

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

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

Лебедев Ю.М.

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Руководство по выполнению контрольной и лабораторных работ для студентов заочного факультета специальности 210106 «Промышленная электроника»

Томск - 2010

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Введение	4
2. Рабочая программа по курсу «Теория автоматического управления» и рекомендуемая литература	4
2.1. Основные понятия и определения	4
2.2. Математическое описание линейных непрерывных САУ	5
2.3. Устойчивость линейных САУ	5
2.4. Оценка качества регулирования	6
2.5. Коррекция динамических характеристик САУ	6
2.6. Список рекомендуемой литературы	6
3. Контрольная работа	7
3.1. Общие требования по выполнению контрольной работы	7
3.2. Задание на выполнение контрольной работы	8
4. Методические указания по выполнению контрольной работы	9
4.1. Определение типовых звеньев САУ	9
4.2. Определение передаточных функций САУ	10
4.3. Определение устойчивости САУ по критерию Найквиста и расчет граничного коэффициента передачи разомкнутой цепи	12
4.4. Анализ устойчивости САУ по критерию Гурвица и построение ее области устойчивости в плоскости варьируемых параметров x_1 и x_2	14
4.5. Построение логарифмических частотных характеристик САУ для заданного запаса устойчивости по амплитуде	17
4.6. Расчет статических характеристик САУ	20
5. Лабораторные работы	23
5.1. Общая характеристика лабораторного цикла	23
5.2. Краткое описание системы моделирования электронных схем «ASIMEC»	23
5.2.1. Назначение и состав программного пакета «ASIMEC»	23

5.2.2. Проведение измерений при временном анализе	25
5.2.3. Проведение измерений при частотном анализе	29
5.3. Основы электронного моделирования	32
5.4. Лабораторная работа № 1. Моделирование и исследование характеристик типовых динамических звеньев САУ	34
5.4.1. Исследование инерционного звена	36
5.4.2. Исследование инерционного форсирующего звена	37
5.4.3. Исследование звеньев второго порядка	39
5.4.5. Контрольные вопросы	40
5.5. Лабораторная работа № 2. Исследование статических и астатических САУ	41
5.5.1. Исследование статической САУ	44
5.5.2. Исследование астатической САУ	47
5.5.3. Контрольные вопросы	48
Приложение. Исходные данные для контрольной работы	50

1. ВВЕДЕНИЕ

Теория автоматического управления (ТАУ) является одной из наиболее важных общетехнических дисциплин, и ее изучение опирается на ряд фундаментальных общеобразовательных и общетехнических дисциплин - высшей математики, информатики, основ теории цепей и так далее. Без знания этих наук будет весьма сложно освоить курс ТАУ.

Основная задача настоящих методических указаний - на конкретных примерах и задачах научить студента практическому применению приемов и методов, применяемых при анализе и синтезе систем автоматического управления (САУ). Приобретение этих навыков необходимо при использовании полученных знаний при изучении ряда специальных дисциплин, таких как «Электронные цепи и микросхемотехника», «Методы анализа и расчета электронных схем», «Преобразовательная техника» и так далее.

При изучении настоящих методических указаний необходимо изучить и проработать конспект лекций по ТАУ, а также (по возможности) и предлагаемые ниже литературные источники.

2. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ПО ДИСЦИПЛИНЕ ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ» И РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

2.1. Основные понятия и определения

Предмет дисциплины и ее значение для электроники. Классификация систем автоматического управления (САУ). Принципы управления по отклонению и возмущению. Функциональные схемы САУ и их элементы.

2.2. Математическое описание линейных непрерывных САУ

Статические характеристики элементов и систем. Описание САУ и их элементов дифференциальными уравнениями. Понятие передаточной функции. Частотные функции и характеристики САУ и их элементов. Временные характеристики. Взаимосвязь различных форм математического описания.

Типовые динамические звенья САУ (пропорциональное, интегрирующее дифференцирующее, форсирующее, апериодическое, апериодическое второго порядка, колебательное, консервативное) и их характеристики. Минимально- и не минимально фазовые звенья. Трансцендентные звенья. Звено чистого запаздывания и его свойства и характеристики.

Понятие структурной схемы САУ. Элементы структурных схем. Правила преобразования структурных схем. Передаточные функции и частотные характеристики разомкнутых и замкнутых САУ. Построение асимптотических логарифмических частотных характеристик.

2.3. Устойчивость линейных САУ

Физическое понятие устойчивости. Определение устойчивости по корням характеристического уравнения. Критерии устойчивости. Алгебраический критерий устойчивости Гурвица. Частотные критерии устойчивости Михайлова и Найквиста. Устойчивость по логарифмическим частотным характеристикам.

Понятие критического (граничного) значения варьируемого параметра. Расчет критического (граничного) значения варьируемого параметра. Построение границы устойчивости САУ в пространстве двух варьируемых параметров с помощью критериев устойчивости. D - разбиения. Понятие запасов устойчивости. Обеспечение заданных запасов устойчивости.

2.4. Оценка качества регулирования

Показатели качества регулирования: точность в установленном режиме, длительность (время) переходного процесса, перерегулирование, колебательность. Статические и астатические САУ, порядок астатизма. Оценка качества регулирования по частотным характеристикам САУ. Методы построения переходной характеристики. Построение переходной характеристики путем непосредственного перехода от изображения к оригиналу через обратное преобразование Лапласа. Применение интегрированной системы (пакета) программирования Mathcad для расчета и анализа характеристик САУ.

2.5. Коррекция динамических характеристик САУ

Постановка задач стабилизации и коррекции. Последовательная и параллельная коррекция. Типовые последовательные корректирующие звенья. Гибкие и жесткие корректирующие обратные связи.

Синтез последовательных корректирующих устройств по логарифмическим частотным характеристикам. Построение желаемой логарифмической амплитудной частотной характеристики (ЛАЧХ) по номограммам Солодовникова. Понятие технического оптимума (ТО) и настройка одноконтурных САУ на минимальные время переходного процесса и перерегулирование.

2.6. Список рекомендуемой литературы

1. Бессекерский В. А. и др. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления. - М: Наука, 1978 - 512 с.
2. Коновалов Б. И., Лебедев Ю. М. Тория автоматического управления. Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 224 с.

3. Лебедев Е. Д., Неймарк В. Е., Пистарк М. Я., Слежановский О. В. Управление вентильными электроприводами постоянного тока. - М.: Энергия, 1970. – 198 с.

4. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). – Изд. 2-е, дол. и перераб. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.

5. Математические основы теории автоматического регулирования./ Под ред. проф. Чемоданова Б.К. / Том 1, Том 2. - М: Высшая школа, 1977.

6. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1989. – 304 с.

7. Теория автоматического управления./ Под ред. Нетушила А.В./ Учебник для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1976. – 400 с.

8. Теория автоматического управления. Ч.1. Теория линейных систем автоматического управления/ Н.А. Бабаков и др.; Под ред. А.А. Воронова. - М.: Высшая школа, 1986. - 367 с.

9. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. - М.: Энергия, 1975. – 416 с.

3. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

3.1. Общие требования по выполнению контрольной работы

Учебный план предусматривает выполнение одной контрольной работы. При ее выполнении необходимо привести содержание задания и исходные данные. Ответы на поставленные вопросы должны быть конкретными и исчерпывающими. Качество выполнения контрольной работы является одним из решающих факторов для получения зачета по теоретическому курсу.

Для выполнения контрольной работы всем студентам выдается одинаковая структурная схема САУ, приведенная на рис. 3.1. Здесь g и f - задающее и возмущающее воздействия соответственно, а y - выходная величина. Передаточные функции звеньев $W_1(p)$ - $W_5(p)$ и другие параметры САУ выдаются сту-

дентам в индивидуальном порядке и приведены в таблице П1 приложения 1.

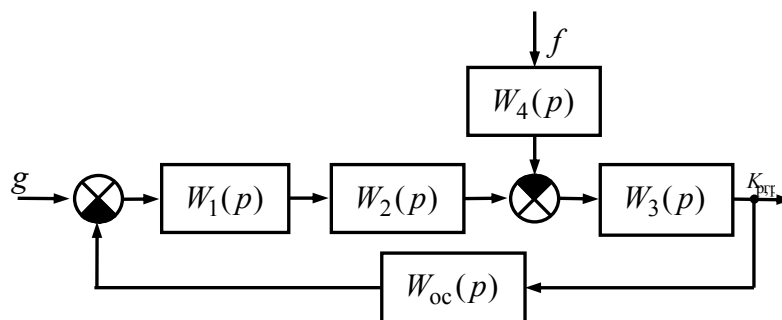


Рис. 3.1

3.2 Задание на выполнение контрольной работы

3.2.1 Указать, из каких типовых звеньев состоит САУ.

3.2.2 Определить передаточные функции разомкнутой и замкнутой САУ.

3.2.3 По критерию устойчивости Найквиста определить устойчивость замкнутой САУ и рассчитать граничное значение коэффициента передачи ее разомкнутой цепи.

3.2.4 Пользуясь критерием устойчивости Гурвица, построить область устойчивости замкнутой САУ по параметрам x_1 и x_2 . Сравнить результаты расчета с результатом, полученным в п. 3.2.3.

3.2.5 Задавая запас устойчивости по амплитуде $\Delta G = 10$ дБ, рассчитать значение коэффициента передачи звена, соответствующего варьируемому параметру x_2 , и построить для разомкнутой цепи САУ асимптотическую ЛАЧХ и точную ЛФЧХ. Определить запас устойчивости по фазе.

3.2.6 Для замкнутой САУ, имеющей запас устойчивости $\Delta G = 10$ дБ, построить регулировочную $y = F(g) \Big|_{f=0}$ и внешнюю $y = F(f) \Big|_{g=\text{const}}$ статические характеристики.

Выполнение всех необходимых расчетов можно производить на микрокалькуляторе или с использованием системы MathCAD.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Рассмотрим выполнение контрольной работы на конкретном примере. Пусть для САУ, структурная схема которой приведена на рис. 3.1, заданы следующие передаточные функции:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_{11}^2 p^2 + T_{12} p + 1}; \quad W_2(p) = \tau_2 p + 1; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1};$$

$$W_4(p) = k_4; \quad W_{\text{ос}}(p) = k_{\text{ос}}.$$

$$k_1 = 10, \quad k_2 = 2, \quad k_3 = 5, \quad k_4 = 4, \quad k_{\text{ос}} = 0,5,$$

$$T_{11} = 0,3 \text{ с}, \quad T_{12} = 0,48 \text{ с}, \quad \tau_2 = 0,1 \text{ с}, \quad T_3 = 0,5 \text{ с}.$$

Максимальные значения задающего g и возмущающего f воздействий равны $g_m = 5$, $f_m = 4$.

4.1. Определение типовых звеньев САУ

Легко видеть, что заданная САУ содержит следующие типовые звенья:

$$W_2(p) = \tau_2 p + 1 - \text{форсирующее звено};$$

$$W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1} \text{ – инерционное звено;}$$

$W_4(p) = k_4$ и $W_{oc}(p) = k_{oc}$ – пропорциональные (безынерционные) звенья.

$$\text{Звено} \quad W_1(p) = \frac{k_1}{T_{11}^2 p^2 + T_{12} p + 1} = \frac{10}{0,09 p^2 + 0,48 p + 1}$$

представляет собой какое-то звено второго порядка. Рассчитаем коэффициент демпфирования этого звена

$$\xi = \frac{T_{12}}{2T_{11}} = \frac{0,48}{2\sqrt{0,09}} = 0,8. \text{ Так как } \xi < 1, \text{ звено второго}$$

порядка является колебательным, и его передаточная функция

$$\text{может быть записана в виде } W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$$

где принято новое обозначение $T_1 = T_{11}$ и $\xi = 0,8$.

4.2. Определение передаточных функций САУ

В соответствии с определениями для передаточных функций САУ, приведенных в [1, 2, 4 – 9], выведем следующие передаточные функции:

- передаточная функция разомкнутой системы по задающему воздействию:

$$W_{pg}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) = \frac{k_1 k_2 k_3 \cdot (\tau_2 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_4 p + 1)};$$

- передаточная функция разомкнутой системы по возмущающему воздействию:

$$W_{pf}(p) = W_3(p) \cdot W_4(p) = \frac{k_3 k_4}{T_3 p + 1};$$

- передаточная функция разомкнутой цепи системы:

$$W_{\text{рц}}(p) = W_{\text{рг}}(p) \cdot W_{\text{ос}}(p) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_{\text{ос}} (T_2 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_3 p + 1)};$$

- передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию:

$$\begin{aligned} W_{\text{зг}}(p) &= \frac{W_{\text{рг}}(p)}{1 + W_{\text{рц}}(p)} = \frac{\frac{k_1 k_2 k_3 (\tau_2 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_3 p + 1)}}{1 + \frac{k_1 k_2 k_3 k_{\text{ос}} (\tau_2 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_3 p + 1)}} = \\ &= \frac{k_1 k_2 k_3 (\tau_2 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_3 p + 1) + k_1 k_2 k_3 k_{\text{ос}} (\tau_2 p + 1)}; \end{aligned}$$

- передаточная функция замкнутой системы по возмущающему воздействию:

$$\begin{aligned} W_{\text{зф}}(p) &= \frac{W_{\text{рф}}(p)}{1 + W_{\text{рц}}(p)} = \frac{\frac{k_3 k_4}{T_3 p + 1}}{1 + \frac{k_1 k_2 k_3 k_{\text{ос}} (\tau_2 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_4 p + 1)}} = \\ &= \frac{k_3 k_4 (T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_3 p + 1) + k_1 k_2 k_3 k_{\text{ос}} (\tau_2 p + 1)}; \end{aligned}$$

Знаменатель передаточных функций замкнутой системы называется ее характеристическим полиномом, который в нашем случае будет иметь вид:

$$\begin{aligned} A(p) &= (T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_3 p + 1) + k_1 k_2 k_3 k_{\text{ос}} (\tau_2 p + 1) = \\ &= a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0, \end{aligned}$$

причем коэффициенты этого полинома будут равны:

$$a_0 = K_p + 1; \quad a_1 = 2\xi T_1 + T_3 + K_p \tau_2; \quad a_2 = T_1 (T_1 + 2\xi T_3); \quad a_3 = T_1^2 T_3,$$

где $K_p = k_1 k_2 k_3 k_{\text{ос}} = 50$ – коэффициент передачи разомкнутой цепи системы.

4.3. Определение устойчивости САУ по критерию Найквиста и расчет граничного коэффициента передачи разомкнутой цепи

В соответствии с критерием Найквиста, САУ будет устойчивой, если годограф АФЧХ ее разомкнутой цепи не охватывает точку с координатами $(-1; j0)$ на комплексной плоскости при изменении частоты ω от нуля до бесконечности. Иначе говоря, для устойчивой САУ необходимо выполнение условий:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}[W_{\text{рц}}(j\omega)] < -1, \\ \operatorname{Im}[W_{\text{рц}}(j\omega)] = 0, \end{cases} \quad (4.1)$$

где $\operatorname{Re}[W_{\text{рц}}(j\omega)]$ и $\operatorname{Im}[W_{\text{рц}}(j\omega)]$ – вещественная и мнимая части АФЧХ разомкнутой цепи системы $W_{\text{рц}}(j\omega)$, полученной из передаточной функции $W_{\text{рц}}(p)$ путем замены оператора p на оператор $j\omega$.

В рассматриваемой задаче АФЧХ разомкнутой цепи системы будет иметь вид:

$$\begin{aligned} W_{\text{рц}}(j\omega) &= \frac{K_p(j\omega\tau_2 + 1)}{(1 - T_1^2\omega^2 + 2j\omega\xi T_1)(j\omega T_3 + 1)} = \\ &= \frac{K_p(j\omega\tau_2 + 1)}{[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2] + j\omega[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2)]} = \\ &= \frac{K_p(j\omega\tau_2 + 1)\{[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2] - j\omega[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2)]\}}{[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2]^2 + \omega^2[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2)]^2} = \\ &= \frac{K_p\{[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2 + \omega^2\tau_2[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2)]]\}}{[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2]^2 + \omega^2[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2)]^2} + \end{aligned}$$

$$+ j\omega \frac{K_p \left\{ \tau_2 \left[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2 \right] - \left[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2) \right] \right\}}{\left[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2 \right]^2 + \omega^2 \left[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2) \right]^2}.$$

Таким образом, действительная и мнимая части АФЧХ описываются выражениями:

$$\operatorname{Re}[W_{\text{рль}}(j\omega)] = \frac{K_p \left\{ 1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2 + \omega^2 \tau_2 \left[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2) \right] \right\}}{\left[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2 \right]^2 + \omega^2 \left[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2) \right]^2},$$

$$\operatorname{Im}[W_{\text{рц}}(j\omega)] = \frac{K_p \omega \left\{ \tau_2 \left[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2 \right] - \left[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2) \right] \right\}}{\left[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega^2 \right]^2 + \omega^2 \left[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega^2) \right]^2}.$$

Приравняв выражение для мнимой части АФЧХ нулю, рассчитаем квадрат частоты переворота фазы ω_{π}^2 :

$$\omega_{\pi}^2 = \frac{2\xi T_1 + T_3 - \tau_2}{T_1^2 T_3 - \tau_2 (T_1^2 + 2\xi T_1 T_3)} =$$

$$= \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 0,3 + 0,5 - 0,1}{0,3^2 \cdot 0,5 - 0,1(0,3^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,8)} = 73,333 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)^2.$$

Подставив значение ω_{π}^2 в выражение для действительной части АФЧХ, получим следующее число при $K_p = 50$:

$$\operatorname{Re}[W_{\text{рц}}(j\omega)] =$$

$$= \frac{K_p \left\{ 1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega_{\pi}^2 + \omega_{\pi}^2 \tau_2 \left[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega_{\pi}^2) \right] \right\}}{\left[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega_{\pi}^2 \right]^2 + \omega_{\pi}^2 \left[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega_{\pi}^2) \right]^2} = -2,155.$$

Так как полученное число по модулю больше, чем -1, то САУ неустойчива.

Определим граничный коэффициент передачи для заданной САУ. Для этого приравняем действительную часть АФЧХ значению $\frac{1}{K_p}$. Тогда граничный коэффициент передачи будет рассчитываться по формуле:

$$K_{p,гр} = - \frac{[1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega_\pi^2]^2 + \omega_\pi^2[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega_\pi^2)]^2}{1 - T_1(T_1 + 2\xi T_3)\omega_\pi^2 + \omega_\pi^2\tau_2[2\xi T_1 + T_3(1 - T_1^2\omega_\pi^2)]}.$$

После подстановки в эту формулу заданных значений постоянных времени и квадрата частоты переворота фазы ω_π^2 получим следующую величину граничного коэффициента передачи $K_{p,гр} = 23,2$.

Примечание. Если в структуре САУ не содержится форсирующих звеньев, то при выделении вещественной и мнимой частей АФЧХ операция умножения числителя АФЧХ на комплексное число, сопряженное знаменателю, не является обязательной. Действительно, пусть выражение АФЧХ имеет вид

$$W(j\omega) = \frac{K_p}{(a+b) + j(c+d)},$$

где a, b, c и d – константы, отличные от нуля. Домножим числитель и знаменатель на выражение, сопряженное выражению, расположенному в знаменателе. Тогда получим $W(j\omega) = \frac{K_p[(a+b) - j(c+d)]}{(a+b)^2 + (c+d)^2}$. Так как по критерию устойчивости Найквиста $\text{Im}[W(j\omega)] = -(c+d) = 0$, то ее можно исключить из выражения АФЧХ, то есть

$$\text{Re}[W(j\omega)] = \frac{K_p(a+b)}{(a+b)^2} = \frac{K_p}{a+b}.$$

4.4. Анализ устойчивости САУ по критерию Гурвица и построение ее области устойчивости в плоскости варьируемых параметров x_1 и x_2

Исходным материалом для исследования устойчивости САУ по критерию Гурвица является ее характеристический полином $A(p)$. Система третьего порядка будет устойчивой, если выполняется неравенство

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_3 a_0 > 0, \quad (4.2)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты характеристического полинома.

На границе устойчивости должно выполняться равенство:

$$a_1 a_2 - a_3 a_0 = 0, \quad (4.3)$$

В рассматриваемом случае

$$a_0 = K_p + 1 = 51; \quad a_1 = 2\xi T_1 + T_3 + K_p \tau_2 = 5,98 \text{ с};$$

$$a_2 = T_1(T_1 + 2\xi T_3) = 0,33 \text{ с}^2; \quad a_3 = T_1^2 T_3 = 0,045 \text{ с}^3.$$

Оценим устойчивость САУ по условию (4.2):

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 = 5,98 \cdot 0,33 - 51 \cdot 0,045 = -0,322.$$

Т.к. условие (4.2) (положительность главного минора определителя Гурвица Δ_2) не выполняется, то система неустойчива.

Пусть варьируемыми параметрами являются коэффициент передачи и постоянная времени первого звена САУ, то есть $x_1 = T_1$ и $x_2 = k_1$. Введем третий варьируемый параметр $x_3 = K_p$ и выведем расчетные соотношения для параметров x_1

и x_3 , так как $x_2 = \frac{x_3}{k_2 k_3 k_{oc}}$. В этом случае выражения для коэффициентов характеристического полинома примут вид:

$$a_0(x_3) = x_3 + 1; \quad a_1(x_1, x_3) = 2\xi x_1 + T_3 + x_3 \tau_2;$$

$$a_2(x_1) = x_1(x_1 + 2\xi T_3); \quad a_3(x_1) = x_1^2 T_3.$$

Подставим выражения коэффициентов в условие границы устойчивости (4.3) и разрешим полученное выражение относительно параметра x_3 . Тогда получим:

$$(2\xi x_1 + T_3 + x_3 \tau_2)x_1(x_1 + 2\xi T_3) - x_1^2 T_3(x_3 + 1) = 0;$$

$$x_3(x_1) = \frac{2\xi(x_1^2 + T_3^2 + 2\xi x_1 T_3)}{x_1 T_3 - \tau_2(x_1 + 2\xi T_3)}. \quad (4.4)$$

При подстановке в качестве параметра x_1 значения постоянной времени T_1 в выражение (4.4) рассчитывается граничное значение коэффициента передачи разомкнутой цепи, что является проверкой правильности выполнения п. 3.2.3 задания:

$$K_{p,cp} = x_3(T_1) = \frac{2 \cdot 0,8 \cdot (0,3^2 + 0,5^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,3 \cdot 0,5)}{0,3 \cdot 0,5 - 0,1 \cdot (0,3 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,5)} = 23,2.$$

Путем простого пересчета по формуле $x_2(x_1) = \frac{x_3(x_1)}{k_2 k_3 k_{oc}}$

строится граница устойчивости САУ в области параметров $x_1 = T_{1,гр}$ и $x_2 = k_{1,гр}$. Результаты вычислений по формуле (4.4) приведены в табл. 4.1, а сама граница устойчивости изображена на рис. 4.1. Область устойчивости САУ будет располагаться между кривой $x_2 = f(x_1)$ и осями координат, поскольку именно здесь выполняется условие $k_1 < k_{1,гр}$.

Таблица 4.1

$x_1 = T_{1,гр},$ с	0,225	0,25	0,275	0,3	0,325	0,35	0,375	0,4
$x_2 = k_{1,гр}$	15,38	8,2	5,82	4,64	3,94	3,48	3,157	2,192

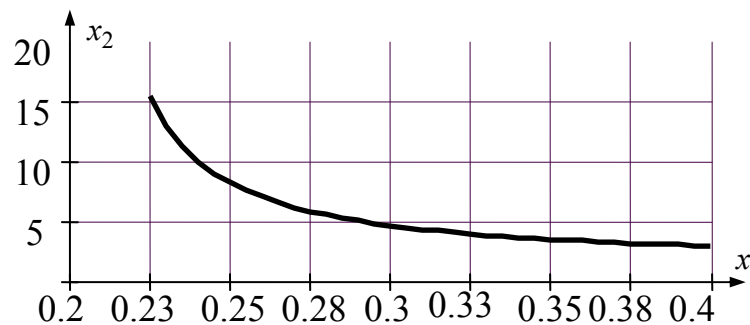


Рис. 4.1. Граница устойчивости САУ

4.5. Построение логарифмических частотных характеристик САУ для заданного запаса устойчивости по амплитуде

Исходя из определения запаса устойчивости по амплитуде ΔG , можно записать следующее уравнение:

$$\Delta G = 20 \lg(K_{p,гр}) - 20 \lg(K_p),$$

где K_p и $K_{p,гр}$ – коэффициент передачи разомкнутой цепи и его граничное значение.

Решая это логарифмическое уравнение, можно рассчитать значение необходимого коэффициента передачи разомкнутой цепи K_p , исходя из известного $K_{p,гр}$ и заданного запаса устойчивости по амплитуде ΔG :

$$K_p = \frac{K_{p,гр}}{10^{\frac{\Delta G}{20}}}. \quad (4.5)$$

В рассматриваемом задании, для $\Delta G = 10$ дБ, в соответствии с формулой (4.5) принимается следующее значение K_p :

$$K_p = \frac{23,2}{10^{\frac{10}{20}}} = \frac{23,2}{\sqrt{10}} = 7,336, \text{ откуда}$$

$$k_1 = \frac{K_p}{k_2 k_3 k_{oc}} = \frac{6,874}{2 \cdot 5 \cdot 0,5} = 1,467.$$

Логарифмические амплитудная $G(\omega)$ и фазовая $\varphi(\omega)$ характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) строятся непосредственно по передаточной функции разомкнутой цепи системы, причем

$$G(\omega) = \sum_{i=1}^m G_i(\omega) = \sum_{i=1}^m 20 \lg[|W_i(j\omega)|], \quad (4.6)$$

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^m \varphi_i(\omega) = \sum_{i=1}^m \arg[W_i(j\omega)], \quad (4.7)$$

где $G_i(\omega)$ и $\varphi_i(\omega)$ – ЛАЧХ и ЛФЧХ i -го звена САУ с частотной характеристикой $W_i(j\omega)$; m – количество звеньев; \arg – функция аргумента (для типовых звеньев может быть рассчитана через вещественную $P_i(\omega)$ и мнимую $Q_i(\omega)$ частотные характеристики по формуле:

$$\arg[W_i(j\omega)] = \operatorname{arctg} \frac{Q_i(\omega)}{P_i(\omega)}.$$

При построении асимптотической ПАЧХ следует руководствоваться следующим алгоритмом:

- рассчитывается коэффициент передачи на частоте $\omega = 1$ по выражению $G_0 = 20 \lg(K_p)$;

- рассчитываются частоты сопряжения ЛАЧХ звеньев $\omega_i = \lg\left(\frac{1}{T_i}\right)$, где T_i – постоянная времени i -го звена;

- асимптотическая ЛАЧХ САУ строится по асимптотическим ЛАЧХ ее звеньев, причем следует помнить, что ЛАЧХ пропорционального звена имеет нулевой наклон во всем диапазоне частот, ЛАЧХ интегрирующего звена - наклон -20 дБ/дек во всем диапазоне частот, ЛАЧХ инерционного звена - нулевой наклон до частоты сопряжения и наклон -20 дБ/дек после этой частоты, ЛАЧХ форсирующего звена - нулевой наклон до частоты сопряжения и наклон +20 дБ/дек после этой частоты, ЛАЧХ колебательного звена - нулевой наклон до частоты сопряжения и наклон -40 дБ/дек после этой частоты.

Ниже приведены расчетные соотношения для ЛФЧХ некоторых типовых звеньев:

$\varphi(\omega) = 0$ – для пропорционального звена;

$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$ – для интегрирующего звена;

$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega T)$ – для инерционного звена;

$\varphi(\omega) = \arctg(\omega\tau)$ – для форсирующего звена;

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -\arctg\left(\frac{2\xi\omega T}{1-\omega^2 T^2}\right) & \text{при } \omega \leq \frac{1}{T}, \\ -\arctg\left(\frac{2\xi\omega T}{1-\omega^2 T^2}\right) - \pi & \text{при } \omega > \frac{1}{T} \end{cases} \quad - \text{ для}$$

колебательного звена.

Проиллюстрируем действие описанного алгоритма для рассматриваемого задания. Рассчитаем значение коэффициента передачи на нулевой частоте

$$G_0 = 20 \lg(K_p) = 20 \lg(7,336) \approx 17,3 \text{ дБ.}$$

Рассчитаем частоты сопряжения:

$$\omega_1 = \lg\left(\frac{1}{T_1}\right) = 0,523 \approx 0,5 \text{ дек} - \text{ для колебательного звена;}$$

$$\omega_2 = \lg\left(\frac{1}{\tau_2}\right) = 1 \text{ дек} - \text{ для форсирующего звена;}$$

$$\omega_3 = \lg\left(\frac{1}{T_3}\right) = 0,301 \approx 0,3 \text{ дек} - \text{ для инерционного звена.}$$

Для заданного варианта расчетная формула для ЛФЧХ будет иметь вид:

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -\arctg\left(\frac{2\xi\omega T_1}{1-\omega^2 T_1^2}\right) + \arctg(\omega\tau_2) - \arctg(\omega T_3) & \text{при } \omega \leq \frac{1}{T_1}, \\ -\arctg\left(\frac{2\xi\omega T_1}{1-\omega^2 T_1^2}\right) - \pi + \arctg(\omega\tau_2) - \\ -\arctg(\omega T_3) & \text{при } \omega > \frac{1}{T_1}. \end{cases}$$

На рис. 4.2а построена асимптотическая ЛАЧХ для заданной САУ. Она имеет нулевой наклон до частоты сопряжения

ω_3 , соответствующей инерционному звену. Инерционное звено «включается» и ЛАЧХ приобретает наклон -20 дБ/дек. Этот наклон сохраняется до частоты сопряжения ω_1 . Далее «срабатывает» колебательное звено, и суммарный наклон ЛАЧХ становится равным -60 дБ/дек, который сохраняется до частоты сопряжения ω_2 , соответствующей форсирующему звену. Оно снижает наклон ЛАЧХ до -40 дБ/дек и этот наклон остается неизменным при дальнейшем увеличении частоты. Частота $\omega_{ср}$, при которой ЛАЧХ пересекает ось $\lg(\omega)$ (т.е. коэффициент передачи САУ становится равным единице), называется частотой среза и характеризует запас устойчивости САУ по фазе $\Delta\varphi$.

На рис. 4.2б показана ЛФЧХ САУ, рассчитанная по приведенному выше выражению. Легко видеть, что начальный фазовый сдвиг составляет около -50° . Это обусловлено одновременным «действием» колебательного и инерционного звеньев. Затем фаза возрастает (по абсолютной величине) и на частоте переворота фазы ω_π , определяющей запас устойчивости САУ по амплитуде, становится равной -180° . После «включения» форсирующего звена фаза начинает уменьшаться (по абсолютной величине) и асимптотически стремится к значению -180° . Отрезок $\Delta\varphi \approx 16^\circ$, образованный ЛФЧХ и линией, соответствующей -180° , на частоте среза является запасом устойчивости САУ по фазе.

4.6. Расчет статических характеристик САУ

Регулировочная и внешняя статические характеристики САУ получается из передаточных функций путем замены в них оператора p на нуль. Таким образом, их уравнения будут иметь вид:

$$y(g) \Big|_{f=0} = g \cdot W_{zg}(0) = g \cdot \frac{k_1 k_2 k_3}{1 + K_p} = g \cdot \frac{K_p / k_{ос}}{1 + K_p} \quad \text{— для регулировочной характеристики;}$$

$$y(f) \Big|_{g=\text{const}} = g \cdot W_{zg}(0) - f \cdot W_{zf}(0) =$$

$$= g_m \cdot \frac{K_p/k_{oc}}{1+K_p} - f \cdot \frac{k_3 k_4}{1+K_p} \quad \text{— для внешней ха-}$$

рактеристики.

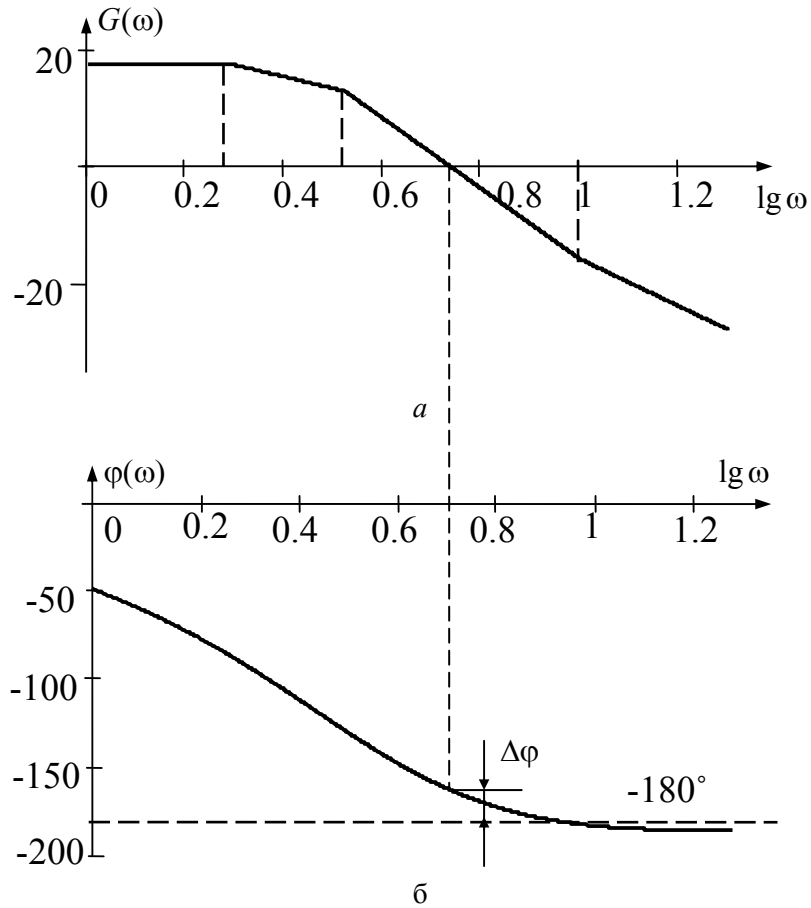


Рис. 4.2. Логарифмические частотные характеристики САУ

На рис. 4.3 приведены графики регулировочной (рис. 4.3а) и внешней (рис. 4.3б) статических характеристик САУ, построенных по приведенным выше соотношениям при изменении задающего воздействия g от нуля до 7 и возмущающего воздействия от 0 до 5,5.

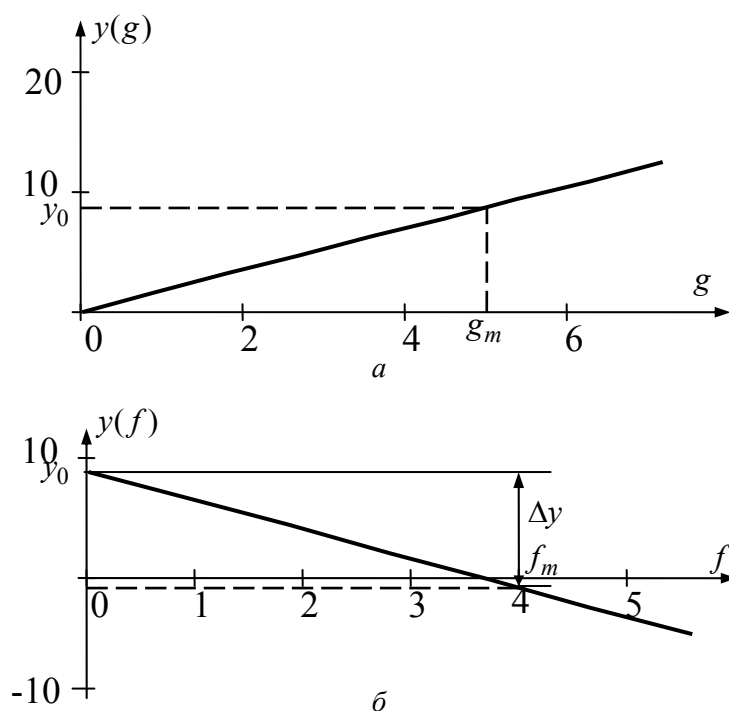


Рис. 4.3. Регулировочная (а) и внешняя (б) статические характеристики САУ

Значение выходной величины при $f = 0$ и $g = g_m$

$$y_0 = g_m \cdot \frac{K_p/k_{oc}}{1 + K_p} = 8,8, \text{ величина отклонения выходной вели-}$$

$$\text{чины под действием возмущения } f_m \quad \Delta y = f_m \frac{k_3 k_4}{1 + K_p} \approx 9,6, \text{ то-}$$

гда статизм внешних статических характеристик

$$S = \frac{\Delta y}{y_0} \cdot 100 \approx 109 \%$$

Низка статическая точность САУ обусловлена малым значением ее коэффициента передачи K_p .

5. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

5.1. Общая характеристика лабораторного цикла

В соответствии с программой обучения по курсу «Теория автоматического управления» для студентов заочной формы обучения лабораторный цикл предусматривает выполнение двух лабораторных работ.

Целью лабораторного цикла является углубление знаний по различным разделам курса ТАУ, овладение практическими навыками исследования, обработки полученных результатов и формулирование выводов по результатам исследования.

Первая лабораторная работа посвящена исследованию характеристик типовых звеньев САУ, вторая – исследованию характеристик статических и астатических САУ.

Инструментальным средством для выполнения лабораторных работ является комплекс программ (пакет) **ASIMEC**.

5.2. Краткое описание системы моделирования электронных схем ASIMEC

5.2.1. Назначение и состав системы ASIMEC

Программный пакет **ASIMEC** представляет собой систему автоматизированного моделирования электронных схем во временной и частотной областях.

Основное окно системы **ASIMEC** показано на рис. 5.1. Оно содержит наборное поле, на котором изображается схема моделируемого устройства, главное меню, которое позволяет организовывать, считывать и запоминать файлы, панель управления

моделированием, панель управления параметрами среды, «ящики» с компонентами электронных схем и инспектор объектов. Краткие подсказки по элементам управления можно получить во всплывающих окнах, если на некоторое время поместить на них курсор мыши.

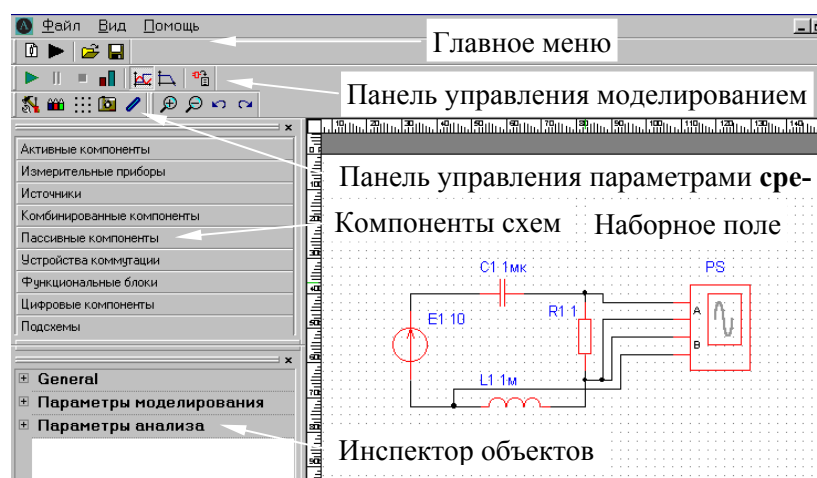


Рис. 5.1. Основное окно ASIMEC

На рис. 5.2 показана панель управления процессом моделирования. Сначала, путем нажатия соответствующей кнопки, выбирается вариант анализа (временной или частотный) и далее нажимается кнопка запуска моделирования. Процесс моделирования можно остановить (приостановить) путем нажатия соответствующей кнопки. При нажатии кнопки **Показать инструмент** появляется экран осциллографа и плоттера Бode (см. ниже). Задание параметров моделирования (метода интегрирования системы дифференциальных уравнений, шага интегрирования и т.д.) задается путем нажатия кнопки **Свойства схемы**



В **Инспекторе объектов** отражаются параметры элементов моделей, параметры моделирования, анализа и т.д.

Более подробно с основными правилами моделирования, изображения схем, проведения измерений можно ознакомиться в п. главного меню **Помощь**.

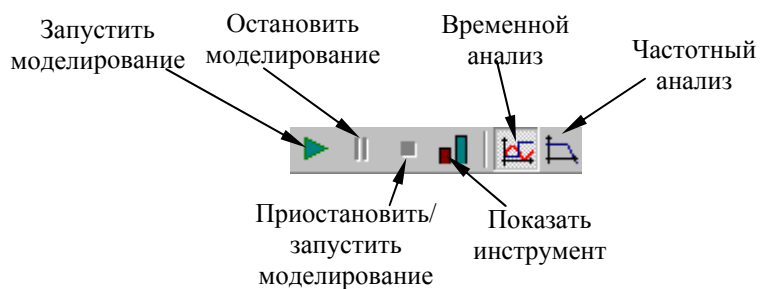


Рис. 5.2. Панель управления процессом моделирования в ASIMEC

5.2.2. Проведение измерений при временном анализе

Основным прибором, позволяющим проводить измерения во временной области, является осциллограф, условное графическое изображение которого показано на рис. 5.3. Он имеет два канала А и В, заземленных одним из своих зажимов и подключаемых к источникам сигналов.

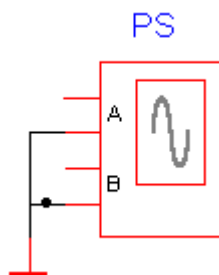








Рис. 5.3. Осциллограф

Перед проведением временного анализа нужно нажать кнопку **Свойства схемы**  и установить параметры **Мас-**

штаб времени (Time ratio в General) и t_{stop} (конечное время расчета в секундах). Поскольку моделирование проводится в реальном времени, масштаб времени (Time ratio) 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** (пользоваться не рекомендуется). 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, активируемых нажатием кнопки . При этом возникают две пары горизонтальных маркеров, служащих для измерения двух уровней каждого из сигналов (по каналам А и В) и пара вертикальных 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 монито-

ра, 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. 5.4 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.

На рис. 5.5 показан процесс измерения времени переходного процесса при его колебательном характере и установившемся значении $U_{уст} = 5$ В. Здесь с помощью горизонтальных маркеров выделена зона ± 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 ± 5 % от установившегося значения). В соответствии с этим время переходного процесса, считанное в окне X2 – X1 равно 652 миллисекунды или 0,652 с.

Для измерения установившегося значения измеряемой величины может быть применен вольтметр, проградуированный по среднему значению.

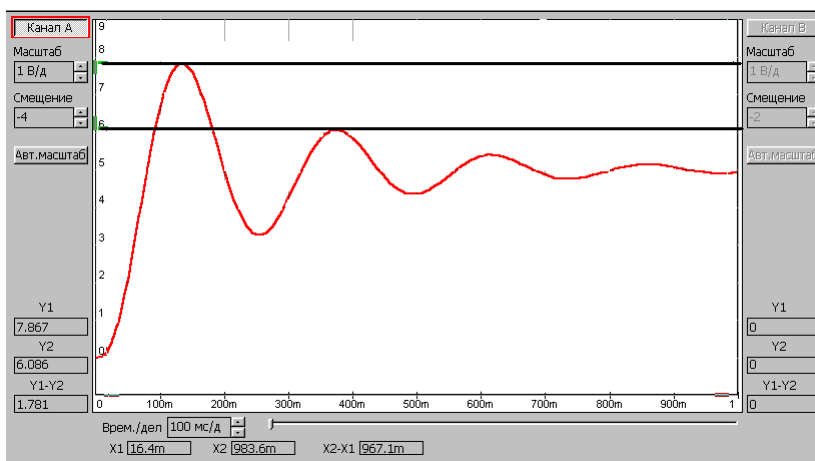


Рис. 5.4. Измерения с помощью горизонтальных маркеров

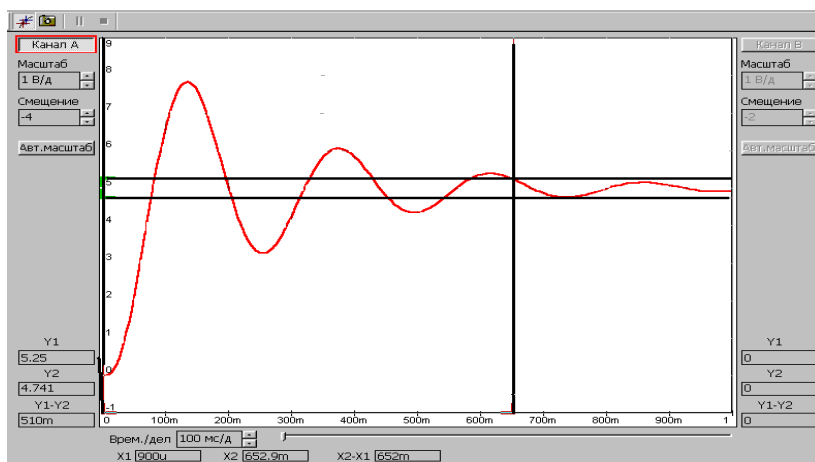


Рис. 5.5. Измерения с помощью вертикальных маркеров

5.2.3. 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. 5.6. Клеммы T_0 объединяются и подключаются к общей шине (заземлению), входная клемма (IN) подключается ко входу исследуемого объекта, а выходная клемма (OUT) – к его выходу.

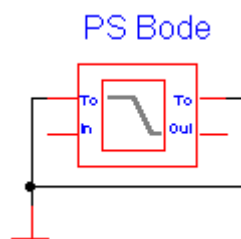















Рис. 5.6. Плоттер Боде

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 $t_{stop} = 1000$ (конечная 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 лупы),  (перемещение),  (включение маркеров),  (копирование диаграмм Боде в виде растрового рисунка, например, в текстовый файл). Нажатие или отключение кнопок  и  приводит к воспроизведению диаграмм в виде точек или линий. При нажатии кнопок  и  включается логарифмическая

шкала по оси частот и амплитуд. Кнопка  позволяет получить дискретный спектр для периодического сигнала.

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. 5.7 показан процесс измерения частот среза, переворота фазы и запасов устойчивости. При совмещении маркера на ЛАЧХ (верхний график на рис. 5.7а 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. 5.7,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. 5.7б) и измеряется частота переворота фазы $f_{\pi} = 5,526$ (левая цифра на нижнем графике рис. 5.7б, 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. 5.7б), тогда запас устойчивости по амплитуде $\Delta G = |G(\omega_{\pi})| = 6,82$ дБ.

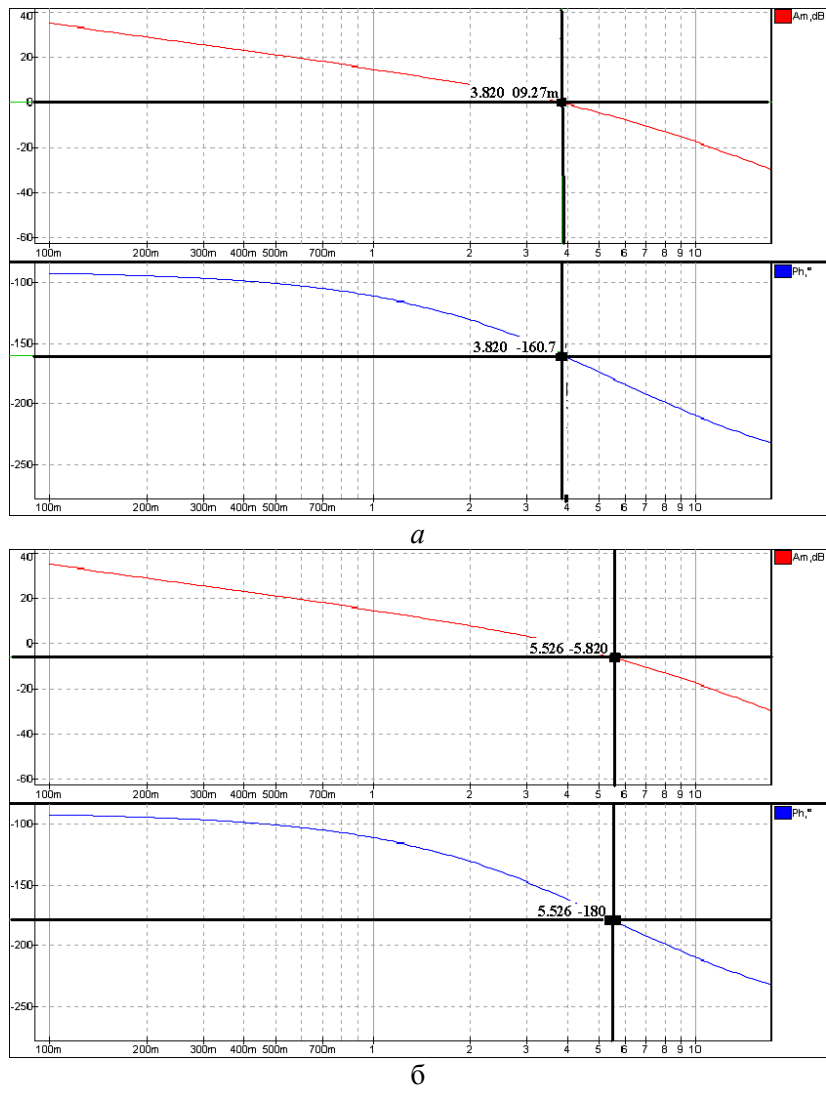


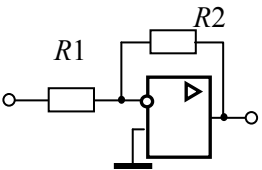
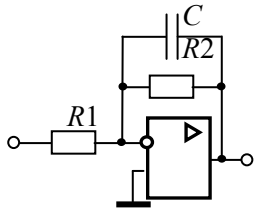
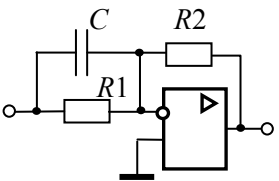
Рис. 5.7. Измерение частоты среза, фазы на частоте среза (а), частоты переворота фазы и фазы на этой частоте (б)

5.3. 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. 5.1 приведены схемы моделей различных звеньев первого порядка и соотношения для определения их параметров.

Таблица 5.1

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 ($\tau > T$)		$W(p) = \frac{-k(\tau p + 1)}{Tp + 1};$ $k = \frac{R_3}{R_1}, T = R_2 C,$ $\tau = (R_2 + R_3)C.$
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		$W(p) = -k \frac{\tau p + 1}{p};$ $\tau = R_2 C,$ $k = \frac{1}{R_1 C}.$

5.4. 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. 5.1).

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 содержать чётное количество усилителей, то есть при проведении

экспериментальных исследований с моделями, приведенными в табл. 5.1, необходимо последовательно включать еще одну схему пропорционального звена с единичным коэффициентом передачи (инвертор напряжения).

На рис. 5.8 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 установившееся значение выходного напряжения $U_{\text{вых}} = 1$ В.

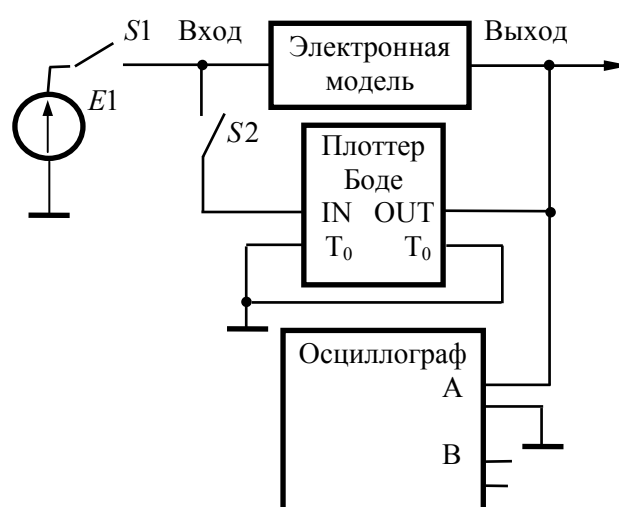


Рис. 5.8

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 $S2$ – замыкается. Ключи $S1$, $S2$ по умолчанию имеют сопротивление 1 Ом замкнутым состоянием 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 (это осуществляется двойным щелчком клавиши мыши по изображению элемента и введением соответствующего значения в омах). Кроме этого, здесь же нужно назначить клавишу (Key), 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 5.2.2 и 5.2.3 настоящего пособия.

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

Программа работы

5.4.1. Исследование инерционного звена

5.4.1.1. Собрать схему модели аperiodического (инерционного) звена (рис. 5.9), 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. 5.2 для индивидуального варианта.

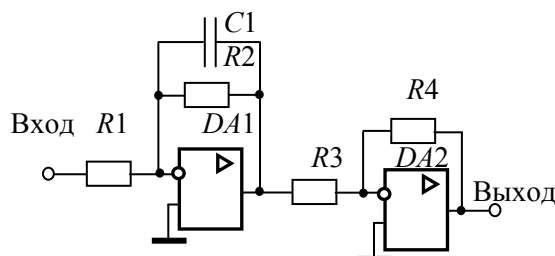


Рис. 5.9

Таблица 5.2

Вариант	k	T , мс	Вариант	k	T , мс	Вариант	k	T , мс
1	2	10	9	5	50	17	3	130
2	3	15	10	4	60	18	2	140
3	4	20	11	3	70	19	2	150
4	5	25	12	2	80	20	3	160
5	4	30	13	4	90	21	4	170
6	3	35	14	5	100	22	5	180
7	2	40	15	5	110	23	5	190
8	4	45	16	4	120	24	4	200

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

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

5.4.1.4. Увеличить значения постоянной времени T звена в два, три, и четыре раза и повторить выполнение заданий по п.п. 5.4.1.2 и 5.4.1.3.

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

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

5.4.2. Исследование инерционного форсирующего звена

5.4.2.1. Собрать схему электронной модели инерционного форсирующего звена (рис. 5.10). Принять $R_4 = R_5 = 100$ кОм, $C_1 = 1$ мкФ. Для заданного варианта из табл. 5.2 выбрать значение постоянной времени T , принять постоянную времени $\tau = 0,1 T$ 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 источника питания электронной модели принять равным 0.5 В.

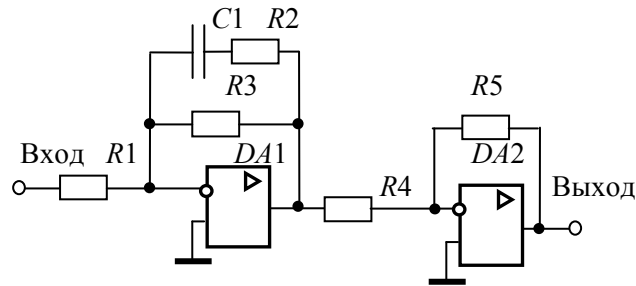


Рис. 5.10

5.4.2.2. 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 $\lambda = \frac{U_0}{U_\infty} \cdot 100\%$.

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

5.4.2.4. Установить соотношения значений постоянных времени $\tau = 0,2T$, $\tau = 0,3T$, $\tau = 0,4T$ и повторить выполнение заданий п.п. 5.4.2.2 и 5.4.2.3, пересчитав параметры модели в соответствии с п. 5.4.2.1.

5.4.2.5. 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. 5.4.1.5.

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

5.4.3. Исследование звеньев второго порядка

5.4.3.1. Собрать схему модели звена второго порядка в соответствии с рис. 5.11. 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. 5.2 согласно индивидуальному варианту, рассчитать значения остальных параметров модели по формулам:

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

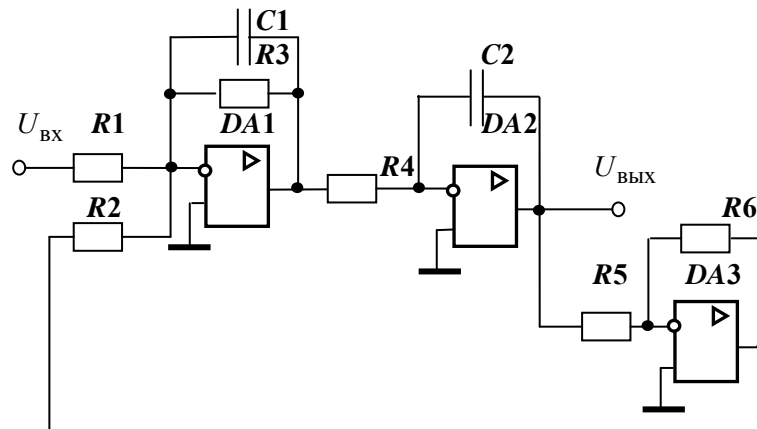


Рис. 5.11

5.4.3.2. Установить напряжение питания модели, равное $U = \frac{1}{k}$, снять переходную характеристику и определить время переходного процесса $t_{\text{пп}}$, фиксируя при этом осциллографом максимальное U_{max} значение выходного напряжения.

5.4.3.3. Рассчитать перерегулирование

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

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

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

5.4.3.5. Установить значения $\xi = 0,5$, $\xi = 0,3$, $\xi = 0,1$, а также $\xi = 1$, $\xi = 2$, $\xi = 3$ и повторить выполнение п.п. 5.4.3.2 – 5.4.3.4.

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

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

5.5.4. Контрольные вопросы

- Как количественно величина постоянной времени связана с временем переходного процесса в инерционном звене?
- Как изменятся характеристики инерционного форсирующего звена при $\tau > T$ и его реализация на электронной модели?
- В каком случае колебательное звено становится консервативным и как при этом изменятся его характеристики?
- Как нужно изменить схему, приведенную на рис. 5.11, чтобы получить электронную модель консервативного звена?
- Чему равен запас устойчивости по амплитуде в звеньях второго порядка?
- Чем объяснить наличие точки перегиба на переходной характеристике апериодического звена второго порядка?

5.5. 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 5.12а приведена структурная схема подлежащей исследованию статической САУ, а на рис. 5.12б – схема ее электронной модели.

В схеме модели (рис. 5.12б) 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

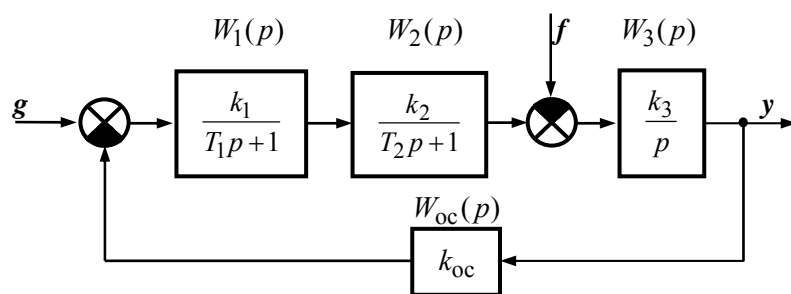
$$k_1 = k_{11} \cdot k_{12} = \frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{R_5}{R_4}. \text{ За счет этого при изменении коэффициента}$$

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.

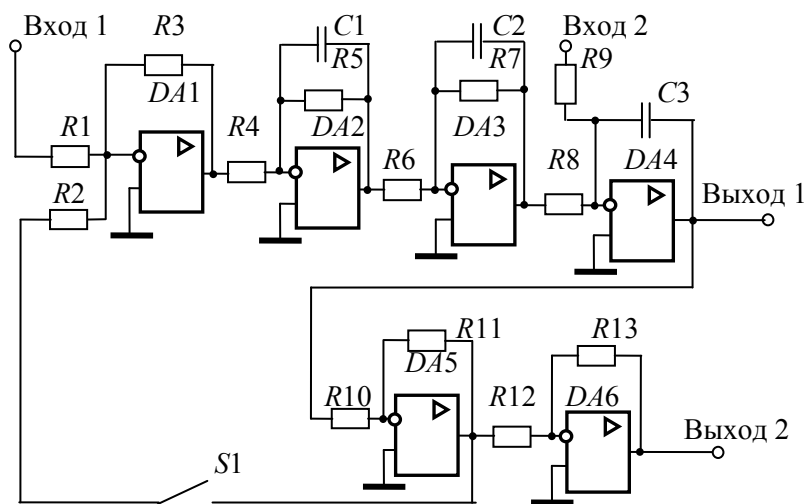
Исследования статической и астатической САУ проводятся при условии постоянства коэффициента передачи по возмущающему воздействию k_3 . При этом второе инерционное и интегрирующее звенья в астатической САУ меняются местами, т.е. резистор R_7 включается в цепь обратной связи усилителя DA4.

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



б

Рис. 5.12. Структурная схема (а) и схема электронной модели статической САУ

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

- для статической САУ

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

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

- для астатической САУ:

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

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. 5.13, приведена схема 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 0,1 до 0,4 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. 5.12б).

Сопроотивления ключей $S1$ – $S4$ устанавливаются равными 1 ГОм. Для измерения среднего значения установившегося напряжения к выходу 1 подключен вольтметр $PV1$.

Измерение запаса устойчивости по амплитуде и фазе описано в разделе 5.2.3. Частотные характеристики снимаются **только для статической САУ**.

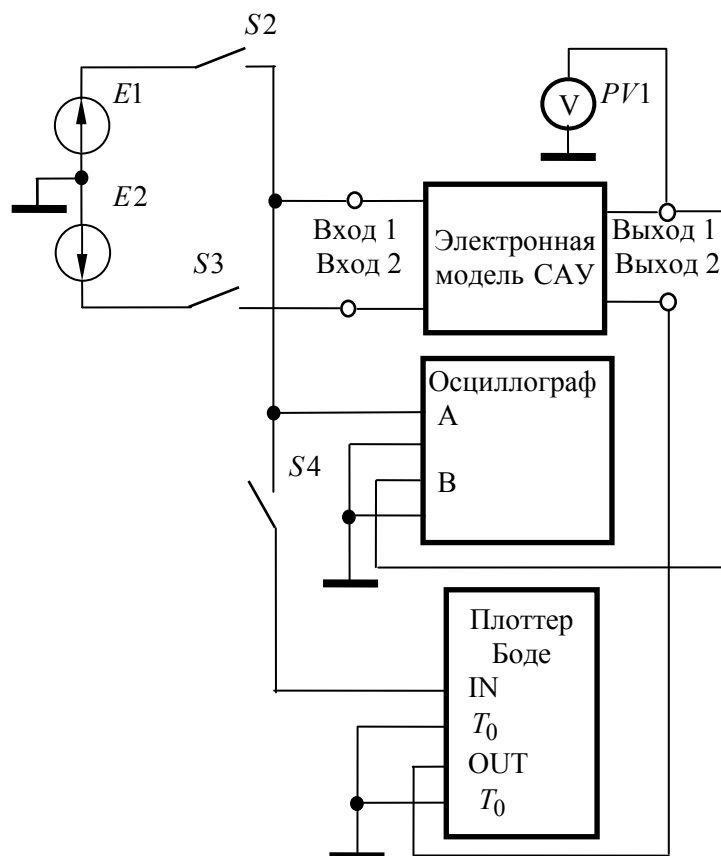


Рис. 5.13. Схема лабораторной установки для исследования статической и астатической САУ

Программа работы

5.5.1. Исследование статической САУ

5.5.1.1. В соответствии с вариантом исходных данных (см. табл. 5.3) по формуле (5.1) рассчитать граничное значение коэффициента передачи САУ и параметры элементов электронной модели.

Таблица 5.3

Вариант	T_1 , мс	T_2 , мс	k_{12}	k_2	k_{oc}	k_3, c^{-1}
1	5	10	4	5	5	30
2	10	20	5	2	0,5	20
3	20	20	5	3	0,5	35
4	30	10	2	2	0,8	30
5	40	5	2	3	0,6	20
6	50	20	1	2	0,5	25
7	15	10	3	2	0,5	10
8	30	5	1	10	0,6	25
9	4	8	10	10	0,5	50
10	60	20	1	4	0,7	40
11	50	30	2	3	1	30
12	70	10	5	5	0,5	25
13	80	20	4	3	0,6	20
14	90	30	3	2	0,6	35
15	100	20	2	1	0,5	30
16	90	10	2	2	0,7	40
17	80	50	3	4	1	25
18	70	20	4	4	0,5	30
19	50	5	5	4	0,6	25
20	40	20	5	4	0,7	20
21	30	30	1	5	0,8	30
22	20	40	2	4	1	40
23	10	50	3	3	0,5	45
24	5	5	2	2	0,8	50

5.5.1.2. Установить значение резистора

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

замкнув ключ S_2 при разомкнутом ключе S_3 , пронаблюдать переходную характеристику САУ. Она должна иметь вид либо незатухающих, либо медленно затухающих (медленно возрас-

тающих) гармонических колебаний. Если этого не происходит, то необходимо заново рассчитать параметры модели.

5.5.1.3. 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 $t_{пп,з}$. При этом убедиться, что вольтметр $PV1$ показывает установившееся значение выходного напряжения $U_{уст0} = 1$ В (при $E_2 = 0$). Рассчитать перерегулирование

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

5.5.1.4. Установить напряжение источника E_2 , равное 0,1 В. Замкнуть ключ $S3$ при замкнутом ключе $S2$, дождаться завершения переходного процесса и снять переходную характеристику САУ по возмущающему воздействию. При этом вольтметром $PV1$ измерить установившееся $U_{уст,1}$, а осциллографом – минимальное $U_{мин,в}$ значения выходного напряжения. Рассчитать величины $0,95 \cdot U_{уст,1}$, $1,05 \cdot U_{уст,1}$ и измерить время переходного процесса $t_{пп,в}$. Рассчитать перерегулирование

$$\delta_в = \frac{U_{уст,1} - U_{мин,в}}{U_{уст,1}} \cdot 100 \% \text{ при подаче на вход САУ возмуща-$$

ющего 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 $U_{уст,1}$, то принять $t_{пп,в} = 0$.

5.5.1.5. Установить $E_2 = 0,2$ В, замкнуть переключатели $S2$ и $S3$, включить установку и измерить вольтметром $PV1$ установившееся значение выходного напряжения $U_{уст2}$. Экс-

перимент повторить при $E_2 = 0.3$ В и $E_2 = 0.4$ В с получением напряжений $U_{уст3}$ и $U_{уст4}$.

5.5.1.6. Разомкнуть ключи $S1$ (см. рис. 5.12, б), $S2$, $S3$ (см. рис. 5.13), замкнуть ключ $S4$, включить клавишу «Частотный анализ» и с помощью плоттера измерить запасы устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ и амплитуде ΔG .

5.5.1.7. Установить R_3 , обеспечивающее $K = 0,3K_{кр}$, $K = 0,5K_{кр}$, $K = 0,8K_{гр}$ и повторить выполнение заданий п.п. 5.5.1.3 – 5.5.1.6.

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

(они должны получиться линейными и их должно быть **четыре**), а также зависимостей $t_{пп,з} = f(K)$, $\delta_3 = f(K)$, $t_{пп,в} = f(K)$, $\delta_в = f(K)$, $\Delta G = f(K)$ и $\Delta\varphi = f(K)$. Рассчитать статизм внешних характеристик САУ по формуле $S = \frac{U_{уст1} - U_{уст2}}{U_{уст1}} \cdot 100\%$, где $U_{уст1}$ и $U_{уст2}$ – установившиеся

значения выходного напряжения САУ при $E_2 = 0,1$ В и $E_2 = 0,2$ В соответственно, и построить график зависимости $S = f(K)$.

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

5.5.2. Исследование астатической САУ

5.5.2.1. Собрать схему астатической САУ, перенеся резистор $R7$ 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.

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

5.5.2.3. 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.

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

5.5.2.3.

5.5.2.5. 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.

5.5.2.6. Оценить влияние астатизма на статические и динамические характеристики САУ по отношению к статической САУ.

5.5.3. Контрольные вопросы

- Возможно ли получение в статической САУ нулевой статической ошибки?
- Как связать частоту собственных колебаний переходной характеристики для САУ, работающей на

границе устойчивости с корнями характеристического уравнения?

- Почему внешние статические характеристики статической САУ исходят из одной точки? Для любой статической системы это свойство будет иметь место?
- При каком коэффициенте передачи K переходная характеристика статической САУ при подаче задающего воздействия будет апериодической?
- Почему в астатической САУ величина статической ошибки равна нулю (ответ обосновать математически)?
- Почему в астатической САУ перерегулирование при подаче возмущающего воздействия больше, чем в статической (ответ обосновать математически)?

**ПРИЛОЖЕНИЕ. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ
КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

Вар.	Перед. функции и воздействия	Параметры звеньев	Варьир. парам.	
			x_1	x_2
1	2	3	4	5
1	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 8, f_m = 2$	$k_1 = 4, k_2 = 3,$ $k_3 = 5, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,8 \text{ с},$ $T_2 = 0,1 \text{ с},$ $T_3 = 0,03 \text{ с}$	T_1	k_1
2	$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 5, f_m = 3$	$k_1 = 5, k_2 = 2,$ $k_3 = 5, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,8,$ $T_1 = 0,6 \text{ с},$ $T_2 = 0,2 \text{ с},$ $T_3 = 0,03 \text{ с},$ $\tau_1 = 0,005 \text{ с}$	T_2	k_2

3	$W_1(p) = k_1(\tau_1 p + 1)$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 10, f_m = 2$	$k_1 = 3, k_2 = 3,$ $k_3 = 5, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_2 = 0,7 \text{ с},$ $T_3 = 0,1 \text{ с},$ $\xi = 0,5$ $\tau_1 = 0,05 \text{ с}$	τ_1	k_1
1	2	3	4	5
4	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, W_2(p) = \frac{k_2}{p},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 10, f_m = 10$	$k_1 = 2,$ $k_2 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 2, k_4 = 5,$ $k_{oc} = 0,6,$ $T_1 = 0,2 \text{ с},$ $T_3 = 0,01 \text{ с}$	T_1	k_2
5	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3(\tau_3 p + 1)}{p},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 10, f_m = 4$	$k_1 = 3, k_2 = 5,$ $k_3 = 8 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 1,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,4 \text{ с},$ $T_2 = 0,08 \text{ с},$ $\tau_3 = 0,04 \text{ с}$	T_2	k_2
6	$W_1(p) = k_1, W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 4, f_m = 3$	$k_1 = 2, k_2 = 5,$ $k_3 = 4, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 1,$ $T_2 = 0,8 \text{ с},$ $T_3 = 0,05 \text{ с},$ $\xi = 0,8$	ξ	T_3

7	$W_1(p) = \frac{k_1}{p}, W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 15, f_m = 5$	$k_1 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_2 = 3,$ $k_3 = 2, k_4 = 5,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_3 = 0,05 \text{ с},$ $\xi = 0,9$	T_3	k_3
1	2	3	4	5
8	$W_1(p) = k_1,$ $W_2(p) = \frac{k_2(\tau_2 p + 1)}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1}$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, f_m = 2$	$k_1 = 3, k_2 = 2,$ $k_3 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_3 = 0,1 \text{ с},$ $\xi = 0,8,$ $\tau_3 = 0,15 \text{ с}$	T_3	k_3
9	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 20, f_m = 3$	$k_1 = 2, k_2 = 3,$ $k_3 = 8 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 4,$ $k_{oc} = 0,8,$ $T_1 = 0,5 \text{ с},$ $T_3 = 0,01 \text{ с}$	T_{oc}	k_1

10	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc}(\tau_{oc} p + 1)$ $g_m = 15, f_m = 5$	$k_1 = 2, k_2 = 2,$ $k_3 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 0,7,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,3 \text{ с},$ $T_2 = 0,05 \text{ с},$ $\tau_{oc} = 0,03 \text{ с}$	T_1	k_1
11	$W_1(p) = k_1,$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 10, f_m = 1$	$k_1 = 5, k_2 = 2,$ $k_3 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,2,$ $T_3 = 0,08 \text{ с},$ $\xi = 0,7$	T_2	k_2
1	2	3	4	5
12	$W_1(p) = \frac{k_1}{p},$ $W_2(p) = k_2(\tau_2 p + 1),$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, f_m = 20$	$k_1 = 3, k_2 = 2,$ $k_3 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 10,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_3 = 0,3 \text{ с},$ $\xi = 0,5,$ $\tau_2 = 0,1 \text{ с}$	τ_2	k_2
13	$W_1(p) = k_1, W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 4, f_m = 3$	$k_1 = 4, k_2 = 5,$ $k_3 = 4, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,6,$ $T_3 = 0,5 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,01 \text{ с},$ $\xi = 0,6$	ξ	k_3

14	$W_1(p) = k_1,$ $W_2(p) = \frac{k_2(\tau_2 p + 1)}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 10, f_m = 5$	$k_1 = 10, k_2 = 2,$ $k_3 = 5, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_2 = 0,15 \text{ с},$ $T_3 = 0,8 \text{ с},$ $\xi = 0,5$ $\tau_2 = 0,1 \text{ с}$	τ_2	k_2
15	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 8, f_m = 2$	$k_1 = 3, k_2 = 3,$ $k_3 = 5, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 1,$ $T_1 = 0,4 \text{ с},$ $T_2 = 0,1 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,01 \text{ с}$	T_2	k_2
1	2	3	4	5
16	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3(\tau_3 p + 1)}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 5, f_m = 3$	$k_1 = 5, k_2 = 2,$ $k_3 = 5, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,8,$ $T_1 = 0,4 \text{ с},$ $T_2 = 0,5 \text{ с},$ $T_3 = 0,02 \text{ с},$ $\tau_2 = 0,008 \text{ с}$	τ_2	k_2

17	$W_1(p) = \frac{k_1}{p}, W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 20, f_m = 3$	$k_1 = 5,$ $k_2 = 2 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 10, k_4 = 4,$ $k_{oc} = 1,$ $T_1 = 0,1 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,02 \text{ с}$	T_2	k_2
18	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, W_2(p) = \frac{k_2}{p},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc}(\tau_{oc} p + 1),$ $g_m = 20, f_m = 30$	$k_1 = 5,$ $k_2 = 4 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 10, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,2 \text{ с},$ $T_2 = 0,05 \text{ с},$ $\tau_{oc} = 0,04 \text{ с}$	T_1	k_1
19	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 10, f_m = 3$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,05 \text{ с},$ $\xi = 0,5$	T_1	k_1
1	2	3	4	5
20	$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{p}, W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, f_m = 20$	$k_1 = 3, k_2 = 2,$ $k_3 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 10,$ $k_{oc} = 1,$ $T_3 = 0,1 \text{ с},$ $\xi = 0,8,$ $\tau_1 = 0,15 \text{ с}$	T_3	k_3

21	$W_1(p) = k_1,$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 10, f_m = 2$	$k_1 = 2, k_2 = 5,$ $k_3 = 4, k_4 = 4,$ $k_{oc} = 0.5,$ $T_2 = 0,025 \text{ с},$ $T_3 = 0,7 \text{ с},$ $\xi = 0,7$	T_3	k_3
22	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2(\tau_2 p + 1)}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 10, f_m = 5$	$k_1 = 5, k_2 = 2,$ $k_3 = 5, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,8 \text{ с},$ $T_2 = 0,1 \text{ с},$ $\xi = 0,7$ $\tau_2 = 0,05 \text{ с}$	T_1	k_1
23	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 10, f_m = 3$	$k_1 = 3, k_2 = 5,$ $k_3 = 5, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,7,$ $T_1 = 0,8 \text{ с},$ $T_3 = 0,3 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,02 \text{ с}$	T_3	k_3
1	2	3	4	5

24	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc}(\tau_{oc} p + 1),$ $g_m = 5, f_m = 3$	$k_1 = 5, k_2 = 2,$ $k_3 = 5, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,8,$ $T_1 = 0,8 \text{ с},$ $T_2 = 0,2 \text{ с},$ $T_3 = 0,03 \text{ с},$ $\tau_{oc} = 0,005 \text{ с}$	T_2	k_2
25	$W_1(p) = k_1, W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 20, f_m = 3$	$k_1 = 5,$ $k_2 = 2,$ $k_3 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 4,$ $k_{oc} = 0,6,$ $T_2 = 0,3 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,03 \text{ с}$	T_{oc}	k_1
26	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2(\tau_2 p + 1)}{p},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 10, f_m = 5$	$k_1 = 5,$ $k_2 = 4 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 5, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,3 \text{ с},$ $T_2 = 0,08 \text{ с},$ $\tau_2 = 0,03 \text{ с}$	T_1	k_2
27	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 12, f_m = 5$	$k_1 = 5, k_2 = 2,$ $k_3 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,6,$ $T_1 = 0,1 \text{ с},$ $\xi = 0,7$	T_1	k_1
1	2	3	4	5

28	$W_1(p) = \frac{k_1}{p},$ $W_2(p) = k_2(\tau_2 p + 1),$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 21, f_m = 10$	$k_1 = 3, k_2 = 2,$ $k_3 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,7,$ $T_3 = 0,15 \text{ с},$ $\xi = 0,3,$ $\tau_2 = 0,12 \text{ с}$	ξ	k_3
29	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 15, f_m = 5$	$k_1 = 2, k_2 = 4,$ $k_3 = 3, k_4 = 4,$ $k_{oc} = 1,$ $T_1 = 0,1 \text{ с},$ $T_2 = 0,6 \text{ с},$ $\xi = 1$	T_1	k_1
30	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = k_3(\tau_3 p + 1),$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 14, f_m = 7$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 4, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,6,$ $T_1 = 0,5 \text{ с},$ $T_2 = 0,15 \text{ с},$ $\xi = 0,5$ $\tau_3 = 0,1 \text{ с}$	τ_3	k_3
31	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 15, f_m = 5$	$k_1 = 3, k_2 = 5,$ $k_3 = 4, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,4 \text{ с},$ $T_2 = 0,1 \text{ с},$ $T_3 = 0,01 \text{ с}$	T_1	k_1
1	2	3	4	5

32	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3(\tau_3 p + 1)}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, \quad W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 8, \quad f_m = 3$	$k_1 = 4, \quad k_2 = 3,$ $k_3 = 5, \quad k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,7,$ $T_1 = 0,6 \text{ с},$ $T_2 = 0,5 \text{ с},$ $T_3 = 0,04 \text{ с},$ $\tau_3 = 0,008 \text{ с}$	T_2	k_2
33	$W_1(p) = \frac{k_1}{p}, \quad W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = k_3, \quad W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 20, \quad f_m = 10$	$k_1 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_2 = 2, \quad k_3 = 4,$ $k_4 = 4,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_2 = 0,5 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,04 \text{ с}$	T_2	k_2
34	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = k_2(\tau_2 p + 1),$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p(T_3 p + 1)},$ $W_4(p) = k_4, \quad W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 10, \quad f_m = 2$	$k_1 = 5, \quad k_2 = 4,$ $k_3 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 1,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,7 \text{ с},$ $T_2 = 0,06 \text{ с},$ $\tau_2 = 0,04 \text{ с}$	τ_2	k_2
35	$W_1(p) = k_1, \quad W_2(p) = \frac{k_2}{p},$ $W_3(p) = k_3, \quad W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc}^2 p^2 + 2\xi T_{oc} p + 1},$ $g_m = 30, \quad f_m = 10$	$k_1 = 5,$ $k_2 = 2 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 5, \quad k_4 = 5,$ $k_{oc} = 1,$ $T_{oc} = 0,05 \text{ с},$ $\xi = 1$	T_{oc}	k_2

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

36	$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = k_2, W_3(p) = \frac{k_3}{p},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 30, f_m = 5$	$k_1 = 3, k_2 = 2,$ $k_3 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 1, k_{oc} = 1,$ $T_1 = 0,01 \text{ с},$ $\xi = 0,5,$ $\tau_1 = 0,006 \text{ с}$	τ_1	k_3
37	$W_1(p) = k_1,$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 12, f_m = 5$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 3, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,8,$ $T_2 = 0,1 \text{ с},$ $T_3 = 0,7 \text{ с},$ $\xi = 0,7$	T_2	k_2
38	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2(\tau_2 p + 1)}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, f_m = 5$	$k_1 = 8, k_2 = 4,$ $k_3 = 4, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,15 \text{ с},$ $T_2 = 0,8 \text{ с},$ $\xi = 0,6$ $\tau_2 = 0,05 \text{ с}$	T_1	k_1
39	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, f_m = 20$	$k_1 = 3, k_2 = 5,$ $k_3 = 4, k_4 = 1,$ $k_{oc} = 0,8,$ $T_1 = 0,7 \text{ с},$ $T_2 = 0,2 \text{ с},$ $T_3 = 0,02 \text{ с}$	T_3	k_1
1	2	3	4	5

40	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc}(\tau_{oc} p + 1),$ $g_m = 20, f_m = 5$	$k_1 = 5, k_2 = 3,$ $k_3 = 5, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,6,$ $T_1 = 0,8 \text{ с},$ $T_2 = 0,4 \text{ с},$ $T_3 = 0,06 \text{ с},$ $\tau_{oc} = 0,005 \text{ с}$	T_2	k_2
41	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, W_2(p) = \frac{k_2}{p},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 18, f_m = 10$	$k_1 = 2,$ $k_2 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 5, k_4 = 4,$ $k_{oc} = 0,6,$ $T_1 = 0,3 \text{ с},$ $T_3 = 0,03 \text{ с}$	T_3	k_3
42	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = k_2(\tau_2 p + 1),$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 24, f_m = 4$	$k_1 = 2, k_2 = 4,$ $k_3 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 1,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,4 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,1 \text{ с},$ $\tau_2 = 0,04 \text{ с}$	T_1	k_1
43	$W_1(p) = k_1, W_2(p) = \frac{k_2}{p},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 30, f_m = 10$	$k_1 = 2,$ $k_2 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 2, k_4 = 5,$ $k_{oc} = 0,6,$ $T_1 = 0,08 \text{ с},$ $\xi = 0,7$	T_3	k_3
1	2	3	4	5

44	$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = k_2, W_3(p) = \frac{k_3}{p},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 50, f_m = 10$	$k_1 = 3, k_2 = 2,$ $k_3 = 8 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 2, k_{oc} = 1,$ $T_1 = 0,02 \text{ с},$ $\xi = 0,3,$ $\tau_1 = 0,008 \text{ с}$	T_1	k_1
45	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 15, f_m = 10$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 4, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 1 \text{ с},$ $T_3 = 0,04 \text{ с},$ $\xi = 0,8$	T_1	k_1
46	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = k_3(\tau_3 p + 1),$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, f_m = 5$	$k_1 = 5, k_2 = 5,$ $k_3 = 5, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,8,$ $T_1 = 0,05 \text{ с},$ $T_2 = 0,2 \text{ с},$ $\xi = 0,7$ $\tau_3 = 0,03 \text{ с}$	ξ	k_1
47	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 10, f_m = 10$	$k_1 = 3, k_2 = 5,$ $k_3 = 4, k_4 = 1,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,8 \text{ с},$ $T_2 = 0,3 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,05 \text{ с}$	T_1	k_1
1	2	3	4	5

48	$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, f_m = 5$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 5, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,8 \text{ с},$ $T_2 = 0,3 \text{ с},$ $T_3 = 0,04 \text{ с},$ $\tau_1 = 0,007 \text{ с}$	T_2	k_2
49	$W_1(p) = \frac{k_1}{p}, W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 16, f_m = 10$	$k_1 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_2 = 2,$ $k_3 = 5, k_4 = 4,$ $k_{oc} = 0,8,$ $T_1 = 0,1 \text{ с},$ $T_2 = 0,04 \text{ с}$	T_2	k_2
50	$W_1(p) = \frac{k_1}{p}, W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3(\tau_3 p + 1)}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 25, f_m = 15$	$k_1 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_2 = 4,$ $k_3 = 3, k_4 = 8,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,8 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,1 \text{ с},$ $\tau_3 = 0,05 \text{ с}$	τ_2	k_2
51	$W_1(p) = \frac{k_1}{p}, W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 30, f_m = 10$	$k_1 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_2 = 5,$ $k_3 = 2, k_4 = 5,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,15 \text{ с},$ $\xi = 0,8$	ξ	k_3
1	2	3	4	5

52	$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{p},$ $W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 25, f_m = 10$	$k_1 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_2 = 2,$ $k_3 = 6, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_3 = 0,05 \text{ с},$ $\xi = 0,8,$ $\tau_1 = 0,01 \text{ с}$	T_3	k_3
53	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1},$ $W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 15, f_m = 10$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 4, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,5 \text{ с},$ $T_2 = 0,01 \text{ с},$ $\xi = 0,6$	T_2	k_2
54	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = k_3, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc}(\tau_{oc} p + 1),$ $g_m = 20, f_m = 4$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 5, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,25,$ $T_1 = 0,05 \text{ с},$ $T_2 = 0,3 \text{ с},$ $\xi = 0,5$ $\tau_{oc} = 0,02 \text{ с}$	ξ	k_1
55	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 20, f_m = 10$	$k_1 = 2, k_2 = 10,$ $k_3 = 4, k_4 = 1,$ $k_{oc} = 0,7,$ $T_1 = 0,6 \text{ с},$ $T_2 = 0,1 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,015 \text{ с}$	T_1	k_1

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

56	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3(\tau_3 p + 1)}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, \quad W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, \quad f_m = 5$	$k_1 = 5, \quad k_2 = 4,$ $k_3 = 5, \quad k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,4 \text{ с},$ $T_2 = 0,3 \text{ с},$ $T_3 = 0,02 \text{ с},$ $\tau_3 = 0,007 \text{ с}$	τ_3	k_3
57	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, \quad W_2(p) = \frac{k_2}{p},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, \quad W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 50, \quad f_m = 10$	$k_1 = 2,$ $k_2 = 20 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 5, \quad k_4 = 4,$ $k_{oc} = 1,$ $T_1 = 0,1 \text{ с},$ $T_3 = 0,003 \text{ с}$	T_3	k_3
58	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, \quad W_2(p) = \frac{k_2}{p},$ $W_3(p) = \frac{k_3(\tau_3 p + 1)}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, \quad W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 25, \quad f_m = 15$	$k_1 = 10,$ $k_2 = 4 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 2, \quad k_4 = 8,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,4 \text{ с},$ $T_3 = 0,1 \text{ с},$ $\tau_3 = 0,04 \text{ с}$	T_1	k_1
59	$W_1(p) = k_1, \quad W_2(p) = \frac{k_2}{p},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, \quad W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 30, \quad f_m = 10$	$k_1 = 2,$ $k_2 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 5, \quad k_4 = 5,$ $k_{oc} = 1,$ $T_3 = 0,01 \text{ с},$ $\xi = 0,25$	T_3	k_3
1	2	3	4	5

60	$W_1(p) = k_1,$ $W_2(p) = \frac{k_2(\tau_2 p + 1)}{p},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 5, f_m = 10$	$k_1 = 10,$ $k_2 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 1, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_3 = 0,04 \text{ с},$ $\xi = 0,5,$ $\tau_2 = 0,01 \text{ с}$	τ_2	k_2
61	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1},$ $W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 25, f_m = 10$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 4, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,5 \text{ с},$ $T_2 = 0,02 \text{ с},$ $\xi = 1$	ξ	k_2
62	$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = k_3, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, f_m = 4$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 5, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,05 \text{ с},$ $T_2 = 0,3 \text{ с},$ $\xi = 0,6$ $\tau_1 = 0,03 \text{ с}$	τ_1	k_1
63	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 20, f_m = 10$	$k_1 = 2, k_2 = 10,$ $k_3 = 4, k_4 = 1,$ $k_{oc} = 0,7,$ $T_1 = 0,6 \text{ с},$ $T_2 = 0,2 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,04 \text{ с}$	T_{oc}	k_{oc}
1	2	3	4	5

64	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}(\tau_{oc} p + 1)}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 30, f_m = 10$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 5, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,6,$ $T_1 = 0,8 \text{ с},$ $T_2 = 0,3 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,04 \text{ с},$ $\tau_{oc} = 0,008 \text{ с}$	T_1	k_1
65	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 14, f_m = 7$	$k_1 = 2,$ $k_2 = 10,$ $k_3 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 4,$ $k_{oc} = 0,7,$ $T_1 = 0,5 \text{ с},$ $T_2 = 0,015 \text{ с}$	T_2	k_2
66	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3(\tau_3 p + 1)}{p},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 16, f_m = 8$	$k_1 = 2, k_2 = 4,$ $k_3 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 1,$ $k_{oc} = 0,8,$ $T_1 = 0,8 \text{ с},$ $T_2 = 0,08 \text{ с},$ $\tau_3 = 0,03 \text{ с}$	T_2	k_2
67	$W_1(p) = k_1, W_2(p) = \frac{k_2}{p},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 30, f_m = 10$	$k_1 = 2,$ $k_2 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_3 = 5, k_4 = 5,$ $k_{oc} = 0,7,$ $T_3 = 0,02 \text{ с},$ $\xi = 0,2$	T_3	k_3
1	2	3	4	5

68	$W_1(p) = k_1,$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3(\tau_3 p + 1)}{p},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 50, f_m = 10$	$k_1 = 4, k_2 = 3,$ $k_3 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 2, k_{oc} = 1,$ $T_2 = 0,05 \text{ с},$ $\xi = 0,6,$ $\tau_3 = 0,007 \text{ с}$	ξ	k_2
69	$W_1(p) = k_1,$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1},$ $W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 20, f_m = 10$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 4, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_2 = 0,8 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,06 \text{ с},$ $\xi = 0,75$	T_2	k_2
70	$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$ $W_2(p) = k_2,$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, f_m = 4$	$k_1 = 5, k_2 = 4,$ $k_3 = 5, k_4 = 3,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,05 \text{ с},$ $T_3 = 0,6 \text{ с},$ $\xi = 0,6$ $\tau_1 = 0,02 \text{ с}$	T_3	k_3
71	$W_1(p) = k_1, W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$ $W_4(p) = k_4, W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 20, f_m = 5$	$k_1 = 2, k_2 = 10,$ $k_3 = 6, k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,6,$ $T_1 = 0,4 \text{ с},$ $T_3 = 0,1 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,01 \text{ с}$	T_3	k_3
1	2	3	4	5

72	$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad W_3(p) = k_3,$ $W_4(p) = k_4, \quad W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1},$ $g_m = 20, \quad f_m = 10$	$k_1 = 5, \quad k_2 = 4,$ $k_3 = 5, \quad k_4 = 2,$ $k_{oc} = 0,4,$ $T_1 = 0,4 \text{ с},$ $T_2 = 0,3 \text{ с},$ $T_{oc} = 0,02 \text{ с},$ $\tau_1 = 0,005 \text{ с}$	τ_1	k_1
73	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p}, \quad W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 20, \quad f_m = 5$	$k_1 = 2,$ $k_2 = 10,$ $k_3 = 5 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 4,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,5 \text{ с},$ $T_2 = 0,05 \text{ с}$	T_1	k_1
74	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1},$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p}, \quad W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc}(\tau_{oc} p + 1),$ $g_m = 15, \quad f_m = 5$	$k_1 = 2, \quad k_2 = 4,$ $k_3 = 8 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 1,$ $k_{oc} = 0,5,$ $T_1 = 0,6 \text{ с},$ $T_2 = 0,08 \text{ с},$ $\tau_{oc} = 0,05 \text{ с}$	T_2	k_2
75	$W_1(p) = k_1,$ $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1},$ $W_3(p) = \frac{k_3}{p}, \quad W_4(p) = k_4,$ $W_{oc}(p) = k_{oc},$ $g_m = 24, \quad f_m = 16$	$k_1 = 2, \quad k_2 = 5,$ $k_3 = 10 \text{ с}^{-1},$ $k_4 = 5,$ $k_{oc} = 0,8,$ $T_2 = 0,01 \text{ с},$ $\xi = 0,4$	T_2	k_2