

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования

**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

Ю. М. Лебедев

**ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ**

Руководство к лабораторным работам
для студентов направления 11.03.04

2017

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общая характеристика лабораторного цикла по теории автоматического управления	3
2. Особенности применения системы моделирования электронных схем ASIMEC при выполнении лабораторных работ	4
3. Основы электронного моделирования	10
4. Лабораторная работа № 1. Моделирование и исследование характеристик типовых динамических звеньев систем автоматического управления	12
5. Лабораторная работа № 2. Исследование статических и астатических систем автоматического управления	21
6. Лабораторная работа № 3. Параллельная коррекция систем автоматического управления	27
7. Лабораторная работа № 4. Последовательная коррекция систем автоматического управления	36
8. Требования к оформлению отчетов	47

1. Общая характеристика лабораторного цикла по теории автоматического управления

В соответствии с рабочей программой обучения по дисциплине «Теория автоматического управления» (ТАУ), лабораторный цикл предусматривает выполнение четырёх лабораторных работ.

Целью лабораторного цикла является овладение следующими компетенциями:

- способностью решать задачи анализа и расчёта характеристик электрических цепей (ОПК-3);
- способностью использовать навыки работы с компьютером, владеть методами информационных технологий, соблюдать основные требования информационной безопасности (ОПК-9);
- способностью строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (ПК-1).

Первая лабораторная работа посвящена исследованию характеристик типовых звеньев систем автоматического управления (САУ), вторая – исследованию характеристик статических и астатических САУ, третья – последовательной коррекции САУ, четвёртая – параллельной коррекции САУ.

Каждая лабораторная работа выполняется рабочей группой студентов, состоящей из двух человек, в соответствии с вариантом исходных данных.

Инструментальным средством для выполнения лабораторных работ является система моделирования электронных схем **ASIMEC**, разработанная на кафедре промышленной электроники ТУСУРа.

Результатом выполнения лабораторной работы является отчет по ней, выполненный на бумажном носителе, в котором приведены полученные зависимости, выводы, сделанные на основании этих зависимостей, и ответы на контрольные вопросы.

2. Особенности применения системы моделирования электронных схем ASIMEC при выполнении лабораторных работ

2.1. Проведение измерений при временном анализе

Основным прибором, позволяющим проводить измерения во временной области, является осциллограф, условное графическое изображение которого показано на рис. 2.1. Он имеет два канала А и В, заземленных одним из своих зажимов и подключаемых к источникам сигналов.

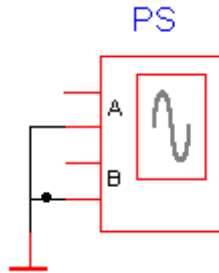









Рис. 2.1. Осциллограф

Перед проведением временного анализа нужно включить **Инспектор объектов**, нажать кнопку **Свойства схемы**  и установить параметры **Time ratio** (масштаб времени) и **t_{stop}** (конечное время расчета в секундах). Поскольку моделирование проводится в реальном времени, масштаб времени принимается равным 1 (цифра, большая единицы, соответствует ускорению процесса моделирования в указанное число раз, а цифра, меньшая единицы – его замедлению). Параметр **t_{stop}** устанавливается таким, чтобы переходный процесс закончился (на практике его удобно принимать равным нескольким секундам). Фиксация введенных параметров производится нажатием клавиши **Enter**.

Далее, путем последовательного нажатия клавиш  и , запускается процесс моделирования. При этом на экране

появляется окно, в котором изображена лицевая панель виртуального осциллографа. В ее верхней горизонтальной части расположены кнопки  (включение маркеров),  (копирование осциллограммы в виде растрового рисунка, например, в текстовый файл), а также кнопки прерывания моделирования . В верхних вертикальных частях для каждого из каналов (А и В) имеются кнопки с соответствующими окнами управления масштабом вертикальной развертки луча и его смещения по вертикали, а также кнопка **Автомасштаб**. В нижней горизонтальной части панели расположены кнопки управления горизонтальной разверткой лучей с соответствующим окном и движок перемещения осциллограмм по горизонтальной оси.

Измерения производятся с помощью маркеров, активизируемых нажатием кнопки . При этом возникают две пары горизонтальных маркеров, служащих для измерения двух уровней каждого из сигналов (по каналам А и В) и пара горизонтальных маркеров, предназначенных для измерения временных интервалов. Уровни сигналов и их разность (в вольтах) отражаются в окнах Y1, Y2, Y1 – Y2, а моменты времени и соответствующий им временной интервал – в окнах X1, X2, X2 – X1.

После завершения процесса моделирования окно с лицевой панелью осциллографа нужно развернуть на весь экран монитора, с помощью движка сдвинуть влево (к началу отсчета) осциллограмму и с помощью клавиш вертикальной и горизонтальной развертки развернуть ее на весь экран, это обеспечит повышенную точность измерений.

При измерении уровня сигнала выбирается один из горизонтальных маркеров (например, верхний) и подводится к участку осциллограммы, интересующему наблюдателя. Результат измерения считывается в соответствующем окне (Y1 для верхнего маркера).

На рис. 2.2 показан процесс измерения величины первого и второго максимумов при колебательном характере переходного процесса. Здесь уровень первого максимума $U_{\max 1} = 7,867$ В (окно Y1), уровень второго максимума $U_{\max 2} = 6,086$ В (окно

Y2), разность уровней $\Delta U = U_{\max 1} - U_{\max 2} = 1,781$ В (окно Y1 – Y2). Полученная информация позволяет оценить степень затухания и колебательность переходного процесса.

Измерение временных интервалов производится аналогично вертикальными маркерами. В этом случае левый маркер подводится к началу временного интервала, интересующего наблюдателя, правый маркер – к его концу. Результаты измерения – в окнах X1, X2, X2 – X1.

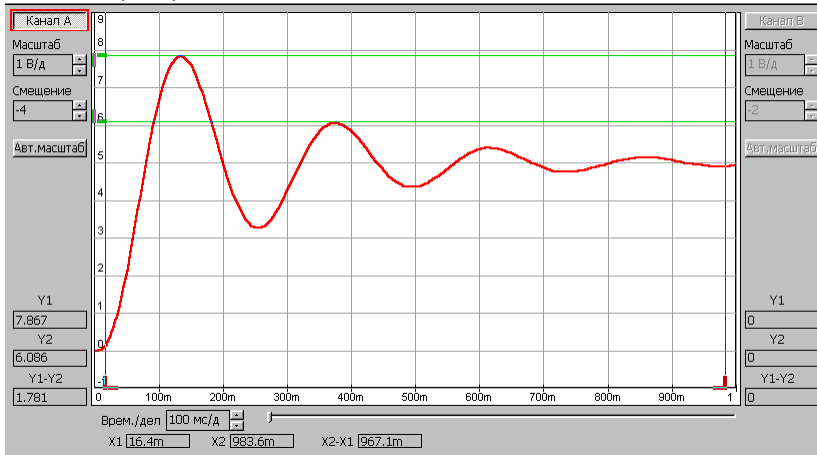


Рис. 2.2. Измерение максимальных значений напряжения

На рис. 2.3 показан процесс измерения времени переходного процесса при его колебательном характере и установившемся значении $U_{уст} = 5$ В. Здесь с помощью горизонтальных маркеров выделена зона $\pm 5\%$ от установившегося значения $U_{уст}$ (уровни, приблизительно равные 5,25 и 4,75 В в окнах Y1 и Y2). Левый вертикальный маркер располагается в начале координатной сетки, а правый маркер – в точке пересечения уровня 5,25 В и участка осциллограммы, после которого переходный процесс считается закончившимся (переходная характеристика располагается внутри зоны $\pm 5\%$ от установившегося значения). В соответствии с этим время переходного процесса, считанное в окне X2 – X1 равно 652 миллисекунды или 0,652 с.

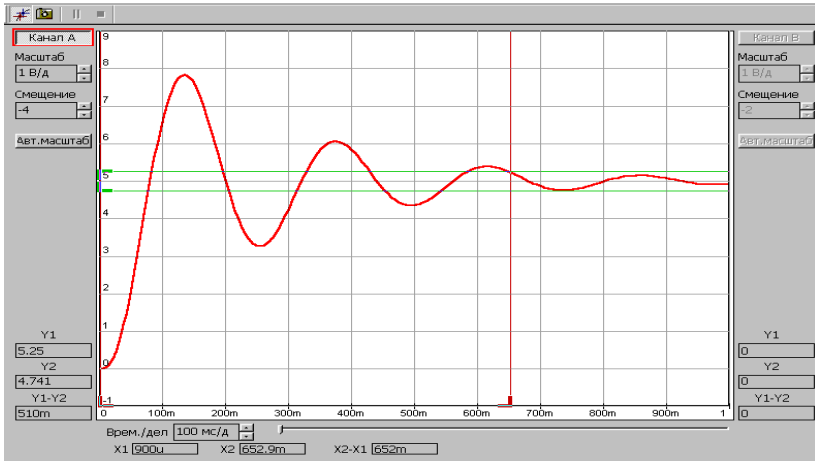


Рис. 2.3. Измерение времени переходного процесса

2.3. Проведение измерений при частотном анализе

Основным прибором применяющимся при исследовании в частотной области, является плоттер Боде. Его условное графическое изображение, принятое в **ASIMEC**, приведено на рис. 2.6. Клеммы **T₀** объединяются и подключаются к общей шине (заземлению), входная клемма (**IN**) подключается ко входу исследуемого объекта, а выходная клемма (**OUT**) – к его выходу.

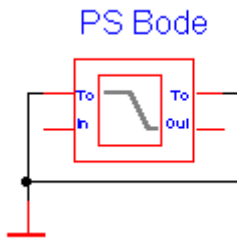









Рис. 2.3. Плоттер Боде

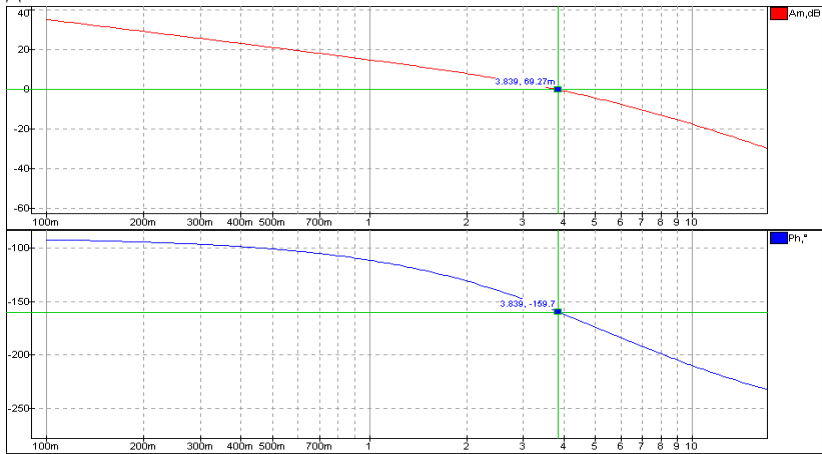
Перед проведением частотного анализа нужно нажать кнопку **Свойства схемы**  и установить параметры **nd** = 100 (количество точек на декаде), **t_{start}** = 0.1 (начальная частота,

Гц) и $f_{\text{stop}} = 1000$ (конечное частота, Гц). Фиксация введенных параметров производится нажатием клавиши **Enter**. Далее, путем последовательного нажатия клавиш  и  запускается процесс моделирования. При этом на экране появляется окно, в котором изображена лицевая панель плоттера Боде. В ее верхней горизонтальной части расположены кнопки  (включение маркеров),  (копирование диаграмм Боде в виде растрового рисунка, например, в текстовый файл). При нажатии кнопки  включается логарифмическая шкала по оси частот.

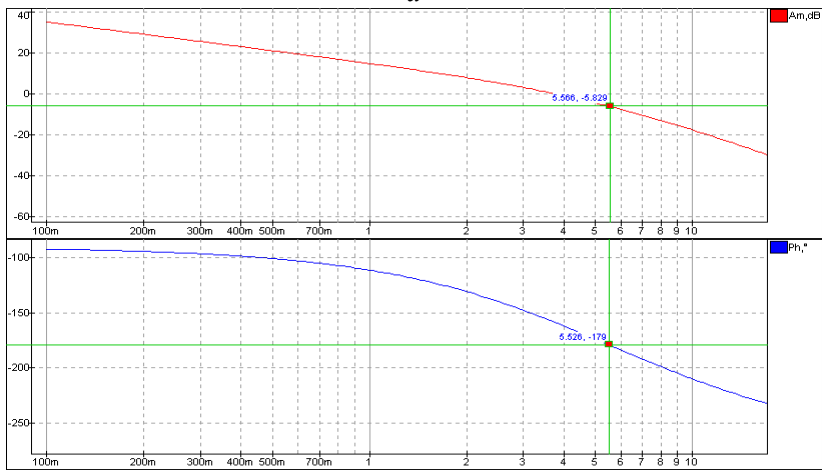
Измерения производятся с помощью маркеров, активируемых нажатием кнопки . При этом маркеры имеют вид пересекающихся горизонтальной и вертикальной линий. При движении их перекрестия вдоль какой-либо частотной характеристики рядом возникают две цифры, первая из которых соответствует измеряемой частоте (в Гц), а вторая – измеряемой амплитуде (в дБ) или фазе (в градусах).

На рис. 2.4 показан процесс измерения частот среза, переворота фазы и запасов устойчивости. При совмещении маркера на ЛАЧХ (верхний график на рис. 2.4, а) с нулевым значением амплитуды измеряется частота среза $f_{\text{ср}} = 3,82$ Гц ($\omega_{\text{ср}} = 2\pi f_{\text{ср}} \approx 24$ рад/с). Маркер ЛАЧХ совмещается по вертикали с маркером ЛФЧХ (нижний график на рис. 2.4, а) и измеряется фаза на частоте среза $\varphi_{\text{ср}} = -160,7^\circ$, тогда запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi = 180 + \varphi_{\text{ср}} = 19,3^\circ$. Затем маркер ЛФЧХ, перемещаясь по характеристике, совмещается со значением $\varphi = -180^\circ$ (см. правую цифру на нижнем графике рис. 2.4, б) и измеряется частота переворота фазы $f_\pi = 5,526$ (левая цифра на нижнем графике рис. 2.4, б, соответствующая угловой частоте $\omega_\pi = 2\pi f_\pi \approx 34,7$ рад/с). Далее маркер ЛАЧХ совмещается по вертикали с маркером ЛФЧХ и измеряется амплитуда $G(\omega_\pi) = -6,82$ дБ (правая цифра на верхнем графике рис. 2.4,

б), тогда запас устойчивости по амплитуде $\Delta G = |G(\omega_{\pi})| = 6,82$ дБ.



a



б

Рис. 2.4. Измерение частот среза, переворота фазы и запасов устойчивости

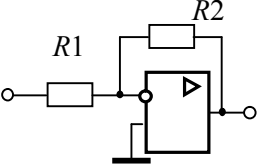
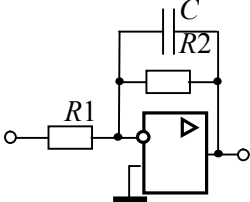
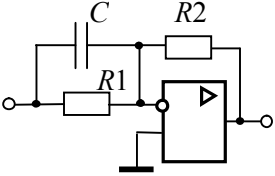
3. Основы электронного моделирования

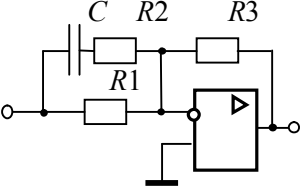
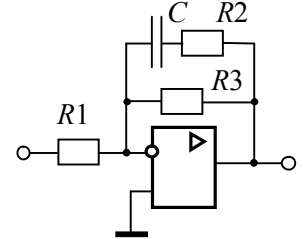
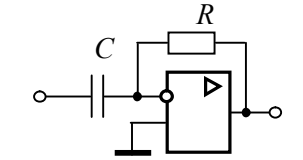
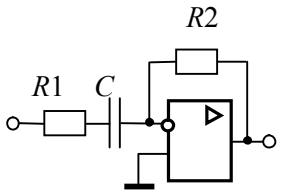
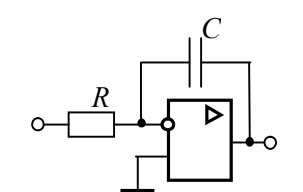
Базовым элементом для построения электронных моделей

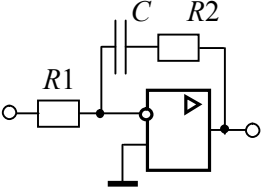
типовых динамических звеньев и систем автоматического управления является идеальный операционный усилитель (он находится в «ящике» **Активные компоненты**). Это усилитель постоянного тока в микросхемном исполнении, имеет два входа – инвертирующий (обозначен окружностью) и неинвертирующий и характеризуется очень большими коэффициентом усиления и входным сопротивлением.

В табл. 3.1 приведены схемы моделей различных звеньев первого порядка и соотношения для определения их параметров.

Таблица 3.1

N	Тип звена	Электронная модель	Передаточная функция и ее параметры
1	2	3	4
1	Пропорциональное		$W(p) = -k;$ $k = \frac{R_2}{R_1}.$
2	Инерционное		$W(p) = -\frac{k}{Tp+1};$ $k = \frac{R_2}{R_1}, T = R_2C.$
3	Форсирующее		$W(p) = -k(\tau p + 1);$ $k = \frac{R_2}{R_1},$ $\tau = R_1 \cdot C.$

1	2	3	4
4a	Инерционное форсирующее ($\tau > T$)		$W(p) = \frac{-k(\tau p + 1)}{Tp + 1};$ $k = \frac{R_3}{R_1}, T = R_2 C,$ $\phi = (R_2 + R_3)C.$
4б	Инерционное форсирующее ($\tau < T$)		$W(p) = \frac{-k(\tau p + 1)}{Tp + 1};$ $k = \frac{R_3}{R_1}, \tau = R_2 C,$ $T = (R_2 + R_3)C.$
5	Идеальное дифференцирующее		$W(p) = -kp;$ $k = RC.$
6	Инерционное (реальное) дифференцирующее		$W(p) = \frac{-kp}{Tp + 1};$ $k = R_2 C,$ $T = R_1 C.$
7	Идеальное интегрирующее		$W(p) = -\frac{k}{p};$ $k = \frac{1}{RC}.$

1	2	3	4
8	Изодромное		$W(p) = -k \frac{\tau p + 1}{p};$ $\tau = R_2 C,$ $k = \frac{1}{R_1 C}.$

4. Лабораторная работа № 1. Моделирование и исследование характеристик типовых динамических звеньев систем автоматического управления

Цель работы

Целью лабораторной работы является получение навыков разработки электронных моделей типовых динамических звеньев САУ, исследование их частотных и переходных характеристик на этих моделях. Такими звеньями, в частности, являются инерционное, инерционное форсирующее, а также звенья второго порядка (колебательное и апериодическое).

Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования характеристик типовых звеньев САУ проводятся в среде **ASIMEC**. Электронные модели звеньев выполняются на основе операционных усилителей (см. табл. 3.1).

Некоторые особенности схем электронных моделей определяются использованием инвертирующего входа операционных усилителей. Если в модели между входом и выходом содержится нечетное количество усилителей, то выходной сигнал дополнительно сдвигается на -180° относительно сигнала объекта, подлежащего исследованию. Поэтому схемы моделей в прямой цепи между входом и выходом обязательно должны содер-

жать **четное количество усилителей**, то есть при проведении экспериментальных исследований с моделями, приведенными в табл. 3.1, необходимо последовательно включать еще одну схему пропорционального звена с единичным коэффициентом передачи (инвертор напряжения).

На рис. 4.1 приведена схема подключения приборов и источников напряжения к электронной модели какого-либо из указанных выше типовых звеньев (условно назовем ее лабораторной установкой). Вход этой установки через ключ $S1$ (он находится в «ящике» **Устройства коммутации**) подключен к положительному полюсу источника постоянного напряжения $E1$, а через ключ $S2$ – ко входу плоттера Боде. Для удобства измерения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ электронной модели величина напряжения источника устанавливается, исходя из соотношения $E_1 = \frac{1}{k}$, где k – коэффициент передачи звена, тогда в установившемся режиме $U_{\text{вых}} = 1$ В.

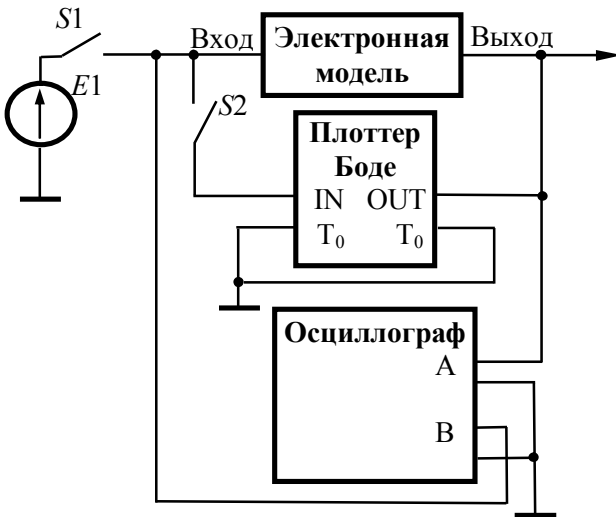


Рис. 4.1. Схема лабораторной установки

Управление режимами работы лабораторной установки осуществляется с помощью ключей $S1$ и $S2$. При исследовании

переходных характеристик ключ $S1$ замкнут, а ключ $S2$ – разомкнут и, наоборот, при исследовании частотных характеристик ключ $S1$ размыкается, а ключ $S1$ – замыкается. Ключи $S1$, $S2$ по умолчанию имеют сопротивление 1 Ом замкнутом состоянии и 1 МОм – в разомкнутом. Этого явно недостаточно, если на входе модели устанавливается сопротивление 100 кОм, поэтому сопротивление ключа в разомкнутом состоянии следует принять равным 1 гОм. Кроме этого, в качестве параметра в **Инспекторе объектов** нужно установить клавишу, которой будет коммутироваться ключ (для $S1$ и $S2$ они должны быть различными).

Основные приемы, применяемые при исследовании временных и частотных характеристик звеньев, изложены выше в разделах 2.2 и 2.3 настоящего руководства.

Следует также отметить, что угловая частота, например, среза, рассчитывается по соотношению $\omega_{\text{ср}} = 2\pi f_{\text{ср}}$.

Программа работы

4.1. Исследование инерционного (апериодического) звена

4.1.1. Собрать схему модели апериодического (инерционного) звена (рис. 4.2), установить значения $R_1 = R_3 = R_4 = 100$ кОм. По формулам $R_2 = k \cdot R_1$, $C_1 = \frac{T}{R_2}$ рассчитать параметры остальных элементов в соответствии с данными, приведенными в табл. 4.1 для индивидуального варианта.

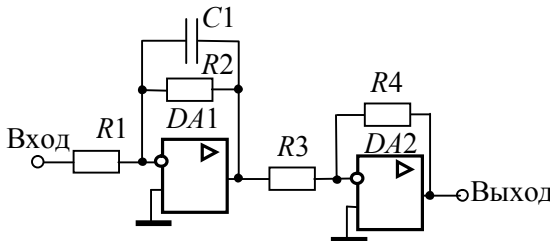


Рис. 4.2. Модель инерционного звена

Таблица 4.1

Вариант	k	T, c	Вариант	k	T, c	Вариант	k	T, c
1	2	0,01	12	2	0,065	23	3	0,15
2	3	0,015	13	4	0,07	24	4	0,16
3	4	0,02	14	5	0,075	25	4	0,17
4	5	0,025	15	5	0,08	26	5	0,18
5	4	0,03	16	4	0,085	27	5	0,19
6	3	0,035	17	4	0,09	28	3	0,2
7	2	0,04	18	3	0,1	29	3	0,21
8	4	0,045	19	3	0,11	30	4	0,22
9	5	0,05	20	2	0,12	31	4	0,23
10	4	0,055	21	2	0,13	32	5	0,24
11	3	0,06	22	3	0,14			

4.1.2. Напряжение питания источника E_1 принять равным

$$E_1 = \frac{1}{k} \text{ В.}$$

4.1.3. Получить переходную характеристику и определить время переходного процесса $t_{\text{пп}}$.

4.1.4. Получить экспериментальные ЛАЧХ и ЛФЧХ, измерить частоту среза $\omega_{\text{ср}}$ и значение фазы $\varphi_{\text{ср}}$ на этой частоте.

4.1.4. Увеличить значения постоянной времени T звена в два, три, и четыре раза и повторить выполнение заданий по п.п. 4.1.3 и 4.1.4.

4.1.5. Построить графики зависимостей $t_{\text{пп}} = f(T)$, $\omega_{\text{ср}} = f(T)$ и $\varphi_{\text{ср}} = f(T)$.

4.1.6. Оценить влияние величины постоянной времени на характеристики апериодического (инерционного) звена

4.2. Исследование инерционного форсирующего (упругого) звена

4.2.1. Собрать схему электронной модели инерционного форсирующего (упругого) звена (рис. 4.3). Принять

$R_4 = R_5 = 100$ кОм, $C_1 = 1$ мкФ. Для заданного варианта из табл. 4.1 выбрать значение постоянной времени T , принять постоянную времени $\tau = 0,2T$ и коэффициент передачи звена $k = 2$. По формулам $R_2 = \frac{\tau}{C_1}$, $R_3 = \frac{T - \tau}{C_1}$, $R_1 = \frac{R_3}{k}$ рассчитать параметры остальных элементов модели. Напряжение E_1 источника питания электронной модели принять равным 0,5 В.

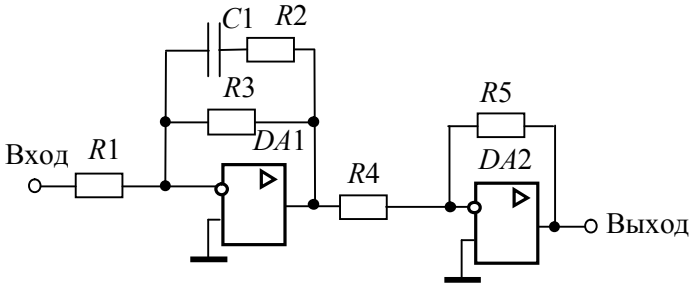


Рис. 4.3. Модель инерционного форсирующего звена

4.2.2. Снять переходную характеристику и определить величину скачка U_0 переходной характеристики при $t = 0$, установившееся значение U_∞ и время переходного процесса $t_{\text{пп}}$. Рассчитать параметр $\lambda = \frac{U_0}{U_\infty} \cdot 100\%$.

4.2.3. Получить экспериментальные ЛАЧХ и ЛФЧХ, замерить частоту среза $\omega_{\text{ср}}$ и значение фазы $\varphi_{\text{ср}}$ на этой частоте.

4.2.4. Установить соотношения значений постоянных времени $\tau = 0,4T$, $\tau = 0,6T$, $\tau = 0,8T$ и повторить выполнение заданий п.п. 4.2.2 и 4.2.3, пересчитав параметры модели в соответствии с п. 4.2.1.

4.2.5. Построить графики зависимостей $\lambda = f(\tau)$, $t_{\text{пп}} = f\left(\frac{\tau}{T}\right)$, $\omega_{\text{ср}} = f\left(\frac{\tau}{T}\right)$, $\varphi_{\text{ср}} = f\left(\frac{\tau}{T}\right)$ и сравнить их с аналогичными зависимостями, полученными в п. 4.1.5.

4.2.6. Оценить влияние постоянной времени форсирующего звена на характеристики инерционного форсирующего звена.

4.3. Исследование звеньев второго порядка

4.3.1. Собрать схему модели звена второго порядка в соответствии с рис. 4.4. Приняв $R_2 = R_5 = R_6 = 100$ кОм, $C_1 = C_2 = 1$ мкФ, $\xi = 0,7$ и, выбрав значения постоянной времени T и коэффициента передачи k из табл. 4.1 согласно индивидуальному варианту, рассчитать значения остальных параметров модели по формулам:

$$R_1 = \frac{R_2}{k}, \quad R_4 = \frac{T^2}{R_2 C_1 C_2}, \quad R_3 = \frac{\sqrt{R_2 R_4}}{2\xi}.$$

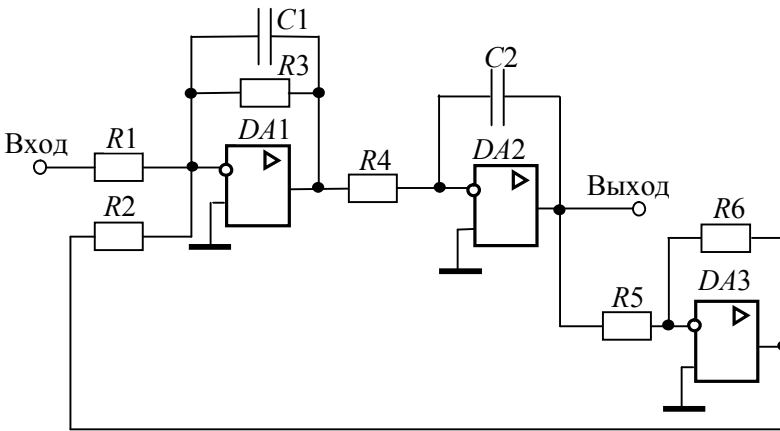


Рис. 4.4. Модель звеньев второго порядка

4.3.2. Установить напряжение питания модели, равное $U = \frac{10}{k}$, снять переходную характеристику и определить время переходного процесса $t_{\text{пп}}$, фиксируя при этом осциллографом максимальное U_{max} значение выходного напряжения.

4.3.3. Рассчитать перерегулирование

$$\sigma = \frac{U_{\max} - U_{\text{уст}}}{U_{\text{уст}}} \cdot 100\%,$$

где $U_{\text{уст}} = 1$ В. При правильном расчете параметров электронной модели колебательного звена перерегулирование не должно превышать 5%.

4.3.4. Получить экспериментальные ЛАЧХ и ЛФЧХ, замерить частоту среза $\omega_{\text{ср}}$, значение фазы $\varphi_{\text{ср}}$ на частоте среза и определить запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$.

4.3.5. Установить значения $\xi = 0,5$, $\xi = 0,3$, $\xi = 0,1$, а также $\xi = 1$, $\xi = 2$, $\xi = 3$ и повторить выполнение п.п. 4.3.2 – 4.3.4.

4.3.6. Построить графики зависимостей $t_{\text{пн}} = f(\xi)$, $\sigma = f(\xi)$, $\omega_{\text{ср}} = f(\xi)$, $\varphi_{\text{ср}} = f(\xi)$ и $\Delta\varphi = f(\xi)$.

4.3.7. Оценить влияние коэффициента демпфирования на характеристики звеньев второго порядка.

4.4. Контрольные вопросы

- 4.4.1. Как количественно величина постоянной времени связана с временем переходного процесса в инерционном звене?
- 4.4.2. Почему в инерционном звене фаза на частоте среза не зависит от постоянной времени звена?
- 4.4.3. Как изменятся характеристики инерционного форсирующего звена при $\tau > T$ и его реализация на электронной модели?
- 4.4.4. В каком случае колебательное звено становится консервативным и как при этом изменятся его характеристики?
- 4.4.5. Как нужно изменить схему, приведенную на рис. 4.4, чтобы получить электронную модель консервативного звена?
- 4.4.6. Чему равен запас устойчивости по амплитуде в звеньях второго порядка?

- 4.4.7. Чем объяснить наличие перегиба на переходной характеристике аperiodического звена второго порядка?

5. Лабораторная работа № 2. Исследование статических и астатических систем автоматического управления

Цель работы

Целью лабораторной работы является исследование на электронной модели характеристик статических и астатических САУ в статических и динамических режимах работы.

Методика проведения экспериментальных исследований

На рис 5.1, *a* приведена структурная схема подлежащей исследованию статической САУ, а на рис. 5.1, *б* – схема ее электронной модели.

В схеме модели (рис. 5.1, *б*) звено с передаточной функцией $W_1(p)$ реализовано на двух операционных усилителях $DA1$ и $DA2$. Так сделано для удобства изменения коэффициента передачи звена в процессе исследования САУ. В этом случае

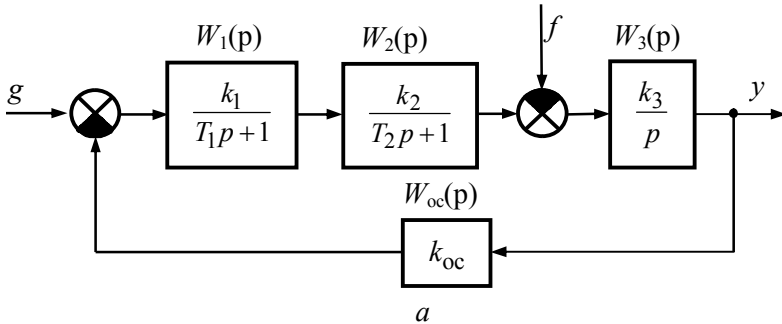
$$k_1 = k_{11} \cdot k_{12} = \frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{R_5}{R_4}.$$

За счет этого при изменении коэффициента передачи k_1 изменяется только коэффициент передачи k_{11} усилителя $DA1$, т.е. значение сопротивления R_3 , в то время как значения сопротивлений R_1 и R_2 (они устанавливаются равными друг другу) и параметры элементов усилителя $DA2$ остаются без изменения.

Исследования статической и астатической САУ проводятся при условии постоянства коэффициента передачи по возмущающему воздействию k_3 . При этом второе инерционное и интегрирующее звенья в астатической САУ меняются местами, т.е. резистор R_7 включается в цепь обратной связи усилителя $DA4$.

Граничное значение коэффициента передачи статической и астатической САУ рассчитывается по выражению

$$K_{гр} = \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2}. \quad (5.1)$$



a

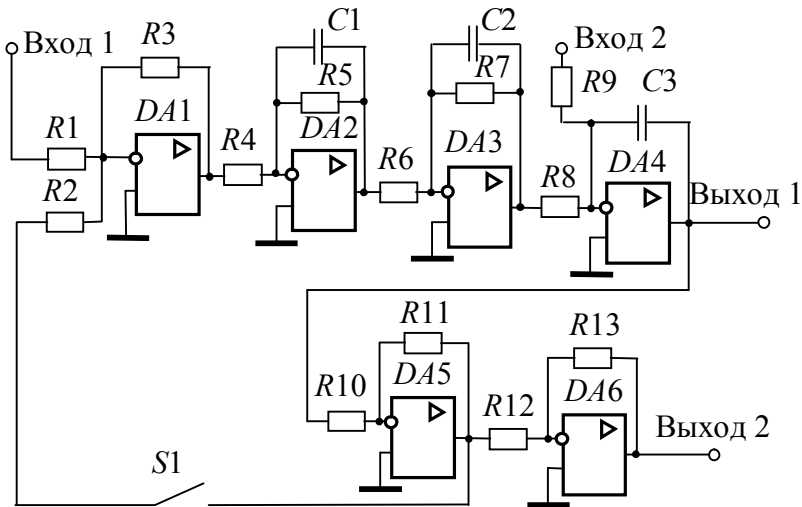


Рис. 5.1. Структурная схема статической САУ (*a*) и её модель (*б*)

При исследовании обеих систем на их электронных моделях следует принимать номиналы сопротивлений $R_1 = R_2 = R_4 = R_6 = R_8 = R_9 = R_{10} = R_{12} = R_{13} = 100$ кОм. Параметры остальных элементов рассчитываются по формулам:

– для статической САУ:

$$R_5 = R_4 \cdot k_{12}, \quad R_7 = R_6 \cdot k_2, \quad R_{11} = R_{10} \cdot k_{oc},$$

$$C_1 = \frac{T_1}{R_5}, \quad C_2 = \frac{T_2}{R_7}, \quad C_3 = \frac{1}{k_3 R_8};$$

– для астатической САУ:

$$R_7 = R_9 \cdot k_3, \quad C_2 = \frac{1}{k_2 R_6}, \quad C_3 = \frac{T_2}{R_8}.$$

Параметры остальных элементов принимаются такими же, как у статической САУ.

В цепи обратной связи установлен ключ $S1$. Он замыкается при исследовании временных характеристик САУ и размыкается при исследовании их логарифмических частотных характеристик разомкнутой системы.

На рис. 5.2, приведена схема модели лабораторной установки для снятия характеристик САУ. На вход 1 через переключатель $S2$ подается напряжение источника E_1 (задающее воздействие), на вход 2 через переключатель $S3$ – напряжение источника E_2 (возмущающее воздействие), изменяющееся от 1 до 4 В. Если $E_1 = k_{oc}$, то установившееся значение выходного напряжения САУ $U_{уст0} = 1$ В. Все переключатели коммутируются независимо друг от друга. Это достигается назначением различных клавиш. Величина выходного напряжения в статическом режиме измеряется осциллографом после полного окончания переходных процессов. При снятии частотных характеристик переключатели $S2$ и $S3$ размыкаются, замыкается переключатель $S4$ при разомкнутом переключателе $S1$ электронной модели (рис. 5.1, б).

Сопровитления ключей $S1$ – $S4$ устанавливаются равными 1 гОм.

Измерение запаса устойчивости по амплитуде и фазе описано в разделе 2.2. Частотные характеристики снимаются только для статической САУ.

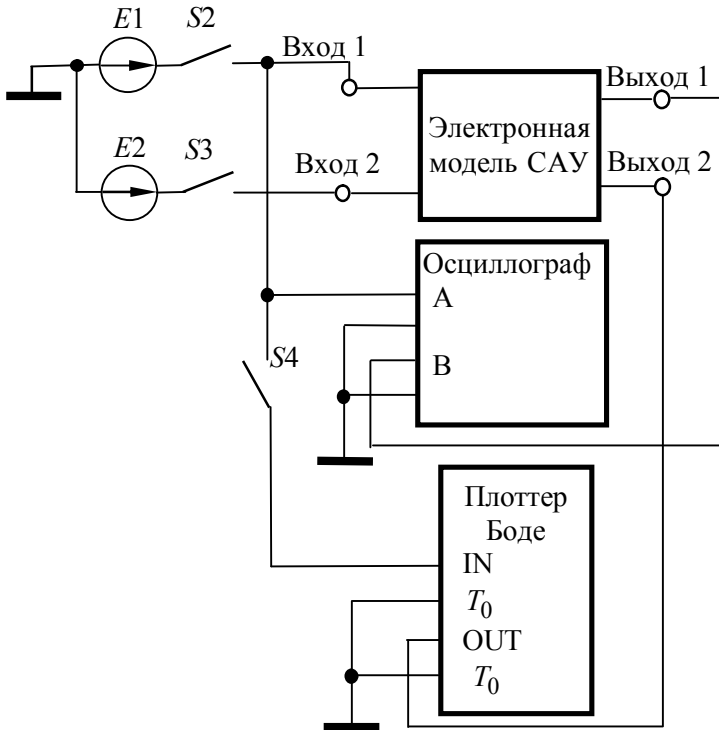


Рис. 5.2. Схема лабораторной установки

Программа работы

5.1. Исследование статической САУ

5.1.1. В соответствии с вариантом исходных данных (см. табл. 5.1) по формуле (5.1) рассчитать граничное значение коэффициента передачи САУ и параметры элементов электронной модели.

Таблица 5.1

Вариант	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	k_{12}	k_2	k_{oc}	$k_3, \text{с}^{-1}$
1	0,005	0,01	4	5	0,5	30
2	0,01	0,02	5	2	0,5	20
3	0,02	0,02	5	3	0,5	35
4	0,03	0,01	2	2	0,8	30
5	0,04	0,005	2	3	0,6	20
6	0,05	0,02	1	2	0,5	25
7	0,015	0,01	3	2	0,5	10
8	0,03	0,005	1	10	0,6	25
9	0,004	0,008	10	10	0,5	50
10	0,06	0,02	1	4	0,7	40
11	0,05	0,03	2	3	1	30
12	0,07	0,01	5	5	0,5	25
13	0,08	0,02	4	3	0,6	20
14	0,09	0,03	3	2	0,6	35
15	0,1	0,02	2	1	0,5	30
16	0,09	0,01	2	2	0,7	40
17	0,08	0,05	3	4	1	25
18	0,07	0,02	4	4	0,5	30
19	0,05	0,005	5	4	0,6	25
20	0,04	0,02	5	4	0,7	20
21	0,03	0,03	1	5	0,8	30
22	0,02	0,04	2	4	1	40
23	0,01	0,05	3	3	0,5	45
24	0,005	0,005	2	2	0,8	50
25	0,05	0,01	3	4	0,6	20
26	0,1	0,01	4	2	0,5	25
27	0,08	0,02	3	1	0,4	30
28	0,12	0,005	4	5	0,5	35
29	0,1	0,002	3	5	0,6	20
30	0,15	0,07	4	1	0,7	25
31	0,08	0,05	5	5	0,8	20
32	0,05	0,02	10	5	0,5	30

5.1.2. Установить значение резистора

$$R_3 = R_{3,гр} = \frac{K_{гр}}{k_{12}k_2k_3k_{ос}} R_1, \text{ напряжение источника } E_1 = k_{ос}, \text{ и,}$$

замкнув ключ $S2$ при разомкнутом ключе $S3$, пронаблюдать переходную характеристику САУ. Она должна иметь вид либо незатухающих, либо медленно затухающих (медленно возрастающих) гармонических колебаний. Если этого не происходит, то необходимо заново рассчитать параметры модели.

5.1.3. Установить значение резистора R_3 , обеспечивающее величину коэффициента передачи разомкнутой цепи $K = 0,2K_{гр}$, и, замкнув ключ $S2$ при разомкнутом ключе $S3$, снять переходную характеристику САУ по задающему воздействию, измерив после окончания переходного процесса максимальное $U_{макс,з}$ значение выходного напряжения и время переходного процесса $t_{п,з}$. При этом убедиться, что вольтметр $PV1$ показывает установившееся значение выходного напряжения $U_{уст0} = 10$ В. Рассчитать перерегулирование

$$\delta_3 = \frac{U_{макс,з} - U_{уст0}}{U_{уст0}} \cdot 100 \% \text{ при подаче задающего воздействия.}$$

Если величина $E_1 = k_{ос}$, то установившееся значение выходного напряжения при отсутствии возмущающего воздействия (при $E_2 = 0$) $U_{вых,0} = 1$ В.

5.1.4. Установить напряжение источника E_2 , равное 0,1 В. Замкнуть ключ $S3$ при замкнутом ключе $S2$, дождаться завершения переходного процесса, выключить установку и снять переходную характеристику САУ по возмущающему воздействию. При этом осциллографом измерить установившееся $U_{уст,1}$, а осциллографом – минимальное $U_{мин,в}$ значения выходного напряжения. Рассчитать величины $0,95 \cdot U_{уст1}$, $1,05 \cdot U_{уст1}$ и измерить время переходного процесса $t_{п,в}$. Рассчитать перере-

гулирование $\delta_B = \frac{U_{уст1} - U_{мин,в}}{U_{уст1}} \cdot 100 \%$ при подаче на вход

САУ возмущающего воздействия.

П р и м е ч а н и е . Если все изменения на переходной характеристике происходят в области $\pm 5 \%$ от установившегося значения напряжения $U_{уст1}$, то принять $t_{пп,в} = 0$.

5.1.5. Установить $E_2 = 0,2$ В, замкнуть переключатели S_2 и S_3 , включить установку и измерить осциллографом установившееся значение выходного напряжения $U_{уст2}$. Эксперимент повторить при $E_2 = 0,3$ В и $E_2 = 0,4$ В с получением напряжений $U_{уст3}$ и $U_{уст4}$.

5.1.6. Разомкнуть ключи S_1 (см. рис. 5.1, б), S_2 , S_3 (см. рис. 5.2), замкнуть ключ S_4 , отключить вольтметр, включить клавишу «**Частотный анализ**» и с помощью плоттера измерить частоту среза, запасы устойчивости по фазе $\Delta\phi$ и амплитуде ΔG .

5.1.7. Установить R_3 , обеспечивающее $K = 0,3K_{гр}$, $K = 0,5K_{гр}$, $K = 0,8K_{гр}$ и повторить выполнение заданий п.п. 5.1.3 – 5.1.6.

5.1.8. По экспериментальным данным построить графики семейства внешних характеристик САУ $U_{вых} = f(E_2) \Big|_{K=const}$, а

также зависимостей $t_{пп,з} = f(K)$, $\delta_3 = f(K)$, $t_{пп,в} = f(K)$, $\delta_B = f(K)$, $\Delta G = f(K)$ и $\Delta\phi = f(K)$. Рассчитать статизм внешних характеристик САУ (они должны получиться линейными)

по формуле $S = \frac{U_{уст1} - U_{уст2}}{U_{уст1}} \cdot 100\%$, где $U_{уст1}$ и $U_{уст2}$ – уста-

новившиеся значения выходного напряжения САУ при $E_2 = 1$ В и $E_2 = 2$ В соответственно, и построить график зависимости $S = f(K)$.

5.1.9. Оценить влияние коэффициента передачи K на статические и динамические характеристики статической САУ.

5.2. Исследование астатической САУ

5.2.1. Собрать схему астатической САУ, перенеся резистор R_7 в цепь обратной связи усилителя $DA4$ и включив его параллельно конденсатору C_3 , поменяв тем самым местами инерционное и интегрирующее звенья. По формулам $R_7 = R_9 \cdot k_3$, $C_2 = \frac{1}{k_2 R_6}$, $C_3 = \frac{T_2}{R_7}$ произвести пересчет номиналов указанных элементов.

5.2.2. Установить $R_3 = R_{3,гр}$, напряжение источника $E_1 = k_{oc}$, замкнуть переключатель S_2 при разомкнутых переключателях S_3 , S_4 и убедиться, что на выходе САУ имеют место установившиеся гармонические колебания.

5.2.3. Установить R_3 , обеспечивающее значение $K = 0,2K_{гр}$, напряжение источника $E_2 = 0,1$ В, замкнуть переключатель S_2 , и замыкая переключатель S_3 , измерить величины $U_{вых,в}$ и $t_{пп,в}$. При этом следует убедиться, что выходное напряжение САУ устанавливается на уровне $U_{уст0} = 1$ В. По формуле $\delta_v = \frac{U_{уст0} - U_{мин,в}}{U_{уст0}} \cdot 100\%$ рассчитать перерегулирование при приложении возмущающего воздействия.

5.2.4. Установить R_3 , обеспечивающее $K = 0,3K_{гр}$, $K = 0,5K_{гр}$, $K = 0,8K_{гр}$ и повторить выполнение заданий п. 5.2.3.

5.2.5. По экспериментальным данным построить зависимости $U_{вых} = f(U_2) \Big|_{K=const}$, $\delta_v = f(K)$, $t_{пп,в} = f(K)$ и сравнить их с аналогичными зависимостями для статической САУ.

5.2.6. Количественно оценить влияние астатизма на статические и динамические характеристики САУ по отношению к статической САУ.

5.3. Контрольные вопросы

- 5.3.1. Возможно ли получение в статической САУ нулевой статической ошибки?
- 5.3.2. Как связать частоту собственных колебаний переходной характеристики для САУ, работающей на границе устойчивости с корнями характеристического уравнения?
- 5.3.3. Почему внешние статические характеристики статической САУ исходят из одной точки? Для любой статической системы это свойство будет иметь место?
- 5.3.4. При каком коэффициенте передачи K переходная характеристика статической САУ при подаче задающего воздействия будет аperiodической?
- 5.3.5. Почему в астатической САУ величина статической ошибки равна нулю?
- 5.3.6. Почему в астатической САУ перерегулирование при подаче возмущающего воздействия больше, чем в статической?

6. Лабораторная работа № 3. Параллельная коррекция систем автоматического управления

Цель работы

Целью лабораторной работы является исследование характеристик САУ с местными жёсткими и гибкими обратными связями.

Методика проведения лабораторной работы

Лабораторная работа состоит из двух частей. Первая из них посвящена исследованию системы с местной положитель-

ной жёсткой обратной связью, а вторая – системы с местной гибкой отрицательной обратной связью.

На рис. 6.1, *a* приведена структурная схема системы, у которой два инерционных звена с передаточными функциями $W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}$ и $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}$ охвачены положительной корректирующей обратной связью с передаточной функцией $W_k(p) = k_k$. Звено с передаточной функцией $W_3(p)$ – пропорциональное, т.е. $W_3(p) = k_3$, а главная обратная связь – инерционная, т.е. $W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1}$.

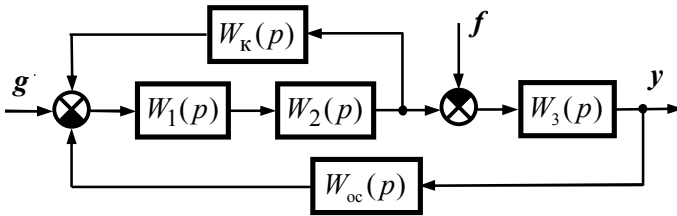
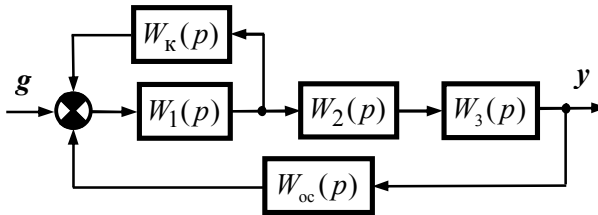
*a**б*

Рис. 6.1

На рис. 6.1, *б* показана структурная схема САУ, у которой инерционное звено с передаточной функцией $W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}$ охвачено отрицательной гибкой обратной связью, осуществляемой посредством идеального дифференцирующего звена с передаточной функцией $W_k(p) = k_k p$. Звенья с передаточными

функциями $W_2(p)$, $W_3(p)$ – инерционные, т.е. $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}$,

$W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}$, а обратная связь – безынерционная, т.е.

$W_{oc}(p) = k_{oc}$.

На вход обеих системы подаётся задающее воздействие g , а в системе, изображённой на рис. 6.1, а, ко входу звена с передаточной функцией $W_3(p)$ приложено возмущающее воздействие f .

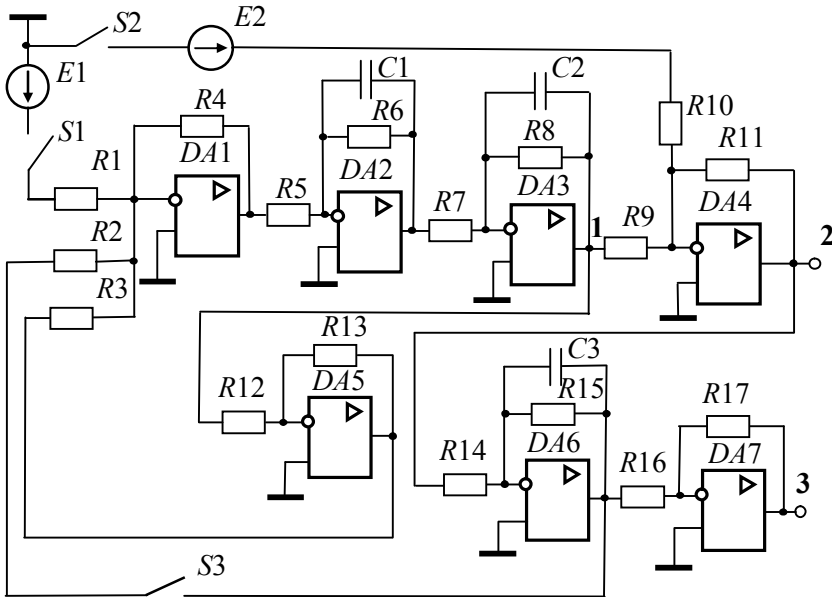


Рис. 6.2. Модель системы с положительной жёсткой обратной связью

На рис. 6.2 приведена схема электронной модели исследуемой САУ. Звенья нескорректированной САУ с передаточными функциями $W_1(p)$ – $W_3(p)$ и $W_{oc}(p)$ выполнены на усилителях $DA2$ – $DA4$, $DA6$. Корректирующее (пропорциональное) звено реализовано на усилителе $DA5$. Усилитель $DA1$

выполняет роль сумматора задающего напряжения E_1 , которое подаётся через ключ S_1 , и двух сигналов обратной связи (местной и главной). К одному из входов усилителя $DA4$ через ключ S_2 подключается источник возмущающего воздействия E_2 . При исследовании нескорректированной САУ связь между выходом усилителя $DA3$ и входом усилителя $DA5$ (точка **1**) отключается. Точка **2** представляет собой выход модели системы и к ней подсоединяется один из входов осциллографа. При работе в частотной области цепь обратной связи размыкается ключом S_3 и к точке **3** подключаются плоттер Боде.

Параметры электронных моделей звеньев нескорректированной САУ рассчитываются и задаются аналогично, как это производилось в первой и второй лабораторных работах, т.е.

$$R_6 = k_1 R_5, \quad C_1 = \frac{T_1}{R_6}, \quad R_8 = k_2 R_7, \quad C_2 = \frac{T_2}{R_8}, \quad R_{11} = k_3 R_9, \quad R_{15} = k_{oc} R_{14},$$

$$C_3 = \frac{T_{oc}}{R_{15}}. \quad \text{При этом } R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_7 = R_9 = R_{10} = R_{12} =$$

$$= R_{14} = R_{16} = R_{17} = 100 \text{ кОм}.$$

Постоянные времени и коэффициенты передачи системы заданы в табл. 6.1.

Глубина положительной обратной связи задаётся коэффициентом передачи K_k . Система исследуется в динамическом и статическом режимах её работы, в частотной области, начиная с $K_k = 0$ (разомкнутой положительной обратной связью), и при его других значениях в соответствии с программой работы. По полученным результатам строятся графики зависимостей.

Для всех вариантов исходных данных задающее воздействие принимается равным $E_1 = k_{oc}$, а возмущающее воздействие $E_2 = 1 \text{ В}$.

На рис. 6.3 приведена схема модели системы с отрицательной гибкой обратной связью, которая осуществляется с помощью идеального дифференцирующего звена с передаточной функцией $W_k(p) = k_k p$, выполненного на усилителе $DA5$. Главная обратная связь – единичная. Здесь $k_k = C_4 R_{11}$, а сопротивление

ния резисторов $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_7 = R_9 = R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_{14} = R_{15} = 100 \text{ кОм}$. Граничный коэффициент передачи нескорректированной САУ рассчитывается по формуле

$$K_{\text{гр}} = \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} \right) \cdot (T_1 + T_2 + T_3) - 1. \quad (6.1)$$

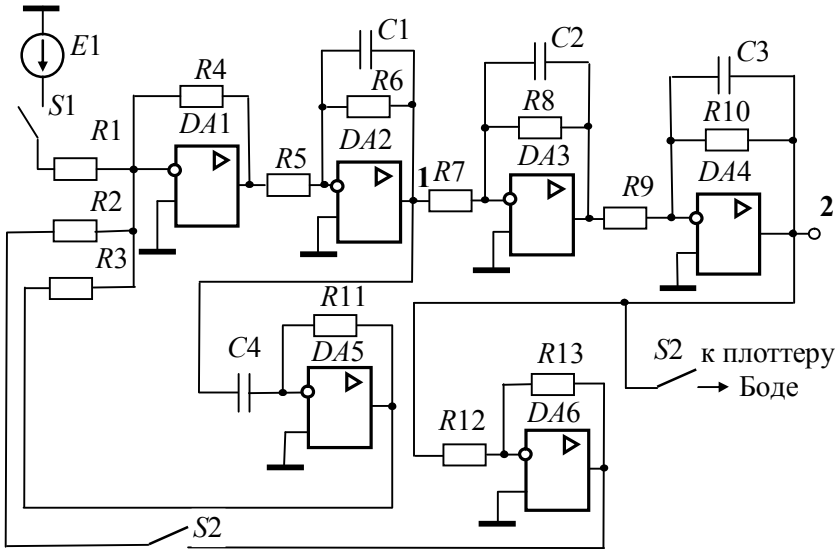


Рис. 6.3. Модель системы с отрицательной гибкой обратной связью

Исходя из полученного значения $K_{\text{гр}}$, рассчитывается значение коэффициента передачи $k_{2\text{гр}} = \frac{K_{\text{гр}}}{k_1 k_3 k_{\text{oc}}}$, определяются номиналы остальных сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов электронной модели нескорректированной САУ:

$$R_6 = k_1 R_5, \quad C_1 = \frac{T_1}{R_6}, \quad R_8 = k_2 R_7, \quad C_2 = \frac{T_2}{R_8}, \quad R_{10} = k_3 R_9, \quad C_3 = \frac{T_3}{R_{10}},$$

от точки 1 отключается гибкая обратная связь и наблюдается ее переходная характеристика. При правильном расчете всех параметров она имеет вид незатухающих колебаний. Затем коэффи-

коэффициент передачи разомкнутой цепи САУ K_p принимается равным $K_p = 0,8 \cdot K_{гр}$, пересчитывается коэффициент передачи

$$k_2 = \frac{K_p}{k_1 k_3 k_{oc}}$$

и параметры второго инерционного звена $R_8 = k_2 R_7$,

$$C_2 = \frac{T_2}{R_8}. \text{ На один из входов усилителя } DA1 \text{ через ключ } S1 \text{ по-}$$

даётся задающее напряжение $E_1 = \frac{K_p + 1}{K_p}$. Точка 2 представляет

собой выход модели системы и к ней подсоединяется один из входов осциллографа, а также через ключ $S3$ подключается плоттер Боде. При работе в частотной области цепь обратной связи размыкается ключом $S2$. Далее и снимаются временные и частотные характеристики нескорректированной САУ (при $K_k = 0$).

Глубина отрицательной гибкой обратной связи задаётся коэффициентом передачи K_k и, исходя из его значения, рассчиты-

вается ёмкость конденсатора $C_4 = \frac{K_k}{R_{11}}$ и система исследуется

в динамическом режиме её работы, а также в частотной области для всех значений K_k , задаваемых в соответствии с программой работы.

Программа работы

6.1. Исследование характеристик САУ с положительной жёсткой обратной связью

6.1.1. Для заданного варианта исходных данных (см. табл. 6.1) рассчитать параметры элементов системы.

6.1.2. Разомкнуть положительную обратную связь и для нескорректированной САУ, поочерёдно замыкая ключи $S1$, $S2$, снять переходные характеристики по задающему и возмущающему воздействиям, измерив при этом установившиеся значения $U_{уст}|_{E_2=0}$ и $U_{уст}|_{E_2=1 \text{ В}}$ выходного напряжения, время переходного

го процесса и перегулирование по задающему $t_{пп,3}$, σ_3 и возмущающему $t_{пп,в}$, $\sigma_в$ воздействиям.

Таблица 6.1

Вариант	T_1, c	T_2, c	T_{oc}, c	k_1	k_2	k_3	k_{oc}	$K_{к,3}$
1	0,1	0,02	0,002	20	2	5	0,1	0,025
2	0,2	0,04	0,001	20	2,5	4	0,2	0,02
3	0,05	0,005	0,003	40	2	2	0,1	0,0125
4	0,08	0,007	0,004	25	2	3	0,2	0,02
5	0,1	0,01	0,002	20	3	2	0,1	0,0167
6	0,15	0,02	0,005	50	2	2	0,1	0,01
7	0,2	0,02	0,005	10	4	5	0,1	0,025
8	0,15	0,03	0,003	20	4	5	0,1	0,0125
9	0,2	0,05	0,005	40	2	3	0,1	0,0125
10	0,3	0,05	0,002	25	3	2	0,2	0,0133
11	0,4	0,05	0,002	25	4	5	0,2	0,01
12	0,5	0,3	0,05	20	3	4	0,1	0,0167
13	0,05	0,3	0,001	50	2	6	0,2	0,01
14	0,7	0,3	0,005	40	1	2	0,4	0,025
15	0,8	0,03	0,01	50	1	3	0,5	0,02
16	0,8	0,05	0,01	50	2	4	0,2	0,01
17	0,8	0,05	0,001	20	4	4	0,2	0,0125
18	0,7	0,5	0,005	20	2	3	0,2	0,025
19	0,6	0,1	0,01	40	1	3	0,2	0,025
20	0,5	0,2	0,01	50	1	4	0,1	0,02
21	0,2	0,4	0,001	20	1	4	0,5	0,05
22	0,1	0,4	0,01	20	2	3	0,2	0,025
23	0,1	0,6	0,02	40	2	2	0,1	0,0125
24	0,2	0,8	0,01	50	1	4	0,2	0,02
25	0,3	0,7	0,001	25	2	5	0,5	0,02
26	0,4	0,6	0,005	100	1	4	0,1	0,01
27	0,5	0,5	0,002	20	2	4	0,2	0,025
28	0,6	0,4	0,003	40	5	3	0,1	0,005
29	0,7	0,3	0,004	50	2,5	2	0,3	0,008

Вариант	T_1, c	T_2, c	T_{oc}, c	k_1	k_2	k_3	k_{oc}	$K_{к,3}$
30	0,8	0,2	0,005	40	5	5	0,1	0,008
31	0,9	0,1	0,004	20	5	5	0,2	0,01
32	1,0	0,05	0,001	50	4	5	0,5	0,005

6.1.3. Разомкнуть ключи $S1, S2$, замкнуть ключ $S3$, снять частотные характеристики нескорректированной САУ и определить запасы устойчивости по амплитуде ΔG и фазе $\Delta \varphi$.

6.1.4. Рассчитать сопротивление R_{13} для $K_k = 0,1K_{к,3}$, подключить к точке **1** положительную обратную связь и повторить выполнение п.п. 6.1.2, 6.1.3.

6.1.5. Рассчитать сопротивление R_{13} для $K_k = 0,5K_{к,3}$ и повторить выполнение п.п. 6.1.2, 6.1.3.

6.1.6. Рассчитать сопротивление R_{13} для $K_k = K_{к,3}$ и повторить выполнение п.п. 6.1.2, 6.1.3.

6.1.7. Рассчитать сопротивление R_{13} для $K_k = 1,5K_{к,3}$ и повторить выполнение п.п. 6.1.2, 6.1.3.

6.1.8. Рассчитать сопротивление R_{13} для $K_k = 2,0K_{к,3}$ и повторить выполнение п.п. 6.1.2, 6.1.3.

6.1.9. По полученным результатам построить внешние статические характеристики САУ для принятых значений K_k , а также графики зависимостей $t_{пн,3} = f(K_k)$, $\sigma_3 = f(K_k)$, $t_{пн,в} = f(K_k)$, $\sigma_в = f(K_k)$, $\Delta G = f(K_k)$, $\Delta \varphi = f(K_k)$. Проанализировать полученные результаты.

6.2. Исследование характеристик САУ с отрицательной гибкой обратной связью

6.2.1. По данным, представленным в табл. 6.2 рассчитать параметры элементов модели САУ, изображённой на рис. 6.3, по формуле (6.1) рассчитать граничный коэффициент передачи нескорректированной САУ и граничное значение коэффициента передачи k_2 , определить значения параметров $R_8 = k_2 R_7$,

$C_2 = \frac{T_2}{R_8}$, в точке **1** разомкнуть местную обратную связь, замк-

нуть ключ $S1$ и пронаблюдать переходную характеристику САУ. Убедиться, что она имеет вид незатухающих колебаний, амплитуда которых не превышает 2 В.

Таблица 6.2

Вариант	T_1, c	T_2, c	T_3, c	k_1	k_3
1	0,2	0,06	0,015	2	5
2	0,15	0,05	0,005	5	3
3	0,1	0,05	0,004	5	6
4	0,2	0,09	0,02	5	5
5	0,18	0,06	0,01	3	4
6	0,16	0,04	0,08	2	4
7	0,14	0,04	0,005	3	3
8	0,12	0,03	0,003	2	3
9	0,1	0,04	0,002	2	2
10	0,2	0,07	0,01	5	6
11	0,25	0,15	0,07	4	2
12	0,2	0,16	0,05	4	3
13	0,3	0,28	0,1	2	2
14	0,22	0,18	0,1	2	3
15	0,1	0,05	0,015	3	4
16	0,08	0,04	0,01	4	4
17	0,05	0,03	0,005	5	4
18	0,04	0,03	0,006	5	5
19	0,1	0,03	0,003	2	6
20	0,12	0,07	0,008	3	3
21	0,13	0,1	0,02	2	2
22	0,15	0,11	0,02	2	4
23	0,18	0,14	0,04	3	4
24	0,2	0,12	0,05	4	5
25	0,3	0,15	0,03	5	4
26	0,4	0,2	0,02	2	5
27	0,5	0,2	0,01	2	3

Вариант	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$T_3, \text{с}$	k_1	k_3
28	0,8	0,1	0,005	4	3
29	0,7	0,1	0,008	5	10
30	1,0	0,1	0,01	5	5
31	0,5	0,1	0,005	4	8
32	0,1	0,005	0,001	5	6

6.2.2. Принять значение $K_p = 0,8K_{пр}$, пересчитать значение коэффициента передачи k_2 , уточнить параметры R_8 , C_2 и при разомкнутой местной обратной связи снять переходную характеристику по задающему воздействию и частотные характеристики САУ, определив при этом время переходного процесса $t_{п,3}$, перерегулирование σ_3 по задающему воздействию, а также запасы устойчивости по амплитуде ΔG и фазе $\Delta\varphi$.

6.2.3. Замкнуть местную гибкую связь, принять значение $K_k = 0,1 \text{ с}$, рассчитать ёмкость конденсатора $C_4 = \frac{K_k}{R_{11}}$, снять переходную характеристику по задающему воздействию и частотные характеристики САУ, определив при этом время переходного процесса $t_{п,3}$, перерегулирование σ_3 по задающему воздействию, а также запасы устойчивости по амплитуде ΔG и фазе $\Delta\varphi$.

6.2.4. Принять значение $K_k = 0,2 \text{ с}$ и повторить выполнение п. 6.2.3.

6.2.5. Принять значение $K_k = 0,5 \text{ с}$ и повторить выполнение п. 6.2.3.

6.2.6. Принять значение $K_k = 1 \text{ с}$ и повторить выполнение п. 6.2.3.

6.2.7. По полученным результатам построить графики зависимостей $t_{п,3} = f(K_k)$, $\sigma_3 = f(K_k)$, $\Delta G = f(K_k)$, $\Delta\varphi = f(K_k)$ и проанализировать их.

6.3. Контрольные вопросы

6.3.1. Как изменяются параметры инерционных звеньев, охваченных жёсткой положительной обратной связью при $K_k < K_{k,з}$?

6.3.2. Почему при $K_k = K_{k,з}$ в САУ с жёсткой положительной обратной связью статическая ошибка равна нулю?

6.3.2. Что происходит с инерционными звеньями при их охвате жёсткой положительной обратной связью с $K_k > K_{k,з}$?

6.3.4. Почему гибкая отрицательная обратная связь слабо влияет на показатели качества регулирования в динамических режимах работы САУ? Почему она не влияет на статические характеристики САУ?

6.3.5. Что произойдёт с системой, если её инерционное звено охватить гибкой положительной обратной связью?

7. Лабораторная работа № 4. Последовательная коррекция систем автоматического управления

Цель работы

Целью лабораторной работы является исследование характеристик САУ при различных типах последовательных корректирующих устройств.

Методика проведения лабораторной работы

В лабораторной работе исследуется вариант САУ, структурная схема которой приведена на рис. 7.1. Здесь звено с передаточной функцией $W_k(p)$, установленное между звеньями с передаточными функциями $W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}$ и $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}$, представляет собой последовательное корректирующее устрой-

ство. Третье звено также инерционное с передаточной функцией $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}$. Система замкнута единичной обратной связью.

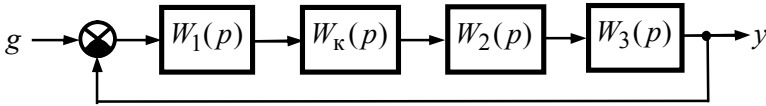


Рис. 7.1. Структурная схема САУ с последовательным корректирующим устройством

Постоянные времени и коэффициенты передачи всех звеньев нескорректированной системы заданы в табл. 7.1.

На рис. 7.2 приведена схема электронной модели исследуемой САУ. Звенья нескорректированной САУ с передаточными функциями $W_1(p) - W_3(p)$ выполнены на усилителях DA2 – DA4, а единичная отрицательная обратная связь организована на усилителе DA5. Усилитель DA1 выполняет роль сумматора, на один из входов которого через ключ S1 поступает задающее напряжение $E1 = \frac{K_p + 1}{K_p}$, где $K_p = k_1 k_2 k_3$, а на дру-

гой вход с выхода усилителя DA5 подаётся сигнал обратной связи. Между точками 1 и 2 включается последовательное корректирующее устройство, а при исследовании нескорректированной САУ точки 1 и 2 соединяются между собой. К точке 3, являющейся выходом системы, подключаются осциллограф и плоттер Бодэ. При снятии частотных характеристик цепь обратной связи размыкается ключом S2.

Параметры электронных моделей звеньев нескорректированной САУ рассчитываются и задаются аналогично, как это производилось в первой и второй лабораторных работах. При этом $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_8 = R_{10} = R_{11} = 100 \text{ кОм}$.

Параметры элементов модели САУ рассчитываются обычным образом (см. лабораторные работы №№ 2, 3), а граничный коэффициент передачи нескорректированной САУ рассчитывается по формуле

$$K_{гр} = \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} \right) \cdot (T_1 + T_2 + T_3) - 1. \quad (7.1)$$

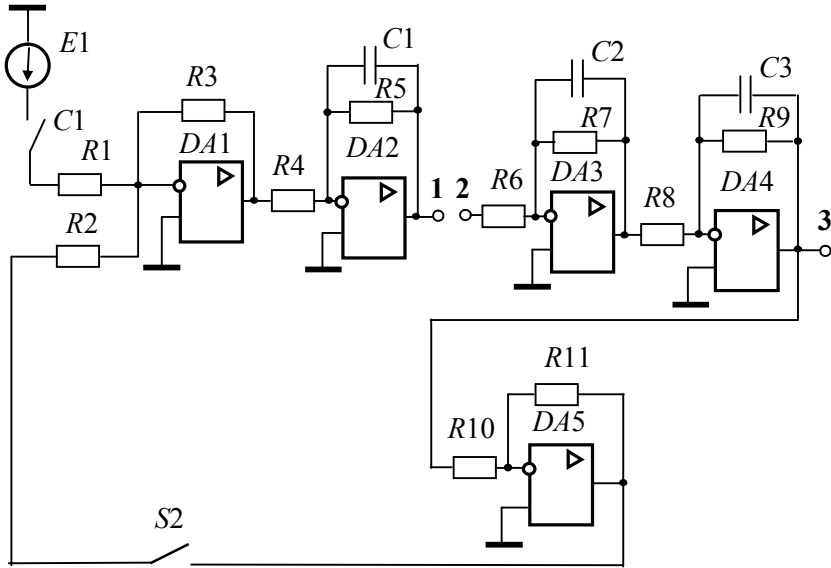


Рис. 7.2. Схема модели нескорректированной САУ

Исходя из полученного значения $K_{гр}$, рассчитывается значение коэффициента передачи k_2 , определяются номиналы остальных сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов электронной модели нескорректированной САУ и наблюдается ее переходная характеристика. При правильном расчете всех параметров она имеет вид незатухающих колебаний. Затем коэффициент передачи разомкнутой цепи САУ K_p принимается равным $K_p = 0,5 \cdot K_{гр}$ (для этого величина резистора R_3 уменьшается в два раза) и снимаются временные и частотные характеристики нескорректированной САУ.

В качестве последовательных корректирующих устройств в данной лабораторной работе предлагается использовать однозвенный фильтр, а также пропорционально-интегральный (ПИ)

и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регуляторы.

Однозвенный фильтр представляет собой инерционное форсирующее звено с передаточной функцией $W_{\Phi}(p) = \frac{\tau_{\Phi} p + 1}{T_{\Phi} p + 1}$.

Схема его электронной модели приведена на рис. 7.3. Для удобства работы форсирующее звено реализовано на усилителе $DA1$, причем постоянная времени $\tau_{\Phi} = R_{1\Phi} C_{1\Phi}$, а коэффициент пере-

дачи $k_{\Phi 1} = -\frac{R_{2\Phi}}{R_{1\Phi}}$. Инерционное звено реализовано на усилителе

$DA2$, при этом постоянная времени $T_{\Phi} = R_{4\Phi} C_{2\Phi}$ и коэффи-

циент передачи $k_{\Phi 2} = -\frac{R_{4\Phi}}{R_{3\Phi}}$. Так как коэффициент передачи

фильтра $k_{\Phi} = k_{\Phi 1} \cdot k_{\Phi 2} = 1$, необходимо принять

$R_{1\Phi} = R_{2\Phi} = R_{3\Phi} = R_{4\Phi} = 100$ кОм. Во всех вариантах задания значение постоянной времени принимается равным $T_{\Phi} = 0,1$ мс,

следовательно, $C_{2\Phi} = \frac{T_{\Phi}}{R_{4\Phi}} = \frac{0,0001}{100 \cdot 10^3} = 1$ нФ. Постоянная време-

ни τ_{Φ} поочередно принимает значения, равные одной из постоянных времени нескорректированной САУ и, в соответствии с

ее значением, рассчитывается величина $C_{1\Phi} = \frac{\tau_{\Phi}}{R_{1\Phi}}$.

ПИ-регулятор представляет собой изодромное звено с передаточной функцией $W_{\text{пи}}(p) = k_{\text{пи}} \frac{\tau_{\text{пи}} p + 1}{p}$. Схема его электронной модели показана на рис. 7.4, причем постоянная време-

ни $\tau_{\text{пи}} = R_{2\text{пи}} C_{\text{пи}}$ и коэффициент передачи $k_{\text{пи}} = \frac{R_{4\text{пи}}}{R_{1\text{пи}} R_{3\text{пи}} C_{\text{пи}}}$. В

лабораторной работе $k_{\text{пи}} = 1 \text{ с}^{-1}$. Следует принять

$R_{1\text{пи}} = R_{3\text{пи}} = 100 \text{ кОм}$, $R_{2\text{пи}} = 1 \text{ кОм}$. Значения $R_{4\text{пи}}$ и $C_{\text{пи}}$ рассчитываются в соответствии с заданным значением $\tau_{\text{пи}}$:

$$C_{\text{пи}} = \frac{\tau_{\text{пи}}}{R_{2\text{пи}}}; \quad R_{4\text{пи}} = \frac{R_{1\text{пи}} R_{3\text{пи}}}{R_{2\text{пи}}} \tau_{\text{пи}} = 10^7 \cdot \tau_{\text{пи}}.$$

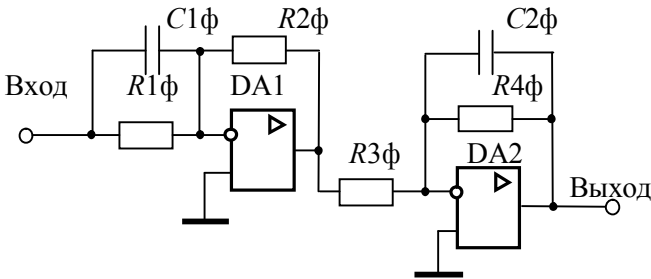


Рис. 7.3. Схема фильтра

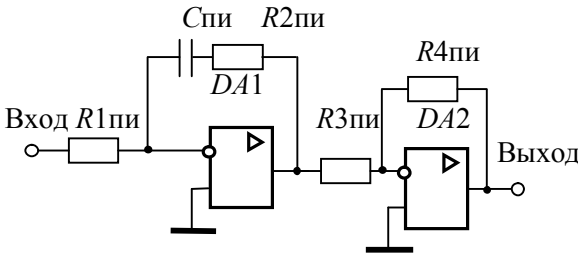


Рис. 7.4. Схема ПИ-регулятора

ПИД-регулятор – это звено с передаточной функцией $W_{\text{пид}}(p) = k_{\text{пид}} \frac{(\tau_{1\text{пид}} p + 1)(\tau_{2\text{пид}} p + 1)}{p}$. Схема электронной модели

этого регулятора показана на рис. 7.5, причем постоянные времени $\tau_{1\text{пид}} = R_{1\text{пид}} C_{1\text{пид}}$, $\tau_{2\text{пид}} = R_{2\text{пид}} C_{2\text{пид}}$ и коэффициент

$$\text{передачи } k_{\text{пид}} = \frac{R_{4\text{пид}}}{R_{1\text{пид}} R_{3\text{пид}} C_{2\text{пид}}}.$$

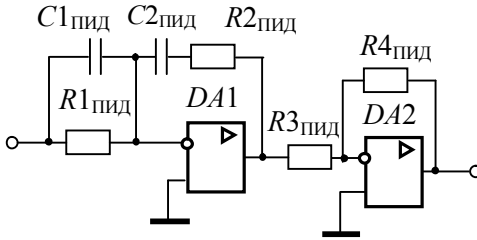


Рис. 7.5. Схема ПИД-регулятора

В лабораторной работе постоянные времени $\tau_{1\text{пид}}$ и $\tau_{2\text{пид}}$ принимаются равными **наибольшей** и **средней** постоянным времени нескорректированной САУ, а значение $k_{\text{пид}}$, задается из табл. 6.2. Сопротивления $R_{1\text{пид}} = R_{2\text{пид}} = R_{3\text{пид}} = 100$ кОм, а номиналы остальных элементов рассчитываются в соответствии с заданными значениями $\tau_{1\text{пид}}$, $\tau_{2\text{пид}}$, $k_{\text{пид}}$:

$$C_{1\text{пид}} = \frac{\tau_{1\text{пид}}}{R_{1\text{пид}}} = 10^{-5} \tau_{1\text{пид}}, \quad C_{2\text{пид}} = \frac{\tau_{2\text{пид}}}{R_{2\text{пид}}} = 10^{-5} \tau_{2\text{пид}},$$

$$R_{4\text{пид}} = k_{\text{пид}} R_{1\text{пид}} R_{3\text{пид}} C_{2\text{пид}} = 10^{10} \cdot k_{\text{пид}} \cdot C_{2\text{пид}}.$$

Программа работы

7.1. Исследование характеристик нескорректированной САУ

7.1.1. В соответствии с вариантом исходных данных (см. табл. 7.1) по формуле 7.1) рассчитать граничное значение коэффициента передачи $K_{\text{гр}}$, определить значение коэффициента

передачи второго звена $k_2 = \frac{K_{\text{гр}}}{k_1 \cdot k_3}$, рассчитать параметры

электронной модели и получить ее переходную характеристику на границе устойчивости. Если она имеет вид незатухающих колебаний, то продолжить выполнение программы работы, в противном случае – уточнить параметры модели.

Таблица 7.1

Вариант	T_1, c	T_2, c	T_3, c	k_1	k_3
1	0,2	0,06	0,015	2	5
2	0,15	0,05	0,005	5	3
3	0,1	0,05	0,004	5	6
4	0,2	0,09	0,02	5	5
5	0,18	0,06	0,01	3	4
6	0,16	0,08	0,04	2	4
7	0,14	0,04	0,005	3	3
8	0,12	0,03	0,003	2	3
9	0,1	0,04	0,002	2	2
10	0,2	0,07	0,01	5	6
11	0,25	0,15	0,07	4	2
12	0,2	0,16	0,05	4	3
13	0,3	0,28	0,1	2	2
14	0,22	0,18	0,1	2	3
15	0,1	0,05	0,015	3	4
16	0,08	0,02	0,01	4	4
17	0,05	0,03	0,005	5	4
18	0,04	0,02	0,001	5	5
19	0,1	0,03	0,003	2	6
20	0,12	0,07	0,008	3	3
21	0,13	0,1	0,02	2	2
22	0,15	0,11	0,02	2	4
23	0,18	0,14	0,04	3	4
24	0,2	0,12	0,05	4	5
25	0,3	0,03	0,005	3	4
26	0,5	0,05	0,01	5	3
27	0,4	0,04	0,008	2	2
28	0,1	0,01	0,002	4	3
29	0,05	0,005	0,001	6	2
30	0,15	0,05	0,003	4	2
31	0,2	0,05	0,004	4	4
32	0,25	0,06	0,005	5	2

7.1.2. Принять значение коэффициента передачи разомкнутой цепи $K_p = 0,5 \cdot K_{гр}$ путем уменьшения в два раза номинала резистора R_3 .

7.1.3. Установить задающее воздействие (напряжение $E_1 = \frac{1+K_p}{K_p}$ В) и, замыкая ключ $S1$, подать его на вход модели системы. С помощью осциллографа снять переходную характеристику нескорректированной САУ. Определить время переходного процесса $t_{пн}$ и перерегулирование σ .

7.1.4. Разомкнув ключ $S2$, с выхода САУ с помощью плоттера Бодэ снять ЛАЧХ и ЛФЧХ нескорректированной САУ, определить частоту среза $\omega_{ср}$, а также запасы устойчивости по амплитуде ΔG и фазе $\Delta\phi$.

7.1.5. Результаты эксперимента оформить в виде таблицы.

7.2. Исследование характеристик САУ с фильтром

7.2.1. Рассчитать для заданного варианта параметры однозвенного фильтра (рис. 7.3) для значений $\tau_\phi = T_1$, $\tau_\phi = T_2$ и $\tau_\phi = T_3$.

7.2.2. Включить между точками **1** и **2** однозвенный фильтр, приняв значение его постоянной времени $\tau_\phi = T_1$.

7.2.3. Повторить выполнение п.п. 7.1.3, 7.1.4., сняв при этом переходную характеристику замкнутой системы, ЛАЧХ и ЛФЧХ скорректированной САУ с фильтром. Определить время переходного процесса $t_{пн}$, перерегулирование σ , частоты среза $\omega_{ср}$, запасы устойчивости по амплитуде ΔG и фазе $\Delta\phi$.

7.2.4. Установить значение постоянной времени фильтра $\tau_\phi = T_2$ и повторить выполнение пункта 7.2.3.

7.2.5. Установить значение постоянной времени фильтра $\tau_\phi = T_3$ и повторить выполнение пункта 7.2.3.

7.2.6. Оформить полученные результаты в виде таблицы и сравнить с результатами исследования нескорректированной САУ.

7.3. Исследование характеристик САУ с ПИ–регулятором

7.3.1. Рассчитать для заданного варианта параметры ПИ–регулятора (рис. 7.4) для значений $k_{\text{пи}} = 1$, $T_{\text{пи}} = T_1$, $T_{\text{пи}} = T_2$ и $T_{\text{пи}} = T_3$.

7.3.2. Включить между точками **1** и **2** ПИ–регулятор и установить значение его постоянной времени $T_{\text{пи}} = T_1$,

7.3.3. Повторить выполнение п.п. 7.1.3, 7.1.4, приняв задающее воздействие равным $E_1 = 1$ В, сняв при этом переходную характеристику, ЛАЧХ и ЛФЧХ скорректированной САУ с ПИ – регулятором. Определить время переходного процесса $t_{\text{пн}}$, перерегулирование σ , частоту среза $\omega_{\text{ср}}$, запасы устойчивости по амплитуде ΔG и фазе $\Delta\varphi$.

7.3.4. Установить значение постоянной времени ПИ–регулятора $T_{\text{пи}} = T_2$ и повторить выполнение пункта 6.3.3.

7.3.5. Установить значение постоянной времени ПИ–регулятора $T_{\text{пи}} = T_3$ и повторить выполнение пункта 6.3.3.

7.3.6. Результаты эксперимента оформить в виде таблицы и сравнить их с результатами исследования нескорректированной САУ и САУ с фильтром.

7.4. Исследование характеристик САУ с ПИД–регулятором

7.4.1. Рассчитать для заданного варианта параметры ПИД–регулятора (рис. 7.5), принимая значения $T_{1\text{пид}}$ и $T_{2\text{пид}}$, равными максимальной и средней постоянным времени нескорректированной САУ. Значения $k_{\text{пид}}$ выбрать из табл. 7.2.

Таблица 7.2

Вариант	$k_{\text{пид1}}, \text{с}^{-1}$	$k_{\text{пид2}}, \text{с}^{-1}$	$k_{\text{пид3}}, \text{с}^{-1}$	$k_{\text{пид4}}, \text{с}^{-1}$
1	11,45	5,725	2,862	2,29
2	17,6	8,8	4,4	3,52
3	23,74	11,87	5,935	4,75
4	13,36	6,68	3,34	2,67
5	13,53	7,767	3,383	2,71
6	8,89	4,444	2,222	1,778
7	19,07	9,536	4,768	3,814
8	23,65	11,826	5,913	4,73
9	26,68	13,34	6,67	5,336
10	12,35	6,173	3,086	2,47
11	5,33	2,664	1,332	1,065
12	6,77	3,38	1,693	1,35
13	6,44	3,222	1,611	1,29
14	9,06	4,53	2,265	1,81
15	17,84	8,92	4,46	3,57
16	23,7	11,85	5,925	4,74
17	38,96	19,48	9,74	7,79
18	61,94	30,97	15,486	12,39
19	27,16	13,58	6,79	5,73
20	17,51	8,75	4,43	2,51
21	12,56	6,28	3,14	3,54
22	11,49	5,744	2,872	2,3
23	7,95	3,98	1,99	1,59
24	7,06	3,53	1,765	1,41
25	10,22	5,11	2,555	2,04
26	5,94	2,97	1,485	1,19
27	7,428	3,714	1,857	1,48
28	29,7	14,85	7,427	5,94
29	59,4	29,7	14,854	11,88
30	18,5	9,25	4,624	3,7
31	14,52	7,26	3,631	2,9
32	11,68	5,84	2,919	2,33

7.4.2. Включить между точками 1 и 2 ПИД-регулятор, установить значения параметров его элементов, соответствующие постоянным времени T_1 и T_2 нескорректированной САУ и значению коэффициента передачи $k_{\text{пид}} = k_{\text{пид}1}$ (см. табл. 7.2).

7.4.3. Повторить выполнение п.п. 7.1.3, 7.1.4, приняв задающее воздействие равным $E_1 = 1$ В, сняв при этом переходную характеристику, ЛАЧХ и ЛФЧХ скорректированной САУ с ПИД-регулятором. Определить время переходного процесса $t_{\text{пп}}$, перерегулирование σ , частоту среза $\omega_{\text{ср}}$, запасы устойчивости по амплитуде ΔG и фазе $\Delta \varphi$.

7.4.4. Изменить параметры ПИД-регулятора, приняв значение $k_{\text{пид}} = k_{\text{пид}2}$ и повторить выполнение п. 7.4.3.

7.4.5. Изменить параметры ПИД-регулятора, приняв значение $k_{\text{пид}} = k_{\text{пид}3}$ и повторить выполнение п. 7.4.3.

7.4.6. Изменить параметры ПИД-регулятора, приняв значение $k_{\text{пид}} = k_{\text{пид}4}$ и повторить выполнение п. 7.4.3.

7.4.7. Результаты эксперимента оформить в виде таблицы и сравнить их с ранее полученными результатами.

7.5. Контрольные вопросы

7.5.1. Возможно ли с помощью последовательных корректирующих устройств сделать неустойчивую САУ устойчивой, и если возможно, то почему?

7.5.2. Возможно ли при определенных параметрах ПИД-регулятора устойчивую систему сделать неустойчивой?

7.5.3. Какое новое качество приобретает САУ при использовании в ней в качестве корректирующих устройств ПИ- и ПИД- регуляторов?

7.5.4. Почему при использовании в качестве корректирующего устройства ПИ- регулятора может ухудшиться быстродействие САУ?

7.5.5. Возможно ли с помощью ПИД - регулятора настроить САУ на технический оптимум и какие показатели качества регулирования при этом будут достигнуты (в цифрах)?

8. Требования к оформлению отчетов

Отчет по каждой лабораторной работе представляется в виде текстового документа, выполненного в рукописном виде или в текстовом редакторе **Word**. Отчет должен содержать:

- цель лабораторной работы;
- схемы моделей звеньев, подкрепленные расчетом номиналов элементов, входящих в эти модели;
- наиболее характерные осциллограммы и кривые Бодде;
- таблицы полученных результатов и графики требуемых зависимостей;
- анализ полученных результатов;
- ответы на контрольные вопросы.

Отчет представляется и защищается при выполнении последующей лабораторной работы. Представление и защита отчета после указанного срока наказывается снижением рейтинговой оценки.