

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования**

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

Факультет дистанционного обучения (ФДО)

Ю. М. Лебедев

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Методические указания
по выполнению курсовой работы
для студентов, обучающихся с применением
дистанционных образовательных технологий**

Томск 2023

Корректор: А. Н. Миронова

Лебедев Ю. М.

Теория автоматического управления : методические указания по выполнению курсовой работы для студентов, обучающихся с применением дистанционных образовательных технологий. – Томск : ФДО, ТУСУР, 2023. – 75 с.

Приведены рекомендации по выполнению курсовой работы по теории автоматического управления. На конкретном примере рассмотрены вопросы получения передаточных функций систем автоматического управления (САУ), исследования их устойчивости, расчета частотных и временных характеристик САУ, а также коррекции ее динамических показателей качества управления. Представлены варианты заданий на курсовую работу.

Для студентов направления подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», обучающихся с применением дистанционных образовательных технологий.

© Лебедев Ю. М., 2023

© Оформление.

ФДО, ТУСУР, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

1	Общая характеристика курсовой работы.....	4
2	Задание на курсовую работу	6
3	Пример выполнения курсовой работы.....	9
3.1	Вывод передаточной функции устройства, заданного четырёхполюсником. Исходные данные для работы.....	9
3.2	Определение типовых динамических звеньев САУ	14
3.3	Получение передаточных функций САУ	14
3.4	Определение устойчивости САУ, построение границы ее устойчивости и расчет ее граничного коэффициента передачи	15
3.4.1	Исследование устойчивости САУ по критерию Гурвица	15
3.4.2	Исследование устойчивости САУ по критерию Михайлова	19
3.5	Расчет частотных характеристик разомкнутой цепи САУ, определение запасов устойчивости	24
3.6	Расчет и построение амплитудной частотной характеристики замкнутой САУ по задающему воздействию.....	28
3.7	Расчет и построение переходных характеристик заданной системы, определение основных показателей качества управления	29
3.8	Расчет и построение внешней статической характеристики САУ	33
3.9	Электронное моделирование заданной САУ	35
3.10	Коррекция динамических характеристик САУ	43
4	Правила представления курсовой работы и ее оценка.....	52
5	Защита (рецензирование) курсовой работы	54
	Список рекомендуемой литературы.....	55
	Приложение А Варианты заданий на курсовую работу.....	56

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Методические указания для курсовой работы разработаны с учетом следующих нормативных документов:

1) Федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»;

2) Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры, утвержденного приказом Минобрнауки России от 05 апреля 2017 г. № 301 (регистрационный номер 47415);

3) Положения по организации выполнения и защиты курсовых работ и курсовых проектов в ТУСУРе № 1300 от 11.11.2022;

4) Образовательного стандарта вуза (ОС ТУСУР 01-2021). Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления.

Целью курсовой работы является получение навыков при проведении расчетов для заданной линейной непрерывной системы автоматического управления.

По критерию Гурвица или Михайлова оценивается устойчивость системы, для заданных параметров строится граница устойчивости. Далее из условия запаса устойчивости по амплитуде рассчитываются частотные и временные характеристики системы и оценивается ее статическая точность. С целью улучшения ее показателей качества управления проводится синтез последовательного корректирующего устройства и настройка системы на эти показатели качества.

Большинство расчетов проводится в среде Mathcad с применением символьных вычислений.

После представления курсовой работы проводится защита ее результатов в виде ответов на поставленные преподавателем вопросы.

Руководство курсовой работой. Общее руководство и контроль хода выполнения курсовой работы осуществляет преподаватель дисциплины.

Основные функции руководителя курсовой работы:

- консультирование по вопросам содержания и последовательности выполнения курсовой работы;
- оказание помощи студенту в подборе необходимой литературы;
- контроль хода выполнения курсовой работы;
- подготовка письменных замечаний на курсовую работу;
- допуск студента к защите (рецензированию) курсовой работы.

Выбор варианта курсовой работы осуществляется по общим правилам с использованием следующей формулы:

$$V = (N \times K) \operatorname{div} 100,$$

где V – искомый номер варианта;

N – общее количество вариантов;

K – код варианта;

div – целочисленное деление.

При $V = 0$ выбирается максимальный вариант.

Темы курсовых работ приведены в приложении А.

2 ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Для всех вариантов работы дана структурная схема системы автоматического управления (САУ), приведенная на рисунке 2.1. Здесь $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$, $W_4(p)$, $W_{oc}(p)$ – передаточные звенья САУ, одно из которых задано пассивным или активным четырехполюсником; g, f – задающее и возмущающее воздействие, y – выходная величина.

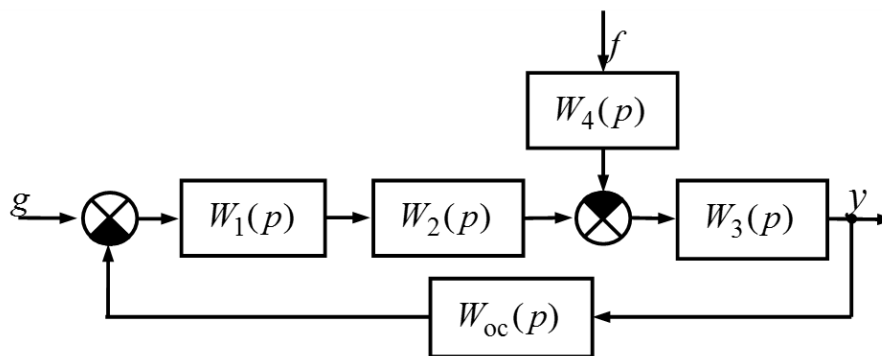


Рис. 2.1 – Структурная схема САУ

Для заданной системы необходимо:

1. Определить передаточную функцию и ее параметры (коэффициент передачи и постоянные времени) для звена, заданного четырехполюсником.
2. Определить типовые динамические звенья, из которых состоит система.
3. Определить передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы.
4. По критерию устойчивости Гурвица (для нечетных вариантов задания) и Михайлова (для четных вариантов) определить устойчивость системы. С помощью устойчивости Гурвица (для нечетных вариантов задания) и D -разбиений (для четных вариантов), рассчитать граничный коэффициент передачи разомкнутой цепи K_p САУ и построить границу ее устойчивости в области заданных варьируемых параметров x_1 (постоянная времени) и x_2

(один из коэффициентов передачи). Определить область устойчивости САУ относительно построенной границы.

5. Задаваясь запасом устойчивости по амплитуде ΔG , рассчитать новые значения коэффициента передачи разомкнутой цепи K_p и варьируемого коэффициента передачи, построить для полученной системы годограф Найквиста, точную и асимптотическую логарифмические частотные характеристики (ЛАЧХ), точную логарифмическую фазовую частотную характеристику (ЛФЧХ) и определить запасы устойчивости для получившейся системы.

6. Рассчитать амплитудную частотную характеристику (АЧХ) системы, определить по ней частоту ω_k и период T_k собственных колебаний и показатель колебательности, оценить по ним время переходного процесса по задающему воздействию.

7. Рассчитать и построить переходные характеристики системы по задающему и возмущающему воздействиям, определить по ним основные показатели качества управления (перерегулирование и время переходного процесса).

8. Рассчитать и построить внешнюю статическую характеристику САУ, определить ее статизм и оценить статическую точность.

9. По структурной схеме заданной САУ в среде ASIMEC разработать ее электронную модель, снять переходные характеристики по задающему и возмущающему воздействиям, логарифмические частотные характеристики, определить перерегулирование, время переходного процесса по каждому из воздействий, частоту среза, запасы устойчивости и оценить погрешность моделирования.

10. Путем осуществления последовательной коррекции настроить систему на заданные показатели качества управления (перерегулирование и время переходного процесса), определить и синтезировать на операционных усилителях последовательное корректирующее устройство.

Все расчеты по курсовой работе выполнять в среде Mathcad 13. Более поздние версии этой среды применять не рекомендуется в связи с вероятностью возникновения трудностей при проведении символьных вычислений.

3 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

3.1 Вывод передаточной функции устройства, заданного четырехполюсником. Исходные данные для работы

На рисунке 3.1 приведена схема устройства на операционных усилителях, реализующего звено с передаточной функцией $W_2(p)$, в которой $R_1 = 20 \text{ кОм}$, $R_2 = R_5 = R_6 = 100 \text{ кОм}$, $R_3 = 20 \text{ кОм}$, $R_4 = 4 \text{ кОм}$, $C_1 = C_2 = 1 \text{ мкФ}$. На операционном усилителе $DA1$ реализовано инерционное звено и сумматор с передаточными функциями $W_{ин1}(p) = -\frac{R_3}{R_1(R_3C_1p + 1)}$ и $W_{ин2}(p) = -\frac{R_3}{R_2(R_3C_1p + 1)}$, на усилителе $DA2$ – интегрирующее звено с передаточной функцией $W_{инт}(p) = -\frac{1}{R_4C_2p}$, на усилителе $DA3$ – пропорциональное звено с передаточной функцией $W_{пр}(p) = -\frac{R_6}{R_5}$. Пользуясь правилами преобразования структурных схем, выведем передаточную функцию этого устройства.

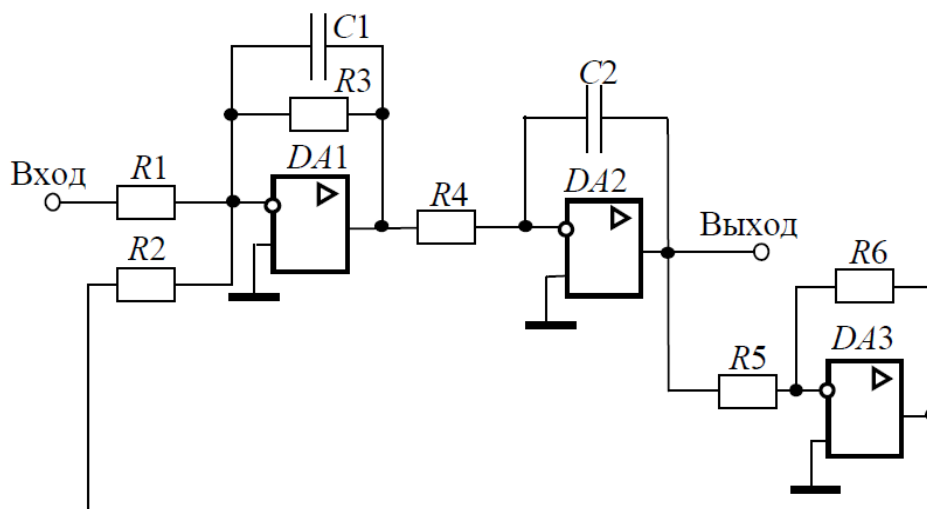


Рис. 3.1 – Схема заданного активного четырехполюсника

$$\begin{aligned}
W_2(p) &= \frac{\left[-\frac{R_3}{R_1(R_3C_1p+1)} \right] \cdot \left(-\frac{1}{R_4C_2p} \right)}{1 - \left[-\frac{R_3}{R_2(R_3C_1p+1)} \right] \cdot \left(-\frac{1}{R_4C_2p} \right) \left(-\frac{R_6}{R_5} \right)} = \\
&= \frac{\frac{R_3}{R_1R_4(R_3C_1p+1)C_2p}}{1 + \frac{R_3R_6}{R_2R_4R_5(R_3C_1p+1)C_2p}} = \frac{\frac{R_3}{R_1R_4(R_3C_1p+1)C_2p} \cdot R_2R_4R_5(R_3C_1p+1)C_2p}{R_2R_4R_5(R_3C_1p+1)C_2p + R_3R_6} = \\
&= \frac{\frac{R_2R_3R_4R_5}{R_1R_4}}{R_3R_6 \left[\frac{R_2R_4R_5}{R_3R_6}(R_3C_1p+1)C_2p + 1 \right]} = \frac{\frac{R_2R_5}{R_1R_6}}{\left[R_2R_4C_1C_2p^2 + \frac{R_2R_4}{R_3}C_2p + 1 \right]} = \\
&= \frac{k_2}{T_{21}^2 p^2 + T_{22}p + 1},
\end{aligned}$$

где

$$k_2 = \frac{R_2R_5}{R_1R_6} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{100 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} = 5,$$

$$T_{21} = \sqrt{R_2R_4C_1C_2} = \sqrt{100 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-6}} = \sqrt{4 \cdot 10^{-4}} = 0,02 \text{ с},$$

$$T_{22} = \frac{R_2R_4}{R_3}C_2 = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \cdot 10^{-6} = 0,02 \text{ с}.$$

Вычисления проведены с учетом того, что отношение $\frac{R_5}{R_6} = 1$.

Коэффициент демпфирования $\xi = \frac{T_{22}}{2T_{21}} = \frac{0,02}{2 \cdot 0,02} = 0,5 < 1$, следова-

тельно, звено – колебательное и его передаточная функция может быть представлена в виде:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1},$$

где $T_2 = T_{21} = 0,02 \text{ с}$.

Другие передаточные функции звеньев системы и их параметры:

$$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{T_1 p + 1}, \quad k_1 = 10, \quad \tau_1 = 0,1 \text{ с}, \quad T_1 = 0,2 \text{ с};$$

$$W_3(p) = \frac{k_3(\tau_3 p + 1)}{p}, \quad k_3 = 8 \text{ с}^{-1}, \quad \tau_3 = 0,01 \text{ с}^{-1};$$

$$W_4(p) = k_4 = 2; \quad W_{oc}(p) = k_{oc} = 0,5.$$

Варьируемые параметры системы: $x_1 = T_2$, $x_2 = k_1$.

Запас устойчивости по амплитуде: $\Delta G = 7 \text{ дБ}$.

Максимальные значения внешних воздействий:

- задающего – $g_m = 20$,
- возмущающего – $f_m = 15$.

Параметры скорректированной САУ по задающему воздействию:

- перерегулирование $\sigma \approx 20\%$,
- время переходного процесса $t_{\text{пн}} \leq 0,11 \text{ с}$.

Примечание 1. В некоторых вариантах задания на курсовую работу присутствует не активный, а пассивный четырехполюсник. В этом случае вывод его передаточной функции осуществляется с применением законов электротехники и линейной алгебры. Рассмотрим конкретный пример такого вывода.

На рисунке 3.2 приведена схема такого четырехполюсника, на которой обозначены токи, протекающие в ветвях схемы, и показаны контуры. Пусть $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$, $C_1 = 10 \text{ мкФ}$, $C_2 = 20 \text{ мкФ}$.

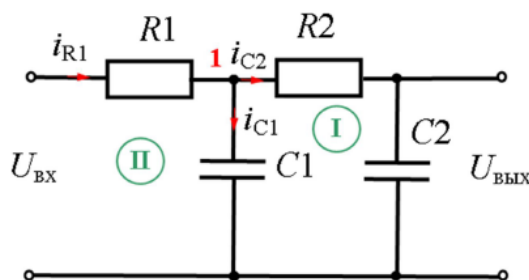


Рис. 3.2 – Схема пассивного четырехполюсника

Поскольку ток заряда каждого из конденсаторов $i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$

по первому закону Кирхгофа для узла **1** получим уравнение:

$$i_{R1}(t) - C_1 \frac{du_{C1}(t)}{dt} - C_2 \frac{du_{C2}(t)}{dt} = 0.$$

По второму закону Кирхгофа для контуров **I** и **II** получим:

$$\begin{aligned} u_{C1}(t) - R_2 C_2 \frac{du_{C2}(t)}{dt} - u_{C2}(t) &= 0, \\ R_1 i_{R1}(t) + u_{C1}(t) &= u_{\text{вх}}(t), \end{aligned}$$

а выходное напряжение $u_{\text{вых}}(t) = u_{C2}(t)$.

Перейдем от оригиналов к изображениям по Лапласу, приняв $i_{R1}(t) \Leftrightarrow I_{R1}(p)$, $u_{C1}(t) \Leftrightarrow U_{C1}(p)$, $u_{C2}(t) \Leftrightarrow U_{C2}(p)$, $u_{\text{вх}}(t) \Leftrightarrow U_{\text{вх}}(p)$, $u_{\text{вых}}(t) \Leftrightarrow U_{\text{вых}}(p)$, $\frac{dx(t)}{dt} \Leftrightarrow pX(p)$, тогда получим следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} I_{R1}(p) - C_1 p U_{C1}(p) - C_2 p U_{C2}(p) = 0, \\ U_{C1}(p) - (R_2 C_2 p + 1) U_{C2}(p) = 0, \\ R_1 I_{R1}(p) + U_{C1}(p) = U_{\text{вх}}(p), \end{cases}$$

которая может быть разрешена по формуле $Y(p)$, где $Y(p)$ – изображение какой-либо переменной системы, A^{-1} – обращенная матрица коэффициентов системы, B – вектор ее правых частей, то есть

$$\begin{bmatrix} 1 & -C_1 \cdot p & -C_2 \cdot p \\ 0 & 1 & -(R_2 \cdot C_2 \cdot p + 1) \\ R_1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ U_{\text{вх}}(p) \end{pmatrix}.$$

Результат получается при последовательном применении к этому выражению операций *Symbolics – Evaluate* и *Symbolics – Collect* относительно переменной p . Выражение имеет вид вектора:

$$\left[\begin{array}{l} p \cdot \frac{C1 \cdot p \cdot R2 \cdot C2 + C1 + C2}{R1 \cdot C1 \cdot p^2 \cdot R2 \cdot C2 + (R2 \cdot C2 + R1 \cdot C1 + R1 \cdot C2) \cdot p + 1} \cdot U_{BX}(p) \\ \frac{R2 \cdot C2 \cdot p + 1}{R1 \cdot C1 \cdot p^2 \cdot R2 \cdot C2 + (R2 \cdot C2 + R1 \cdot C1 + R1 \cdot C2) \cdot p + 1} \cdot U_{BX}(p) \\ \frac{1}{R1 \cdot C1 \cdot p^2 \cdot R2 \cdot C2 + (R2 \cdot C2 + R1 \cdot C1 + R1 \cdot C2) \cdot p + 1} \cdot U_{BX}(p) \end{array} \right],$$

последняя компонента которого:

$$U_{C2}(p) = \frac{1}{R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2 \cdot p^2 + [(R1 + R2) \cdot C2 + R1 \cdot C1] \cdot p + 1} \cdot U_{BX}(p).$$

Так как передаточная функция $W(p) = \frac{U_{ВЫХ}(p)}{U_{ВХ}(p)} = \frac{U_{C2}(p)}{U_{ВХ}(p)}$, то оконча-

тельно получим:

$$W(p) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + [R_1 C_1 + (R_1 + R_2) C_2] p + 1} = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1},$$

где для заданных выше параметров

$$k = 1, \quad T_1 = \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2} \approx 0,141 \text{ с}, \quad T_2 = R_1 C_1 + (R_1 + R_2) C_2 = 0,5 \text{ с}.$$

Коэффициент демпфирования $\xi = \frac{T_2}{2T_1} \approx 1,768 > 1$, следовательно, рас-

смотренный четырехполюсник реализует апериодическое звено второго порядка, которое может быть представлено последовательным соединением двух инерционных звеньев, то есть окончательно

$$W(p) = \frac{k}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)},$$

где новые постоянные времени

$$T_{3,4} = \frac{T_2}{2} \pm \sqrt{\frac{T_2^2}{4} - T_1^2}, \quad T_3 \approx 0,456 \text{ с}, \quad T_4 \approx 0,044 \text{ с}.$$

3.2 Определение типовых динамических звеньев САУ

Система содержит следующие типовые динамические звенья:

- звено с передаточной функцией $W_1(p)$ – инерционное форсирующее;
- звено с передаточной функцией $W_2(p)$ – колебательное;
- звено с передаточной функцией $W_3(p)$ – изодромное;
- звенья с передаточными функциями $W_4(p)$, $W_{oc}(p)$ – пропорциональные.

3.3 Получение передаточных функций САУ

1. Передаточная функция разомкнутой системы по задающему воздействию:

$$W_{pg}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) = \frac{k_1 k_2 k_3 (\tau_1 p + 1)(\tau_3 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)}.$$

2. Передаточная функция разомкнутой системы по возмущающему воздействию:

$$W_{pg}(p) = W_3(p) \cdot W_4(p) = \frac{k_3 k_4 (\tau_3 p + 1)}{p}.$$

3. Передаточная функция разомкнутой цепи:

$$\begin{aligned} W_{pc}(p) &= W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_{oc}(p) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_{oc} (\tau_1 p + 1)(\tau_3 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)} = \\ &= \frac{K_p (\tau_1 p + 1)(\tau_3 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)}, \end{aligned}$$

где $K_p = k_1 k_2 k_3 k_{oc}$ – коэффициент передачи разомкнутой цепи.

4. Передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию:

$$W_{zg}(p) = \frac{W_{pg}(p)}{1 + W_{pc}(p)} = \frac{\frac{k_1 k_2 k_3 (\tau_1 p + 1)(\tau_3 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)}}{1 + \frac{K_p (\tau_1 p + 1)(\tau_3 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)}} =$$

$$= \frac{\frac{K_p}{k_{oc}}(\tau_1 p + 1)(\tau_3 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1) + K_p(\tau_1 p + 1)(\tau_3 p + 1)}.$$

5. Передаточная функция замкнутой системы по возмущающему воздействию:

$$\begin{aligned} W_{zf}(p) &= \frac{W_{pf}(p)}{1 + W_{pc}(p)} = \frac{\frac{k_3 k_4 (\tau_3 p + 1)}{p}}{1 + \frac{K_p (\tau_1 p + 1)(\tau_3 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)}} = \\ &= \frac{k_3 k_4 (T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)(\tau_3 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1) + K_p (\tau_1 p + 1)(\tau_3 p + 1)}. \end{aligned}$$

Характеристический полином САУ:

$$\begin{aligned} A(p) &= p(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1) + K_p (\tau_1 p + 1)(\tau_3 p + 1) = \\ &= a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0. \end{aligned}$$

Значения коэффициентов полинома будут определены и рассчитаны в среде Mathcad.

3.4 Определение устойчивости САУ, построение границы ее устойчивости и расчет ее граничного коэффициента передачи

3.4.1 Исследование устойчивости САУ по критерию Гурвица

Исходные данные:

$$k_1 := 10 \quad k_2 := 5 \quad k_3 := 8 \quad k_{oc} := 0.5$$

$$\xi := 0.5 \quad \tau_3 := 0.01 \quad g := 20 \quad f := 15$$

$$T_1 := 0.2 \quad \tau_1 := 0.1 \quad T_2 := 0.02$$

$$x_1 = T_2 \quad x_2 = k_1 \quad \Delta G := 7$$

Коэффициент передачи разомкнутой цепи САУ (c^{-1}), правая часть характеристического полинома и вектор его коэффициентов (далее приведены фрагменты расчетного файла среды Mathcad, красным курсивом показана работа с символьными вычислениями):

$$K_p := k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_{oc} \quad K_p = 200$$

$$p \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot p + 1) + K_p \cdot (\tau_1 \cdot p + 1) \cdot (\tau_3 \cdot p + 1)$$

$$a := \begin{pmatrix} K_p \\ 1 + K_p \cdot \tau_1 + K_p \cdot \tau_3 \\ T_1 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 + K_p \cdot \tau_1 \cdot \tau_3 \\ 2 \cdot T_1 \cdot \xi \cdot T_2 + T_2^2 \\ T_1 \cdot T_2^2 \end{pmatrix} \quad \text{п. меню **Symbolics – Polynomial Coefficients** относительно переменной p и дальнейшее присваивание ему переменной a }$$

Главный минор определителя Гурвица:

$$\Delta_3 := \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} \quad \Delta_3 = -3.688 \times 10^{-3}$$

Так как главный минор определителя Гурвица меньше нуля, то САУ **неустойчива**.

Построение границы устойчивости САУ в области варьируемых параметров **x_1 , x_2** .

Введем варьируемый параметр **x_3** , равный граничному коэффициенту передачи разомкнутой цепи, тогда вектор коэффициентов характеристического полинома примет вид:

$$a(x_1, x_3) := \begin{pmatrix} x_3 \\ 1 + x_3 \cdot \tau_1 + x_3 \cdot \tau_3 \\ T_1 + 2 \cdot \xi \cdot x_1 + x_3 \cdot \tau_1 \cdot \tau_3 \\ 2 \cdot T_1 \cdot \xi \cdot x_1 + x_1^2 \\ T_1 \cdot x_1^2 \end{pmatrix}$$

На границе устойчивости главный минор определителя Гурвица равен нулю, то есть

$$a(x1)_3 \cdot a(x1, x3)_2 \cdot a(x3)_1 - a(x3)_0 \cdot (a(x1)_3)^2 - a(x1)_4 \cdot (a(x3)_1)^2 = 0$$

Иначе

$$\begin{aligned} & (2 \cdot T1 \cdot \xi \cdot x1 + x1^2) \cdot (T1 + 2 \cdot \xi \cdot x1 + x3 \cdot \tau1 \cdot \tau3) \cdot [1 + x3 \cdot (\tau1 + \tau3)] - x3 \cdot (2 \cdot T1 \cdot \xi \cdot x1 + x1^2)^2 - \\ & - T1 \cdot x1^2 \cdot [1 + x3 \cdot (\tau1 + \tau3)]^2 = 0 \end{aligned}$$

В результате выполнения символьной операции *Symbolics – Collect* относительно переменной $x3$ получается квадратное уравнение вида

$$b(x1)_2 \cdot x3^2 + b(x1)_1 \cdot x3 + b(x1)_0 = 0,$$

где вектор его коэффициентов будет таким:

$$b(x1) = \begin{pmatrix} 4 T1 \cdot \xi^2 \cdot x1^2 + 2 T1^2 \cdot \xi \cdot x1 + 2 x1^3 \cdot \xi \\ 2 T1^2 \cdot \xi \cdot x1 \cdot \tau1 + 2 T1^2 \cdot \xi \cdot x1 \cdot \tau3 + 4 T1 \cdot \xi^2 \cdot x1^2 \cdot \tau1 + 4 T1 \cdot \xi^2 \cdot x1^2 \cdot \tau3 - T1 \cdot x1^2 \cdot \tau1 - T1 \cdot x1^2 \cdot \tau3 + 2 x1^3 \cdot \xi \cdot \tau1 + 2 x1^3 \cdot \xi \cdot \tau3 + 2 \tau1 \cdot \tau3 \cdot T1 \cdot \xi \cdot x1 + \tau1 \cdot \tau3 \cdot x1^2 - 4 T1^2 \cdot \xi^2 \cdot x1^2 - 4 T1 \cdot \xi \cdot x1^3 - x1^4 \\ 2 \tau1^2 \cdot \tau3 \cdot T1 \cdot \xi \cdot x1 + 2 \tau1 \cdot \tau3^2 \cdot T1 \cdot \xi \cdot x1 + \tau1^2 \cdot \tau3 \cdot x1^2 + \tau1 \cdot \tau3^2 \cdot x1^2 - T1 \cdot x1^2 \cdot \tau1^2 - 2 T1 \cdot x1^2 \cdot \tau1 \cdot \tau3 - T1 \cdot x1^2 \cdot \tau3^2 \end{pmatrix}$$

Общее решение уравнения, приведенного выше, можно легко получить символьной операцией *Symbolics – Variable – Solve* относительно переменной $x3$:

$$x3(x1) := \begin{bmatrix} \frac{1}{2 \cdot b(x1)_2} \cdot \left[(-b(x1)_1) + \sqrt{(b(x1)_1)^2 - 4 \cdot b(x1)_2 \cdot b(x1)_0} \right] \\ \frac{1}{2 \cdot b(x1)_2} \cdot \left[(-b(x1)_1) - \sqrt{(b(x1)_1)^2 - 4 \cdot b(x1)_2 \cdot b(x1)_0} \right] \end{bmatrix}$$

Первое решение, соответствующее нулевой компоненте вектора $x3(T2)$ – отрицательное и не имеет смысла, поэтому выбирается второе решение, тогда

$$\begin{aligned} x3(x1) &:= \frac{1}{2 \cdot b(x1)_2} \cdot \left[(-b(x1)_1) - \sqrt{(b(x1)_1)^2 - 4 \cdot b(x1)_2 \cdot b(x1)_0} \right] \\ x2(x1) &:= \frac{x3(x1)}{k2 \cdot k3 \cdot k0c} \end{aligned}$$

а граничные значения коэффициентов передачи K_p и $k1$ будут такими:

$$K_{gr} := x3(T2) \quad K_{gr} = 163.92 \quad k1_{gr} := x2(T2) \quad k1_{gr} = 8.196$$

Полученный результат легко проверить путем присваивания коэффициенту передачи K_p его граничного значения в вектор коэффициентов характеристического полинома, однако вследствие ошибок округления, главный минор редко бывает равным нулю. Поэтому, например, при его отрицательном значении в младшем разряде полученного числа нужно убрать единицу и, если он становится положительным, то результат – правильный. Если же главный минор определителя Гурвица – положительный, то к младшему разряду следует добавить единицу.

На рисунке 3.3 приведена граница устойчивости САУ в области заданных варьируемых параметров. При заданных значениях $T2$ и $k1$ система неустойчива. Так как точка пересечения пунктирных маркеров, соответствующих заданным значениям $T2$ и $k1$, расположена выше построенной границы, то область устойчивости заданной САУ будет располагаться ниже этой границы.

$$x1 := 0.015, 0.016 \dots 0.05$$

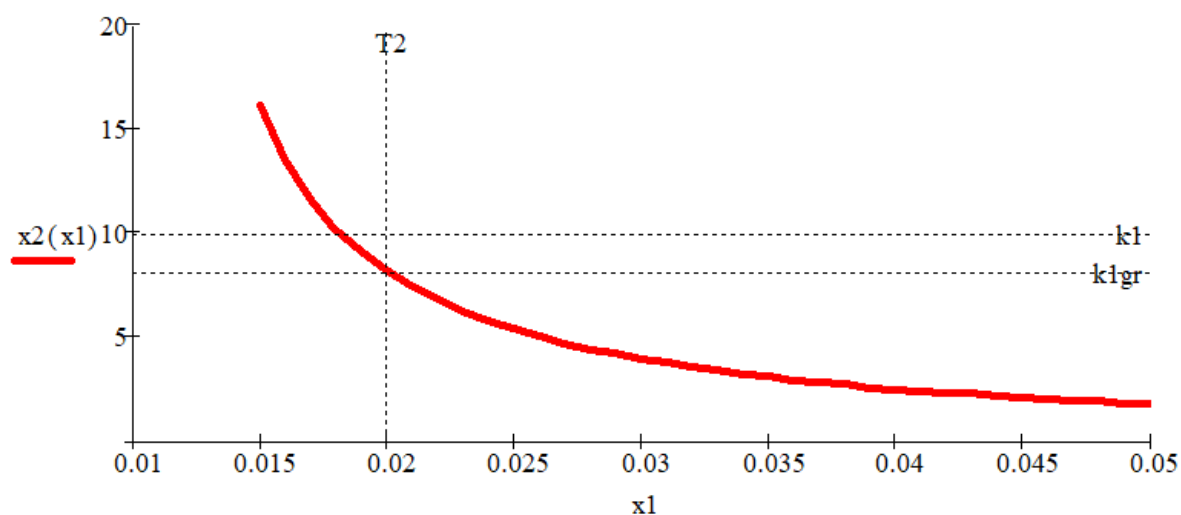


Рис. 3.3 – Граница устойчивости САУ (по Гурвицу)

3.4.2 Исследование устойчивости САУ по критерию Михайлова

Характеристический полином системы и вектор его коэффициентов:

$$A(p) := p \cdot (T1 \cdot p + 1) \cdot (T2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T2 \cdot p + 1) + Kp \cdot (\tau1 \cdot p + 1) \cdot (\tau3 \cdot p + 1)$$

$$a := \begin{pmatrix} Kp \\ 1 + Kp \cdot \tau1 + Kp \cdot \tau3 \\ T1 + 2 \cdot \xi \cdot T2 + Kp \cdot \tau1 \cdot \tau3 \\ 2 \cdot T1 \cdot \xi \cdot T2 + T2^2 \\ T1 \cdot T2^2 \end{pmatrix}$$

На рисунке 3.4 приведен годограф Михайлова для заданной системы. При этом конечное значение частоты ω подбирается экспериментально. Поскольку при изменении частоты от нуля до ее конечного значения годограф Михайлова не проходит в положительном направлении (против часовой стрелки) последовательно четыре квадранта комплексной плоскости, САУ **неустойчива**.

$$\omega := 0..75$$

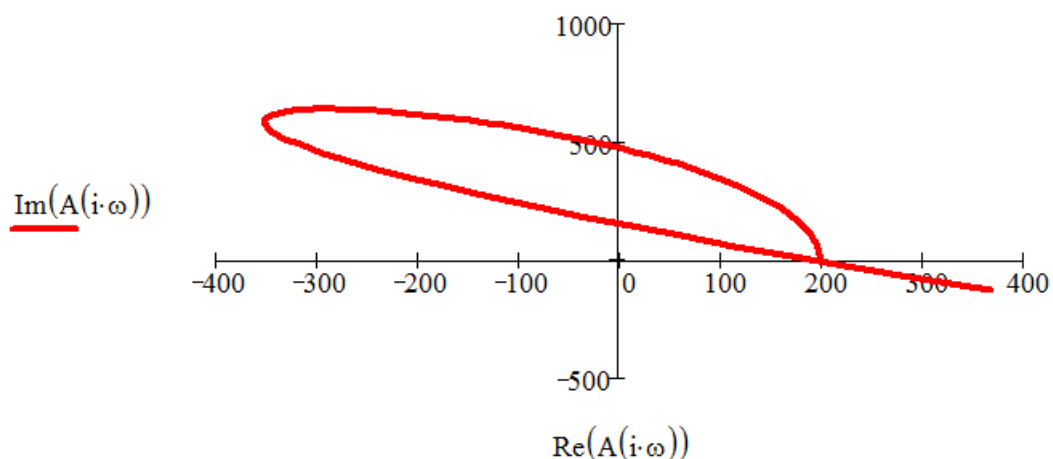


Рис. 3.4 – Годограф Михайлова

Построим область устойчивости системы путем проведения D -разбиений и определение граничного коэффициента передачи ее разомкнутой цепи.

В правой части характеристического полинома с параметрами $x1$ и $x3$ следует заменить оператор Лапласа p на переменную $1i \cdot \omega$. Для этого данная переменная копируется в буфер обмена, в правой части $A(p)$ мышью указывается оператор p и выполняется символьная операция *Symbolics – Variable – Substitute*. Результат операции – замена переменной p на переменную $1i \cdot \omega$.

$$p \cdot (T1 \cdot p + 1) \cdot (x1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot x1 \cdot p + 1) + x3 \cdot (\tau1 \cdot p + 1) \cdot (\tau3 \cdot p + 1) \\ i \cdot \omega \cdot (i \cdot T1 \cdot \omega + 1) \cdot [(-x1^2) \cdot \omega^2 + 2 \cdot i \cdot \xi \cdot x1 \cdot \omega + 1] + x3 \cdot (i \cdot \tau1 \cdot \omega + 1) \cdot (i \cdot \tau3 \cdot \omega + 1)$$

Далее ко всему полученному выражению (выделяется мышью) применяется символьная операция *Symbolics – Evaluate – Complex*, в результате выполнения которой происходит разделение вещественной и мнимой частей полученного ранее выражения, то есть

$$\omega^4 \cdot T1 \cdot x1^2 - \omega^2 \cdot T1 - 2 \cdot \omega^2 \cdot \xi \cdot x1 - x3 \cdot \tau1 \cdot \omega^2 \cdot \tau3 + x3 + \\ + i \cdot [(-2) \cdot \omega^3 \cdot T1 \cdot \xi \cdot x1 - \omega^3 \cdot x1^2 + \omega + x3 \cdot \tau1 \cdot \omega + x3 \cdot \tau3 \cdot \omega]$$

Затем копируется мнимая часть, для нее выполняется операция *Symbolics – Collect*, далее степень переменной ω понижается на единицу, т. е. проводится последовательность действий:

$$i \cdot [(-2) \cdot \omega^3 \cdot T1 \cdot \xi \cdot x1 - \omega^3 \cdot x1^2 + \omega + x3 \cdot \tau1 \cdot \omega + x3 \cdot \tau3 \cdot \omega] \\ i \cdot [(-x1^2) - 2 \cdot T1 \cdot \xi \cdot x1] \cdot \omega^3 + i \cdot (x3 \cdot \tau3 + 1 + x3 \cdot \tau1) \cdot \omega \\ [(-x1^2) - 2 \cdot T1 \cdot \xi \cdot x1] \cdot \omega^2 + (x3 \cdot \tau3 + 1 + x3 \cdot \tau1)$$

На границе устойчивости годограф Михайлова должен проходить через начало координат, то есть вещественная и мнимая части $A(i \cdot \omega)$ равны нулю. Поэтому для полученной мнимой части применяем операцию

Symbolics – Variable – Solve относительно параметра $x3$. В итоге получаем решение:

$$\frac{x1^2 \cdot \omega^2 + 2 \cdot T1 \cdot \omega^2 \cdot \xi \cdot x1 - 1}{\tau3 + \tau1}$$

то есть

$$\underline{x3}(x1, \omega) := \frac{x1^2 \cdot \omega^2 + 2 \cdot T1 \cdot \omega^2 \cdot \xi \cdot x1 - 1}{\tau3 + \tau1}$$

Аналогично поступаем и с вещественной частью, копируя ее из ранее полученного выражения, производя в ней с помощью операции *Symbolics – Variable – Substitute* замену переменной $x3$ на правую часть приведенного выше выражения и затем с помощью операции *Symbolics – Collect* относительно переменной $x1$ получаем квадратное уравнение вида $\text{Re}[A(i\omega)] = 0$, то есть

$$\omega^4 \cdot T1 \cdot x1^2 - \omega^2 \cdot T1 - 2 \cdot \omega^2 \cdot \xi \cdot x1 - x3 \cdot \tau1 \cdot \omega^2 \cdot \tau3 + x3$$

$$\omega^4 \cdot T1 \cdot x1^2 - \omega^2 \cdot T1 - 2 \cdot \omega^2 \cdot \xi \cdot x1 - \frac{x1^2 \cdot \omega^2 + 2 \cdot T1 \cdot \omega^2 \cdot \xi \cdot x1 - 1}{\tau3 + \tau1} \cdot \tau1 \cdot \omega^2 \cdot \tau3 +$$

$$+ \frac{x1^2 \cdot \omega^2 + 2 \cdot T1 \cdot \omega^2 \cdot \xi \cdot x1 - 1}{\tau3 + \tau1}$$

$$\left(\omega^4 \cdot T1 - \frac{\omega^4}{\tau3 + \tau1} \cdot \tau1 \cdot \tau3 + \frac{\omega^2}{\tau3 + \tau1} \right) \cdot x1^2 +$$

$$+ \left[(-2) \cdot T1 \cdot \omega^4 \cdot \frac{\xi}{\tau3 + \tau1} \cdot \tau1 \cdot \tau3 - 2 \cdot \omega^2 \cdot \xi + 2 \cdot T1 \cdot \omega^2 \cdot \frac{\xi}{\tau3 + \tau1} \right] \cdot x1 -$$

$$- \left| \omega^2 \cdot T1 - \frac{1}{\tau3 + \tau1} + \frac{\omega^2}{\tau3 + \tau1} \cdot \tau1 \cdot \tau3 \right|$$

Затем путем последовательного выполнения операций *Symbolics – Polynomial Coefficients*, *Symbolics – Simplify* и *Symbolics – Collect* получаем вектор коэффициентов:

$$\underline{b}(\omega) := \begin{bmatrix} \frac{(-T1) \cdot \tau3 - T1 \cdot \tau1 + \tau1 \cdot \tau3}{\tau3 + \tau1} \cdot \omega^2 - \frac{1}{\tau3 + \tau1} \\ (-2) \cdot T1 \cdot \omega^4 \cdot \frac{\xi}{\tau3 + \tau1} \cdot \tau1 \cdot \tau3 - 2 \cdot \xi \cdot \frac{\tau3 + \tau1 - T1}{\tau3 + \tau1} \cdot \omega^2 \\ - \left[\frac{(-T1) \cdot \tau3 - T1 \cdot \tau1 + \tau1 \cdot \tau3}{\tau3 + \tau1} \right] \cdot \omega^4 + \frac{\omega^2}{\tau3 + \tau1} \end{bmatrix}$$

квадратного уравнения

$$b(\omega)_2 \cdot x_3^2 + b(\omega)_1 \cdot x_3 + b(\omega)_0 = 0$$

Вектор решений этого уравнения, найденный с помощью операции *Symbolics – Variable – Solve*, будет иметь вид:

$$x1(\omega) := \begin{bmatrix} \frac{1}{2 \cdot b(\omega)_2} \cdot \left[(-b(\omega)_1) + \left[(b(\omega)_1)^2 - 4 \cdot b(\omega)_2 \cdot b(\omega)_0 \right]^{\frac{1}{2}} \right] \\ \frac{1}{2 \cdot b(\omega)_2} \cdot \left[(-b(\omega)_1) - \left[(b(\omega)_1)^2 - 4 \cdot b(\omega)_2 \cdot b(\omega)_0 \right]^{\frac{1}{2}} \right] \end{bmatrix}$$

На рисунке 3.5 приведены графики зависимостей переменной x_1 от частоты ω , полученные из приведенных решений.

$$\omega := 0..100$$

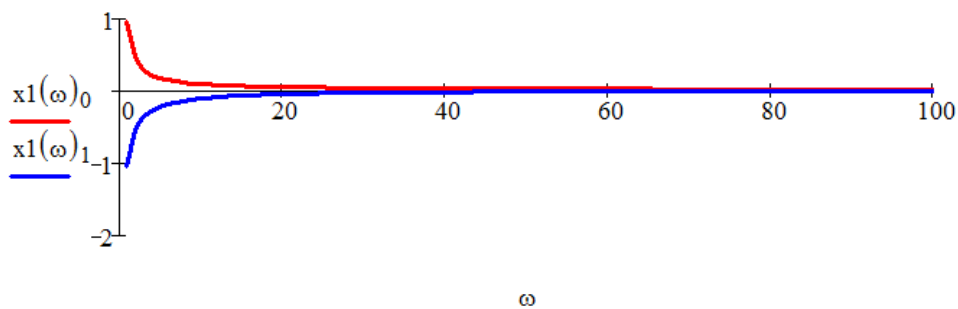


Рис. 3.5 – Графики зависимостей $x_1(\omega)$

Легко видеть, что правильным является верхнее решение (нулевая компонента вектора $x1(\omega)$), поскольку второе решение дает отрицательные результаты. Таким образом,

$$\underline{x1}(\omega) := x1(\omega)_0$$

Более подробный график этого решения представлен на рисунке 3.6. На нем для наглядности маркером по вертикальной оси отмечена варьируемая постоянная времени $T2$.

$$\omega := 40..100$$

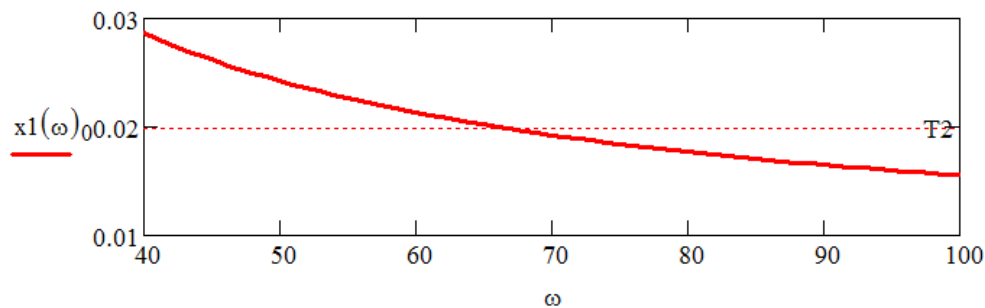


Рис. 3.6 – График положительного решения для $x1(\omega)$

Задаваясь приближением из графика, изображенного на рисунке 3.6, выберем приближение для определения с помощью функции **Find** значения частоты, соответствующей варьируемой постоянной времени $T2$ и граничные коэффициенты передачи для заданной системы:

$$\omega := 70 \quad \text{Given} \quad x1(\omega) = T2 \quad \omega2 := \text{Find}(\omega) \quad \omega2 = 65.767$$

$$\underline{x3}(\omega) := \frac{x1(\omega)^2 \cdot \omega^2 + 2 \cdot T1 \cdot \omega^2 \cdot \xi \cdot x1(\omega) - 1}{\tau3 + \tau1} \quad \underline{x2}(\omega) := \frac{x3(\omega)}{k2 \cdot k3 \cdot k_{oc}}$$

$$\underline{Kgr} := x3(\omega2) \quad Kgr = 163.92 \quad \underline{k1gr} := x2(\omega2) \quad k1gr = 8.196$$

Полученные значения граничных коэффициентов передачи совпали с результатами, приведенными в пп. 3.4.1.

На рисунке 3.7 построена граница устойчивости заданной САУ для ее варьируемых параметров. Здесь также легко видеть, что область устойчивости системы расположена ниже этой границы.

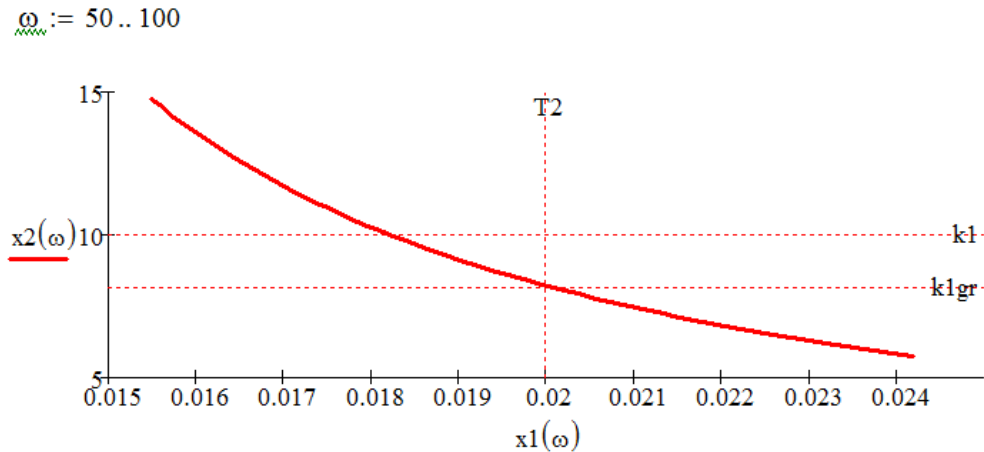


Рис. 3.7 – Граница устойчивости САУ (по Михайлову)

3.5 Расчет частотных характеристик разомкнутой цепи САУ, определение запасов устойчивости

Поскольку область устойчивости системы расположена ниже ранее построенной границы, запас устойчивости по амплитуде будет определяться по формуле:

$$\Delta G = 20 \lg K_{\text{гр}} - 20 \lg K_p,$$

отсюда новое значение коэффициента передачи разомкнутой цепи рассчитывается так:

$$K_p = \frac{K_{\text{гр}}}{10^{\frac{\Delta G}{20}}}.$$

Учитывая это, рассчитаем для заданной САУ новые значения коэффициентов передачи K_p и k_1 :

$$\underline{K_p} := \frac{K_{\text{гр}}}{10^{\frac{\Delta G}{20}}} \quad K_p = 73.22 \quad \underline{k_1} := \frac{K_p}{k_2 \cdot k_3 \cdot k_{\text{ос}}} \quad k_1 = 3.661$$

Примечание 2. Если область устойчивости САУ расположена выше ее границы, то значение коэффициента передачи разомкнутой цепи нужно принимать равным

$$K_p = K_{\text{гр}} \cdot 10^{\frac{\Delta G}{20}}.$$

Построим для заданной САУ годограф Найквиста и логарифмические частотные характеристики ее разомкнутой цепи, передаточная функция которой имеет вид:

$$W_{pc}(p) := \frac{K_p \cdot (\tau_1 \cdot p + 1) \cdot (\tau_3 \cdot p + 1)}{p \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot p + 1)}$$

На рисунке 3.8 показан годограф Найквиста, построенный по этой передаточной функции в полярной системе координат (**Polar Plot**). В нем по оси ординат откладывается модуль частотной передаточной функции разомкнутой цепи, а по оси абсцисс – ее аргумент. Для наглядности верхний предел изменения модуля принят равным 1,5, цена деления по углу равна 10 градусов. Пунктиром (маркером по вертикальной оси) показана окружность единичного радиуса.

$$\omega := 1, 1.1 \dots 500$$

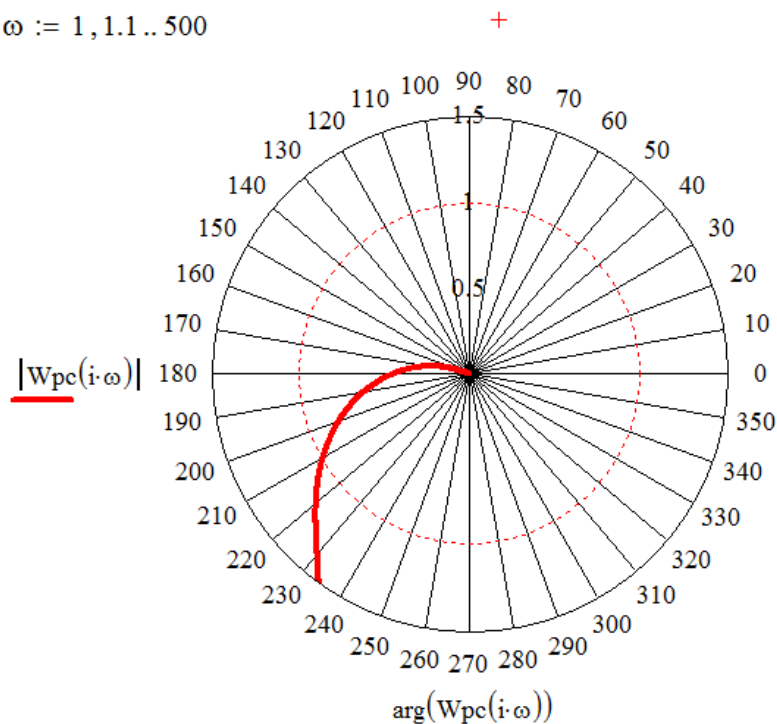


Рис. 3.8 – Годограф Найквиста

Рассчитаем и построим точную и асимптотическую логарифмическую амплитудную частотную характеристики (ЛАЧХ), точную логарифмическую фазовую частотную характеристику (ЛФЧХ) и определим запасы устойчивости САУ.

Точная ЛАЧХ:

$$G(\omega) := 20 \cdot \log(|W_{pc}(i \cdot \omega)|)$$

Асимптотическая ЛАЧХ может быть построена как сумма асимптотических ЛАЧХ звеньев, входящих в передаточную функцию разомкнутой цепи системы:

$G_0 := 20 \cdot \log(K_p)$ – ЛАЧХ пропорционального звена;

$G_1(\omega) := -20 \cdot \log(\omega)$ – ЛАЧХ интегрирующего звена;

$G_2(\omega) := \text{if}\left(\omega < \frac{1}{\tau_1}, 0, 20 \cdot \log(\omega \cdot \tau_1)\right)$ – ЛАЧХ 1-го форсирующего звена;

$G_3(\omega) := \text{if}\left(\omega < \frac{1}{\tau_3}, 0, 20 \cdot \log(\omega \cdot \tau_3)\right)$ – ЛАЧХ 2-го форсирующего звена;

$G_4(\omega) := \text{if}\left(\omega < \frac{1}{T_1}, 0, -20 \cdot \log(\omega \cdot T_1)\right)$ – ЛАЧХ инерционного звена;

$G_5(\omega) := \text{if}\left(\omega < \frac{1}{T_2}, 0, -40 \cdot \log(\omega \cdot T_2)\right)$ – ЛАЧХ колебательного звена;

$G_a(\omega) := G_0 + G_1(\omega) + G_2(\omega) + G_3(\omega) + G_4(\omega) + G_5(\omega)$ – расчетная формула для асимптотической ЛАЧХ.

Точная ЛФЧХ строится через сумму аргументов, каждый из которых должен изменяться в диапазоне от $-\pi$ до π , в противном случае ЛФЧХ будет претерпевать разрыв (чего быть не должно!). В данном случае она представлена суммой фазы интегрирующего звена (она равна $-\frac{\pi}{2}$) и аргументом для последовательного соединения остальных звеньев частотной передаточной функции разомкнутой цепи, то есть

$$F(\omega) := \arg \left[\frac{(\tau_1 \cdot i \cdot \omega + 1) \cdot (\tau_3 \cdot i \cdot \omega + 1)}{(T_1 \cdot i \cdot \omega + 1) \cdot [T_2^2 \cdot (i \cdot \omega)^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot i \cdot \omega + 1]} \right] - \frac{\pi}{2}$$

На рисунке 3.9 приведены асимптотическая ЛАЧХ (синяя сплошная линия), точная ЛАЧХ (красная пунктирная линия) и точная ЛФЧХ. При этом логарифмирование по оси частот производилось с помощью пункта **Log Scale** графического меню по оси абсцисс. Легко видеть, что точная и асимптотическая ЛАЧХ имеют максимальные отклонения на частотах сопряжения асимптотической ЛАЧХ.

$$\omega := 1, 1.1 \dots 999.9$$

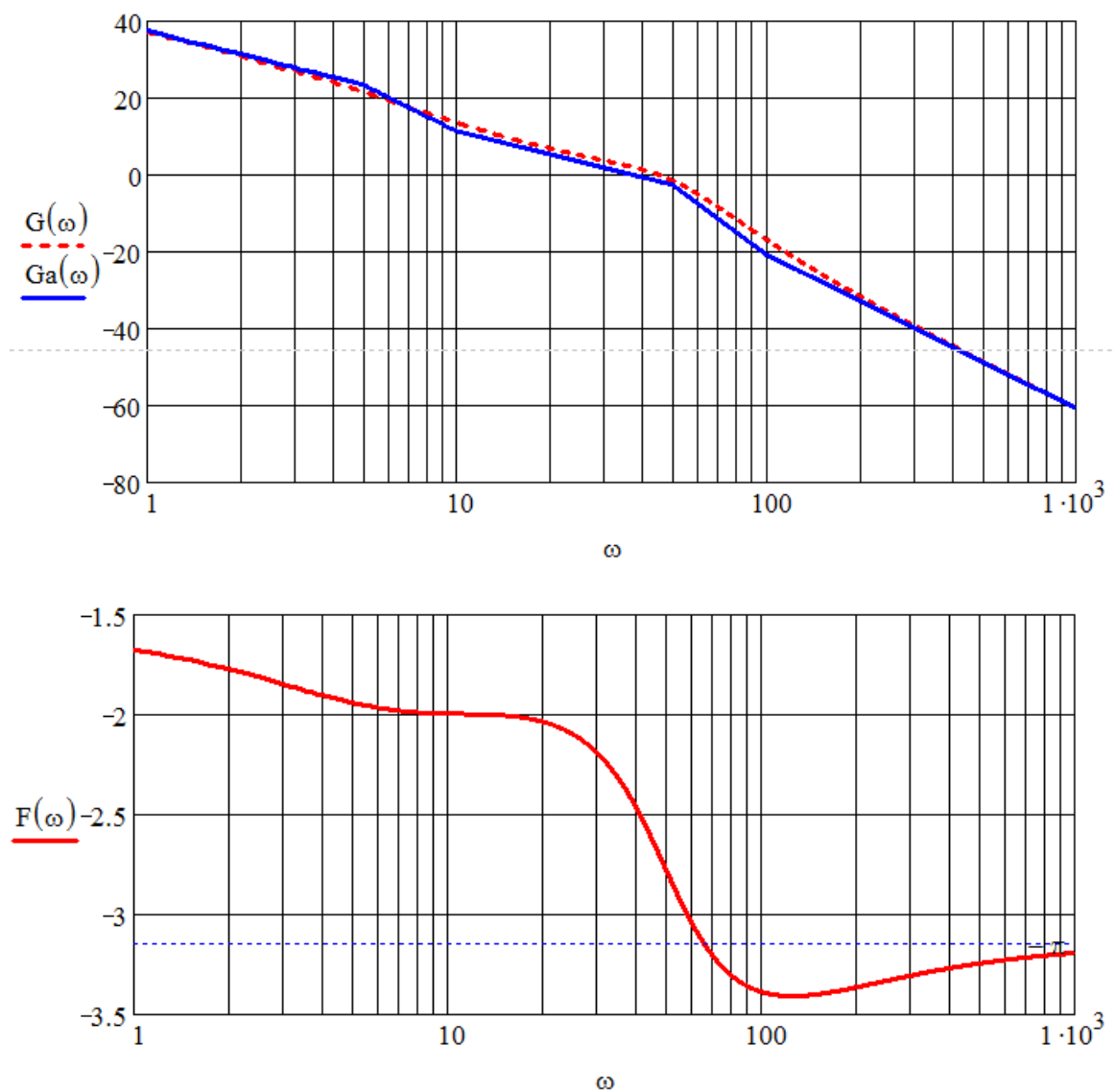


Рис. 3.9 – Логарифмические частотные характеристики САУ

Далее помощью функции **Find** рассчитаем частоты среза и переворота фазы (приближения взяты из графиков ЛАЧХ и ЛФЧХ):

Частоты среза и переворота фазы:

$$\omega := 40 \quad \text{Given} \quad G(\omega) = 0 \quad \omega_{\text{ср}} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{\text{ср}} = 44.609 \quad (\text{в рад/с})$$

$$\omega := 60 \quad \text{Given} \quad F(\omega) = -\pi \quad \omega_{\pi} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{\pi} = 65.767 \quad (\text{в рад/с})$$

Запас устойчивости по амплитуде:

$$\Delta G := |G(\omega_{\pi})| \quad \Delta G = 7 \quad (\text{в дБ})$$

Запас устойчивости по фазе:

$$\Delta F := (\pi + F(\omega_{\text{ср}})) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \Delta F = 30.681 \quad (\text{в градусах})$$

Запас устойчивости по амплитуде совпадает с его заданным значением, следовательно, все расчеты проведены правильно.

3.6 Расчет и построение амплитудной частотной характеристики замкнутой САУ по задающему воздействию

Передаточная функция замкнутой САУ по задающему воздействию и ее амплитудная частотная характеристика:

$$W_{\text{zg}}(p) := \frac{\frac{K_p}{k_{\text{ос}}} \cdot (\tau_1 \cdot p + 1) \cdot (\tau_3 \cdot p + 1)}{p \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot p + 1) + K_p \cdot (\tau_1 \cdot p + 1) \cdot (\tau_3 \cdot p + 1)}$$

Амплитудная частотная характеристика (АЧХ) замкнутой системы:

$$A(\omega) := |W_{\text{zg}}(i \cdot \omega)|$$

На рисунке 3.10 приведен график АЧХ по задающему воздействию для заданной САУ, а ниже определены ее основные показатели.

Частота (найдена с помощью функции **Find**, где начальное приближение взято из графика АЧХ) и период собственных колебаний переходной характеристики системы по задающему воздействию:

$$\omega := 50 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{d\omega} A(\omega) = 0 \quad \omega_k := \text{Find}(\omega) \quad \omega_k = 50.36 \quad \text{рад/с}$$

$$T_k := \frac{2 \cdot \pi}{\omega_k} \quad T_k = 0.125 \quad \text{с}$$

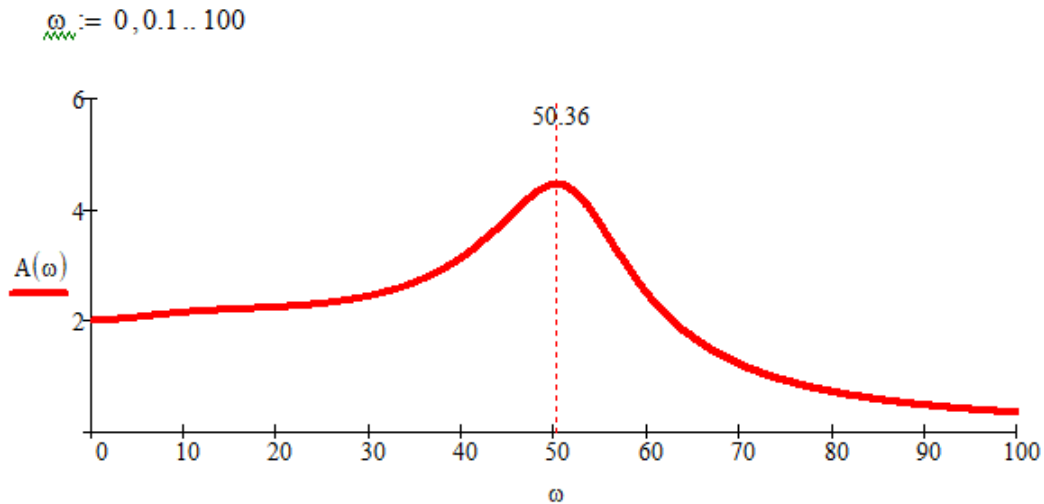


Рис. 3.10 – Амплитудная частотная характеристика САУ

Значение частоты собственных колебаний ω_k на рисунке 3.10 показано вертикальным маркером.

Максимальное значение амплитуды:

$$A_{\max} := A(\omega_k) \quad A_{\max} = 4.466$$

Показатель колебательности:

$$M := \frac{A_{\max}}{A(0)} \quad M = 2.233$$

Поскольку физически показатель колебательности примерно отражает количество колебаний переходной характеристики по задающему воздействию за время переходного процесса, то при известном их периоде можно оценить ожидаемое время переходного процесса (в секундах) по формуле:

$$tp_{go} := M \cdot T_k \quad tp_{go} = 0.279$$

3.7 Расчет и построение переходных характеристик заданной системы, определение основных показателей качества управления

Для расчета переходных характеристик систем автоматического управления удобнее всего использовать теоремы разложения [4]. Поскольку

чаще всего изображения выходных величин содержат нулевой и простые полюсы, то соответствующая теорема разложения имеет вид:

$$y(t) = x \left[\frac{D(0)}{A(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{D(p_k) e^{p_k t}}{p_k A'(p_k)} \right],$$

где x – какое-либо входное воздействие (задающее или возмущающее);

$D(0)$, $A(0)$ – числитель и знаменатель (характеристический полином)

передаточной функции, вычисленный при $p = 0$;

k – количество простых полюсов изображения выходной величины;

$D(p_k)$, $A'(p_k)$ – числитель передаточной функции и производная от характеристического полинома, вычисленные для k -го простого полюса p_k .

Первое слагаемое в теореме разложения определяет установившуюся составляющую переходного процесса, а вторая – свободную составляющую.

Характеристический полином САУ и вектор его коэффициентов:

$$\underline{A}(p) := p \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot p + 1) + K_p \cdot (\tau_1 \cdot p + 1) \cdot (\tau_3 \cdot p + 1)$$

$$\underline{a} := \begin{pmatrix} K_p \\ 1 + K_p \cdot \tau_1 + K_p \cdot \tau_3 \\ T_1 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 + K_p \cdot \tau_1 \cdot \tau_3 \\ 2 \cdot T_1 \cdot \xi \cdot T_2 + T_2^2 \\ T_1 \cdot T_2^2 \end{pmatrix}$$

Числители передаточных функций замкнутой САУ по задающему и возмущающему воздействиям, производная от характеристического полинома:

$$B(p) := \frac{K_p}{k_{oc}} \cdot (\tau_1 \cdot p + 1) \cdot (\tau_3 \cdot p + 1) \quad \underline{C}(p) := k_3 \cdot k_4 \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot p + 1)$$

$$Q(p) := \frac{d}{dp} A(p)$$

Вектор корней характеристического уравнения замкнутой САУ:

$$p := \text{polyroots}(a) \quad p = \begin{pmatrix} -27.44 \\ -12.256 \\ -7.652 + 51.603i \\ -7.652 - 51.603i \end{pmatrix}$$

Установившиеся значения выходной величины при подаче задающего g и возмущающего f воздействий:

$$y0g := gm \cdot \frac{B(0)}{A(0)} \quad y0g = 40 \quad y0f := y0g - fm \cdot \frac{C(0)}{A(0)} \quad y0f = 35.63$$

Переходная функция САУ по задающему воздействию:

$$yg(t) := y0g + gm \cdot \text{Re} \left(\sum_{k=0}^3 \frac{B(p_k) \cdot \exp(p_k \cdot t)}{p_k \cdot Q(p_k)} \right)$$

Момент подачи возмущающего воздействия (с):

$$t0 := 0.1.$$

Переходная функция САУ по возмущающему воздействию:

$$yf(t) := y0f - fm \cdot \text{Re} \left[\sum_{k=0}^3 \frac{C(p_k) \cdot \exp[p_k \cdot (t - t0)]}{p_k \cdot Q(p_k)} \right] \quad yf(t) := \text{if}(t < t0, y0g, yf(t))$$

На рисунке 3.11 показана переходная характеристика САУ по задающему воздействию, на которой вертикальными маркерами показаны время первого максимума на переходной характеристике (с) и время переходного процесса по задающему воздействию (определяются ниже).

Определим основные показатели качества управления САУ по задающему воздействию.

Время, соответствующее первому максимуму переходной характеристики (с) и величина этого максимума:

$$t := 0.07 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} yg(t) = 0 \quad tm1 := \text{Find}(t) \quad tm1 = 0.075$$

$$ygm1 := yg(tm1) \quad ygm1 = 55.723$$

$t := 0, 0.001 \dots 0.5$

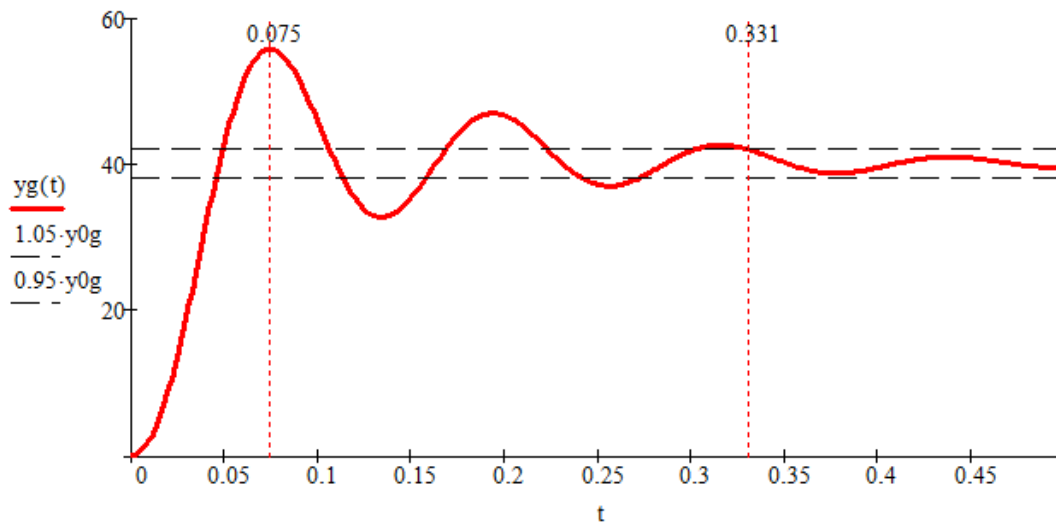


Рис. 3.11 – Переходная характеристика САУ по задающему воздействию

Перерегулирование (%) по задающему воздействию:

$$\sigma_z := \frac{y_{gm1} - y_{0g}}{y_{0g}} \cdot 100 \quad \sigma_z = 39.309$$

Время переходного процесса по задающему воздействию (с):

$$t := 0.33 \quad \text{Given} \quad y_g(t) = 1.05 \cdot y_{0g} \quad t_{pz} := \text{Find}(t) \quad t_{pz} = 0.331$$

На рисунке 3.12 приведена переходная характеристика САУ по возмущающему воздействию. На ней также вертикальными маркерами показаны время первого минимума на переходной характеристике (с) и время переходного процесса по возмущающему воздействию.

Время окончания переходного процесса по возмущающему воздействию (с):

$$t := 0.28 \quad \text{Given} \quad y_f(t) = 0.95 \cdot y_{0f} \quad t_{pv} := \text{Find}(t)$$

$$t_{pv} = 0.282 \quad t_{pv} := t_{pv} - t_0 \quad t_{pv} = 0.182$$

Время, соответствующее минимуму переходной характеристики САУ по возмущающему воздействию (с):

$$t := 0.15 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} y_f(t) = 0 \quad t_{min} := \text{Find}(t) \quad t_{min} = 0.148$$

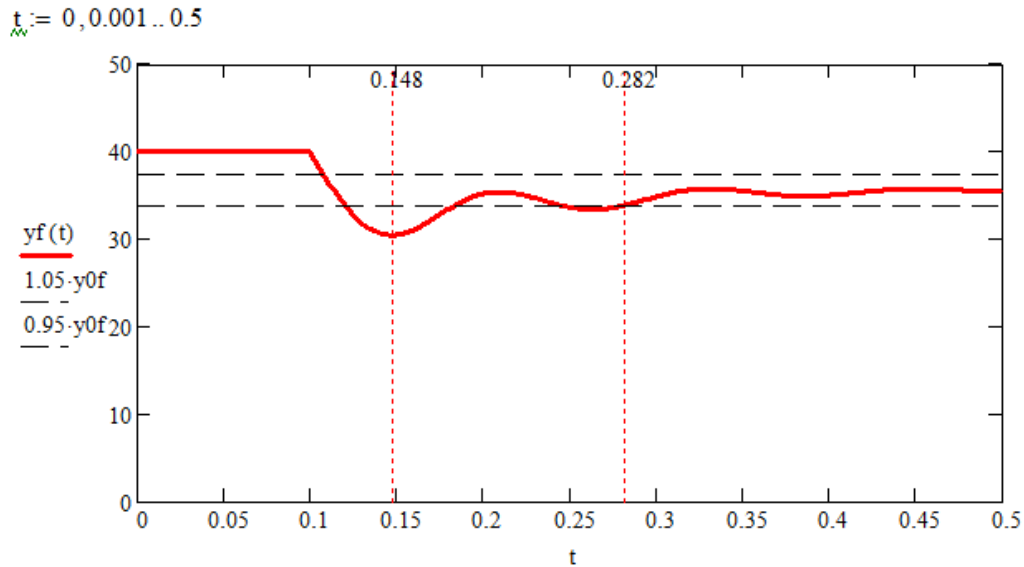


Рис. 3.12 – Переходная характеристика САУ
по возмущающему воздействию

Перерегулирование по возмущающему воздействию (%):

$$y_{fm} := y_f(t_{min}) \quad y_{fm} = 30.459 \quad \sigma_v := \frac{y_{0f} - y_{fm}}{y_{0f}} \cdot 100 \quad \sigma_v = 14.512$$

3.8 Расчет и построение внешней статической характеристики САУ

Для проведения статического расчета на основании теоремы о конечном значении оригинала в передаточных функциях замкнутой системы оператор Лапласа p заменяется на нуль. Тогда уравнения статики будут иметь вид:

$$y(g, f) = gW_{zg}(0) - fW_{zf}(0).$$

Значение выходной величины при отсутствии возмущающего воздействия и величина максимальной статической ошибки:

$$y_0 = g_m W_{zg}(p) \Big|_{p=0} = \frac{g_m}{k_{oc}}, \quad \Delta y = f_m W_{zf}(p) \Big|_{p=0} = f_m \frac{k_3 k_4}{K_p}.$$

Следует отметить, что подобные соотношения имеют место *только для систем, содержащих интегрирующее звено*. При отсутствии в САУ интегрирующего звена расчетные выражения будут другими.

Проведем необходимые расчеты:

$$y_0 := \frac{g_m}{k_{oc}} \quad y_0 = 40 \quad \Delta y_m := f_m \cdot \frac{k_3 \cdot k_4}{K_p} \quad \Delta y_m = 4.37$$

Статизм внешней статической характеристики САУ (%):

$$S := \frac{\Delta y}{y(0)} \cdot 100 \quad S = 10.93 \%$$

Так как $S > 5\%$, заданная система обладает низкой статической точностью и для ее увеличения (уменьшения статической ошибки) необходимо увеличивать коэффициент передачи разомкнутой цепи K_p . Для этого нужно увеличить коэффициент передачи k_1 , например, путем уменьшения постоянной времени T_2 (см. рис. 3.3).

Уравнение внешней статической характеристики САУ:

$$y(f) := \frac{g_m}{k_{oc}} - f \cdot \frac{k_3 \cdot k_4}{K_p}$$

На рисунке 3.13 изображена эта характеристика при изменении величины возмущающего воздействия от 0 до 25. Она линейная и значение $y(f)$ уменьшается с возрастанием возмущения.

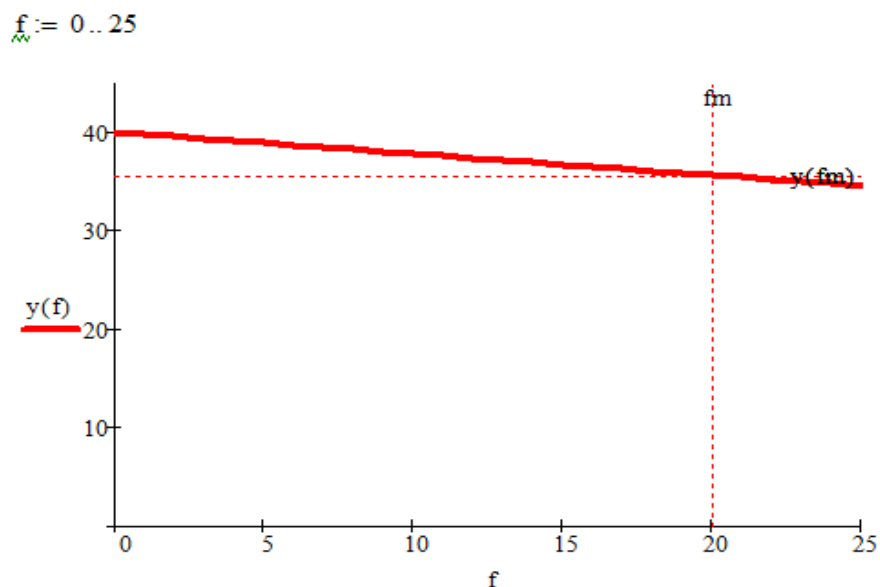


Рис. 3.13 – Внешняя статическая характеристика САУ

3.9 Электронное моделирование заданной САУ

Электронное моделирование заданной системы проводится в среде ASIMEC на основе опыта, полученного при выполнении лабораторных работ [4].

На рисунке 3.14 изображена схема лабораторной установки для исследования заданной САУ на ее электронной модели. Сама модель выполнена на операционных усилителях **DA1 – DA10**, реализующих устройства, представленные на структурной схеме системы (рис. 2.1).

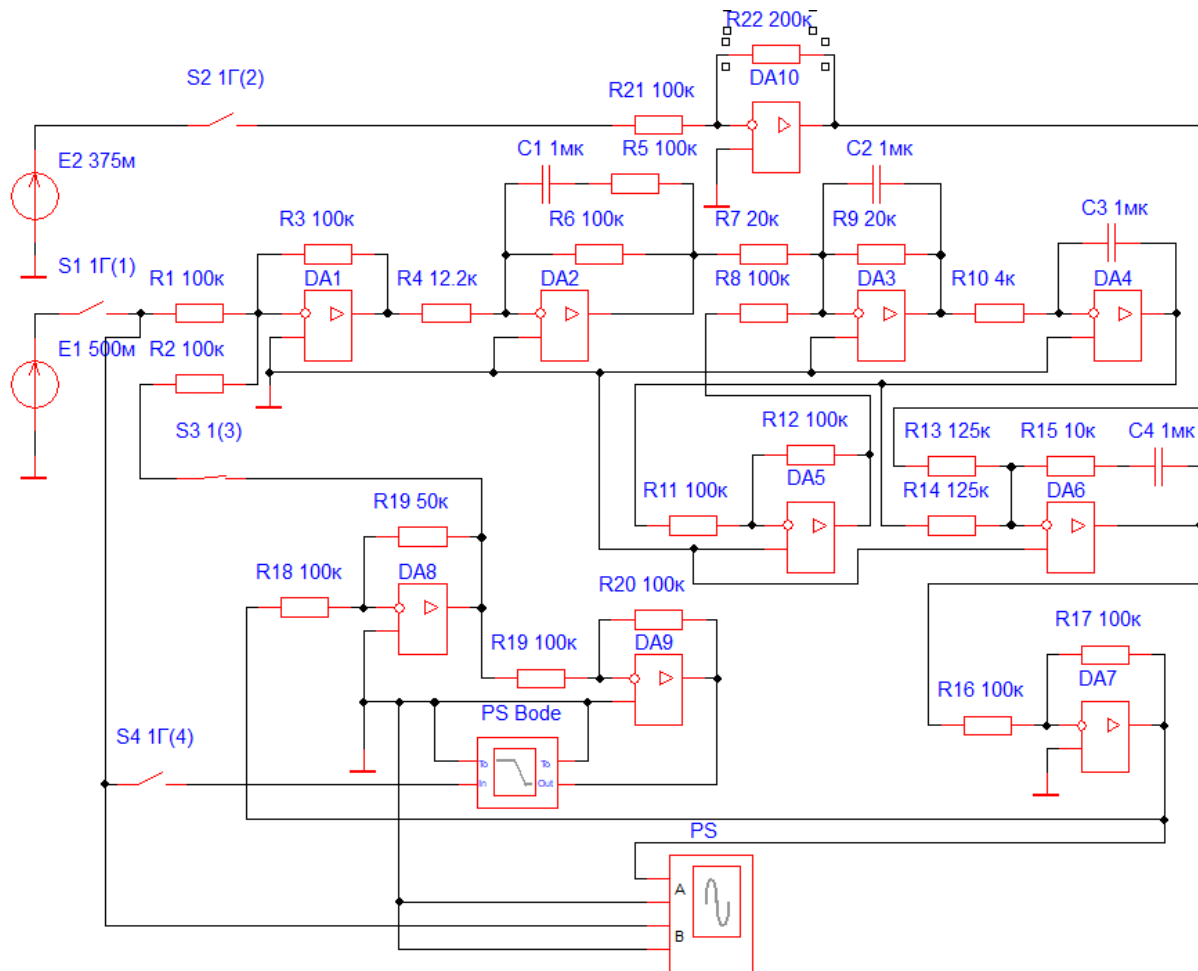


Рис. 3.14 – Схема лабораторной установки
для исследования заданной САУ на ее электронной модели

Сумматор входных сигналов выполнен на усилителе **DA1** с единичным коэффициентом передачи, т. е. сопротивления резисторов приняты равными $R_1 = R_2 = R_3 = 100 \text{ кОм}$.

Инерционное форсирующее звено выполнено на усилителе **DA2**, при этом емкость конденсатора $C_1 = 1 \text{ мкФ}$, а сопротивления резисторов

$$R_5 = \frac{\tau_1}{C_1} = 100 \text{ кОм}, \quad R_5 = \frac{T_1 - \tau_1}{C_1} = 100 \text{ кОм}.$$

Сопротивление резистора R_4 зависит от величины коэффициента передачи $k_1 = k_{1,гр} = 8,196$. При его гра-

$$\text{ничном значении } R_4 = R_{4,гр} = \frac{R_6}{k_{1,гр}} = 12,2 \text{ кОм}, \quad \text{а при } k_1 = \frac{k_{1,гр}}{\Delta G} = 3,661,$$

$$R_4 = \frac{R_6}{k_1} = 27,31 \text{ кОм}.$$

В колебательном звене, реализованном на усилителях **DA3 – DA5** $C_2 = C_3 = 1 \text{ мкФ}$, а $R_8 = R_{11} = R_{12} = 100 \text{ кОм}$, $R_7 = R_9 = 20 \text{ кОм}$, $R_{10} = 4 \text{ кОм}$.

Изодромное звено выполнено на усилителе **DA6**, здесь $C_4 = 1 \text{ мкФ}$,

$$R_{15} = \frac{\tau_3}{C_4} = 10 \text{ кОм}, \quad R_{13} = R_{14} = \frac{1}{k_3 C_4} = 125 \text{ кОм}.$$

Также, с целью обеспечения четного количества усилителей от источника задающего воздействия E_1 до выхода системы на усилителе **DA7** реализовано пропорциональное звено с единичным коэффициентом передачи, где $R_{16} = R_{17} = 100 \text{ кОм}$.

Пропорциональное звено, установленное в цепи обратной связи, выполнено на усилителе **DA8**, при этом $R_{18} = 100 \text{ кОм}$, а $R_{19} = \frac{R_{18}}{k_{oc}} = 50 \text{ кОм}$.

Выход этого усилителя через резистор R_2 подсоединен ко входу усилителя **DA1**, а через резистор $R_{19} = 100 \text{ кОм}$ – ко входу усилителя-инвертора **DA9**, где $R_{20} = 100 \text{ кОм}$.

На вход усилителя **DA6** через резистор R_{13} с выхода усилителя **DA10** поступает возмущающее воздействие. На этом усилителе реализовано пропорциональное звено с коэффициентом передачи $k_4 = 2$, при этом $R_{21} = 100 \text{ кОм}$, $R_{22} = \frac{R_{21}}{k_4} = 200 \text{ кОм}$.

Управление работой лабораторной установки осуществляется с помощью ключей S1–S4, сопротивление которых равно 1 ГОм в разоткнутом состоянии и 1 Ом – в замкнутом состоянии. Ключ S1 (управляется клавишей 1) подключает на вход усилителя **DA1** источник задающего напряжения E1, ключ S2 (управляется клавишей 2) подключает на вход усилителя **DA10** источник возмущающего воздействия E2, а ключ S3 (управляется клавишей 3) замыкает и размыкает обратную связь. Ключ S4 (управляется клавишей 4) подключает вход плоттера Бодэ **PS Bode** к управляющему входу модели, а выход этого плоттера подсоединен к выходу усилителя **DA9**. Осциллограф **PS** одним из входов подключен к выходу усилителя **DA7**, а его другой вход подсоединен к выходу ключа S1.

При работе модели в режиме временного анализа ключ S3 замкнут, а ключи S1 и S2 разомкнуты в исходном состоянии и замыкаются в процесса проведения анализа, ключ S4 разомкнут. При работе модели в режиме частотного анализа ключ S4 замкнут, а остальные ключи разомкнуты.

Установившееся значение выходного напряжения при отсутствии возмущения выбрано равным 1 В, поэтому напряжение источника задающего воздействия $E_1 = \frac{1}{W_{3g}(0)} = k_{oc} = 0,5 \text{ В}$. Напряжение источника возмущающего воздействия выбирается из пропорции: если $f_m = 15$, то $\Delta y = 3,278$,

если $E_2 = x$, то $\Delta U_{\text{вых}} = \frac{S}{100} = \frac{8,198}{100} = 0,08198 \text{ В}$, отсюда

$$E_2 = \frac{f_m \cdot \Delta U_{\text{вых}}}{\Delta y} = \frac{15 \cdot 0,08192}{3,278} \approx 0,375 \text{ В}.$$

Примечание 3. Если в заданной системе отсутствует интегрирующее звено, то задающее напряжение следует рассчитывать по формуле:

$$E_1 = \frac{K_p / k_{oc}}{1 + K_p}.$$

Приступим к исследованиям САУ на ее модели, начиная работы на границе устойчивости при $R_4 = R_{4,гр} = 12,2$ кОм. На рисунке 3.15 приведена осциллограмма выходного напряжения модели при замыкании ключа S1. Это напряжение имеет вид незатухающих колебаний, амплитуда которых не превышает 2 В, что подтверждает правильность расчета параметров модели.

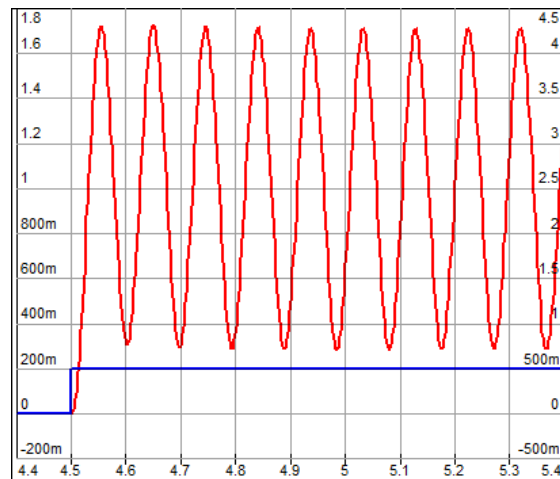
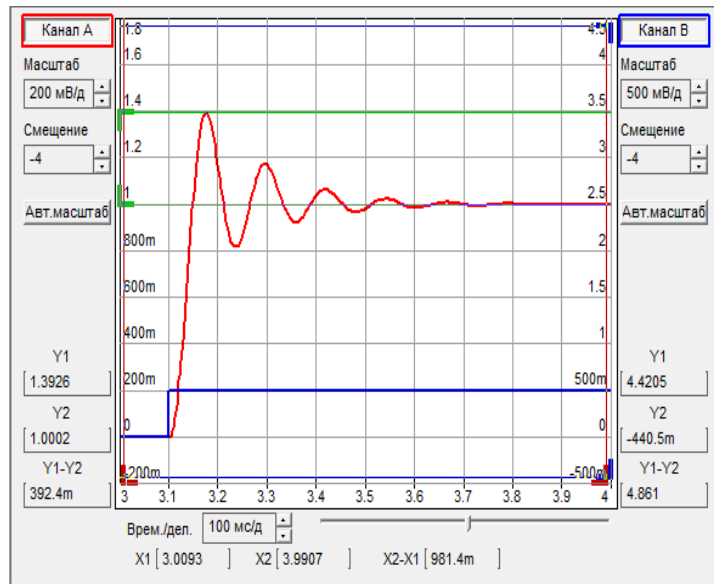


Рис. 3.15 – Осциллограмма выходного напряжения модели САУ на границе ее устойчивости

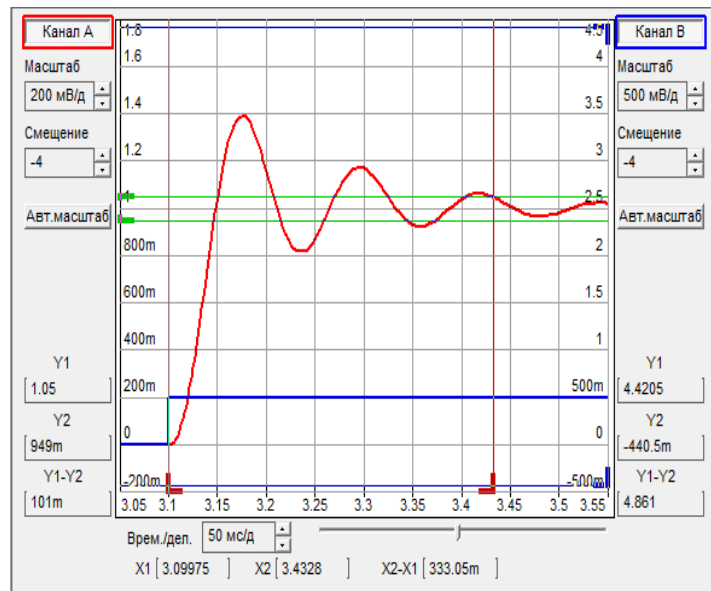
На рисунке 3.16 приведена осциллограмма выходного напряжения модели САУ для $R_4 = 27,31$ кОм при подаче на ее вход задающего напряжения $E_1 = 0,5$ В (замыкании ключа S1). Его установившееся воздействие (см. положение нижнего маркера на рисунке 3.16, а) $U_{уст0} = 1$ В, максимальное значение (см. положение верхнего маркера на рисунке 3.16, а) $U_{max} \approx 1,393$ В, тогда перерегулирование по задающему воздействию

$$\sigma_{з,м} = \frac{U_{max} - U_{уст0}}{U_{уст0}} \cdot 100 = 39,3\%.$$

Время переходного процесса (рис. 3.16, б) определяется правее третьего максимума при достижении выходным напряжением уровня $1,05U_{уст0} = 1,05 \text{ В}$, т. е. время переходного процесса по задающему воздействию $t_{п,з} \approx 0,333 \text{ с}$.



а

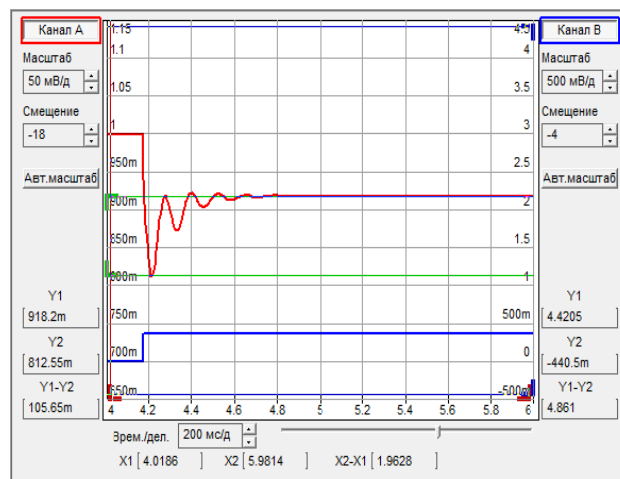


б

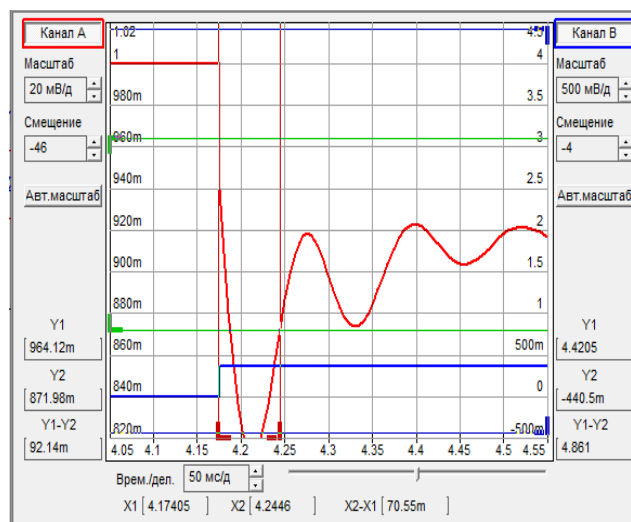
Рис. 3.16 – Измерение перерегулирования (а) и времени переходного процесса по задающему воздействию (б)

Замкнем ключ S1, дождемся окончания переходного процесса и замкнем ключ S2, подав на вход модели возмущающее воздействие $E_2 = 0,375 \text{ В}$.

Вторая половина этого процесса показана на рисунке 3.17. Новое установившееся значение выходного напряжения (см. положение верхнего маркера на рисунке 3.17, а) $U_{уст1} \approx 0,918 \text{ В}$, его минимальное значение (см. положение нижнего маркера на рис. 3.17, а) $U_{\min} \approx 0,813 \text{ В}$, тогда перерегулирование по возмущающему воздействию $\sigma_{в,м} = \frac{U_{уст1} - U_{\min}}{U_{уст1}} \cdot 100 \approx 11,3\%$.



a



б

Рис. 3.17 – Измерение перерегулирования (*a*)
и времени переходного процесса по возмущающему воздействию (*б*)

Время переходного процесса по возмущающему воздействию (рис. 3.17, б) определяется правее первого минимума при достижении выходным напряжением уровня $0,95U_{уст1} = 0,872 \text{ В}$, т. е. время переходного процесса по возмущающему воздействию $t_{пп,в} \approx 0,071 \text{ с}$.

На рисунке 3.18 представлены ЛАЧХ и ЛФЧХ системы в области частот среза и переворота фазы. Для этого размыкаются ключи S1–S3 и замыкается ключ S4. Частота среза (рис. 3.18, а) $\omega_{ср,м} = 2\pi f_{ср,м} = 2\pi \cdot 7.092 \approx 44,56 \text{ рад/с}$, фаза на частоте среза $\varphi_{ср,м} \approx -149,2^\circ$, запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi_m = 180 + \varphi_{ср,м} = 30,8^\circ$.

Частота переворота фазы (рис. 3.18, б) $\omega_{\pi,м} = 2\pi f_{\pi,м} = 2\pi \cdot 10,47 \approx 65,79 \text{ рад/с}$, запас устойчивости по амплитуде $\Delta G_m = |G(\omega_\pi)| = 7,009 \text{ дБ}$.

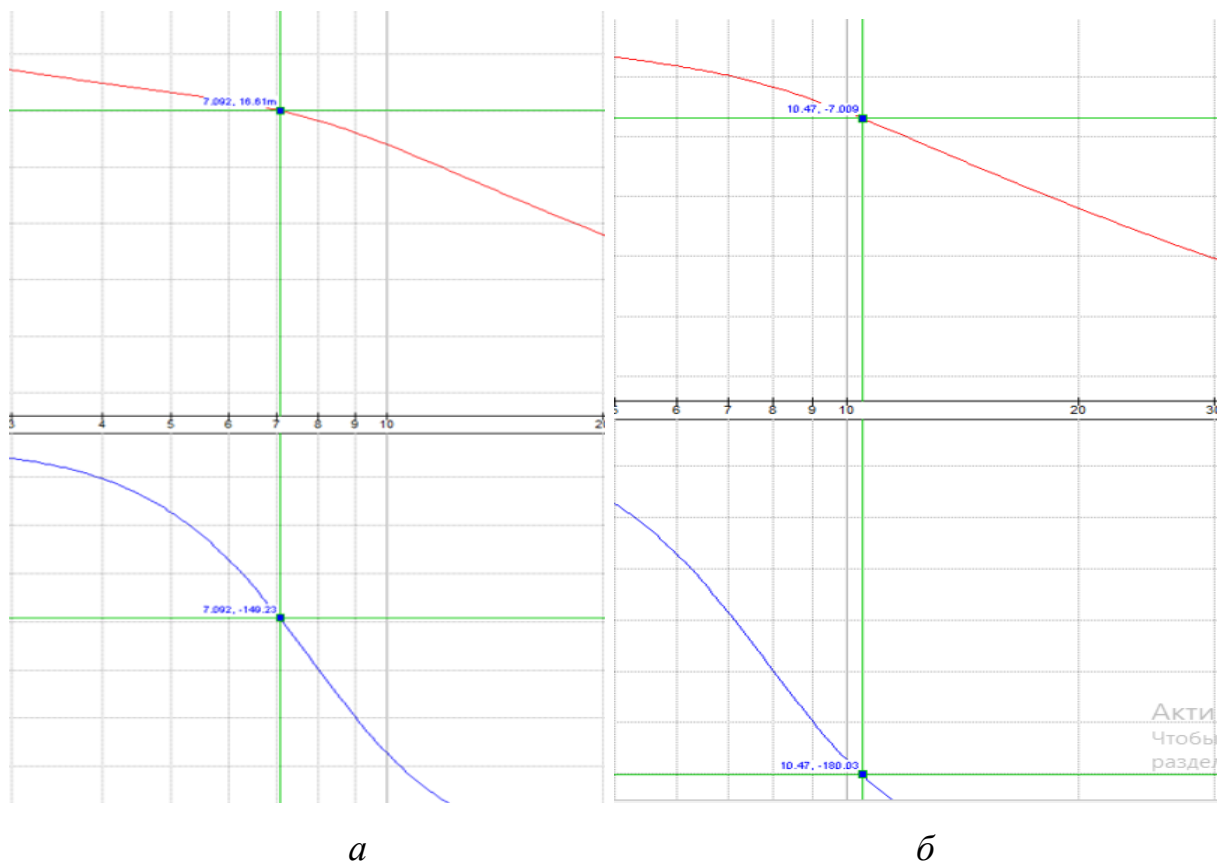


Рис. 3.18 – ЛАЧХ и ЛФЧХ заданной системы

Примечание 4. Следует отметить, что при определении значения частоты среза линия горизонтальной шкалы, соответствующая нулевому значению на ЛАЧХ, фактически не является нулем, за нуль следует принимать положение маркера, соответствующее минимальному (по модулю) значению цифры, расположенной правее значения частоты.

Оценим относительную погрешность моделирования по формуле:

$$\delta x = \frac{x_p - x_m}{x_p} \cdot 100,$$

где x – измеряемая величина, x_p , x_m – ее значения, полученные в результате расчета и моделирования соответственно.

Для задающего воздействия по перерегулированию:

$$\delta\sigma_z = \frac{\sigma_z - \sigma_{z,m}}{\sigma_z} \cdot 100 = \frac{39,309 - 39,3}{39,309} \cdot 100 \approx 0,023\%,$$

по времени переходного процесса:

$$\delta t_{\text{пз}} = \frac{t_{\text{pz}} - t_{\text{пз,м}}}{t_{\text{pz}}} \cdot 100 = \frac{0,331 - 0,333}{0,331} \cdot 100 \approx -0,005\%.$$

Для возмущающего воздействия по перерегулированию:

$$\delta\sigma_v = \frac{\sigma_v - \sigma_{v,m}}{\sigma_v} \cdot 100 = \frac{10,56 - 11,3}{10,56} \cdot 100 \approx -7\%,$$

по времени переходного процесса:

$$\delta t_{\text{пв}} = \frac{t_{\text{pv}} - t_{\text{пв,м}}}{t_{\text{pv}}} \cdot 100 = \frac{0,079 - 0,071}{0,079} \cdot 100 \approx 10,1\%.$$

Для частот среза и переворота фазы:

$$\delta\omega_{\text{ср}} = \frac{\omega_{\text{ср}} - \omega_{\text{ср,м}}}{\omega_{\text{ср}}} \cdot 100 = \frac{44,609 - 44,56}{44,609} \cdot 100 \approx 0,11\%,$$

$$\delta\omega_{\pi} = \frac{\omega_{\pi} - \omega_{\pi,m}}{\omega_{\pi}} \cdot 100 = \frac{65,767 - 65,79}{65,767} \cdot 100 \approx -0,035\%.$$

Для запасов устойчивости по амплитуде и фазе:

$$\delta\Delta G = \frac{\Delta G - \Delta G_{\text{м}}}{\Delta G} \cdot 100 = \frac{7 - 7,009}{7} \cdot 100 \approx -0,13\%,$$

$$\delta\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi - \Delta\varphi_{\text{м}}}{\Delta\varphi} \cdot 100 = \frac{30,681 - 30,8}{30,681} \cdot 100 \approx -0,39\%.$$

Знак «минус» в полученных выражениях означает превышение значения рассматриваемого параметра, полученного при моделировании, над его расчетным значением.

Выводы:

- Результаты моделирования по задающему воздействию и в частотной области отличаются высокой точностью, погрешность моделирования не превышает 0,5%.
- Результаты моделирования по возмущающему воздействию намного менее точны, вследствие малости полученных величин и дискретности перемещения маркеров.

3.10 Коррекция динамических характеристик САУ

Заданная система имеет не лучшие показатели качества регулирования в ее динамических режимах работы (перерегулирование по задающему воздействию $\sigma_z > 33\%$ и время переходного процесса по задающему воздействию $t_{pz} \approx 0,33$ с). Их необходимо улучшить путем введения в структуру заданной САУ последовательно корректирующего устройства с передаточной функцией $W_k(p)$.

Методика этого процесса подробно изложена в [2, 3]: на основании проектных параметров строится желаемая ЛАЧХ САУ, из которой путем вычитания ЛАЧХ нескорректированной системы получается ЛАЧХ корректирующего устройства, и по наклонам участков этой ЛАЧХ синтезируются передаточная функция корректирующего устройства $W_k(p)$ и ее реализация, например, на операционных усилителях.

Построение желаемой ЛАЧХ поводится с помощью номограмм Солодовникова, из которых для заданных значений перерегулирования определяются параметры λ и L_g , необходимые для построения желаемой ЛАЧХ. С целью удобства пользования значения этих параметров для некоторых значений перерегулирования приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры последовательной коррекции

σ , %	20	25	30	35	40	45
λ	2,5	3,1	3,6	4,1	4,5	5,2
L_g , дБ	20	15	13	12	10	8

Основное требование к желаемой ЛАЧХ – на частоте среза она должна иметь наклон -20 дБ/дек, а после этой частоты – наклоны -40 дБ/дек и -60 дБ/дек. Низкочастотная часть этой ЛАЧХ, как удобно, стыкуется с ЛАЧХ нескорректированной системы.

Заданные показатели качества управления для скорректированной САУ:

$$t_{pc} := 0.11 \quad c \quad \sigma_c := 20 \%$$

Параметры желаемой ЛАЧХ (из табл. 3.1):

$$\lambda := 2.5 \quad L_g := 20 \text{ дБ}$$

Частота среза (рад/с), через которую должна проходить желаемая ЛАЧХ:

$$\omega_{cp} := \frac{\lambda \cdot \pi}{t_{pc}} \quad \omega_{cp} = 71.4$$

Варьируемые частоты, на которых желаемая ЛАЧХ меняет наклон на -40 и -60 дБ/дек (первое приближение):

$$\omega_1 := 200 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad \omega_2 := 300 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Отрезок желаемой ЛАЧХ, проходящий с наклоном -20 дБ/дек через рассчитанную выше частоту среза:

$$G_{x1}(\omega) := 20 \cdot \log\left(\frac{\omega_{cp}}{\omega}\right)$$

Отрезки желаемой ЛАЧХ, имеющие наклон -40 дБ/дек и -60 дБ/дек после частоты среза:

$$G_{x2}(\omega) := 40 \cdot \log\left(\frac{\omega_1}{\omega}\right) + G_{x1}(\omega_1)$$

$$G_{x3}(\omega) := 60 \cdot \log\left(\frac{\omega_2}{\omega}\right) + G_{x2}(\omega_2)$$

Операторы, выделенные рамкой, являются шаблонами при выполнении курсовой работы.

Построение желаемой ЛАЧХ и ЛАЧХ корректирующего устройства:

$$G_{g1}(\omega) := \text{if}\left(\omega < \frac{1}{T_1}, G_a(\omega), G_{x1}(\omega)\right)$$

$$G_{g2}(\omega) := \text{if}(\omega < \omega_1, G_{g1}(\omega), G_{x2}(\omega))$$

$$G_g(\omega) := \text{if}(\omega < \omega_2, G_{g2}(\omega), G_{x3}(\omega))$$

$$G_k(\omega) := G_g(\omega) - G_a(\omega)$$

На рисунке 3.19 приведено все семейство ЛАЧХ. Уровень L_g – синяя пунктирная прямая, черная линия – ЛАЧХ нескорректированной системы, зеленая прямая соответствует отрезку желаемой ЛАЧХ, проходящему через частоту среза, коричневая линия – желаемая ЛАЧХ, красная линия – ЛАЧХ корректирующего устройства.

Анализируя поведение ЛАЧХ корректирующего устройства, имеющую последовательность наклонов $+20, 0, +40, +20, 0, -20$ дБ/дек можно сделать вывод о том, что это устройство содержит в своей структуре три форсирующих и четыре инерционных звена, т. е. представляет собой четырехзвенный фильтр с передаточной функцией:

$$W_k(p) = \frac{(\tau_{k1} \cdot p + 1) \cdot (\tau_{k2} \cdot p + 1)^2}{(T_{k1} \cdot p + 1) \cdot (T_{k2} \cdot p + 1) \cdot (T_{k3} \cdot p + 1) \cdot (T_{k4} \cdot p + 1)},$$

$$\text{где } \tau_{k1} := T_1 \quad T_{k1} := \tau_1 \quad \tau_{k2} := T_2 \quad T_{k2} := \tau_3 \quad T_{k3} := \frac{1}{\omega_1} \quad T_{k4} := \frac{1}{\omega_2}$$

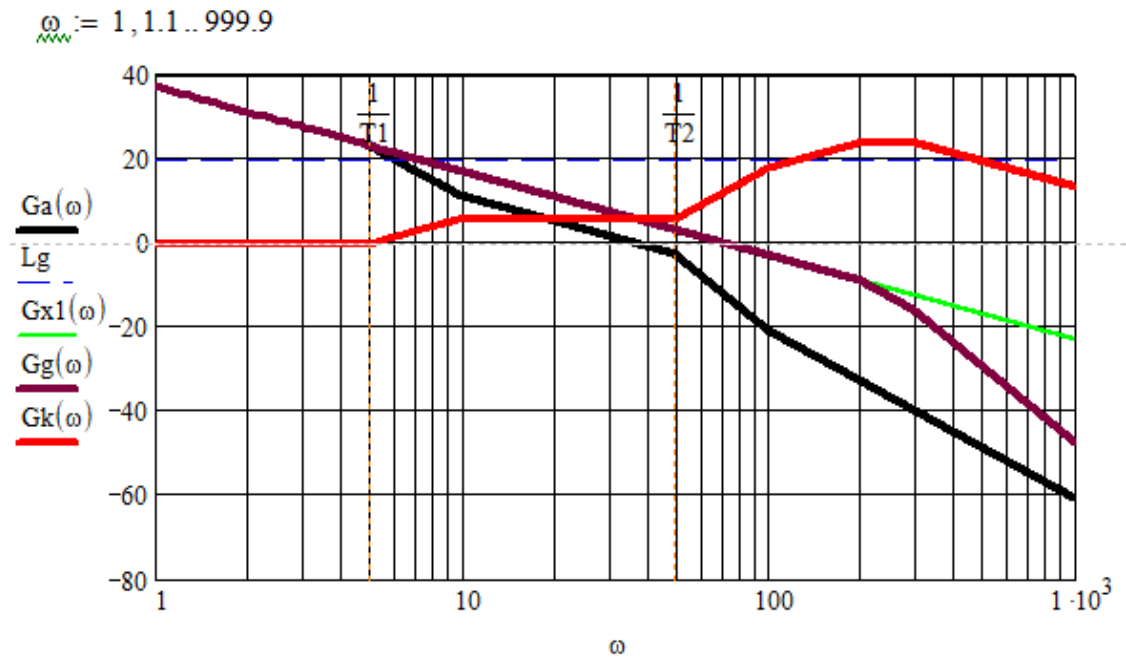


Рис. 3.19 – ЛАЧХ нескорректированной САУ,
желаемая ЛАЧХ и ЛАЧХ корректирующего устройства

Иначе

$$W_k(p) := \frac{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1)^2}{(\tau_1 \cdot p + 1) \cdot (\tau_3 \cdot p + 1) \cdot (T_k3 \cdot p + 1) \cdot (T_k4 \cdot p + 1)}$$

Определим для скорректированной системы передаточную функцию разомкнутой цепи и передаточную функцию системы, замкнутой по задающему воздействию:

$$W_{psc}(p) = \frac{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1)^2}{(\tau_1 \cdot p + 1) \cdot (\tau_3 \cdot p + 1) \cdot (T_k3 \cdot p + 1) \cdot (T_k4 \cdot p + 1)} \cdot \frac{K_p \cdot (\tau_1 \cdot p + 1) \cdot (\tau_3 \cdot p + 1)}{p \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot p + 1)}$$

$$W_{psc}(p) = \frac{(T_2 \cdot p + 1)^2}{(T_k3 \cdot p + 1) \cdot (T_k4 \cdot p + 1)} \cdot \frac{K_p}{p \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot p + 1)}$$

$$W_{zgc}(p) = \frac{\frac{(T_2 \cdot p + 1)^2}{(T_k3 \cdot p + 1) \cdot (T_k4 \cdot p + 1)} \cdot \frac{K_p}{\cos}}{1 + \frac{(T_2 \cdot p + 1)^2}{(T_k3 \cdot p + 1) \cdot (T_k4 \cdot p + 1)} \cdot \frac{K_p}{p \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot p + 1)}}$$

$$W_{zgc}(p) = \frac{\frac{K_p}{k_{oc}} \cdot (T_2 \cdot p + 1)^2}{p \cdot (T_{k3} \cdot p + 1) \cdot (T_{k4} \cdot p + 1) \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot p + 1) + K_p \cdot (T_2 \cdot p + 1)^2}$$

Проведем предварительный расчет переходной характеристики скорректированной САУ.

Числитель ее передаточной функции, характеристический полином и производная от него, вектор коэффициентов характеристического полинома и вектор значений простых полюсов ее передаточной функции:

$$B_c(p) := \frac{K_p}{k_{oc}} \cdot (T_2 \cdot p + 1)^2$$

$$A_c(p) := p \cdot (T_{k3} \cdot p + 1) \cdot (T_{k4} \cdot p + 1) \cdot (T_2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_2 \cdot p + 1) + K_p \cdot (T_2 \cdot p + 1)^2$$

$$Q_c(p) := \frac{d}{dp} A_c(p)$$

$$ac := \left(\begin{array}{c} K_p \\ \hline 2 \cdot K_p \cdot T_2 + 1 \\ 2 \cdot \xi \cdot T_2 + T_{k4} + T_{k3} + K_p \cdot T_2^2 \\ T_{k3} \cdot T_{k4} + 2 \cdot T_{k4} \cdot \xi \cdot T_2 + T_2^2 + 2 \cdot T_{k3} \cdot \xi \cdot T_2 \\ T_{k4} \cdot T_2^2 + T_{k3} \cdot T_2^2 + 2 \cdot T_{k3} \cdot T_{k4} \cdot \xi \cdot T_2 \\ T_{k3} \cdot T_{k4} \cdot T_2^2 \end{array} \right)$$

$$pc := \text{polyroots}(ac) \quad pc = \left(\begin{array}{c} -362.766 \\ -113.657 \\ -26.737 \\ -23.42 + 97.028i \\ -23.42 - 97.028i \end{array} \right)$$

Переходная функция и переходная характеристика (рис. 3.20):

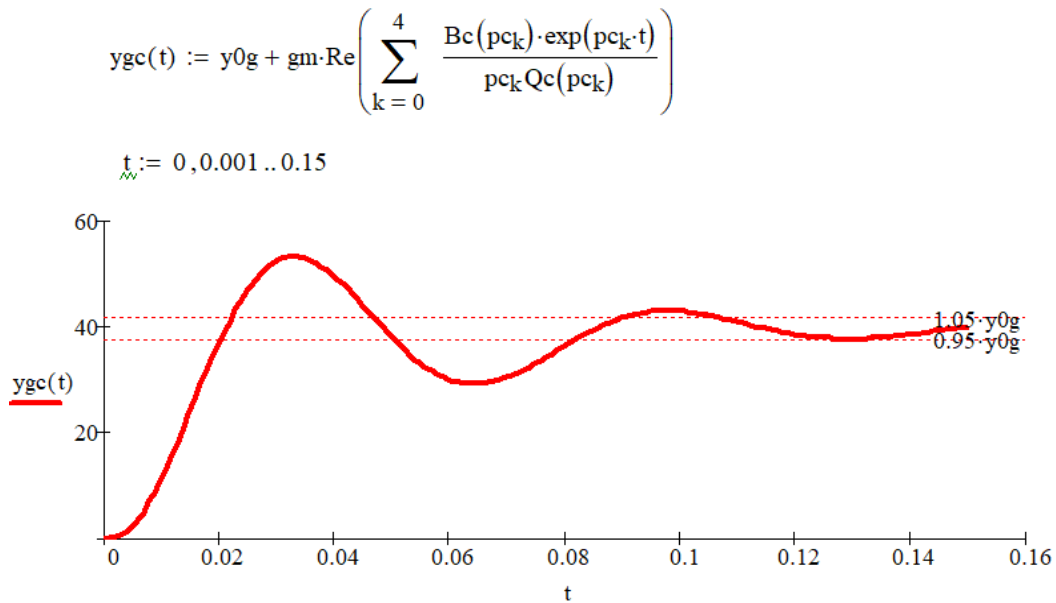


Рис. 3.20 – Переходная характеристика скорректированной САУ
(первое приближение)

Определим перерегулирование по задающему воздействию для скорректированной системы:

$$t := 0.033 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} ygc(t) = 0 \quad tmc := \text{Find}(t)$$

$$tmc = 0.033 \quad ygc(tmc) = 53.324$$

$$\sigma_c := \frac{ygc(tmc) - y0g}{y0g} \quad \sigma_c = 33.309\%$$

Перерегулирование намного превышает заданное значение, поэтому увеличивая варьируемые частоты ω_1 и ω_2 путем выполнения нескольких итераций, добьемся результата $\sigma_c \approx 20\%$ и определим время переходного процесса.

Окончательный расчет переходной характеристики:

$$\omega_1 := 320 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad \omega_2 := 428 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad Tk3 := \frac{1}{\omega_1} \text{ с} \quad Tk4 := \frac{1}{\omega_2} \text{ с}$$

$$Ac(p) := p \cdot (Tk3 \cdot p + 1) \cdot (Tk4 \cdot p + 1) \cdot (T2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T2 \cdot p + 1) + Kp \cdot (T2 \cdot p + 1)^2$$

$$\begin{aligned}
 \underline{Qc}(p) &:= \frac{d}{dp} \underline{Ac}(p) \\
 \underline{ac} &:= \begin{pmatrix} K_p \\ 2 \cdot K_p \cdot T_2 + 1 \\ 2 \cdot \xi \cdot T_2 + T_{k4} + T_{k3} + K_p \cdot T_2^2 \\ T_{k3} \cdot T_{k4} + 2 \cdot T_{k4} \cdot \xi \cdot T_2 + T_2^2 + 2 \cdot T_{k3} \cdot \xi \cdot T_2 \\ T_{k4} \cdot T_2^2 + T_{k3} \cdot T_2^2 + 2 \cdot T_{k3} \cdot T_{k4} \cdot \xi \cdot T_2 \\ T_{k3} \cdot T_{k4} \cdot T_2^2 \end{pmatrix} \\
 \underline{pc} &:= \text{polyroots}(\underline{ac}) \quad \underline{pc} = \begin{pmatrix} -516.392 \\ -174.85 \\ -40.371 - 95.093i \\ -40.371 + 95.093i \\ -26.017 \end{pmatrix} \\
 \underline{ygc}(t) &:= y_{0g} + g_m \cdot \text{Re} \left(\sum_{k=0}^4 \frac{Bc(p_{ck}) \cdot \exp(p_{ck} \cdot t)}{p_{ck} Qc(p_{ck})} \right)
 \end{aligned}$$

На рисунке 3.21 приведена переходная характеристика скорректированной САУ. Определим перерегулирование и время переходного процесса в этой системе:

$$t := 0.03 \quad \text{Given} \quad \frac{d}{dt} ygc(t) = 0 \quad \underline{tmc} := \text{Find}(t)$$

$$tmc = 0.03 \quad ygc(tmc) = 47.996$$

$$\underline{\sigma_c} := \frac{yg_c(tmc) - y_{0g}}{y_{0g}} \quad \sigma_c = 19.991\%$$

Время переходного процесса (с)

$$\underline{t} := 0.08 \quad \text{Given} \quad ygc(t) = 0.95 \cdot y_{0g} \quad \underline{tpc} := \text{Find}(t) \quad tpc = 0.08$$

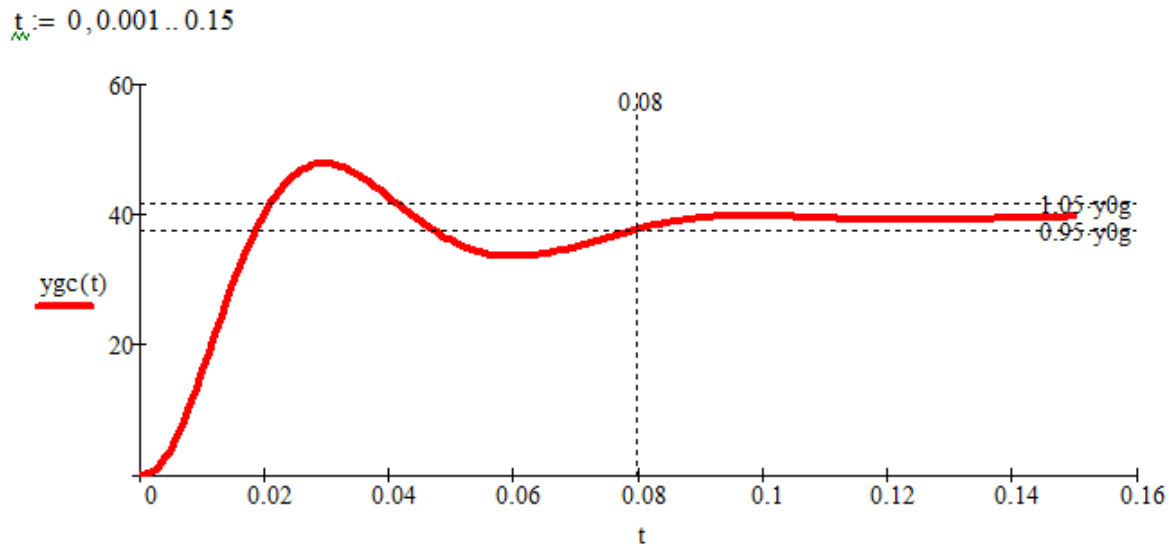


Рис. 3.21 – Переходная характеристика скорректированной САУ
(окончательный вариант)

Таким образом, заданная система путем осуществления последовательной коррекции на заданное перерегулирование настроена на требуемые показатели качества управления, при этом время переходного процесса меньше заданного значения. В качестве корректирующего устройства применен четырехзвенный фильтр с тремя инерционными форсирующими и одним инерционным звеном. Принципиальная схема этого фильтра приведена на рисунке 3.22. На операционных усилителях DA1 – DA3 реализованы инерционные форсирующие звенья, постоянные времени форсирующих звеньев $\tau_{k1} - \tau_{k3}$ которых больше постоянных времени инерционных звеньев $T_{k1} - T_{k3}$. На операционном усилителе DA4 реализовано инерционное звено с постоянной времени T_{k4} . Коэффициенты передачи $k_1 - k_4$ каждого из звеньев равны единице. Это означает, что $R_3 = R_1$, $R_6 = R_4$, $R_9 = R_7$, $R_{11} = R_{10}$.

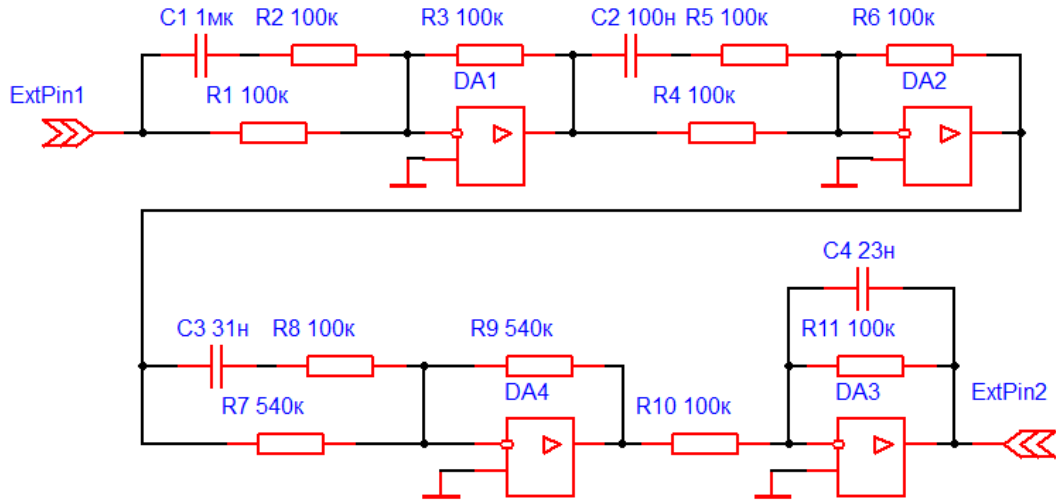


Рис. 3.22 – Схема корректирующего устройства

Номиналы остальных элементов определяются следующим образом.

Примем $R_2 = R_5 = R_8 = R_{10} = R_{11} = 100 \text{ кОм}$, тогда $C_1 = \frac{\tau_1}{R_2} = 1 \text{ мкФ}$,

$$C_2 = \frac{\tau_3}{R_2} = 0,1 \text{ мкФ}, \quad C_3 = \frac{\tau_{к3}}{R_8} = \frac{1}{\omega_1 R_8} \approx 0,031 \text{ мкФ},$$

$$C_4 = \frac{\tau_{к4}}{R_{11}} = \frac{1}{\omega_2 R_8} \approx 0,023 \text{ мкФ}, \quad R_1 = \frac{T_1 - \tau_1}{C_1} = 100 \text{ кОм}, \quad R_3 = R_1 = 100 \text{ кОм},$$

$$R_4 = \frac{T_2 - \tau_3}{C_2} = 100 \text{ кОм}, \quad R_6 = R_4 = 100 \text{ кОм}, \quad R_7 = \frac{T_2 - \tau_{к3}}{C_3} = 540 \text{ кОм},$$

$$R_9 = R_7 = 540 \text{ кОм}.$$

4 ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ И ЕЕ ОЦЕНКА

Курсовая работа представляется в виде текстового и расчетного файлов, а также файла, выполненного в среде ASIMEC и соответствующего электронному моделированию заданной системы.

Структура текстового файла включает:

- задание на курсовую работу;
- вывод передаточных функций четырехполюсника и заданной системы;
- графический материал, полученный в расчетном файле, и выводы по результатам расчетов.

Расчетный файл выполняется в среде Mathcad (в текстовом файле указывается его версия), в котором все расчеты сопровождаются текстовыми комментариями.

При выполнении расчетного файла рекомендуется:

- не применять кириллицу. Следует использовать **только** латинский и греческий алфавиты;
- избегать применения в скалярных переменных подстрочных индексов (переменную можно спутать с компонентой массива).

Курсовая работа должна быть выполнена в соответствии с ОС ТУСУР 01-2021 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления» (<https://regulations.tusur.ru/documents/70>).

Рекомендуемый объем курсовой работы – 8–10 страниц (без учета приложений). Работа выполняется с использованием компьютера на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (210x297 мм).

Форматирование текста: шрифт Times New Roman, цвет – черный, размер – 14 пт, межстрочный интервал – 1,5.

Основной текст и заголовки выравниваются по ширине, размеры полей: левое – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм. Абзацный отступ – 1,25 см. Выравнивание текста производится по ширине страницы.

Рисунки (кроме структурных схем) представляются в растровом виде из расчетного файла. Исходные данные для работы представляются в виде таблиц, выполненных в произвольной форме. Для написания формул используется редактор формул, например MathType 5, 6.

Текстовый файл представляется в формате PDF.

5 ЗАЩИТА (РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ) КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Готовая курсовая работа (текстовый и расчетный файл и схема для исследования САУ на её электронной модели) размещается в электронном курсе для проверки и рецензирования руководителем. Руководитель осуществляет проверку:

- на плагиат;
- соответствие содержания работы ее названию;
- качество изложенного материала, правильность расчетов, качество выводов, оформление работы в соответствии с предъявляемыми требованиями.

В результате проверки курсовой работы руководителем курсовой работы оформляется рецензия.

В необходимых случаях руководитель курсовой работы может потребовать письменной доработки или переработки как всей работы в целом, так и отдельных ее частей. Решение о возможности допуска работы к защите (рецензированию) определяется преподавателем и доводится до сведения обучающегося.

При выявлении серьезных отклонений от предъявляемых требований к курсовой работе студенту предлагается устранить недостатки или выполнить работу по новой теме, предложенной преподавателем.

После исправления недостатков наступает второй этап, на котором преподаватель высылает студенту дополнительные вопросы по полученным в работе результатам. Итоговая оценка учитывает качество выполнения работы, правильность и полноту ответов на дополнительные вопросы.

Работа не принимается и не допускается к защите, если она не носит самостоятельный характер, заимствована или написана другими авторами, оформлена не по стандартам вуза.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов, Б. И. Теория автоматического управления [Электронный ресурс] : учеб. пособие для вузов / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. – 6-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2022. – 120 с. – URL: <https://reader.lanbook.com/book/238508#2> (дата обращения: 31.03.2023).

2. Лебедев, Ю. М. Теория автоматического управления [Электронный ресурс] : руководство к организации самостоятельной работы / Ю. М. Лебедев, Б. И. Коновалов. – Томск : ТУСУР, 2006. – 118 с. – URL: <https://edu.study.tusur.ru/publications/808> (дата обращения: 31.03.2023).

3. Магазинников, Л. И. Высшая математика III. Ряды. Интегральные преобразования / Л. И. Магазинников. – Томск : Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2002. – 206 с.

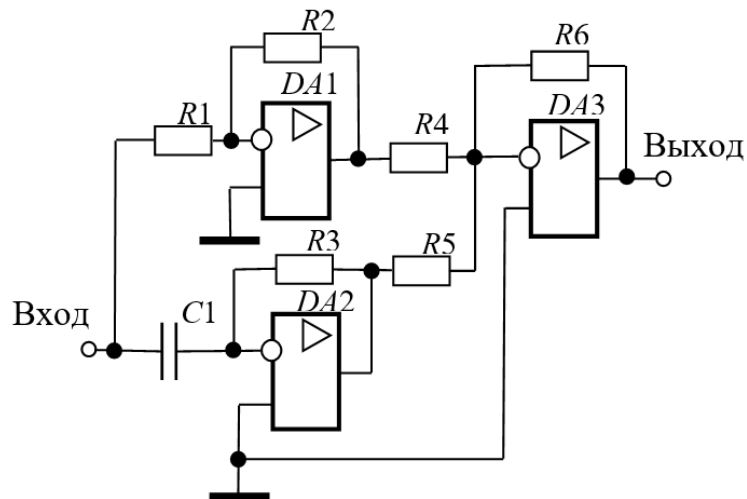
4. Коновалов, Б. И. Теория автоматического управления : учеб.-метод. пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. – Томск : ФДО, ТУСУР, 2010. – 62 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Варианты заданий на курсовую работу

Вариант № 1

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	C_1 , мкФ
100	100	100	100	100	500	8

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1}; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{p}; \quad W_4(p) = k_4; \quad W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1}.$$

Исходные данные для расчета:

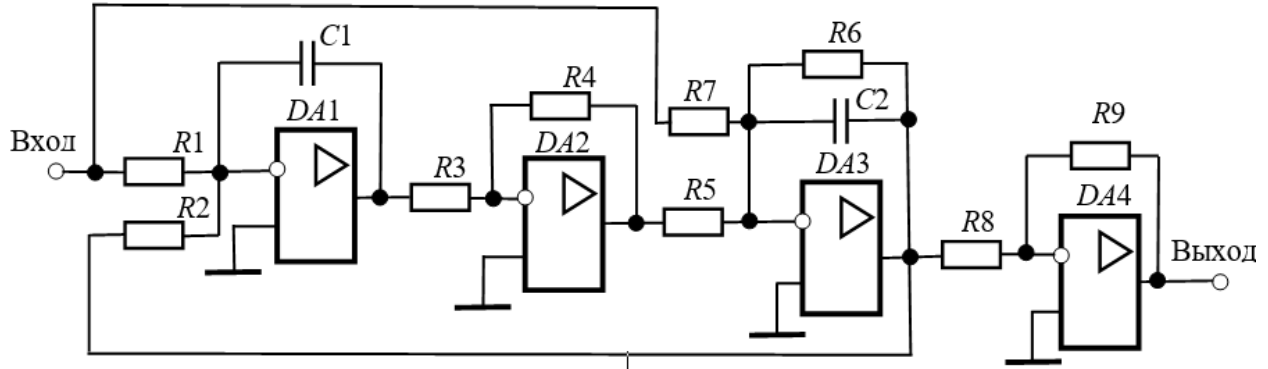
k_2	k_3 , с ⁻¹	k_4	k_{oc}	ξ	T_2 , с	T_{oc} , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
										x_1	x_2
1	40	1	0,5	0,7	0,5	0,01	20	2	10	T_2	k_2

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 25\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{пн}} = 0,38$ с.

Вариант № 2

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



$$R_1 = R_2 = 1,25 \text{ МОм}, R_3 = 200 \text{ кОм}, R_4 = R_5 = 10 \text{ кОм}, R_6 = 625 \text{ кОм},$$

$$R_7 = 1,25 \text{ МОм}, R_8 = R_9 = 10 \text{ кОм}, C_1 = C_2 = 1 \text{ мкФ}.$$

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}; \quad W_3(p) = k_3; \quad W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1}.$$

Исходные данные для расчета:

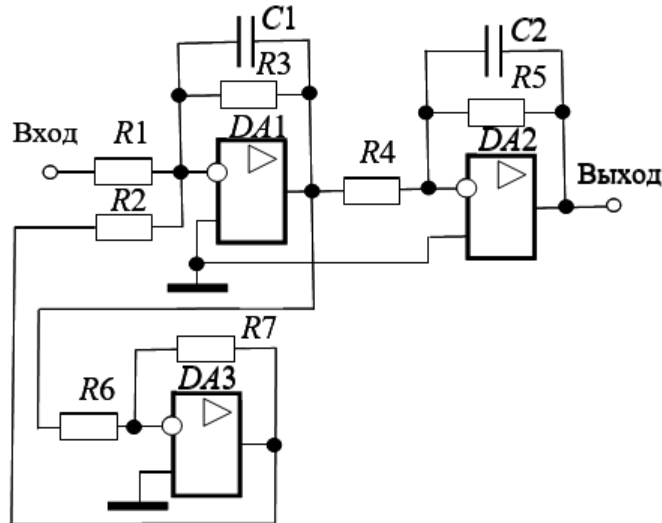
k_2	k_3	k_4	k_{oc}	$T_2, \text{ с}$	$T_{oc}, \text{ с}$	g_m	f_m	$\Delta G, \text{ дБ}$	Вар. парам.	
									x_1	x_2
40	5	2	0,5	0,1	0,01	20	10	5	T_2	k_2

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 40\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{ин}} = 0,2 \text{ с}$.

Вариант № 3

Схема звена с передаточной функцией $W_2(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	R_7 , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
100	100	50	100	100	100	100	0,5	0,1

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

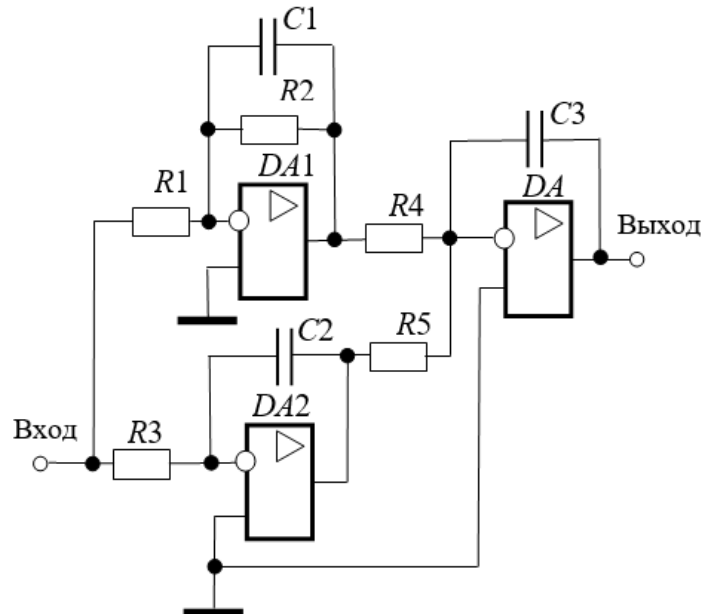
k_1	k_3	k_4	k_{oc}	T_1 , с	T_3 , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
									x_1	x_2
3	5	3	0,3	0,002	0,1	15	3	5	T_1	k_1

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 20\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{шт}} = 0,03$ с.

Вариант № 4

Схема звена с передаточной функцией $W_2(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ
100	100	200	100	100	1	1	1

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = \frac{k_2(\tau_2 p + 1)}{T_2 p + 1}; \quad W_3(p) = k_3; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

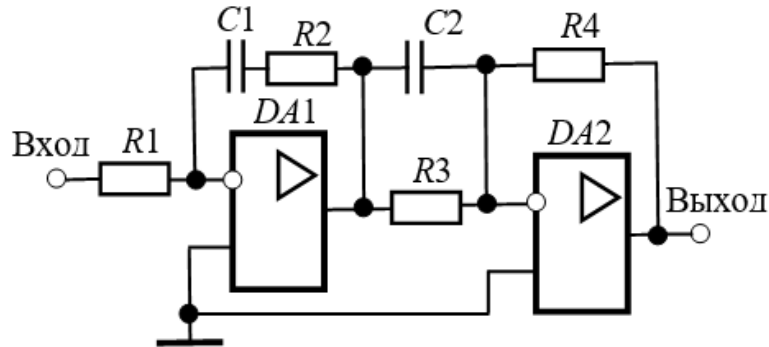
k_2	k_3	k_4	k_{oc}	T_2 , с	τ_2 , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
									x_1	x_2
2	5	5	0,1	0,55	0,15	10	5	5	T_2	k_2

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 40\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{ин}} = 0,228$ с.

Вариант № 5

Схема звена с передаточной функцией $W_2(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
100	100	1	50	8	10

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1}; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

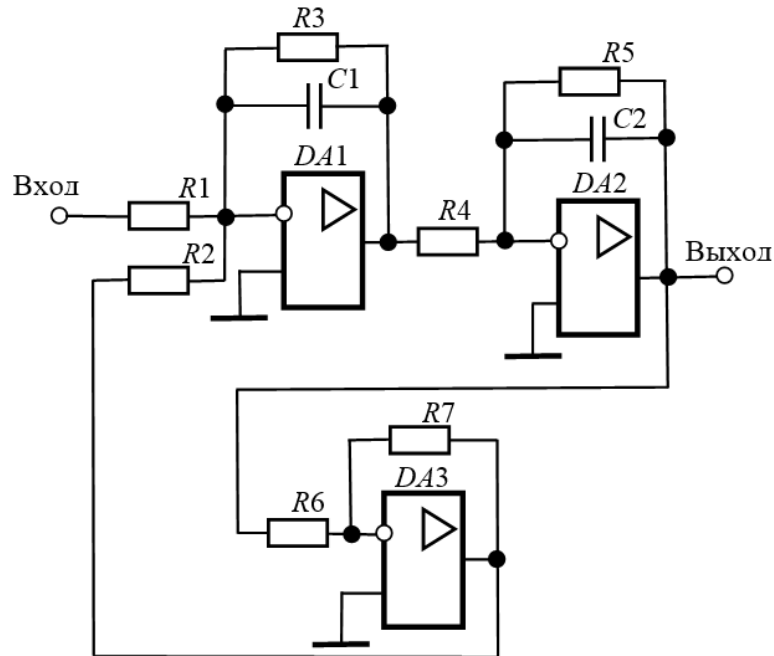
k_2	k_3	k_4	k_{oc}	T_2 , с	ξ	T_3 , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
										x_1	x_2
2	2	1	0,5	0,4	0,8	0,02	15	8	8	T_3	k_3

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 20\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{ин}} = 0,16$ с.

Вариант № 6

Схема звена с передаточной функцией $W_2(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	R_7 , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
100	100	30	100	500	100	10	1	1

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчёта:

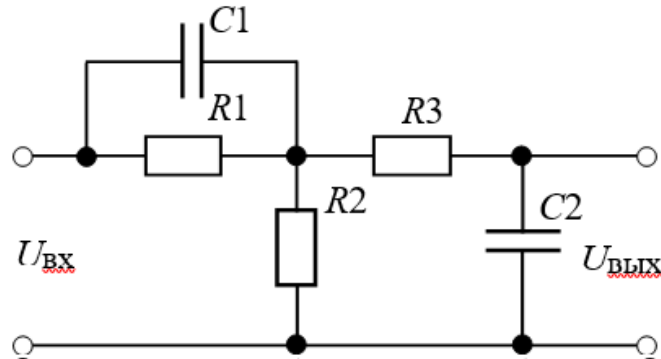
k_1	k_3	k_4	k_{oc}	T_1 , с	T_3 , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
									x_1	x_2
5	15	2	0,8	0,8	0,001	40	4	5	T_1	k_1

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 20\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{пн}} = 0,1$ с.

Вариант № 7

Схема звена с передаточной функцией $W_3(p)$ и его параметры:



$R_1,$ Ом	$R_2,$ МОм	$R_3,$ кОм	$C_1,$ мкФ	$C_2,$ мкФ
300	1	1	2000	300

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1}; \quad W_2(p) = k_2; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

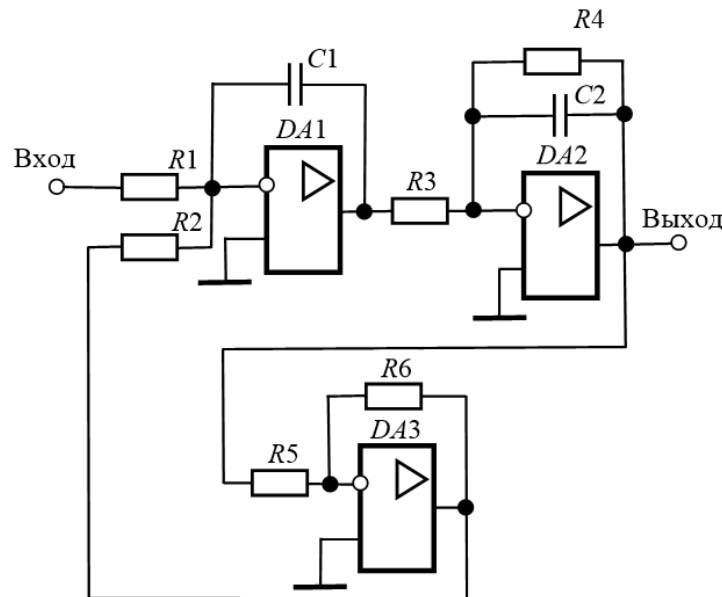
k_1	k_2	k_4	k_{oc}	T_1	ξ	g_m	f_m	$\Delta G,$ дБ	Вар. парам.	
									x_1	x_2
50	5	4	0,1	0,006	0,6	10	15	5	T_1	k_1

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 30\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{ин}} = 0,05$ с.

Вариант № 8

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , МОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
100	10	100	1,7	100	2,5	1	0,01

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_1(p) = k_1(\tau_1 p + 1); \quad W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 \cdot p + 1}; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

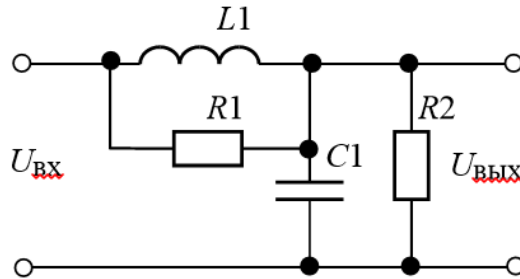
k_1	k_2	k_4	k_{oc}	τ_1 , с	T_2 , с	ξ_2	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
										x_1	x_2
8	4	1	0,4	0,1	0,5	0,8	10	15	3	τ_1	k_1

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 45\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{пн}} = 0,092$ с.

Вариант № 9

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



R_1 , Ом	R_2 , Ом	L_1 , Гн	C_1 , мкФ
5	100	0,2	5000

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p)=k_2; \quad W_3(p)=\frac{k_3}{T_3 p+1}; \quad W_4(p)=k_4; \quad W_{oc}(p)=\frac{k_{oc}}{T_{oc} p+1}.$$

Исходные данные для расчета:

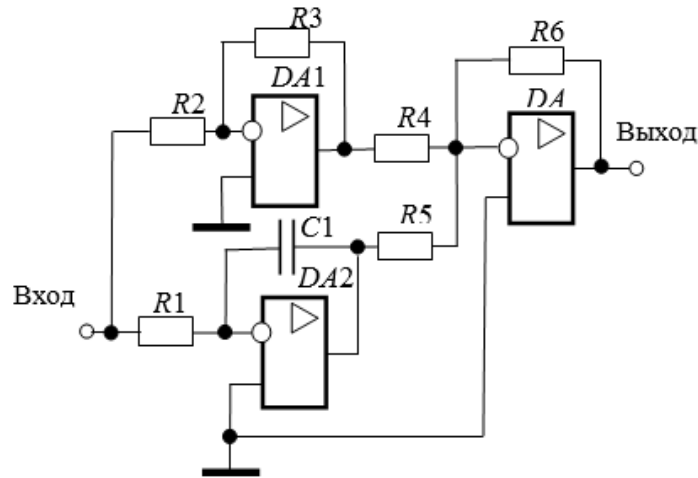
k_2	k_3	k_4	k_{oc}	T_3 , с	T_{oc} , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
									x_1	x_2
40	5	2	0,5	0,5	0,002	10	5	10	T_3	k_3

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 20\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{ин}} = 0,05$ с.

Вариант № 10

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	C_1 , мкФ
100	100	200	100	100	200	1

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1}; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

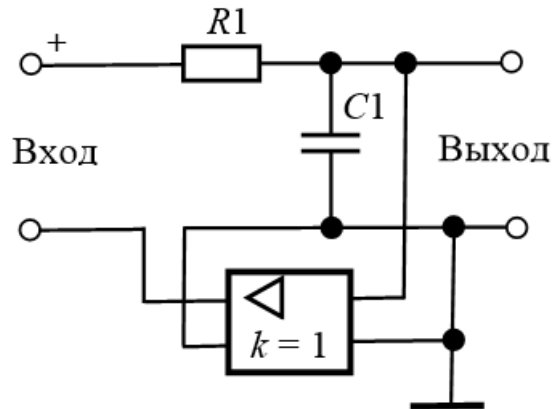
k_2	k_3	k_4	k_{oc}	T_2 , с	ξ	T_3 , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
										x_1	x_2
2	4	4	0,1	0,1	0,7	0,002	10	5	8	T_3	k_3

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 25\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{шт}} = 0,1$ с.

Вариант № 11

Схема звена с передаточной функцией $W_2(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	C_1 , мкФ
200	1

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{T_1 p + 1}; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1}; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчёта:

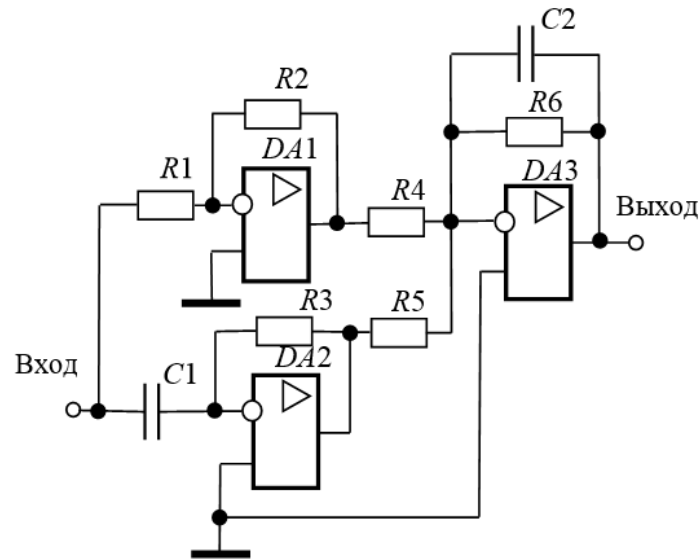
k_1	k_3	k_4	k_{oc}	T_1 , с	τ_1 , с	T_3 , с	ξ	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
											x_1	x_2
10	20	1	0,3	0,8	0,2	0,03	1,5	18	15	5	τ_1	k_1

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 40\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{ин}} = 0,095$ с.

Вариант № 12

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
100	100	100	100	100	200	3,2	3,2

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}; \quad W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1}.$$

Исходные данные для расчета:

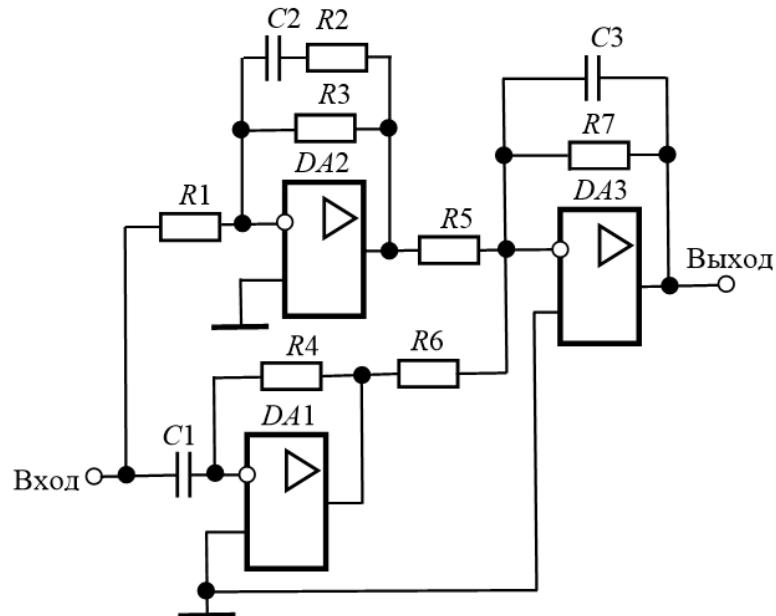
k_2	k_3	k_4	k_{oc}	T_2 , с	T_3 , с	T_{oc} , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
										x_1	x_2
30	0,909	2	0,5	0,2	0,091	0,001	10	10	8	T_2	k_2

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 30\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{шт}} = 0,021$ с.

Вариант № 13

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	R_7 , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ
10	10	10	1	20	20	100	5	5	5

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = k_2; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}; \quad W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1}.$$

Исходные данные для расчета:

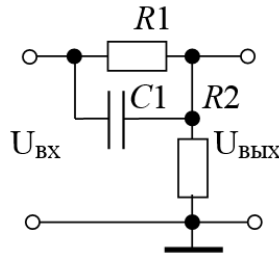
k_2	k_3	k_4	k_{oc}	T_3 , с	T_{oc} , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
									x_1	x_2
2	10	3	0,5	0,8	0,008	20	7	10	T_3	k_3

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 25\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{шт}} = 0,5$ с.

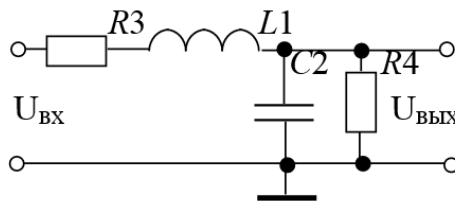
Вариант № 14

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	C_1 , мкФ
1	1	50

Схема звена с передаточной функцией $W_3(p)$ и его параметры:



R_3 , Ом	R_4 , кОм	L_1 , Гн	C_2 , мкФ
10	1	0,8	10000

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

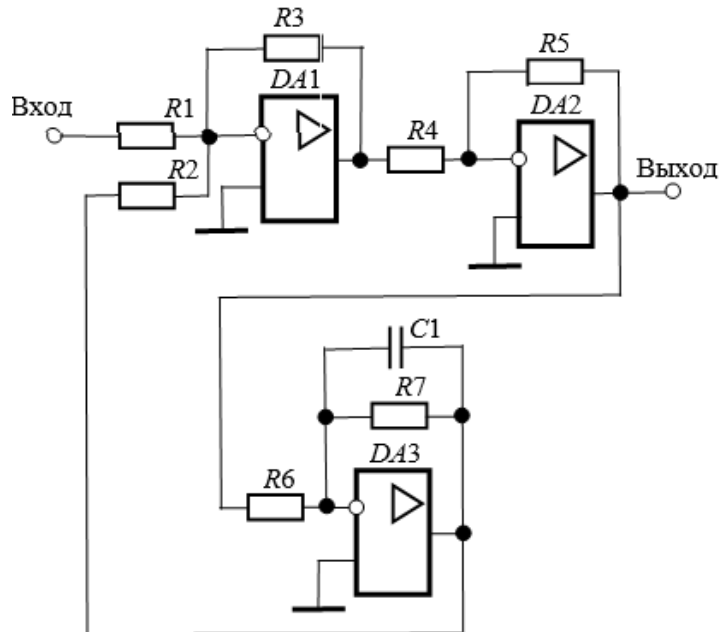
k_2	k_4	k_{oc}	T_2 , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
							x_1	x_2
100	3	0,25	0,002	5	5	5	T_2	k_2

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 35\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{ип}} = 0,03$ с.

Вариант № 15

Схема звена с передаточной функцией $W_2(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	R_7 , кОм	C_1 , мкФ
1	1	1	1	1	1	80	10

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{p^2}; \quad W_3(p) = \frac{k_3(\tau_3 p + 1)}{T_3 p + 1}; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

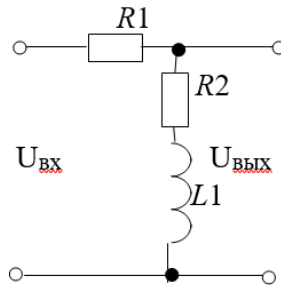
k_1 , с ⁻²	k_3	k_4	k_{oc}	T_3 , с	τ_3 , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
									x_1	x_2
50	10	4	0,5	0,4	0,005	20	5	7	T_3	k_3

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 35\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{пн}} = 0,275$ с.

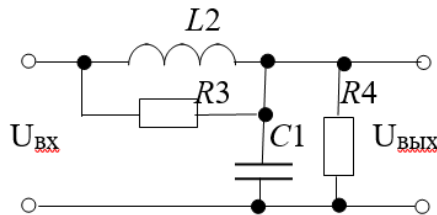
Вариант № 16

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



$R_1,$	$R_1,$	$L_1,$
Ом	Ом	Гн
5	5	0,1

Схема звена с передаточной функцией $W_3(p)$ и его параметры:



$R_3,$	$R_4,$	$L_3,$	$C_1,$
Ом	Ом	Гн	Ф
10	1	1	0,5

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}; \quad W_4(p) = k_4; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

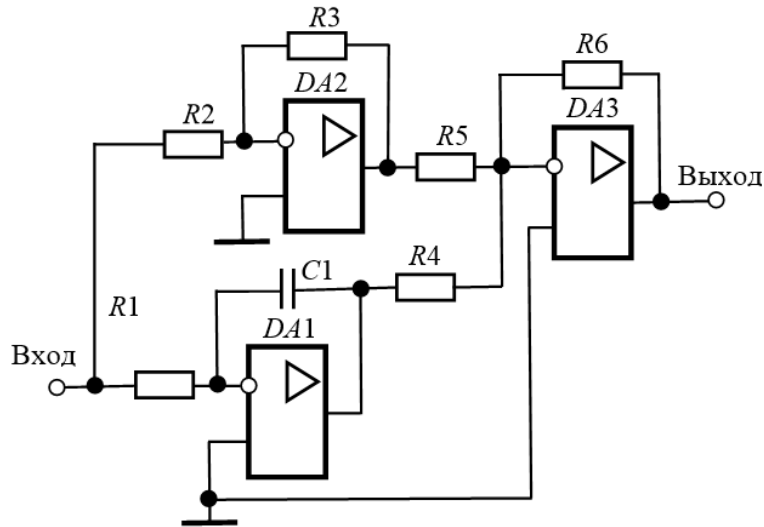
k_2	k_4	k_{oc}	$T_2,$ с	g_m	f_m	$\Delta G,$ дБ	Вар. парам.	
							x_1	x_2
40	5	1	0,2	10	20	10	T_2	k_2

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 20\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{ин}} = 0,15$ с.

Вариант № 17

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	C_1 , мкФ
20	10	50	5	10	10	2

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}; \quad W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1}.$$

Исходные данные для расчета:

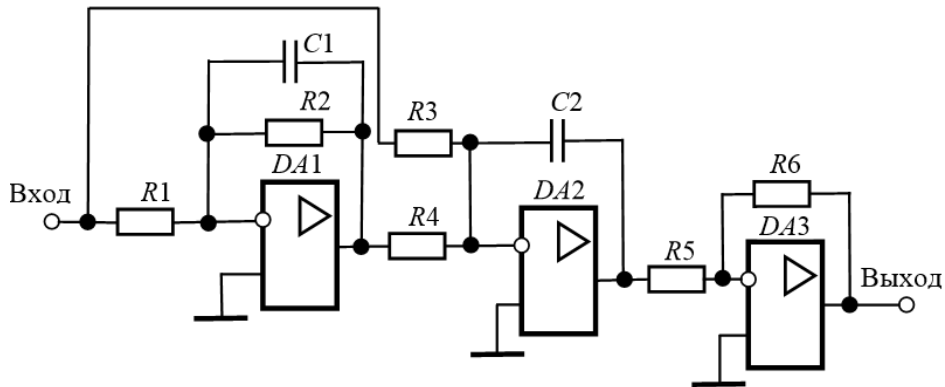
k_2	k_3	k_4	k_{oc}	T_2 , с	T_3 , с	T_{oc} , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
										x_1	x_2
2	5	3	0,5	0,6	0,05	0,028	20	15	10	T_2	k_2

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 25\%$;
- время переходного процесса $t_{ин} = 0,255$ с.

Вариант № 18

Схема звена с передаточной функцией $W_2(p)$ и его параметры:



R_1 , МОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
2,25	300	20	60	10	10	1	1

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_1(p) = \frac{k_1(\tau_1 p + 1)}{T_1 p + 1}; \quad W_3(p) = k_3; \quad W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} p + 1}.$$

Исходные данные для расчета:

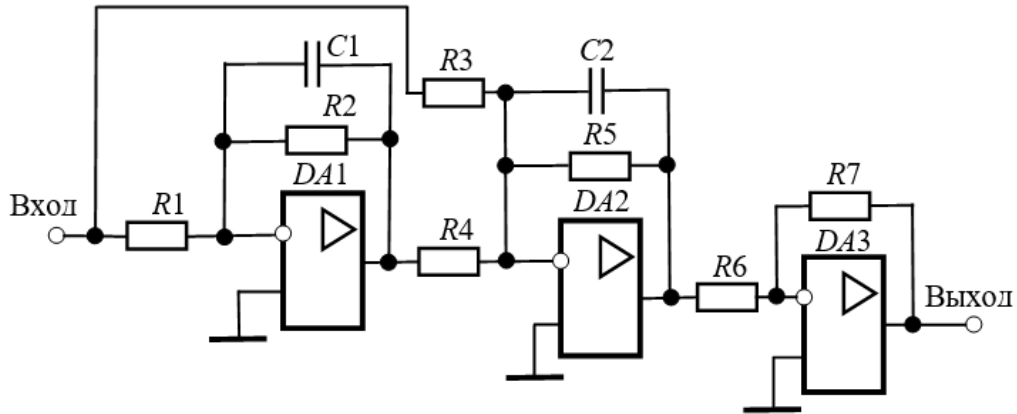
k_1	k_3	k_4	k_{oc}	T_1 , с	τ_1 , с	T_{oc} , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
										x_1	x_2
5	8	5	0,2	0,8	0,002	0,01	10	20	5	τ_1	k_1

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 20\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{пн}} = 0,1$ с.

Вариант № 19

Схема звена с передаточной функцией $W_1(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	R_7 , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
1	5	1	10	1	1	1	8	600

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_2(p) = \frac{k_2(\tau_2 p + 1)}{T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1}; \quad W_3(p) = k_3; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

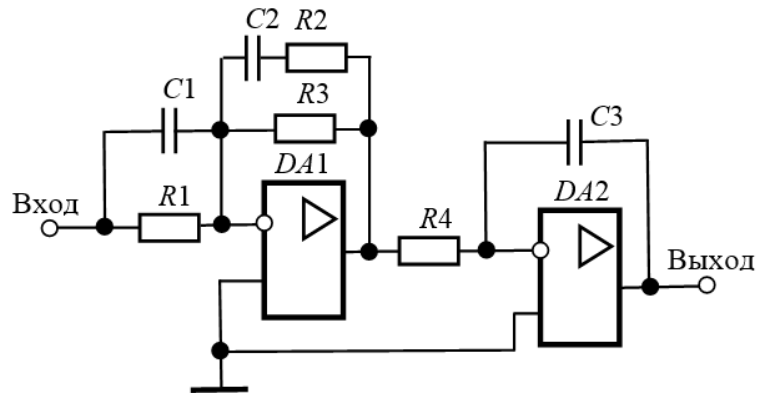
k_2	k_3	k_4	k_{oc}	T_2 , с	ξ	τ_2 , с	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
										x_1	x_2
20	10	5	1	0,05	1	0,01	30	5	8	T_2	k_2

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 20\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{ин}} = 0,098$ с.

Вариант № 20

Схема звена с передаточной функцией $W_3(p)$ и его параметры:



R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ
15	40	20	10	1	10	10

Передаточные функции остальных звеньев:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1}; \quad W_2(p) = k_2; \quad W_{oc}(p) = k_{oc}.$$

Исходные данные для расчета:

k_1	k_2	k_4	k_{oc}	T_1 , с	ξ	g_m	f_m	ΔG , дБ	Вар. парам.	
									x_1	x_2
10	2	3	0,3	0,03	0,6	15	5	5	T_1	k_1

Параметры скорректированной САУ:

- перерегулирование $\sigma = 35\%$;
- время переходного процесса $t_{\text{ин}} = 0,38$ с.