит для вывода легенды – символьных строк, описывающих каждый из построенных графиков.

Команда: `>> scf()  
subplot(2, 1, 1);  
plot(phi0.time, phi0.values, phi.time, phi.values);  
title('Курс');  
xlabel('Время, сек');  
ylabel('\phi, градусы');  
legend('ПД-регулятор', 'ПИД-регулятор');`

4.7. Аналогично постройте в нижней части графика 2 кривых – изменение угла перекладки руля для ПД- и ПИД-регуляторов, используя данные из массивов **delta0** и **delta**.

Команда: `>> subplot(2, 1, 2);`

...

Таблица 5.2.1

Таблица коэффициентов

Вариант	$T_s$ , сек	$K$ , рад/сек	$T_R$ , сек	$T_{oc}$ , сек
2.	10.0	0.05	0,1	0,2
3.	10.5	0.06	0,3	0,4
4.	11.0	0.07	0,5	0,5
5.	11.5	0.08	0,1	0,1
6.	12.0	0.09	0,2	0,6
7.	12.5	0.10	0,5	0,8
8.	13.0	0.05	1	2
9.	13.5	0.06	2	2,5
10.	14.0	0.07	0,5	1,5
11.	14.5	0.08	2	4
12.	15.0	0.09	0,1	1
13.	15.5	0.10	0,3	0,9
14.	16.0	0.05	0,5	2
15.	16.5	0.06	1	4
16.	17.0	0.07	2	5
17.	17.5	0.08	3	6
18.	18.0	0.09	0,2	2
19.	18.5	0.10	0,4	3
20.	19.0	0.05	0,6	4
21.	19.5	0.06	0,8	5

4.8. Скопируйте построенный график в отчет через буфер обмена. Сделайте выводы о влиянии интегрального канала на переходные процессы в системе.

4.9. Постройте передаточную функцию разомкнутой системы с ПИД-регулятором.

Команда: `>> Wopen = ...`

### 3. ЗАДАНИЕ К ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

3.1 Провести анализ устойчивости системы с ПИД-регулятором.

Команда: `>> Gm_dB = g_margin ( Wopen )`

`Pm = p_margin ( Wopen )`

Являются ли они достаточными?

### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Результаты выполнения всех пунктов инструкции: результаты вычислений, графики, ответы на вопросы.
3. Привести результаты выполнения задания к защите лабораторной работы.
4. Выводы по результатам исследований.

### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему при использовании ПД-регулятора система не компенсирует постоянное возмущение?
2. Как, зная статический коэффициент усиления по возмущению, определить установившееся отклонение от заданного курса?
3. Какими свойствами должна обладать передаточная функция по возмущению для того, чтобы постоянное возмущение полностью компенсировалось?
4. Какими свойствами должен обладать регулятор для того, чтобы постоянное возмущение полностью компенсировалось?

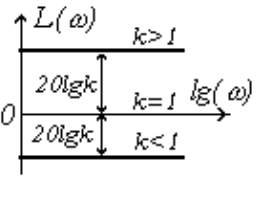
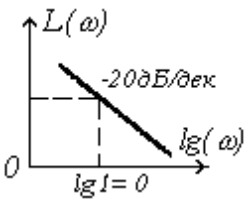
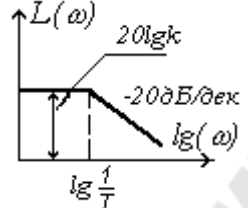
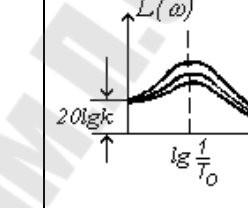
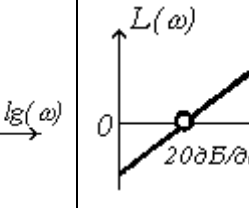
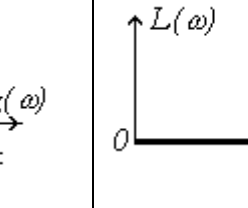
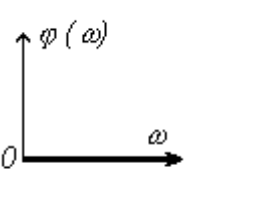
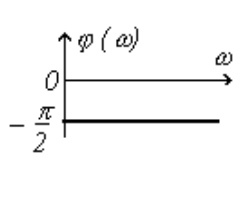

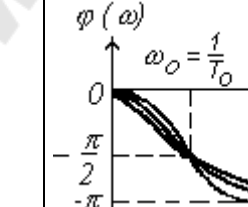
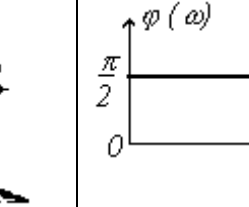
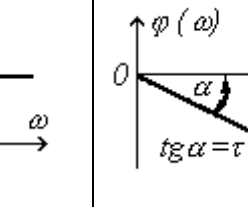
Таблица 5.3.1

## Характеристика основных элементарных звеньев

	Тип звена					
Характеристика	Пропорциональное (усилительное, безынерционное)	Интегрирующее	Апериодическое (инерционное)	Колебательное	Идеальное дифференцирующее звено	Запаздывающее
Уравнение	$x_{вых} = k \cdot x_{вх}$ , где $k$ - коэффициент усиления или передачи звена	$T \frac{dx_{вых}}{dt} = x_{вх}$ , где $T$ - постоянная времени	$T \frac{dx_{вых}}{dt} + x_{вых} = kx_{вх}$ где $k$ - коэффициент передачи звена, $T$ - постоянная времени	$T_0^2 \frac{d^2 x_{вых}}{dt^2} + T \frac{dx_{вых}}{dt} + x_{вых} = kx_{вх}$ где $T_0, T$ - постоянные времени, $k$ - коэффициент передачи	$x_{вых} = T \frac{dx_{вх}}{dt}$ , где $T$ - постоянная времени	$x_{вых}(t - \tau) = x_{вх}(t)$ , где $\tau$ - время запаздывания
Передаточная функция $W(p)$	$k$	$\frac{1}{T \cdot p}$	$\frac{k}{T \cdot p + 1}$	$\frac{k}{T_0^2 \cdot p^2 + T \cdot p + 1}$	$T \cdot p$	$e^{-p\tau}$
Переходная характеристика $h(t)$						
						
						



Продолжение таблицы 5.3.1

Характеристика	Тип звена					
	Пропорциональное (усилительное, безынерционное)	Интегрирующее	Апериодическое (инерционное)	Колебательное	Идеальное дифференцирующее звено	Запаздывающее
ЛАЧХ $L(\omega)$						
ФЧХ $\varphi(\omega)$						

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. «Исследование свойств статической САУ в установившемся режиме»

Лабораторная работа №2. «Исследование свойств астатической САУ в установившемся режиме»

Лабораторная работа №3. «Исследование динамических свойств звеньев САУ по временным и частотным характеристикам»

Лабораторная работа №4. «Исследование разомкнутой линейной системы с помощью среды SCILAB»

Лабораторная работа №5. «Моделирование линейных систем автоматического управления в пакете XCOS»

**Котова Юлия Евгеньевна  
Хананов Валентин Андреевич**

## **ЛИНЕЙНЫЕ НЕПРЕРЫВНЫЕ СИСТЕМЫ**

**Практикум  
по дисциплине «Теория автоматического  
управления» для студентов специальности  
1-53 01 07 «Информационные технологии  
и управление в технических системах»  
дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 15.05.18.

Рег. № 63Е.  
<http://www.gstu.by>