

**ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»**

Выполнение КР с 25. 02 по 25.04.2016г.

Защита КР – с 25.04 по 17.05.2016г.

ТЕМА КУРСОВОЙ РАБОТЫ:

«Исследование системы автоматического управления и ее коррекция».

ЦЕЛЬ КУРСОВОЙ РАБОТЫ:

На основе исходных данных провести исследование и коррекцию системы автоматического управления(САУ) для обеспечения заданного качества процесса управления в соответствии с вариантом задания.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВАРИАНТОВ ЗАДАНИЯ

1. Структурные схемы исследуемых САУ

Структурные схемы для каждого варианта задания приведены в Приложении 1, а номера вариантов заданий и соответствующие им исходные данные указаны в Приложении 2.

Структурные схемы САУ №№ 1, 2, 3 отображают систему автоматического регулирования скорости вращения ротора электродвигателя Ω_d . На указанных структурных схемах электродвигатель является объектом автоматического управления (регулирования).

Структурные схемы САУ №№ 4 ... 10 отображают систему управления рукой робота-манипулятора, в которой непосредственно регулируется угол поворота редуктора Θ_r . Вращение вала электродвигателя через редуктор

обеспечивает управляемый поворот руки робота. В данной САУ электродвигатель является исполнительным устройством, непосредственно воздействующим на объект управления через редуктор, который обеспечивает сочленение с управляемой рукой робота.

На структурных схемах задающее напряжение U_3 сравнивается с напряжением U_d датчика скорости вращения или датчика угла поворота, установленными в главной обратной связи САУ и выполняющими функцию измерительного устройства на выходе объекта управления.

На выходе вычитающего (сравнивающего) устройства формируется сигнал рассогласования $\Delta = U_3 - U_d$ между задающим напряжением и напряжением датчика, измеряющего регулируемую (наблюдаемую) величину скорости вращения ротора электродвигателя или величину угла поворота редуктора, сочлененного с рукой робота.

2. Передаточные функции звеньев САУ

2.1. Усилитель

Передаточная функция

$$W_{y1}(p) = \frac{k_y}{T_y p + 1} .$$

Значения коэффициентов k_y и постоянных времени T_y задаются в табл.1 Приложения 2 для каждого варианта задания. Коэффициент передачи усилителя k_y может варьироваться для повышения качества процесса автоматического управления.

2.2. Электродвигатель

Передаточная функция

$$W_{дв}(p) = \frac{k_{дв}}{T_я T_м p^2 + T_м p + 1} ,$$

где коэффициент передачи электродвигателя $k_{дв}=0,6$;

электромеханическая постоянная времени электродвигателя $T_M = 1,6$ с;

электромагнитная постоянная времени якорной цепи $T_я = 0,8$ с для структурных схем №№ 5, 6, 7;

электромагнитная постоянная времени якорной цепи $T_я = 0,1$ с для структурных схем №№ 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10.

2.3. Редуктор

Передаточная функция

$$W_p(p) = \frac{k_p}{p},$$

где передаточное отношение редуктора $k_p = \frac{1}{30}$.

2.4. Датчик угловой скорости вращения ротора электродвигателя

Для структурных схем №№ 1, 2, 3 передаточная функция

$$W_d(p) = \frac{k_{дт}}{T_d p + 1},$$

где коэффициент передачи $k_{дт} = 0,02$ В/(рад/с); постоянная времени $T_d = 0,006$ с.

2.5. Датчик угла поворота редуктора

2.5.1. Для структурных схем №№ 4, 7, 8, 9 передаточная функция

$$W_d(p) = \frac{k_{дт}}{T_d p + 1},$$

где коэффициент передачи датчика угла поворота $k_{дт} = 0,01$ В/рад, постоянная времени датчика угла поворота $T_d = 0,003$ с.

2.5.2. Для структурных схем №№ 5, 6, 10 передаточная функция

$$W_d(p) = k_{дт} ,$$

где коэффициент передачи датчика угла поворота редуктора

$$k_{дт} = 0,01 \text{ В/рад.}$$

2.6. Звенья последовательной коррекции

2.6.1. Для структурных схем № 1, №2 передаточная функция

$$W_{пк}(p) = \frac{k_k(1 + \tau_k p)}{T_k p + 1} .$$

2.6.2. Для структурной схемы № 3 передаточная функция

$$W_{пк}(p) = \frac{k_k + \tau_k p}{T_k p + 1} .$$

2.6.3. Для структурной схемы № 4 передаточная функция

$$W_{пк}(p) = (k_k + \tau_k p)^2 .$$

2.6.4. Для структурной схемы № 5 передаточная функция

$$W_{пк}(p) = \frac{(k_k + \tau_k p)^2}{T_k p + 1} .$$

2.6.5. Для структурных схем № 6, №10 передаточная функция

$$W_{пк}(p) = \frac{k_k(1 + \tau_k p)^2}{T_k p + 1} .$$

2.6.6. Для структурных схем №№ 7, 8, 9 передаточная функция

$$W_{пк}(p) = k_k(1 + \tau_k p)^2 .$$

В звеньях последовательной коррекции значения коэффициентов передачи k_k и постоянных времени τ_k, T_k выбираются на основе анализа динамических процессов САУ и обеспечения требуемого качества

процесса управления. Предварительно установлены следующие их значения: $k_K = 2$; $\tau_K = 10$ с; $T_K = 0,01$ с.

2.8. Звенья параллельной коррекции

$$W_{0i}(p) = \tau_{0i} p, \quad i=1, 2.$$

Постоянные времени корректирующих звеньев τ_{0i} , $i = 1, 2$ могут варьироваться для обеспечения требуемого качества функционирования САУ. Предварительно установлены значения: $\tau_{01} = 10^{-5}$ с; $\tau_{02} = 5$ с.

ТРЕБОВАНИЯ ПО КАЧЕСТВУ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ САУ

1. В процессе коррекции САУ обеспечить требуемое качество процесса управления САУ по ее устойчивости и точности:
 - запас устойчивости по амплитуде $L_A(\omega) \geq 12$ дБ;
 - запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi \geq 60$ град.;
 - статическая ошибка $\Delta_{ст} \leq 0,1\%$ относительно постоянного значения задающего воздействия на входе системы.
2. При достижении требуемых запасов устойчивости и заданной точности САУ обеспечить требуемое качество переходного процесса:
 - быстродействие САУ, определяемое временем переходного процесса $t_{п} \leq 3$ с;
 - колебательность переходного процесса $N \leq 1$;
 - перерегулирование $\sigma \leq 15\%$.

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЮ И РАЗРАБОТКЕ

1. Анализ устойчивости САУ с применением алгебраического и частного критериев устойчивости системы
 - 1.1. Составление передаточной функции разомкнутой и замкнутой САУ.
 - 1.2. Анализ устойчивости САУ с применением критерия Рауса-Гурвица.

- 1.3. Анализ устойчивости САУ с применением критерия Найквиста.
- 1.4. Анализ путей повышения устойчивости САУ.

2. Анализ точности САУ в вынужденном режиме

- 2.1. Анализ статической ошибки.
- 2.2. Анализ ошибки по скорости.
- 2.3. Анализ путей повышения точности САУ.

3. Анализ качества переходного процесса

- 3.1. Частотный метод анализа переходного процесса.
- 3.2. Корневой метод анализа переходного процесса.
- 3.3. Построение переходной характеристики и оценка основных показателей качества переходного процесса.
- 3.4. Анализ путей повышения качества переходного процесса.

4. Разработка рекомендаций по повышению качества процесса управления исследуемой САУ

- 4.1. Выбор путей коррекции САУ.
- 4.2. Расчет запасов устойчивости скорректированной САУ по амплитуде и фазе.
- 4.3. Расчет точности скорректированной САУ в вынужденном режиме.
- 4.4. Оценка качества переходного процесса скорректированной САУ.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ И ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Методические указания по анализу и коррекции САУ

1. Для анализа устойчивости исследуемой САУ применить последовательно алгебраический критерий Рауса-Гурвица и частотный критерий Найквиста.
2. Для применения одной из двух формулировок критерия Найквиста необходимо предварительно провести анализ устойчивости САУ в разомкнутом состоянии. Применяя критерий Найквиста к САУ с неединичной обратной связью, следует преобразовать ее исходную

структурную схему с целью получения единичной главной обратной связи, отнеся датчик к объекту управления и получив таким образом преобразованный объект как объект управления с последовательно подключенным к его выходу датчиком.

3. Для проверки достоверности результатов анализа устойчивости исследуемой САУ в разомкнутом и замкнутом состояниях найти с использованием прикладной программы Mathcad корни соответствующих характеристических уравнений САУ в разомкнутом и замкнутом состояниях.
4. При анализе запасов устойчивости САУ по амплитуде и фазе использовать логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) и логарифмическую фазо-частотную характеристику (ЛФЧХ) разомкнутой САУ. Для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ следует применять прикладную программу Mathcad.
5. Точность исследуемой системы в установившемся режиме оценивать при постоянном и линейно нарастающем входном воздействии, определяя соответственно статическую ошибку и ошибку по скорости в установившемся режиме методом коэффициентов ошибок. Для скорректированной САУ определить точность САУ по скорости.
6. Анализ качества переходного процесса САУ первоначально провести прямым методом, оценив основные показатели качества переходного процесса САУ непосредственно по графику переходной характеристики, а далее анализ провести с использованием косвенных методов - корневого и частотного методов анализа переходных процессов. По результатам оценки показателей качества переходного процесса прямым и косвенными методами провести сравнительный анализ.
7. Качество переходного процесса оценить по трем основным показателям:
 - время переходного процесса t_{Π} - время от начала переходного процесса до момента достижения им установившегося значения с допустимым отклонением от него на величину 5%;
 - колебательность переходного процесса N - число колебаний (максимумом) за время переходного процесса;
 - перерегулирование σ - отношение максимального отклонения от установившегося значения переходной характеристики к ее установившемуся значению, выраженное в процентах.

Для приближенных расчетов показателей качества переходного процесса могут быть использованы соотношения, полученные на основе связи переходной характеристики замкнутой САУ с её частотными характеристиками в разомкнутом состоянии (частотный метод), а также с

использованием связи переходной характеристики исследуемой системы с ее корневым портретом (корневой метод).

Время переходного процесса t_{π} можно определить по приближенным соотношениям. Для колебательной переходной характеристики с колебательностью N :

$$t_{\pi} \approx 2\pi N / \omega_{\text{ср}}.$$

В данном и в последующих соотношениях частота среза $\omega_{\text{ср}}$ определена для системы в разомкнутом состоянии.

Колебательность N с периодом колебаний T_0 можно определить, как число периодов за время переходного процесса по соотношению

$$N \approx \frac{t_{\pi}}{T_0} \approx \frac{\omega_{\text{ср}} t_{\pi}}{2\pi}.$$

В отсутствие колебательности переходной характеристики ($N=0$):

$$t_{\pi} \approx \pi / \omega_{\text{ср}}.$$

По корневому портрету можно оценить время переходного процесса вне зависимости от характера переходного процесса:

$$t_{\pi} \approx \frac{3}{\eta},$$

Здесь показатель η , называемый степенью устойчивости системы, определяется как расстояние на комплексной плоскости от мнимой оси до ближайшего к ней корня p_k с отрицательной вещественной частью $Re p_k$:

$$\eta = \min_{\{i\}} |Re p_i| = |Re p_k|, \quad i=1, 2, \dots, n,$$

где $\{p_i\}, i=1, 2, \dots, n$, - множество корней характеристического уравнения системы n -порядка.

Характер переходной характеристики можно определить по корневому портрету исследуемой системы. Наличие мнимой части у корней характеристического уравнения системы приводит к колебательности переходного процесса и перерегулированию.

Величина перерегулирования может быть вычислена по приближенной формуле

$$\sigma \approx (1 - \sin \Delta\varphi) 100\%,$$

где $\Delta\varphi$ - запас устойчивости по фазе исследуемой замкнутой системы.

8. Для построения переходной характеристики исследуемой системы следует использовать связь переходной характеристики $h(t)$ с передаточной

функцией $W(p)$. При подаче на вход исследуемой системы с передаточной функцией $W(p)$ единичного скачка $1(t)$, имеющего в операторной форме вид $1/p$, можно определить переходную характеристику $h(t)$ как обратное преобразование Лапласа выходной величины в операторной форме $H(p) = W(p)/p$: $h(t) = L^{-1}[W(p)/p]$. Для построения графика переходной характеристики использовать прикладную программу Mathcad.

9. Для обеспечения требуемого качества процесса управления исследуемой САУ следует варьировать параметры корректирующих звеньев САУ и усилителя, а при необходимости вводить дополнительные корректирующие звенья.
10. Для вычисления значений диагональных миноров матрицы Гурвица, вычисления корней характеристических уравнений САУ, построения ее частотных характеристик: годографа амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ), ЛАЧХ и ЛФЧХ, а также для построения и анализа переходной характеристики исследуемой САУ использовать прикладную программу Mathcad.
11. Дополнительно может быть построена модель исследуемой САУ с применением пакета прикладных программ Matlab и на ее модели проведено исследование для проверки достоверности ранее полученных характеристик САУ.

Требования к содержанию и оформлению курсовой работы

Пояснительная записка к курсовой работе должна содержать:

1. Титульный лист.
2. Введение
Во введении раскрывается актуальность темы, формулируются цели и задачи курсовой работы, описываются предмет, объект и методы исследования.
3. Основная часть.
Основная часть должна быть посвящена анализу устойчивости исследуемой САУ, переходных процессов и точности САУ, анализу основных динамических характеристик САУ и необходимой их коррекции. Здесь приводятся аналитические выражения и графики: годографы АФЧХ, логарифмические АЧХ, ФЧХ, графики переходной функции.
4. Выводы и рекомендации по обеспечению качества функционирования САУ.
5. Список использованных источников.

Оформляется пояснительная записка в соответствии с требованиями ГОСТа по оформлению отчета о научно-исследовательской работе. Объем пояснительной записки не более **20** листов формата **A4** при использовании шрифта **Times New Roman** размером **14пт** и размера межстрочного интервала **1,5**. Все рисунки должны иметь подрисовочные надписи, а таблицы – наименования, поясняющие их содержание. Формулы должны иметь порядковую нумерацию в круглых скобках. Номер указывается в одной строке с приводимой формулой в правой стороне от нее.

В Приложении к пояснительной записке должен быть представлен демонстрационный материал, иллюстрирующий основные результаты анализа статических и динамических свойств исследуемой САУ и разработанные рекомендации по повышению качества процесса управления исследуемой САУ (не менее 5 слайдов). При этом чертежи, графики, диаграммы, схемы должны соответствовать требованиям государственных стандартов ЕСКД.

Пояснительная записка представляется на защиту в сброшюрованном виде и с оформленным Приложением на отдельных листах.

В качестве примера иллюстрации результатов курсовой работы, выносимых на ее защиту, в Приложении 3 представлен фрагмент иллюстрации доклада.

Порядок защиты курсовой работы

Пояснительная записка по курсовой работе представляется руководителю курсовых работ не позднее чем за 5 дней до назначенного дня ее защиты для предварительной оценки содержания и качества оформления курсовой работы.

Защита курсовой работы проводится в форме доклада ее основных результатов. На доклад отводится до 10 минут, в течение которых студент должен раскрыть суть проведенных исследований и основные результаты анализа САУ с последующей её коррекцией. После доклада студент отвечает на вопросы руководителя по уточнению результатов выполненной курсовой работы и проверке уровня знаний и компетенций по анализу и коррекции САУ.

Оценка курсовой работы

Курсовая работа оценивается руководителем курсовой работы по следующим компонентам:

- по степени полноты, достоверности и обоснованности результатов выполнения задания по курсовой работе;
- по качеству оформления пояснительной записки и демонстрационного материала;
- по уровню качества доклада и использованного в ходе доклада иллюстративного материала;
- по уровню обоснованности и полноты ответов студента в ходе защиты курсовой работы.

Рекомендуемая учебная литература

Основная литература

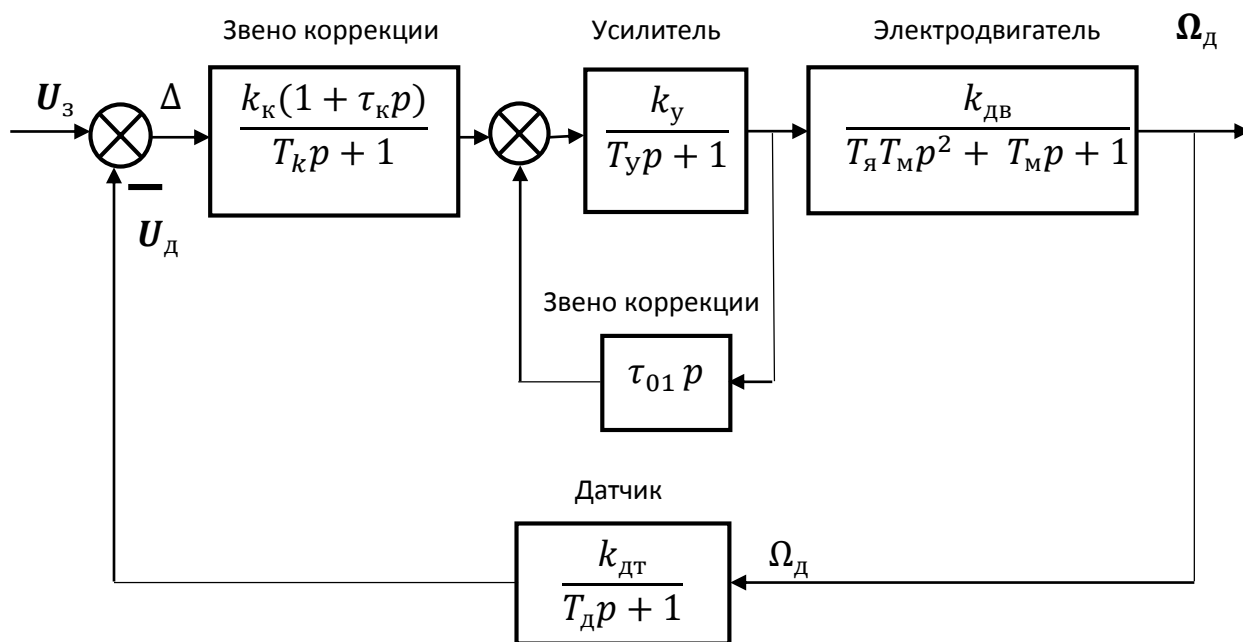
1. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. Учебник для вузов / Е. И. Юревич. -3-е изд. – БХВ-Петербург, 2007.
2. Савин М. М. Теория автоматического управления: Учеб. пособие для вузов/ М. М. Савин, В. С. Елсуков, О. Н. Пятина; под ред. д.т.н., проф. В. И. Лачина. Ростов н/Д: Феникс, 2007.
3. Федоров С. Е. Учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы по дисциплине Теория автоматического управления. М. МТУСИ, 2015.
4. Шишмарев В. Ю. Теория автоматического управления. – М.: Академия, 2012.

Дополнительная литература

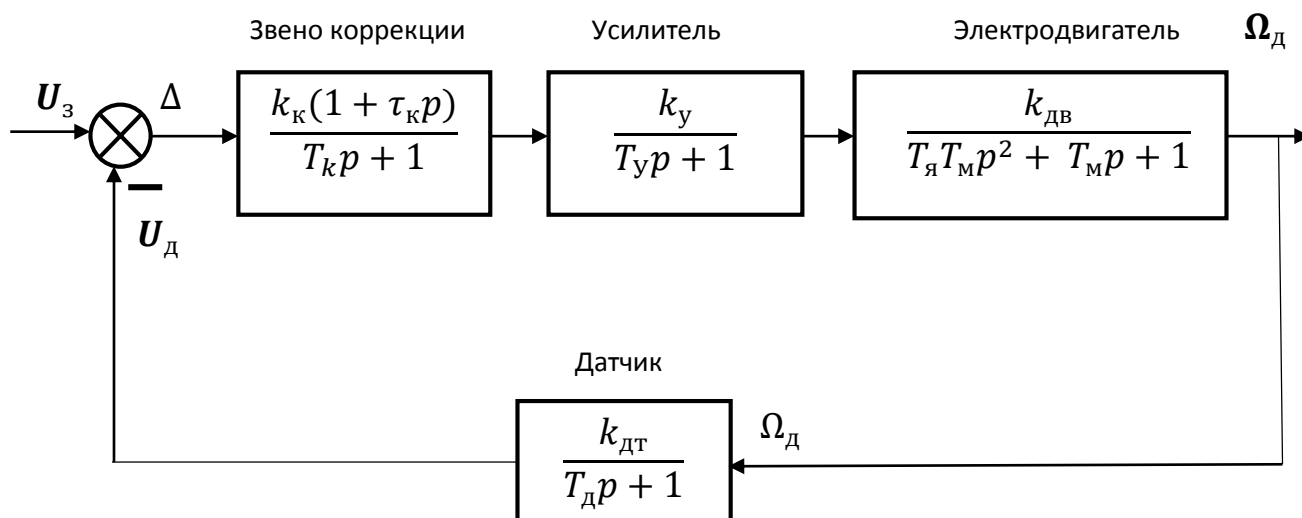
1. Дьяконов В. П. Mathcad 11/12/13 в математике. Справочник. М.: Горячая линия. Телеком, 2007.
2. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т 1. Линейные системы. Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., исп. доп. М.: Физматлит, 2010.
3. Ким Д. П., Дмитриева Д. П. Сборник задач по теории автоматического управления. Линейные системы. М.: Физматлит, 2007.
4. Востриков А. С. Теория автоматического регулирования [Текст]: учеб. пособие для вузов / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – М.: Высшая школа, 2006 (гриф УМО).
5. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления [Текст]: учеб. пособие / А. А. Первозванский-2-е изд., стер. - Спб: Лань, 2010.

Варианты структурных схем исследуемых САУ

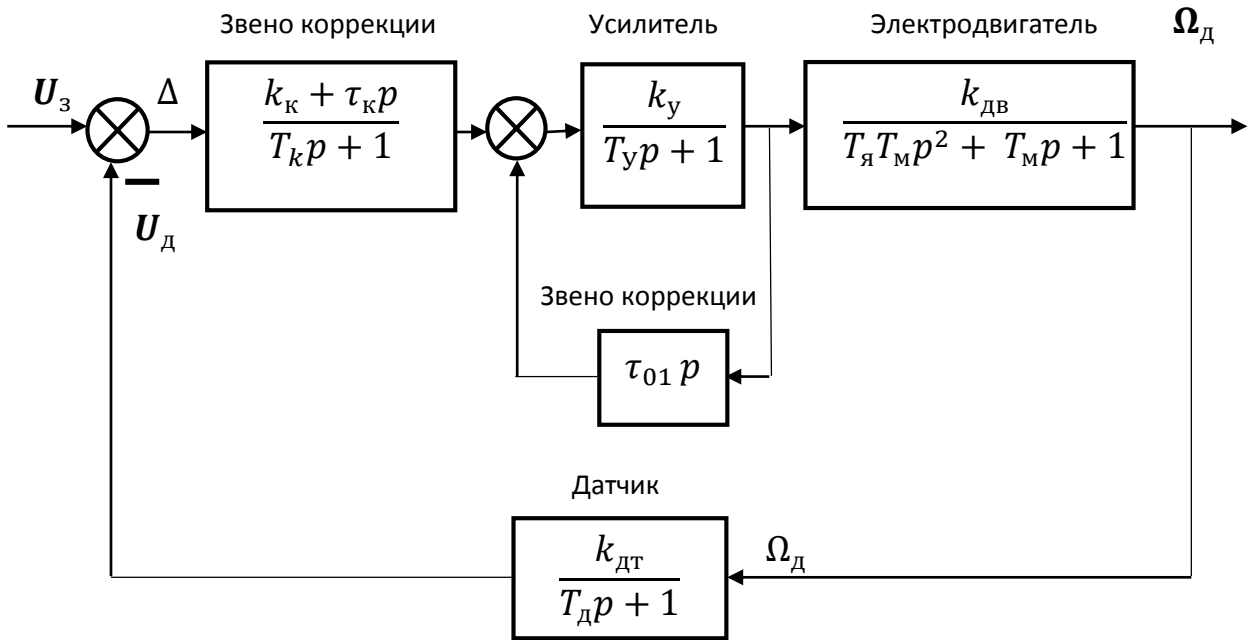
Вариант № 1



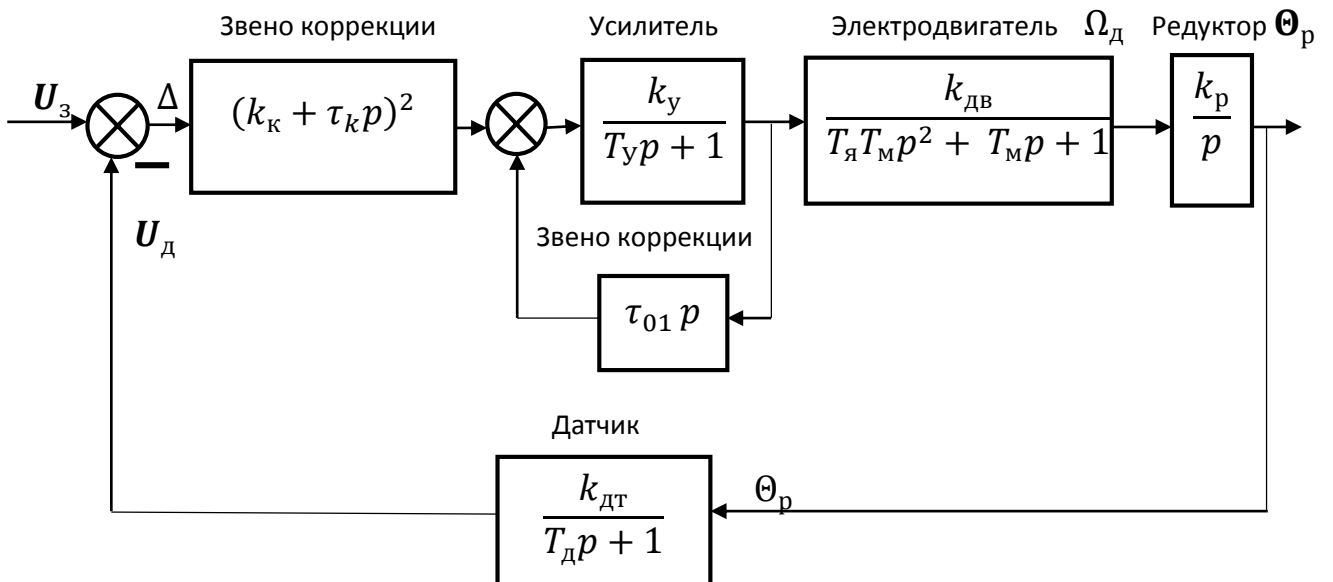
Вариант № 2



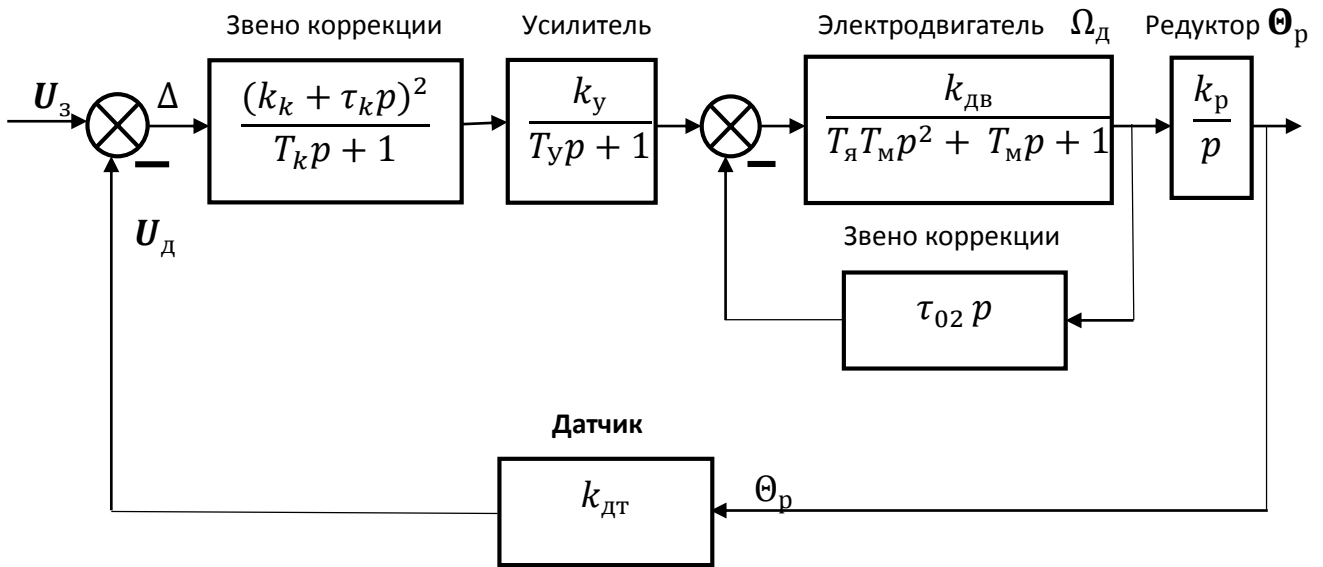
Вариант № 3



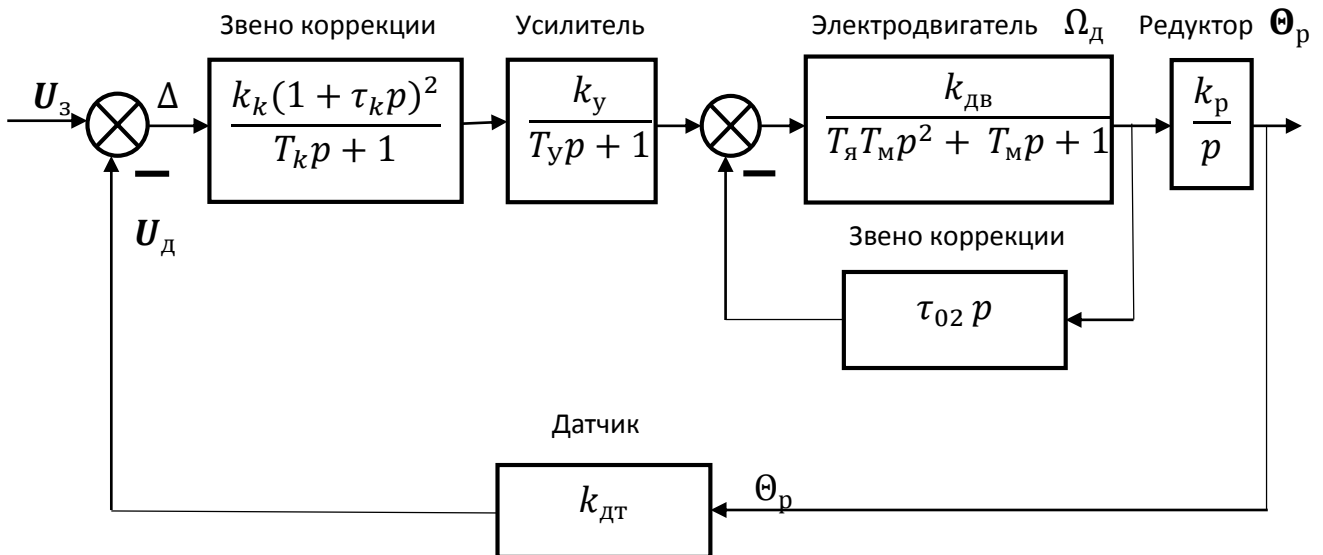
Вариант № 4



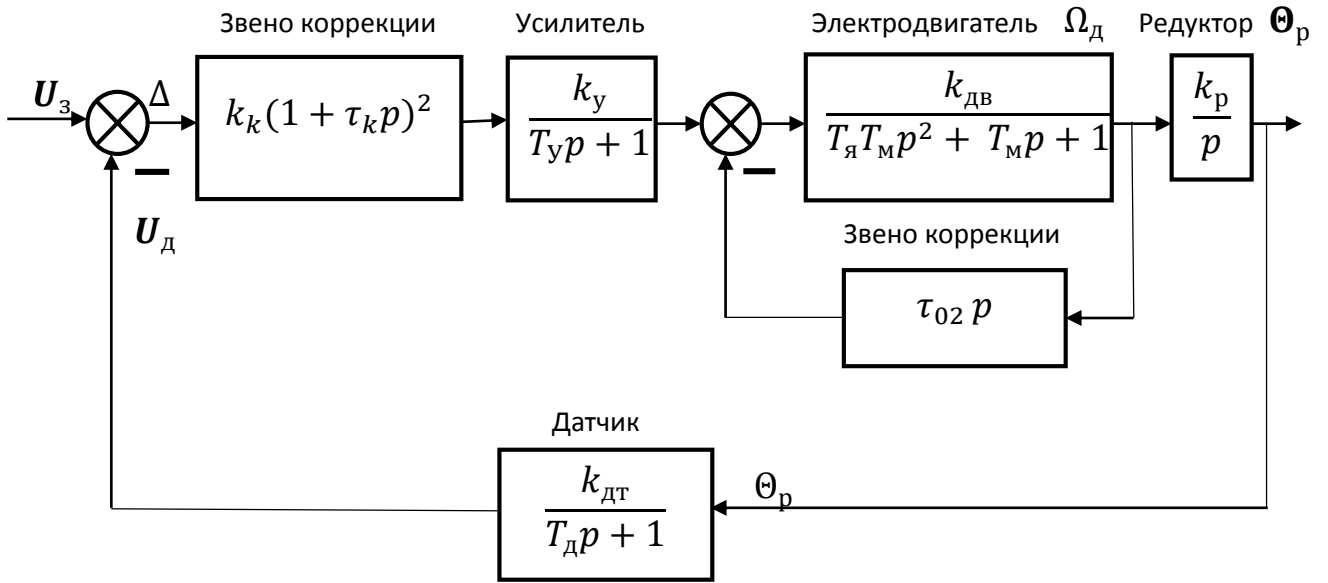
Вариант № 5



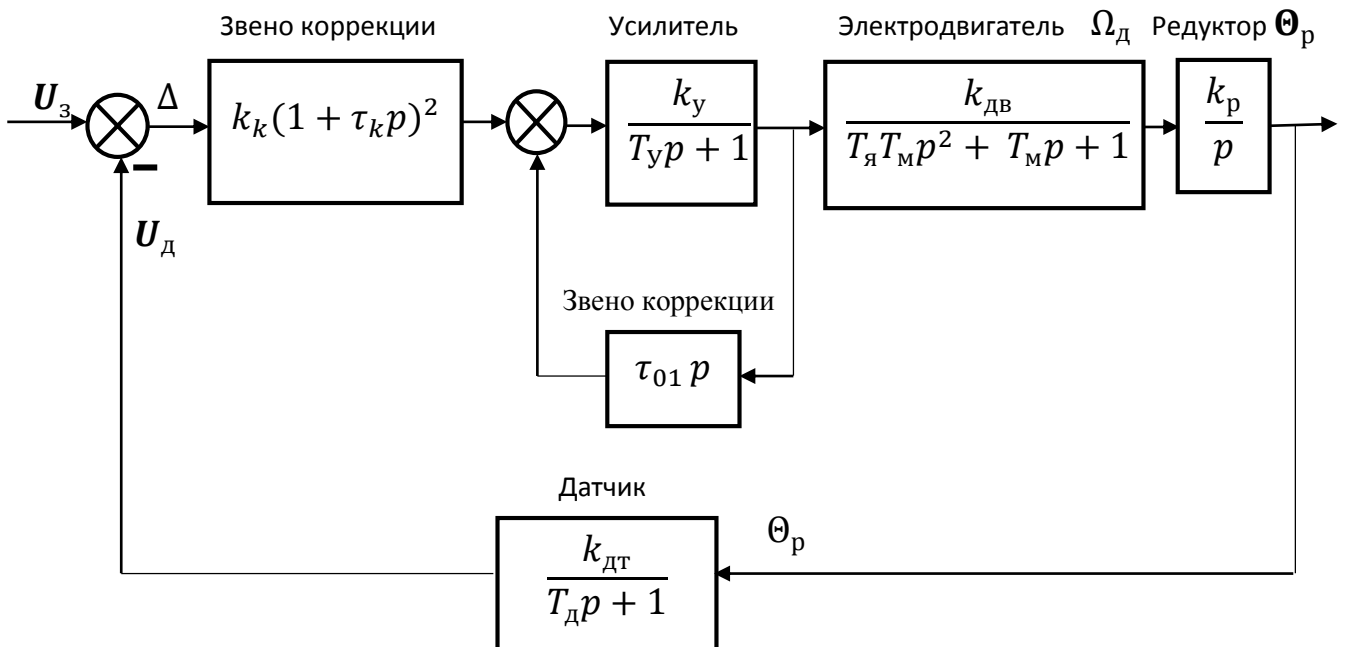
Вариант № 6



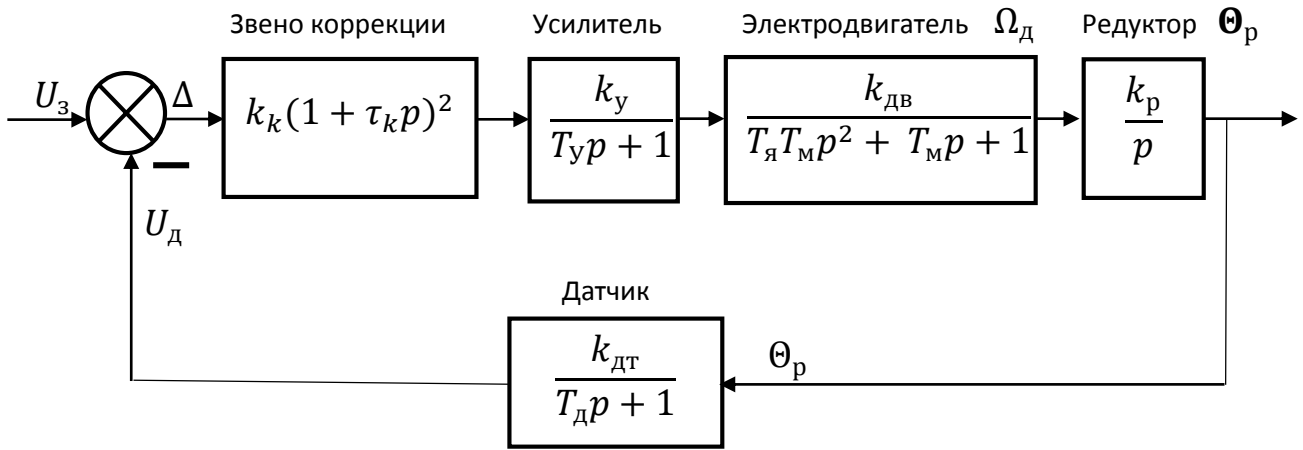
Вариант № 7



Вариант № 8



Вариант № 9



Вариант № 10

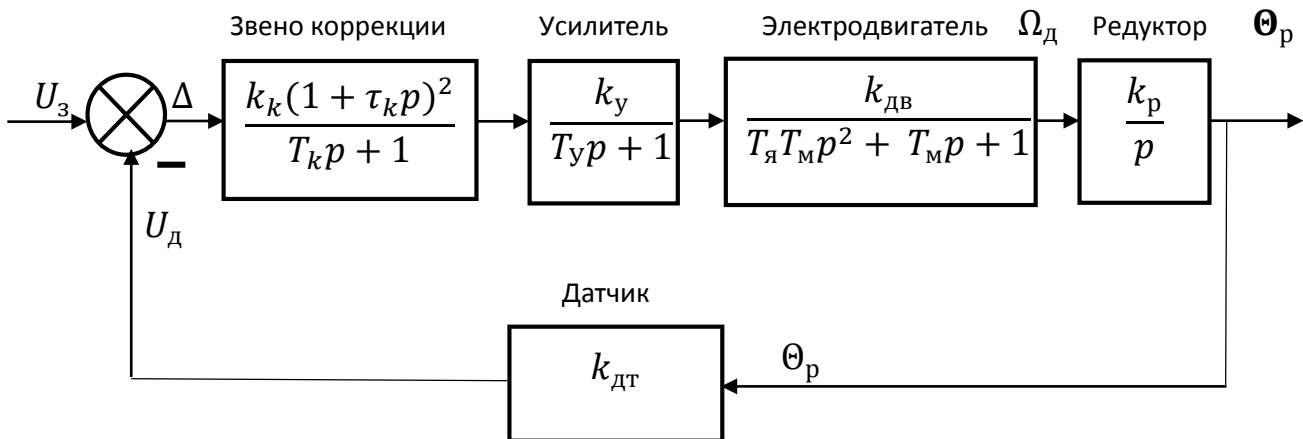


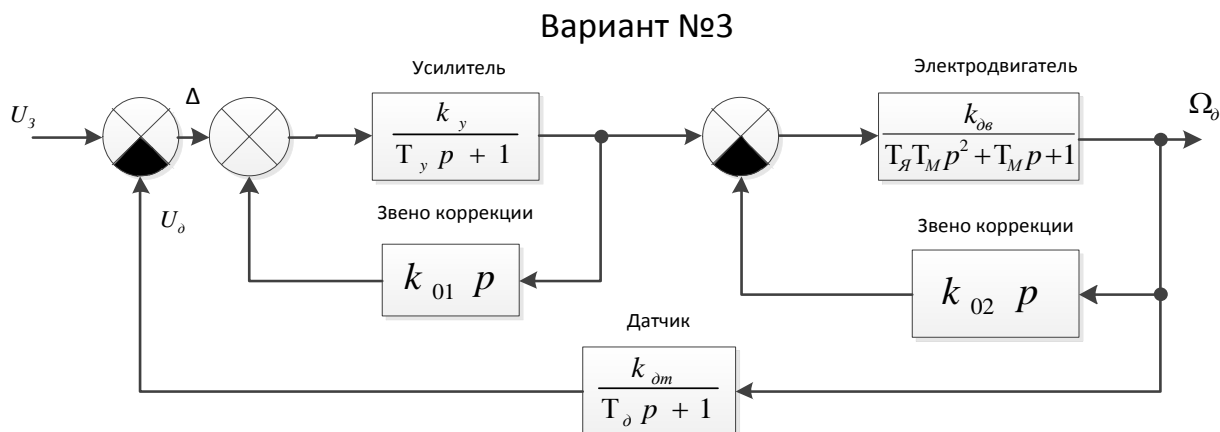
Таблица 1

Варианты задания

Номер варианта задания	Номер структурной схемы САУ	Коэффициент передачи усилителя k_y	Постоянная времени усилителя T_y, c
1	1	$7 \cdot 10^3$	0,08
2	2	$3 \cdot 10^3$	0,04
3	3	$7 \cdot 10^3$	0,08
4	4	$7 \cdot 10^3$	0,08
5	5	$2 \cdot 10^3$	0,04
6	6	$2 \cdot 10^3$	0,04
7	7	$2 \cdot 10^3$	0,04
8	8	$6 \cdot 10^3$	0,08
9	9	$2 \cdot 10^3$	0,04
10	10	$2 \cdot 10^3$	0,04
11	1	$4 \cdot 10^3$	0,07
12	2	$6 \cdot 10^3$	0,08
13	3	$5 \cdot 10^3$	0,07
14	4	$5 \cdot 10^3$	0,07
15	5	$6 \cdot 10^3$	0,08
16	6	$6 \cdot 10^3$	0,08
17	7	$6 \cdot 10^3$	0,08
18	8	$4 \cdot 10^3$	0,07
19	9	$5 \cdot 10^3$	0,08
20	10	$5 \cdot 10^3$	0,08
21	1	$8 \cdot 10^3$	0,09
22	2	$4 \cdot 10^3$	0,06
23	3	$4 \cdot 10^3$	0,09
24	4	$4 \cdot 10^3$	0,09
25	5	$3 \cdot 10^3$	0,06
26	6	$3 \cdot 10^3$	0,06
27	7	$3 \cdot 10^3$	0,06
28	8	$6 \cdot 10^3$	0,09
29	9	$3 \cdot 10^3$	0,06
30	10	$3 \cdot 10^3$	0,06

Пример иллюстрации доклада о результатах исследования САУ

Структурная схема САУ

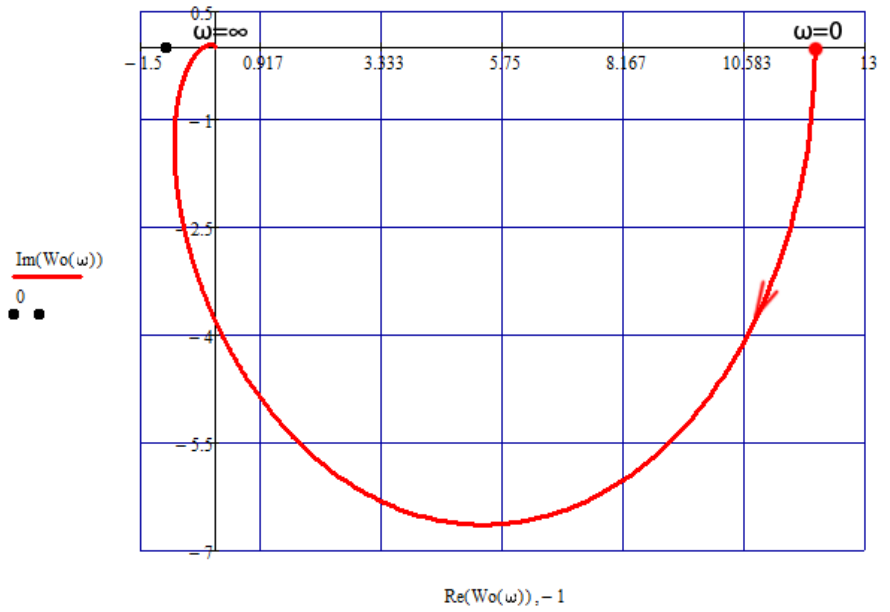


Анализ устойчивости САУ

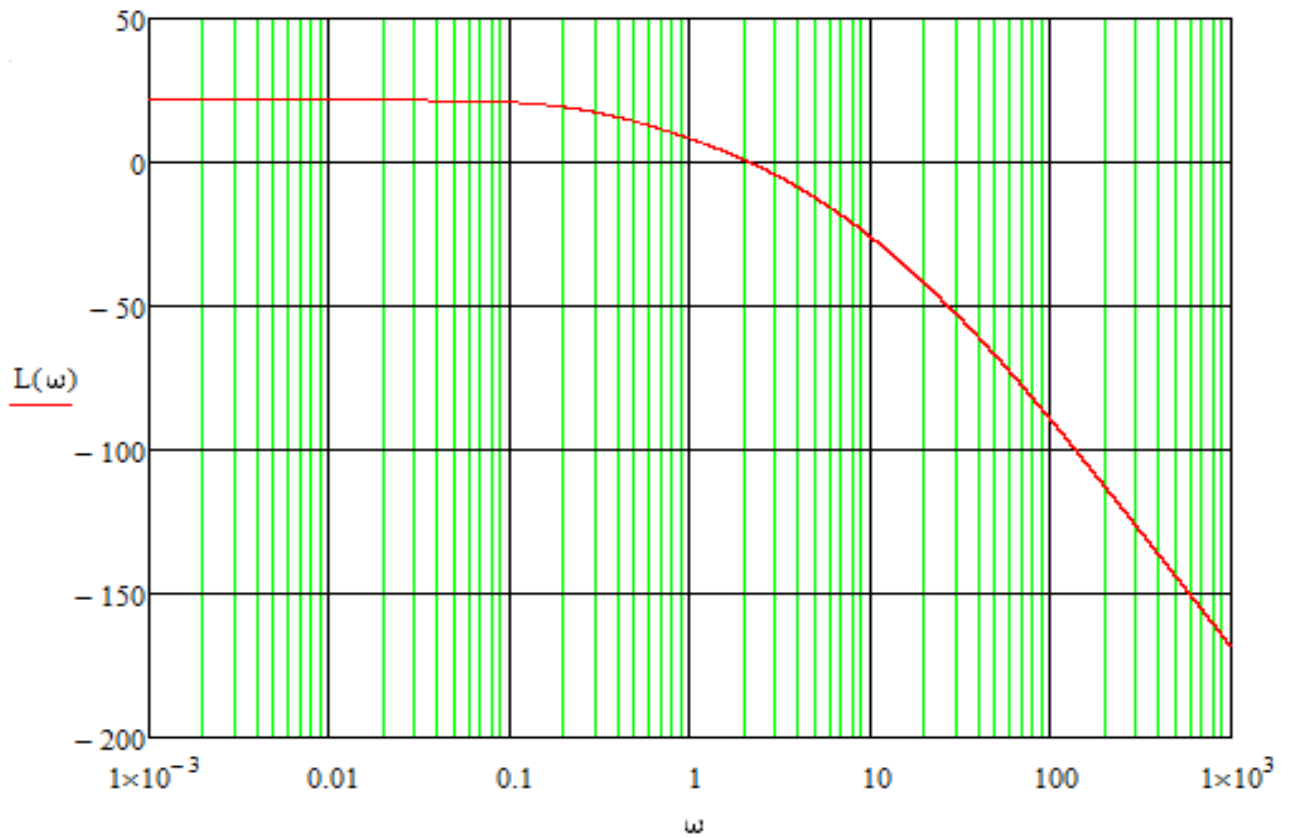
<p>Метод анализа устойчивости</p>	
<p>Корневой метод анализа</p>	
<p>Критерий Рауса-Гурвица</p>	<p>$\Delta_1 = 0.201, \quad \Delta_2 = 0.418, \quad \Delta_3 = 1.448, \quad \Delta_4 = 18.824$</p>

Критерий Найквиста

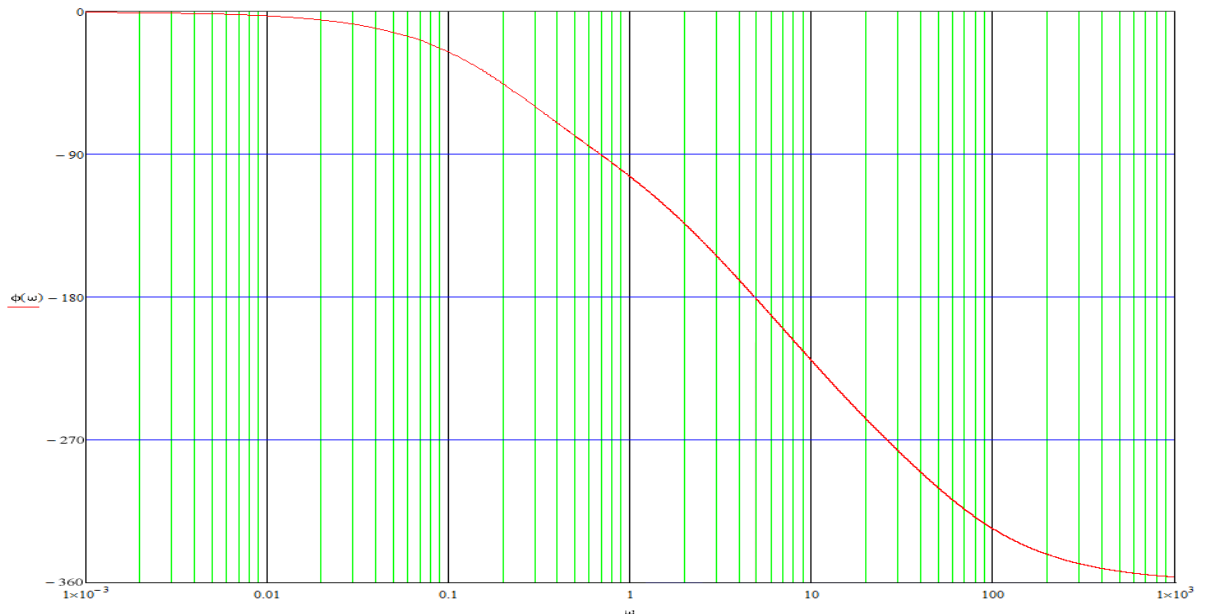
$\omega := 0.001, 0.005, 1000$



ЛАЧХ разомкнутой САУ



ЛФЧХ разомкнутой САУ



Показатели качества САУ (частотный метод)

Запасы устойчивости замкнутой САУ

Запас устойчивости по амплитуде

$$L_A(\omega) = 0; \quad \omega_{\text{ср}} = 4.843$$

$$\Delta L_A = 11.998 \text{ дБ}$$

Запас устойчивости по фазе

$$\omega_{\pi} = 2.14; \quad \varphi(\omega_{\pi}) = -137.33 \text{ град.}$$

$$\Delta \varphi = 180 - |\varphi(\omega_{\pi})| = 42.67 \text{ град.}$$

Показатель колебательности переходного процесса

$$\omega_{0 \text{ зам}} \approx \omega_{\text{ср}} = 2.14; \quad M = \frac{A_3(\omega_{0 \text{ зам}})}{A_3(0)} = 1.1$$

Длительность переходного процесса

$$t_{\text{п}} \approx \frac{2\pi}{\omega_{0 \text{ зам}}} = 2.9 \text{ с}$$

Колебательность переходного процесса

$$N \approx \frac{\omega_{\text{ср}} t_{\text{п}}}{2\pi} \approx 1.$$

Перерегулирование

$$\sigma \approx (1 - \sin \Delta\varphi) 100\% \approx 32\%.$$

Показатели качества САУ (корневой метод)

$$P := \begin{pmatrix} -11.057 \\ -49.961 \\ -0.9289 - 2.5478i \\ -0.9289 + 2.5478j \end{pmatrix}$$

Показатель степени устойчивости САУ

$$\eta = \min_{\{i\}} |\operatorname{Re}(p_i)| = 0.929$$

Длительность переходного процесса

$$t_{\text{п}} \leq \frac{3}{\eta}; \quad t_{\text{п}} \leq 3.2 \text{ с}$$

Показатели степени колебательности переходного процесса

$$z := -0.9289 + 2.5478j$$

$$\mu := \left| \frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)} \right| = 2.743$$

$$\gamma := \frac{\arg(z) \cdot 180}{\pi} = 110.031$$

Анализ точности замкнутой САУ

Коэффициент статической ошибки

$$c_0 = 1 - W_3(0),$$

$$c_0 = \frac{1}{1 - k_y k_{дв} k_{дт}} = 0,077.$$

Коэффициент ошибки по скорости

$$c_1 = \left[\frac{d}{dp} (1 - W_3(p)) \right]_{p=0} = 0,0335.$$