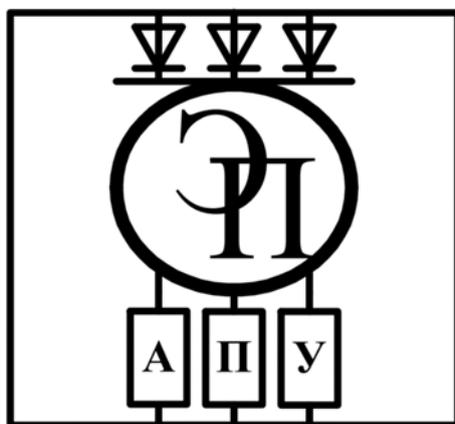


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2021

УДК 658.012.011.56
ББК 32.965
С40

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «06» января 2021 г., протокол № 6

Составитель ст. преподаватель И. С. Стасенко

Рецензент Ю. С. Романович

Методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» очной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Ответственный за выпуск	Г. С. Ленеvский
Корректор	А. А. Подошеvко
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2021

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Типовые звенья САР.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Передаточные функции САР.....	14
3 Лабораторная работа № 3. Синтез ПИД-регулятора.....	29
Список литературы.....	36

Введение

В курсе лабораторных работ студент ознакомится с основными подходами для описания и настройки линейных систем автоматического управления. Будут рассмотрены методы описания линейных систем при помощи дифференциальных уравнений. Это универсальный подход, позволяющий описать объекты и явления различной природы и связи между ними. Язык дифференциальных уравнений позволяет создавать аналогии между объектами различной природы, что позволяет строить универсальные методы управления, применимые для объектов различной природы, т. е. методы управления электрическими цепями применимы для механических схем и наоборот.

Также в ходе выполнения лабораторных работ будут получены навыки описания технических объектов в среде математического моделирования MATLAB.

1 Лабораторная работа № 1. Типовые звенья САУ

Целью лабораторной работы является:

- 1) изучение способов математического описания динамических свойств звеньев систем автоматического управления (САУ);
- 2) получение практических навыков составления дифференциальных уравнений и передаточных функций (ПФ) динамических звеньев и определение их параметров;
- 3) приобретение навыков расчета переходных и частотных характеристик динамических звеньев САУ;
- 4) построение переходных и частотных характеристик динамических звеньев с помощью системы компьютерной математики для настольных персональных компьютеров (ПК).

1.1 Ход работы

1.1.1 Изучение вопросов техники безопасности.

Перед тем как первый раз приступить к работе, необходимо изучить инструкцию по технике безопасности лаборатории, утвержденную соответствующим образом. По окончании инструктажа по технике безопасности производится каждым студентом индивидуальная отметка о прохождении техники безопасности в специальном протоколе (журнале).

1.1.2 Получение варианта индивидуального задания.

У преподавателя необходимо получить вариант индивидуального задания. Параметры электрической схемы каждого исследуемого динамического звена определяются по данным таблицы 1.1 на основе полученного номера варианта. Варианты индивидуальных заданий указаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта	Безынерционное звено		Инерционное звено		Реальное дифференцирующее звено			Колебательное звено		
	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R , кОм	C , мкФ	R_1 , кОм	R_2 , кОм	C , мкФ	R , кОм	L , Гн	C , мкФ
1	1	2	1	0,02	11	24	0,6	0,1	0,1	20
2	2	1	2	0,02	12	23	0,7	0,3	0,3	10
3	3	3	3	0,02	13	22	0,8	0,4	0,4	5
4	4	4	4	0,02	14	21	0,9	0,3	0,2	5
5	5	5	5	0,02	15	20	1	0,8	0,6	1
6	6	6	6	0,02	16	19	1,1	0,6	0,6	1
7	7	1	7	0,02	17	18	1,2	0,6	0,9	0,8
8	8	2	8	0,02	18	17	1,3	0,3	0,2	8
9	9	3	9	0,02	19	16	1,4	0,4	0,2	6

Окончание таблицы 1.1

Номер варианта	Безынерционное звено		Инерционное звено		Реальное дифференцирующее звено			Колебательное звено		
	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R , кОм	C , мкФ	R_1 , кОм	R_2 , кОм	C , мкФ	R , кОм	L , Гн	C , мкФ
10	1	4	1	0,02	20	15	1,5	0,5	0,3	3
11	2	5	2	0,02	21	14	1,6	0,2	0,8	6
12	3	6	3	0,02	22	13	1,7	0,2	0,4	8
13	4	7	4	0,02	23	12	1,8	0,3	0,3	10
14	5	8	5	0,02	24	11	1,9	0,5	0,2	4
15	6	9	6	0,02	25	10	2	0,8	0,1	2
16	6	9	9	0,02	11	24	0,6	0,5	0,3	3
17	5	5	4	0,02	13	22	0,8	0,3	0,3	10
18	6	6	6	0,02	18	17	1,3	0,1	0,1	20
19	7	1	3	0,02	12	22	0,8	0,2	0,1	2
20	2	2	2	0,02	8	10	0,9	0,4	0,4	5
21	3	3	1	0,02	5	12	1,1	0,5	0,3	3
22	4	4	8	0,02	4	8	0,9	0,7	0,5	2
23	1	2	5	0,02	11	28	1,2	0,8	0,2	2
24	2	3	6	0,02	14	22	1,6	0,6	0,1	3
25	3	4	7	0,02	15	24	0,6	0,7	0,3	8
26	9	5	8	0,02	25	10	0,8	0,5	0,2	10
27	8	6	3	0,02	18	15	0,9	0,4	0,1	2
28	7	8	2	0,02	22	34	1,2	0,1	0,6	4
29	5	6	5	0,02	12	35	0,5	0,6	0,2	5
30	2	3	1	0,02	10	22	0,6	0,9	0,2	8

1.1.3 Составление математического описания заданных динамических звеньев.

1.1.3.1 Изображение электрической схемы динамического звена.

Для каждого заданного типового динамического звена изображается электрическая схема согласно рисункам 1.1–1.4.

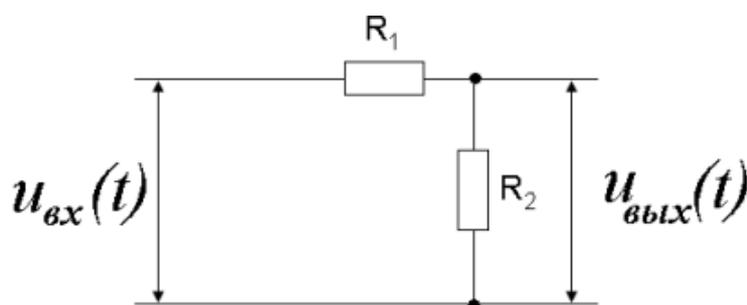


Рисунок 1.1 – Электрическая схема безынерционного динамического звена

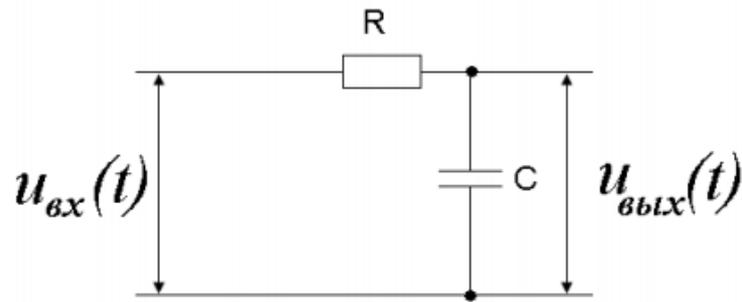


Рисунок 1.2 – Электрическая схема инерционного динамического звена

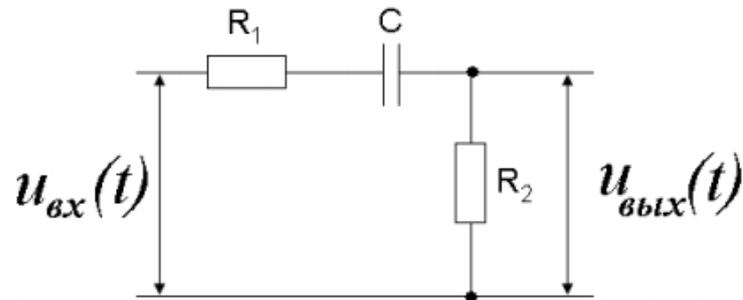


Рисунок 1.3 – Электрическая схема реального дифференцирующего звена

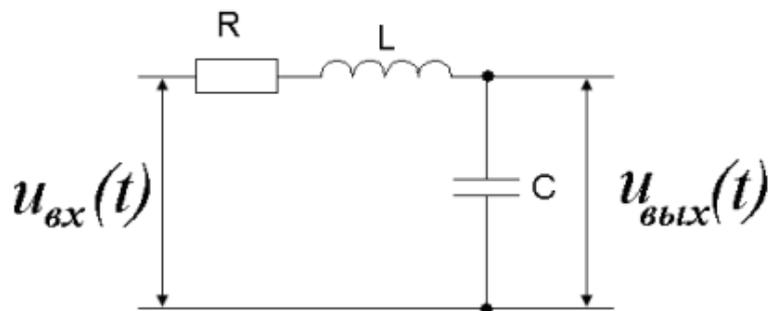


Рисунок 1.4 – Электрическая схема колебательного динамического звена

1.1.3.2 Запись системы дифференциальных и алгебраических уравнений звена.

На основе электрической принципиальной схемы типового динамического звена выполнить математическое описание звена. Математическое описание должно быть представлено в виде системы линейных неоднородных дифференциальных уравнений, которые выводятся на основании первого и второго законов Кирхгофа и закона Ома во временной области. В качестве задающего воздействия принять $u_{вх}$, в качестве выходного сигнала – $u_{вых}$. Предполагается, что выходная цепь звена подключена на бесконечно большое сопротивление.

1.1.4 Вывод передаточных функций типовых динамических звеньев и определения их параметров.

Для определения частотных и временных свойств звена необходимо представить математическое описание в частотной области. Для этого определяют ПФ звена. В качестве ПФ звена необходимо принять отношение изображений

выходного сигнала к управляющему сигналу. Для этого полученные системы дифференциальных уравнений преобразуют по Лапласу, предполагая, что начальные условия нулевые.

1.1.5 Запуск системы компьютерной математики.

При выполнении работы необходимо использовать пакет компьютерной математики, установленный на компьютер. Рекомендуется использовать MATLAB из состава основного программного обеспечения или портативную версию. Допускается применение любого другого пакета компьютерной математики, однако это делается под свою ответственность.

1.1.6 Запись выражений передаточных функций в среде компьютерной математики.

1.1.6.1 Использование команд настройки среды MATLAB.

В начале командного файла рекомендуется вызвать команды очистки экрана **clc**, удаления ранее созданных переменных из рабочей области (**clear all**) и закрытия всех ранее открытых графических окон (**close all**). В конце строки команды рекомендуется помещать комментарии, которые начинаются после символа процента и действуют до конца строки.

```
clc      % очистка окна
clear all % очистка старых переменных
close all % закрытие всех открытых окон графиков
```

1.1.6.2 Объявление переменных с параметрами передаточной функции (ПФ).

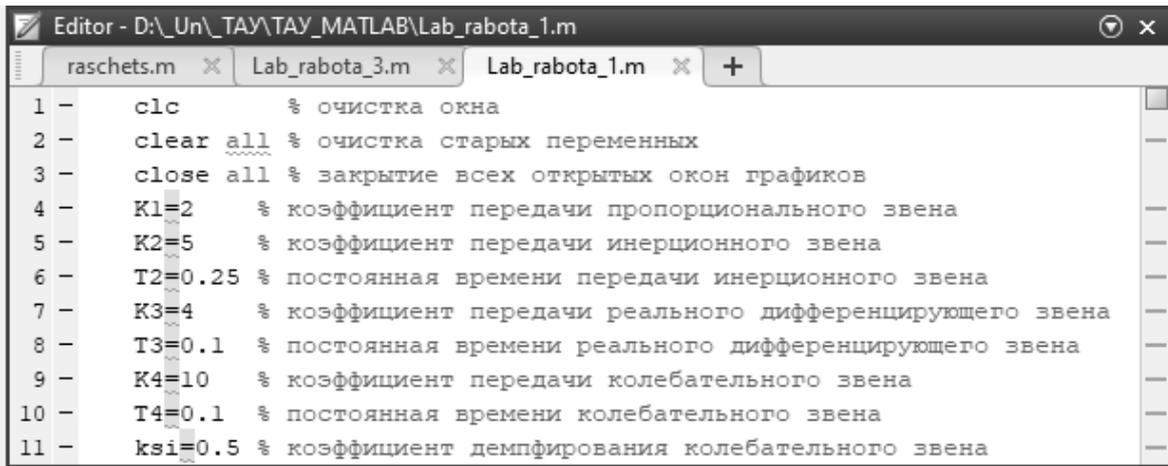
Далее следует объявить переменные с ненулевыми параметрами заданных ПФ, используя оператор присваивания (=). При этом для имен следует применять только латинские символы и цифры. Необходимо помнить, что имена переменных MATLAB чувствительны к регистру. На рисунке 1.5 показан пример объявления переменных с параметрами звеньев.

1.1.6.3 Задание передаточных функций исходной САУ.

В среде MATLAB для описания и преобразования ПФ непрерывных САУ удобно использовать встроенные функции **Control System Toolbox**. Значения переменных параметров функций задаются первоначально, а далее с помощью функции **tf** (с параметром **'variable','p'** управляющим отображением оператора Лапласа в виде p). Формат задания ПФ:

Имя_ПФ=**tf**([полином_числителя],[полином_знаменателя], 'variable','p')

На рисунке 1.6 показан пример задания ПФ.



```

Editor - D:\Un\TAY\TAY_MATLAB\Lab_rabota_1.m
raschets.m x Lab_rabota_3.m x Lab_rabota_1.m x +
1 -   clc           % очистка окна
2 -   clear all    % очистка старых переменных
3 -   close all   % закрытие всех открытых окон графиков
4 -   K1=2        % коэффициент передачи пропорционального звена
5 -   K2=5        % коэффициент передачи инерционного звена
6 -   T2=0.25     % постоянная времени передачи инерционного звена
7 -   K3=4        % коэффициент передачи реального дифференцирующего звена
8 -   T3=0.1     % постоянная времени реального дифференцирующего звена
9 -   K4=10       % коэффициент передачи колебательного звена
10 -  T4=0.1     % постоянная времени колебательного звена
11 -  ksi=0.5    % коэффициент демпфирования колебательного звена

```

Рисунок 1.5 – Пример объявления переменных с параметрами звеньев

```

11 -   ksi=0.5 % коэффициент демпфирования колебательного звена
12 -   W1=tf([K1],[1],'variable','p') % ПФ пропорционального звена
13 -   W2=tf([K2],[T2 1],'variable','p') % ПФ инерционного звена
14 -   W3=tf([K3 0],[T3 1],'variable','p') % ПФ реально-дифференцирующего звена
15 -   W4=tf([K4],[T4^2 2*ksi*T4 1],'variable','p') % ПФ колебательного звена

```

Рисунок 1.6 – Объявление ПФ динамических звеньев

1.1.6.4 Выполнение командного файла работы.

Выполнение командного файла производится нажатием кнопки *Run* или функциональной клавиши *F5*. При необходимости система предложит сменить текущий каталог (папку) на ту, где находится командный файл. При этом будет выведено сообщение рисунка 1.7. Для продолжения в окне диалога следует нажать кнопку «Change Folder».

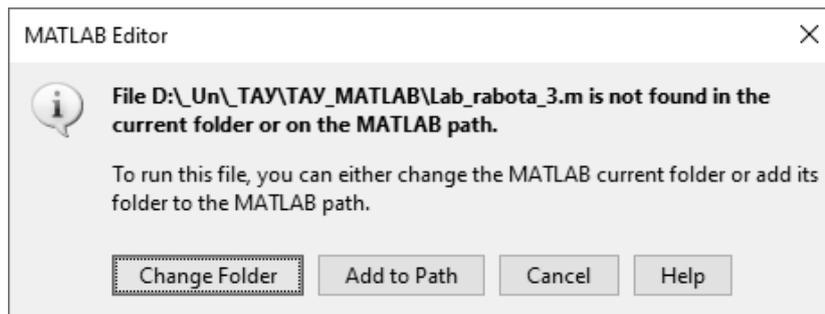


Рисунок 1.7 – Диалоговое окно «Смена текущей папки среды MATLAB»

Результаты расчета отображаются в командном окне Command Window и в рабочей области MATLAB (окне Workspace). Из командного окна результаты копируются через буфер обмена операционной системы (ОС) в электронный документ отчета по лабораторной работе.

Пример выполнения расчетов ПФ изображен на рисунке 1.8.

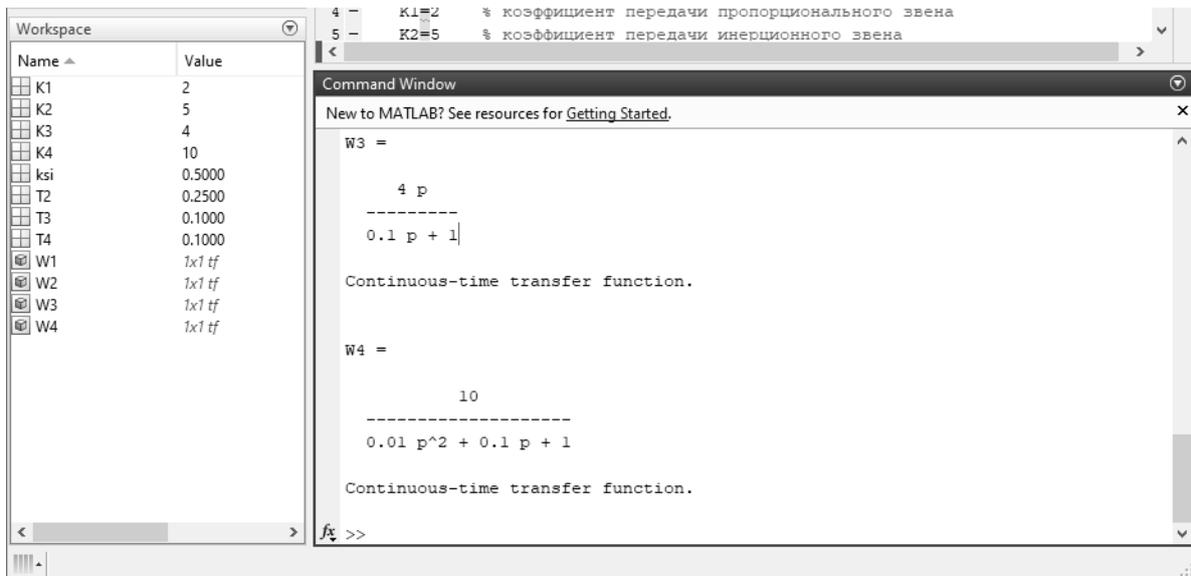


Рисунок 1.8 – Пример отображения передаточных функций

1.1.7 Запись в программе выражений переходных характеристик типовых звеньев.

1.1.7.1 Изображение переходной характеристики.

Выражение переходной характеристики получают аналитически с помощью обратных преобразований Лапласа (1.1)–(1.7). Для этого используется изображение выходного сигнала на выходе динамического звена при подаче на вход единичного ступенчатого воздействия:

$$h(p) = W(p) \cdot 1(p), \quad (1.1)$$

где $W(p)$ – передаточная функция звена;

$1(p)$ – изображение единичного ступенчатого воздействия:

$$1(p) = \frac{1}{p}. \quad (1.2)$$

Тогда выражение изображения переходной характеристики динамического звена

$$h(p) = \frac{W(p)}{p}. \quad (1.3)$$

Изображение переходной характеристики безынерционного звена имеет общий вид:

$$h_{np}(p) = \frac{K}{p}. \quad (1.4)$$

Изображение переходной характеристики инерционного звена

$$h_{np}(p) = \frac{K}{(T \cdot p + 1) \cdot p} = \frac{K}{T \cdot p^2 + p}. \quad (1.5)$$

Изображение переходной характеристики реального дифференцирующего звена

$$h_{np}(p) = \frac{K \cdot p}{(T \cdot p + 1) \cdot p} = \frac{K}{T \cdot p + 1}. \quad (1.6)$$

Изображение переходной характеристики колебательного звена

$$h_{np}(p) = \frac{K}{(T^2 \cdot p^2 + 2T \cdot \xi \cdot p + 1) \cdot p} = \frac{K}{T^2 \cdot p^3 + 2T \cdot \xi \cdot p^2 + p}. \quad (1.7)$$

1.1.8 Расчет переходных характеристик типовых звеньев.

1.1.8.1 Построение графиков переходных характеристик.

Построение и анализ переходной характеристики динамического звена, описанного ПФ (согласно п. 1.1.6), в среде MATLAB автоматически выполняется с помощью функции **step** (ПФ). Перед построением каждого нового графика в MATLAB следует создать новое графическое командой **figure**, а после построения характеристики включается отображение координатной сетки графика командой **grid on**.

Пример добавление в *m*-файл описания построения переходных характеристик динамических звеньев показан на рисунке 1.9.

```

16 - figure      % создание нового окна графика
17 - step(W1)    % построение переходной характеристики безынерционного звена
18 - grid on    % включение сетки графика
19 - figure      % создание нового окна графика
20 - step(W2)    % построение переходной характеристики инерционного звена
21 - grid on    % включение сетки графика
22 - figure      % создание нового окна графика
23 - step(W3)    % построение переходной характеристики реально-дифференцирующего
24 - grid on    % включение сетки графика
25 - figure      % создание нового окна графика
26 - step(W4)    % построение переходной характеристики колебательного звена
27 - grid on    % включение сетки графика

```

Рисунок 1.9 – Состав *m*-файла с построением переходных характеристик

1.1.8.2 Анализ параметров качества регулирования по переходным характеристикам.

Каждый полученный график переходной характеристики анализируется с помощью раздела **Characteristics** всплывающего меню (вызывается кликом правой кнопки мыши по графику), который устанавливает на графике следующие характерные точки:

.Steady State – установившееся значение сигнала на выходе $Y_{уст}$;

.Peak response – максимальное значение сигнала на выходе Y_{\max} при времени t_{\max} , что также дает величину перерегулирования σ в процентах;

.Setting Time – время регулирования $t_{\text{рег}}$.

Для определения показателей качества переходной характеристики, сначала выполняется настройка отображения времени регулирования (setting time) на значение трубки 5 % (по умолчанию обычно 2 %). Для этого выполняется клик правой кнопкой мышки по графику и во всплывающем меню выбирается пункт **Properties**. После выбора этого пункта на экране откроется окно свойств графика, как изображено на рисунке 1.10, в котором следует перейти на вкладку **Options** и в поле **Show setting time within** поменять значение с 2 % на 5 %. После чего нажать кнопку **Close** и вернуться к графику.

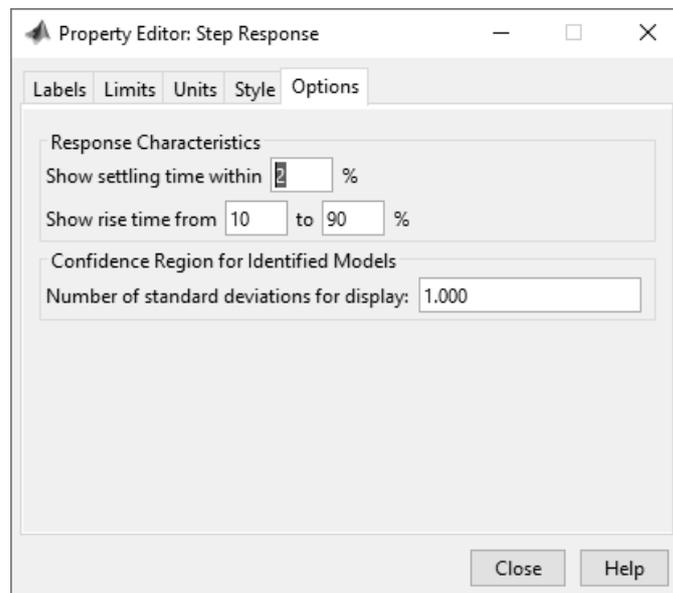


Рисунок 1.10 – Вид всплывающего меню и окна опций переходной характеристики

Далее выполняется повторный клик правой кнопкой мыши по графику для вызова всплывающего меню, в котором выбирается пункт **Characteristics**. После этого раскрывается подменю, в котором выбираются пункт **Setting Time** для отображения точки времени регулирования. Для подсветки значения точки выполняется клик мышкой по ней.

1.1.9 Определение выражений частотных характеристик динамических звеньев.

Для определения выражений частотных характеристик используется ПФ звена, в которой заменяется оператор Лапласа на $p = j\omega$ (где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица и ω – частота). Тогда получается выражение частотной ПФ динамического звена $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$, в котором далее выделяются вещественно частотная характеристика (ВЧХ) $U(\omega)$ и мнимо частотная характеристика (МЧХ) $V(\omega)$.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) звена находится на основе выражения

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}. \quad (1.8)$$

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) звена определяется как

$$\Psi(\omega) = \arctan\left(\frac{V(\omega)}{U(\omega)}\right). \quad (1.9)$$

1.1.10 Оформление отчета.

1.2 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется индивидуально каждым студентом на листах формата А4. Отчет должен содержать следующее:

- 1) титульный лист;
- 2) исходные электрические схемы исследуемых типовых динамических звеньев со значениями параметров их элементов согласно заданному варианту;
- 3) вывод систем уравнений, описывающих типовые динамические звенья;
- 4) ПФ исследуемых типовых динамических звеньев;
- 5) расчет параметров ПФ исследуемых динамических звеньев;
- 6) графики переходных характеристик с анализом показателей качества;
- 7) выражения частотных характеристик исследуемых динамических звеньев;
- 8) графики частотных характеристик.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105–95.

Контрольные вопросы

- 1 Дать определение понятия «Передаточная функция».
- 2 Дать определение динамического режима.
- 3 Дать определение статического режима.
- 4 Дать определение переходной характеристики.
- 5 Дать определение импульсной характеристики.
- 6 Пояснить назначение преобразований Лапласа.
- 7 Пояснить определение статического коэффициента передачи звена по переходной характеристике динамического звена.
- 8 Определить по переходной характеристике время регулирования.
- 9 Записать выражение ПФ безынерционного динамического звена.
- 10 Записать выражение ПФ инерционного динамического звена.
- 11 Записать выражение ПФ интегрирующего динамического звена.
- 12 Записать выражение ПФ идеального дифференцирующего динамического звена.
- 13 Записать выражение ПФ реального дифференцирующего динамического звена.
- 14 Записать выражение ПФ колебательного динамического звена.

- 15 Записать выражение ПФ форсирующего динамического звена.
- 16 Записать выражение ПФ изодромного динамического звена.
- 17 Дать определение вещественной частотной характеристики.
- 18 Дать определение мнимой частотной характеристики.
- 19 Дать определение АЧХ.
- 20 Дать определение ФЧХ.
- 21 Дать определение амплитудно-фазовой характеристики.
- 22 Построить асимптотическую ЛАЧХ для инерционного динамического звена.
- 23 Построить асимптотическую ЛАЧХ для колебательного динамического звена.
- 24 Построить асимптотическую ЛАЧХ для реального дифференцирующего динамического звена.

2 Лабораторная работа № 2. Передаточные функции САР

Целью лабораторной работы является:

- 1) изучение методов преобразования структурных схем динамических моделей линейных САУ;
- 2) изучение методов оценки устойчивости линейных систем автоматического управления;
- 3) приобретение навыков расчета корневых и частотных показателей качества линейных систем автоматического управления;
- 4) практическая оценка устойчивости линейных САУ с помощью системы компьютерной математики для настольных персональных компьютеров (ПК).

2.1 Ход работы

2.1.1 Получение варианта индивидуального задания.

У преподавателя необходимо получить вариант индивидуального задания, которое включает номер исходной структурной схемы, отдельный номер варианта критерия устойчивости и дополнительный номер варианта параметров ПФ элементов структурной схемы САУ на основе данных таблицы 2.1 для полученного номера варианта.

2.1.2 Преобразование структурной схемы САУ.

Используя преобразования структурной схемы, путем объединения отдельных элементов, соединенных последовательно или параллельно, или встречно-параллельно в один модуль исходная структурная схема приводится к эквивалентному виду, показанному на рисунке 2.1.

Таблица 2.1 – Таблица исходных данных

Вариант	$W_1(p)$				$W_2(p)$				$W_3(p)$		$W_4(p)$	
	K_1	τ_1	T_1	k_{01}	K_2	τ_2	T_2	k_{02}	K_3	T_3	K_4	T_4
0	4	0,1	0,05	0	2	0	0,2	1	3	0,25	0,5	0
1	2	0	0,1	0	5	0,2	0,1	1	2,5	0,15	0,2	0
2	0,5	0,5	0,2	1	4	0	0,25	0	5	0	0,1	0,1
3	2	0,2	0,15	1	8	0,1	0,4	0	0,5	0	0,25	0,05
4	10	0,25	0,5	0	2	0	0,15	0	4	0,2	0,4	0
5	3	0	0,25	0	4	0,15	0,2	1	2	0,4	0,5	0
6	8	0,1	0,4	1	3	0,25	0,05	0	5	0	0,25	0,15
7	6	0	0,5	0	2	0,4	0,25	1	3	0	0,2	0,1
8	4	0,4	0,2	1	6	0,1	0,4	1	4	0,25	0,1	0
9	7	0,5	0,1	0	9	0,2	0,15	1	6	0,3	0,25	0

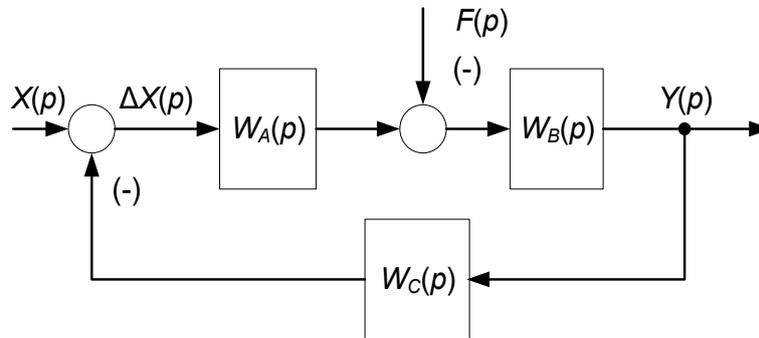


Рисунок 2.1 – Эквивалентная структурная схема

Для каждого звена эквивалентной схемы определяются соответствующие им значения ПФ $W_A(p)$, $W_B(p)$ и $W_C(p)$.

2.1.3 Вывод передаточных функций линейной САУ.

2.1.3.1 Получение ПФ разомкнутой САУ по задающему воздействию.

Разомкнутая САУ по задающему воздействию показана на рисунке 2.2.

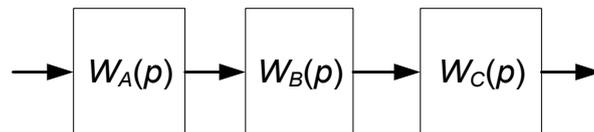


Рисунок 2.2 – Структурная схема разомкнутой САУ

ПФ разомкнутой по задающему воздействию САУ:

$$W_p(p) = W_A(p) \cdot W_B(p) \cdot W_C(p). \quad (2.1)$$

2.1.3.2 Получение ПФ замкнутой САУ по задающему воздействию.

ПФ САУ по задающему воздействию определяется при отсутствии возмущения $F(p) = 0$ на основе следующей структурной схемы САУ (рисунок 2.3).

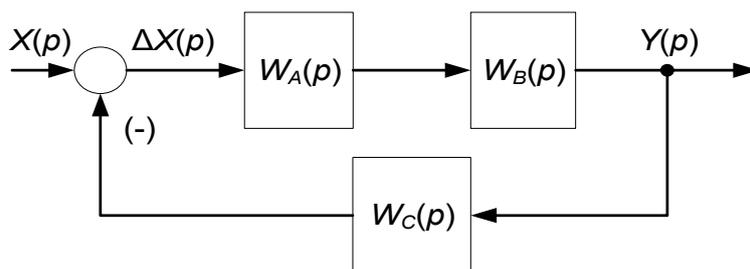


Рисунок 2.3 – Структурная схема поиска ПФ по задающему воздействию

ПФ замкнутой САУ по задающему воздействию определяется как отношение изображения выходного сигнала к входному по выражению

$$W_s(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{W_A(p) \cdot W_B(p)}{1 + W_A(p) \cdot W_B(p) \cdot W_C(p)}. \quad (2.2)$$

2.1.3.3 Получение ПФ замкнутой САУ по возмущающему воздействию.

ПФ САУ по возмущающему воздействию определяется при отсутствии задания $X(p) = 0$ на основе структурной схемы САУ рисунка 2.4.

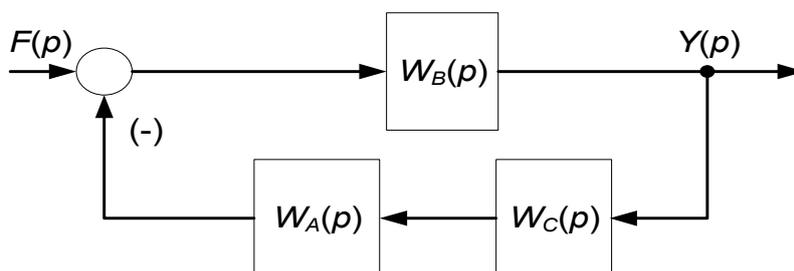


Рисунок 2.4 – Структурная схема для поиска ПФ по возмущению

ПФ замкнутой САУ по возмущающему воздействию определяется как отношение изображения выходного сигнала к входному по выражению

$$W_f(p) = \frac{Y(p)}{F(p)} = \frac{W_B(p)}{1 + W_A(p) \cdot W_B(p) \cdot W_C(p)}. \quad (2.3)$$

2.1.3.4 Получение ПФ ошибки замкнутой САУ от задающего воздействия.

ПФ САУ по ошибке от задающего воздействия определяется при отсутствии возмущения $F(p) = 0$ на основе структурной схемы САУ, изображённой на рисунке 2.5.

ПФ САУ по ошибке от задающего воздействия определяется как отношение изображения выходного сигнала по ошибке к изображению входного задающего сигнала:

$$W_{dx}(p) = \frac{\Delta X(p)}{X(p)} = \frac{1}{1 + W_A(p) \cdot W_B(p) \cdot W_C(p)}. \quad (2.4)$$

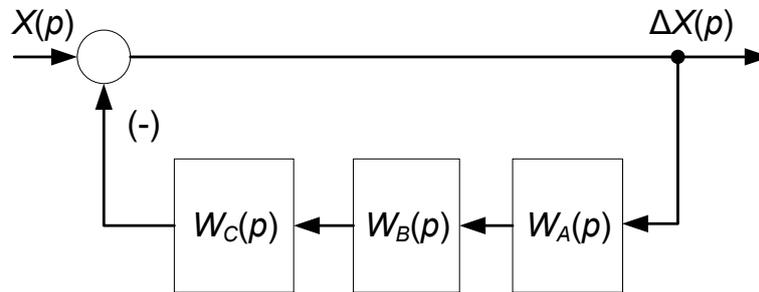


Рисунок 2.5 – Структурная схема для поиска ПФ по ошибке от задания

2.1.3.5 Получение ПФ ошибки замкнутой САУ от возмущающего воздействия.

ПФ САУ по ошибке от возмущающего воздействия определяется при отсутствии задания $X(p) = 0$ на основе структурной схемы, изображённой на рисунке 2.6.

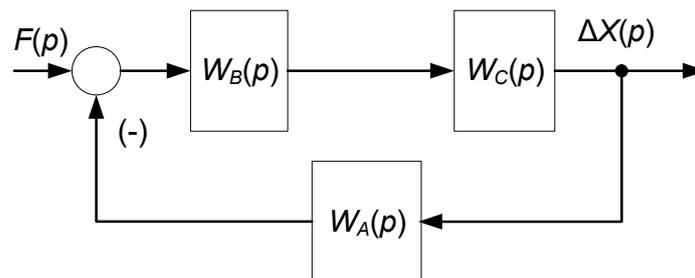


Рисунок 2.6 – Структурная схема для поиска ПФ по ошибке от возмущения

ПФ САУ по ошибке от возмущающего воздействия определяется как отношение изображения выходного сигнала ошибки регулирования к изображению входного возмущающего воздействия:

$$W_{df}(p) = \frac{\Delta X(p)}{F(p)} = \frac{W_B(p) \cdot W_C(p)}{1 + W_A(p) \cdot W_B(p) \cdot W_C(p)}. \quad (2.5)$$

2.1.4 Запуск системы компьютерной математики.

При выполнении работы необходимо использовать пакет компьютерной математики, установленный на компьютер. Рекомендуется использовать MATLAB из состава основного программного обеспечения или портативную версию. Допускается применение любого другого пакета компьютерной математики, однако это делается под свою ответственность.

2.1.5 Определение корней характеристического уравнения.

В качестве характеристического уравнения следует принять приведенный числитель выражения:

$$S(p) = W_p(p) + 1 = W_A(p) \cdot W_B(p) \cdot W_C(p) + 1. \quad (2.6)$$

Характеристическое уравнение линейной системы представлено в виде полинома с конечной старшей степенью. Для данного полинома необходимо определить корни, причём, на основании основной теоремы алгебры, число корней полинома совпадает со старшей степенью полинома. На основании корней характеристического уравнения приближённо определяют динамические показатели качества системы. Для определения устойчивости системы корни характеристического уравнения отображают на комплексной плоскости. В соответствии с критерием устойчивости Ляпунова, для того чтобы линейная система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического полинома лежали слева от мнимой оси.

2.1.6 Определение корней характеристического уравнения.

Критерий Ляпунова является первичным критерием определения устойчивости системы автоматического управления, однако данный критерий указывает только на факт устойчивости системы. При построении САУ этого не достаточно, поэтому на его основании был построен ряд других способов определения устойчивости систем, которые кроме определения самого факта устойчивости системы дают рекомендации по её преобразованию. Студенту предлагается оценить устойчивость системы по одному из этих методов в соответствии с вариантом задания.

2.1.7 Оформление отчета.

2.2 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется индивидуально каждым студентом на листах формата А4. Отчет должен содержать следующее:

- 1) титульный лист;
- 2) исходные данные: вариант исходной структурной схемы САУ, значения параметров динамических звеньев САУ согласно заданному варианту и наименование метода устойчивости;
- 3) ПФ преобразованной структурной схемы;
- 4) ПФ разомкнутой САУ по задающему воздействию;
- 5) ПФ замкнутой САУ по задающему воздействию;
- 6) ПФ замкнутой САУ по возмущающему воздействию;
- 7) ПФ ошибки замкнутой САУ от задающего воздействия;
- 8) ПФ ошибки замкнутой САУ от возмущающего воздействия;
- 9) характеристическое уравнение САУ и его корни, нанесенные на комплексную плоскость;
- 10) анализ корневых показателей качества линейной САУ;

11) оценка устойчивости линейной САУ в соответствии с заданным вариантом критерия устойчивости.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105–95.

2.3 Варианты индивидуальных заданий

Задания для лабораторной работы выбираются в соответствии с вариантом студента по списку из рисунков 2.7–2.36. Параметры схемы выбираются из таблицы 2.1 по последней цифре номера варианта.

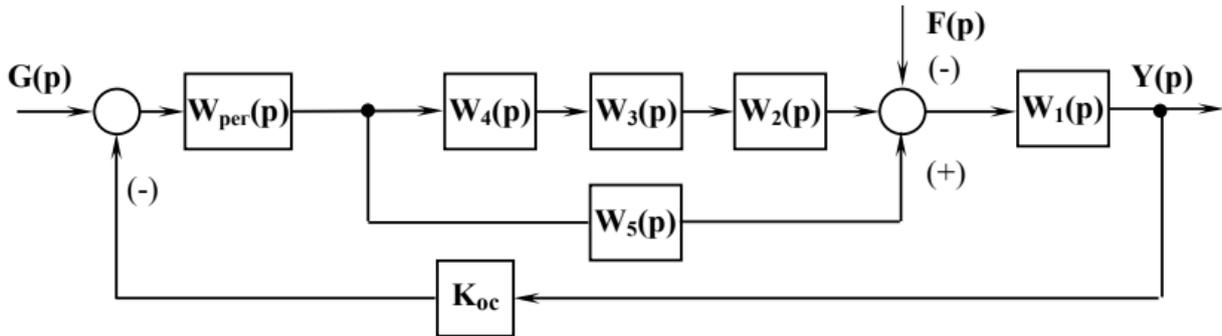


Рисунок 2.7 – Структурная схема для варианта 1

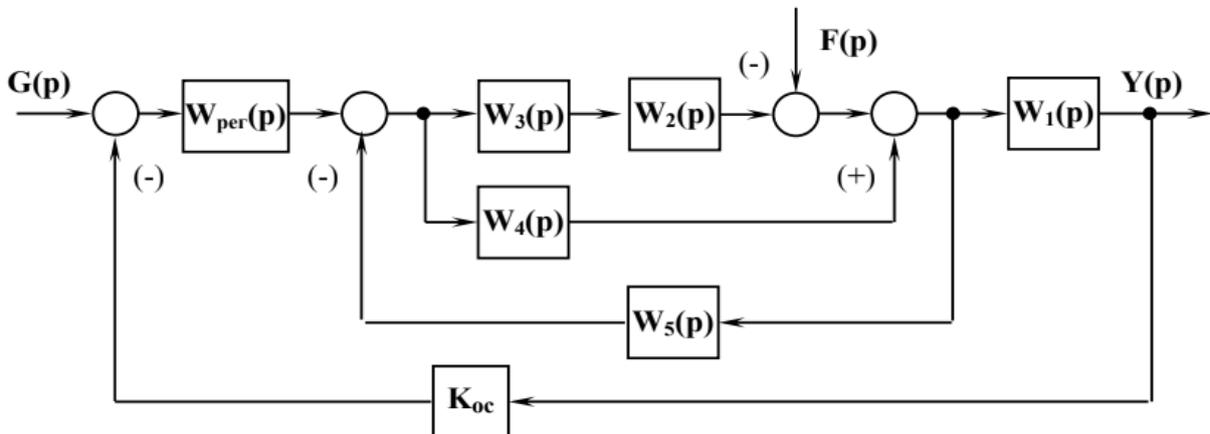


Рисунок 2.8 – Структурная схема для варианта 2

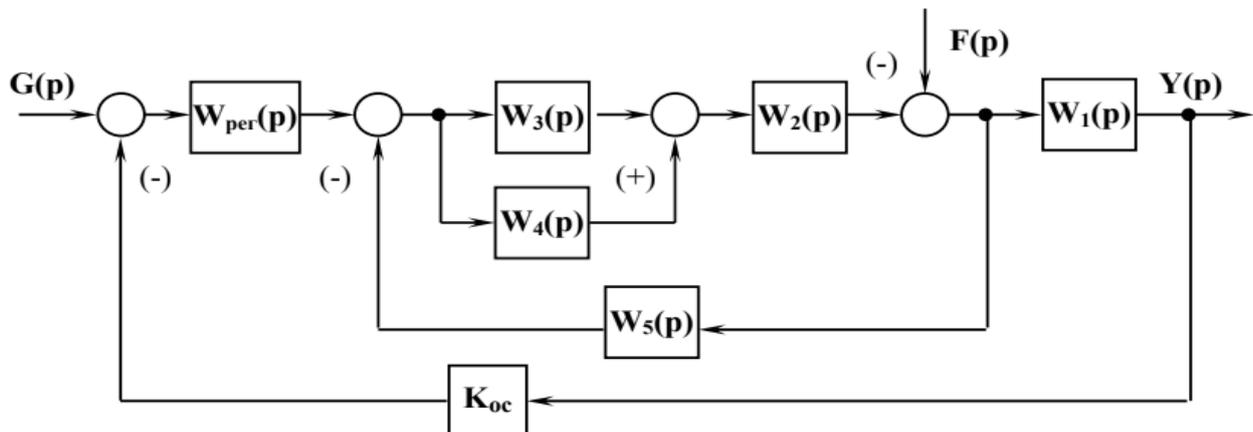


Рисунок 2.9 – Структурная схема для варианта 3

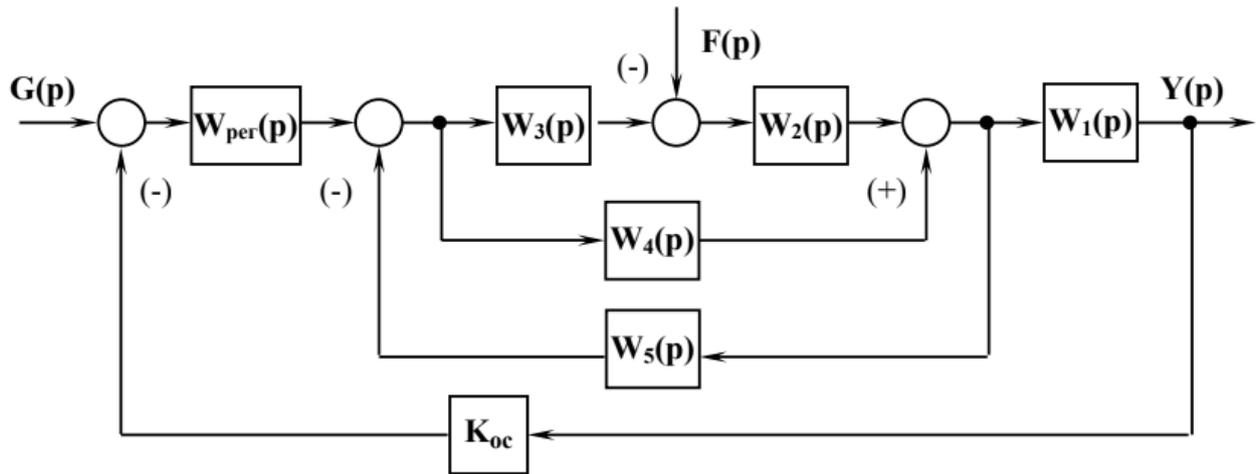


Рисунок 2.10 – Структурная схема для варианта 4

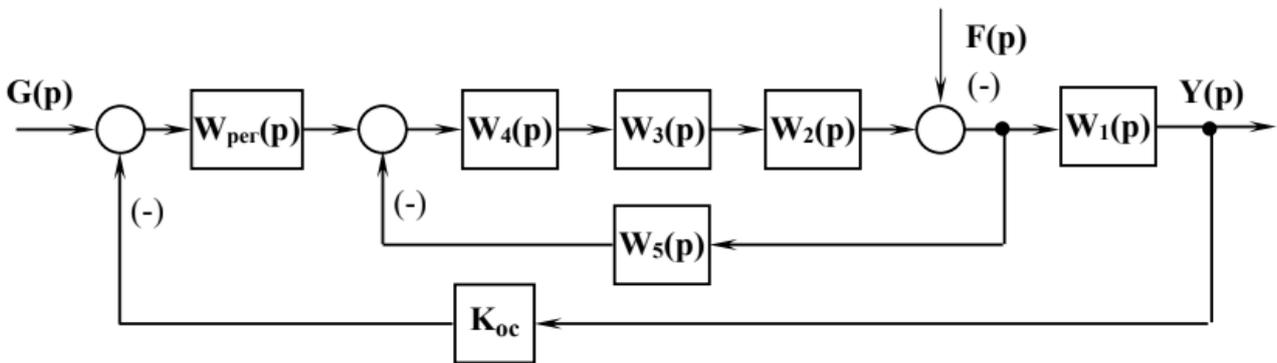


Рисунок 2.11 – Структурная схема для варианта 5

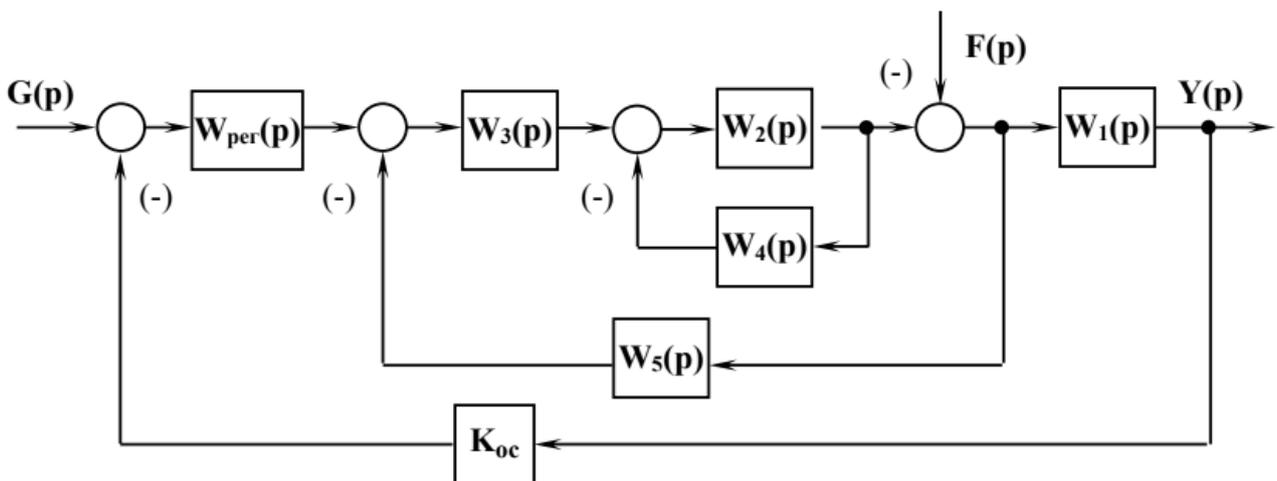


Рисунок 2.12 – Структурная схема для варианта 6

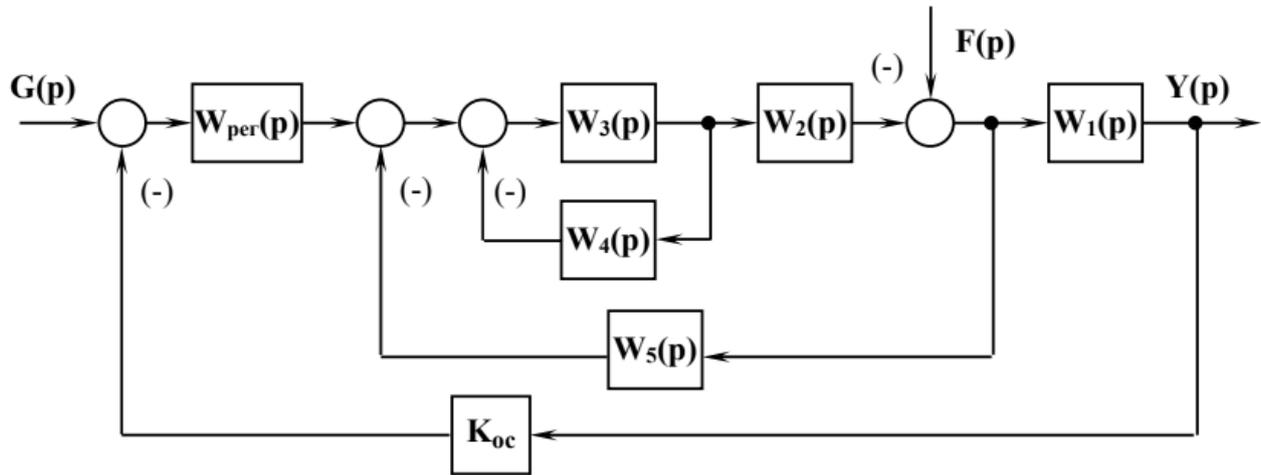


Рисунок 2.13 – Структурная схема для варианта 7

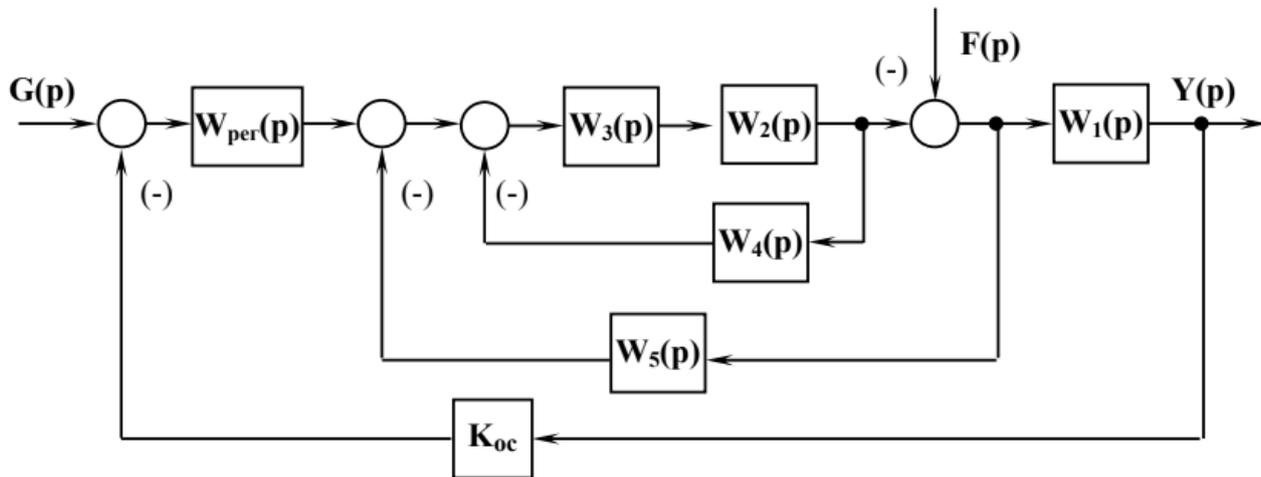


Рисунок 2.14 – Структурная схема для варианта 8

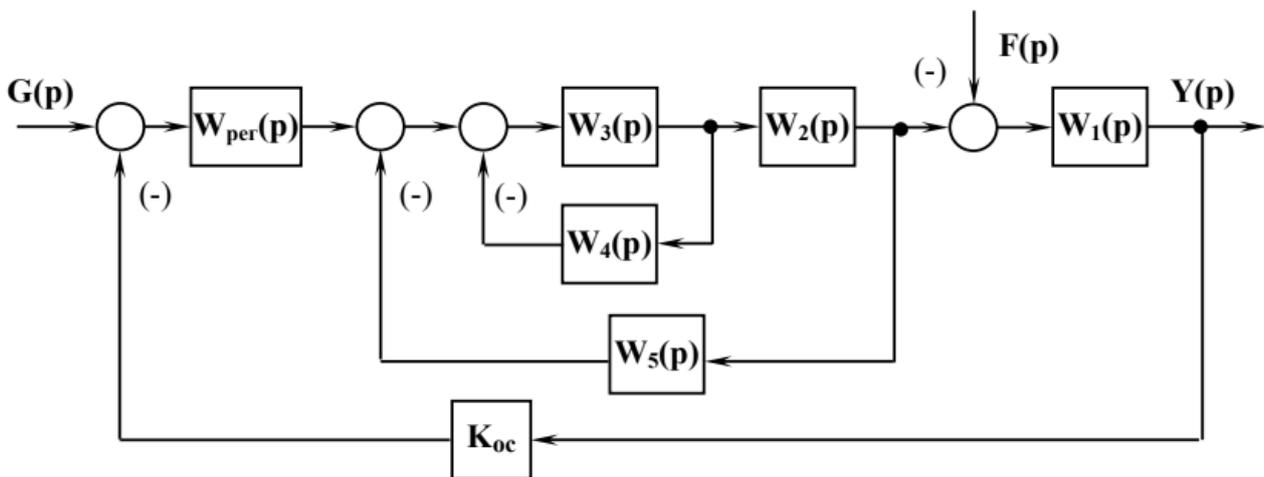


Рисунок 2.15 – Структурная схема для варианта 9

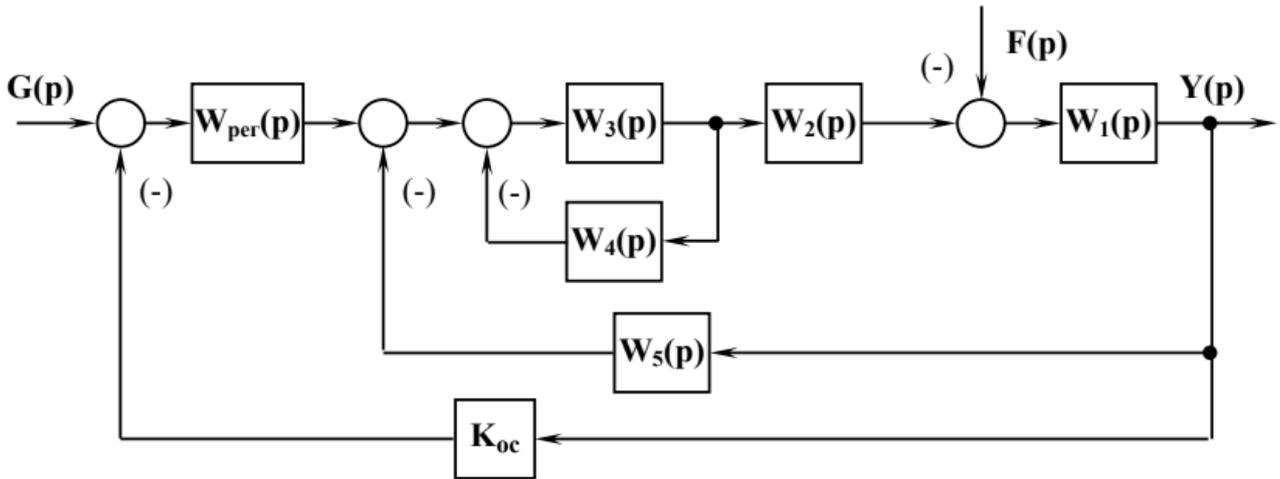


Рисунок 2.16 – Структурная схема для варианта 10

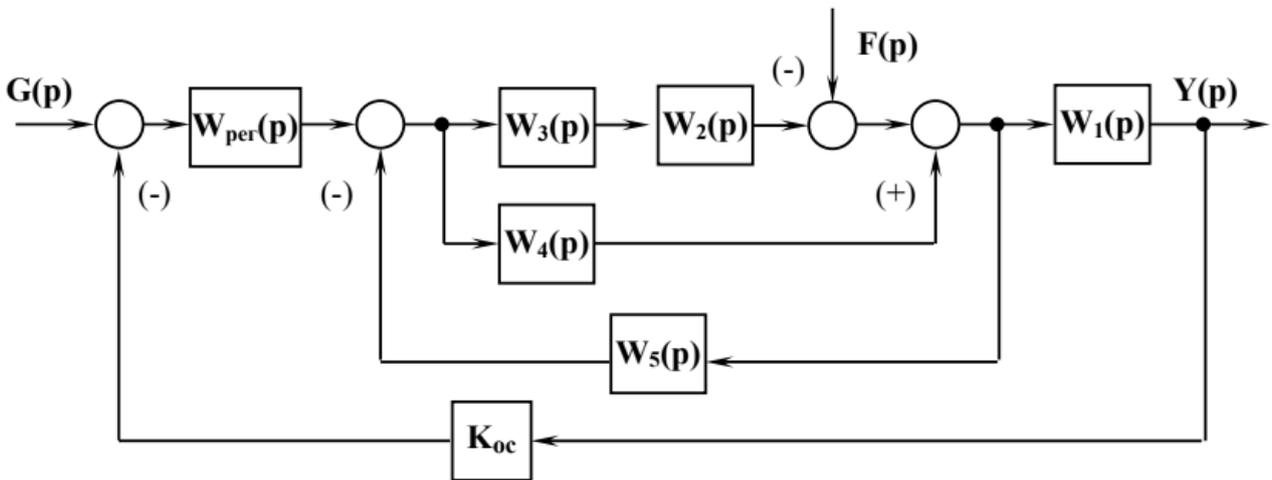


Рисунок 2.17 – Структурная схема для варианта 11

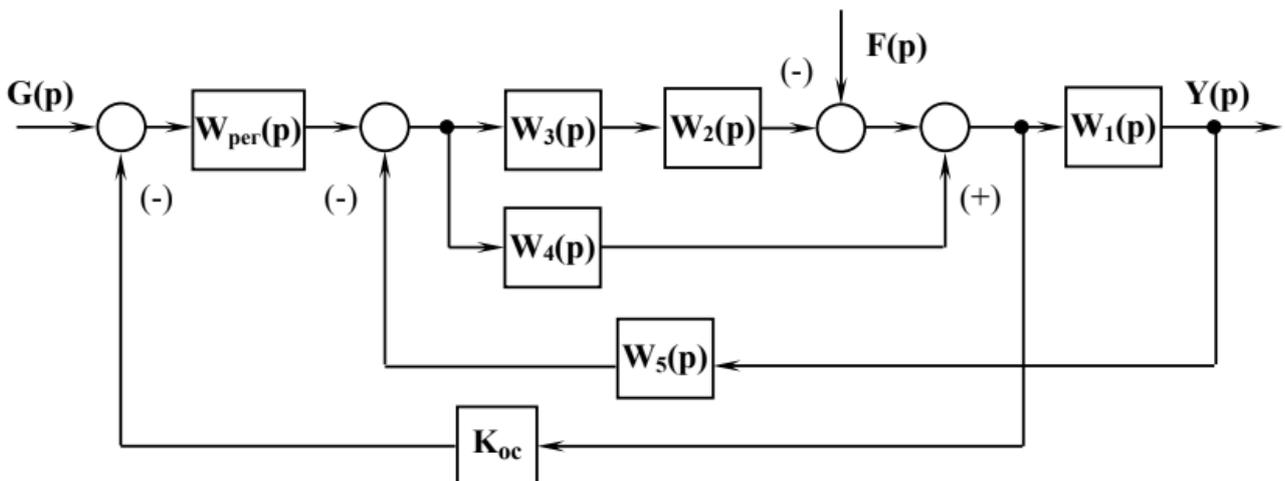


Рисунок 2.18 – Структурная схема для варианта 12

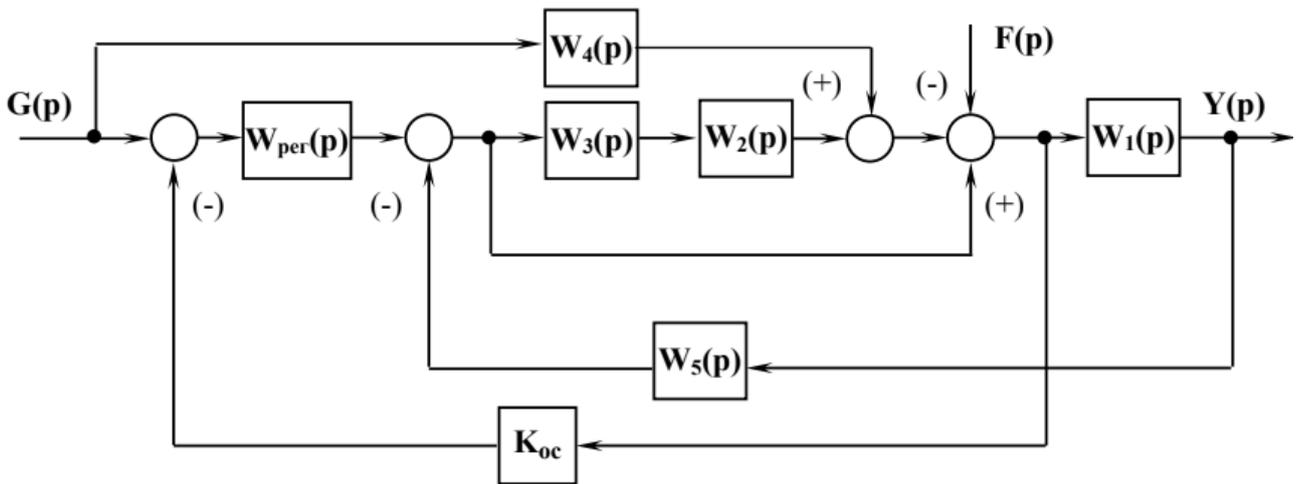


Рисунок 2.19 – Структурная схема для варианта 13

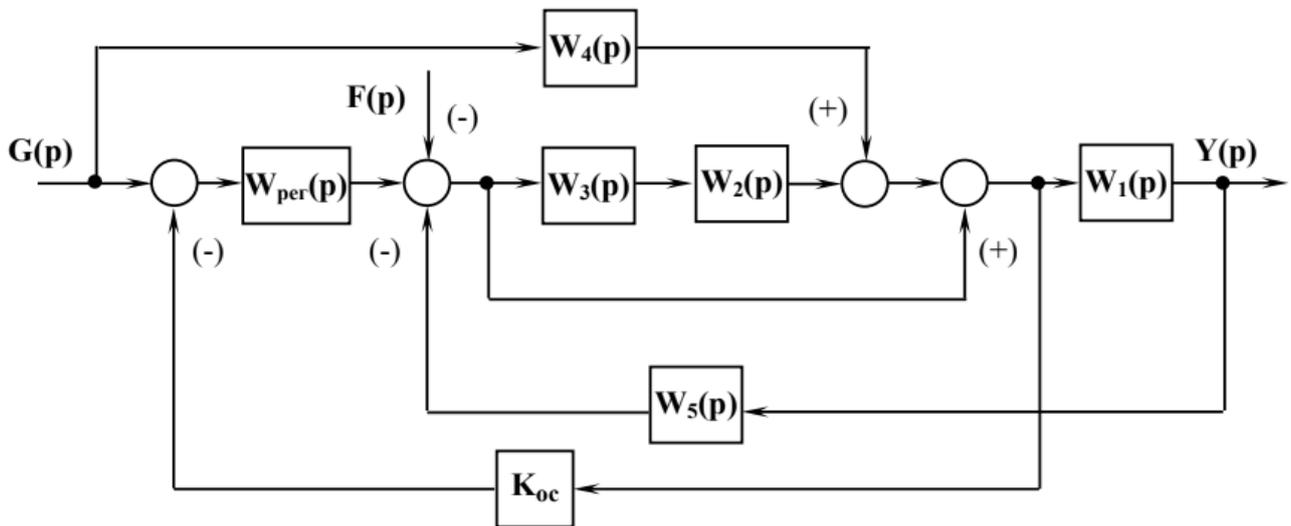


Рисунок 2.20 – Структурная схема для варианта 14

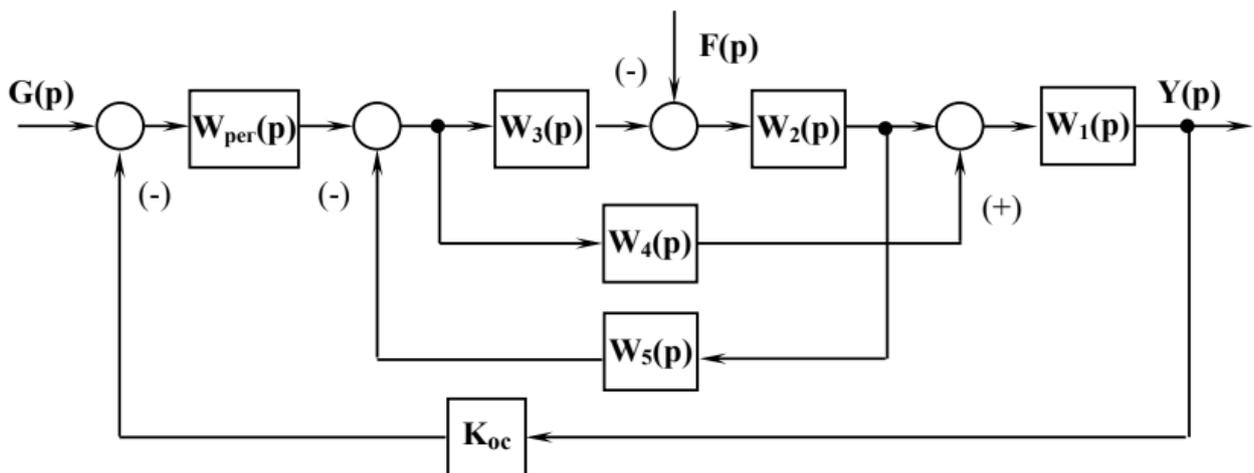


Рисунок 2.21 – Структурная схема для варианта 15

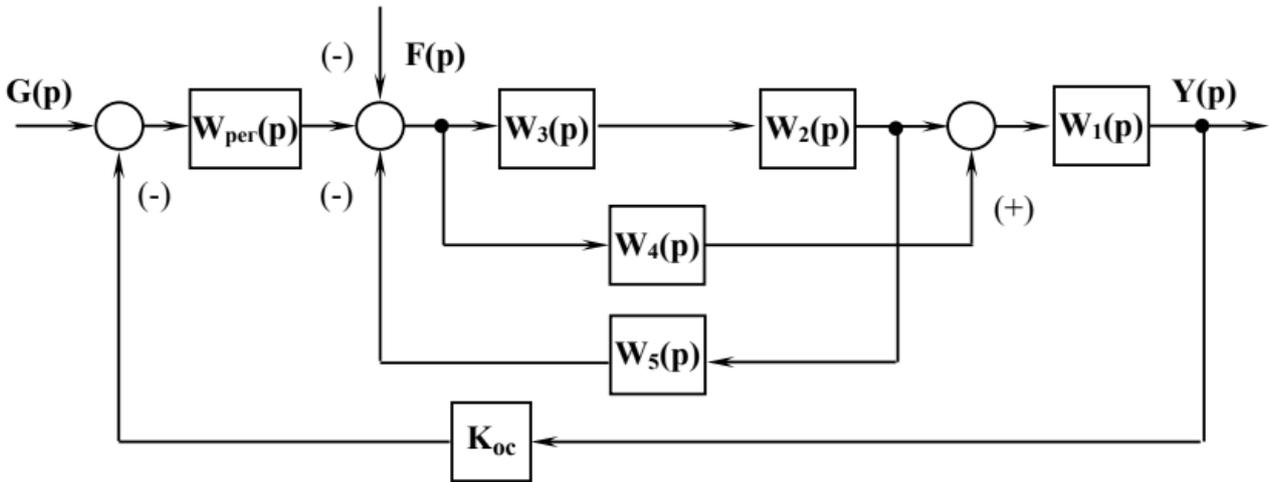


Рисунок 2.22 – Структурная схема для варианта 16

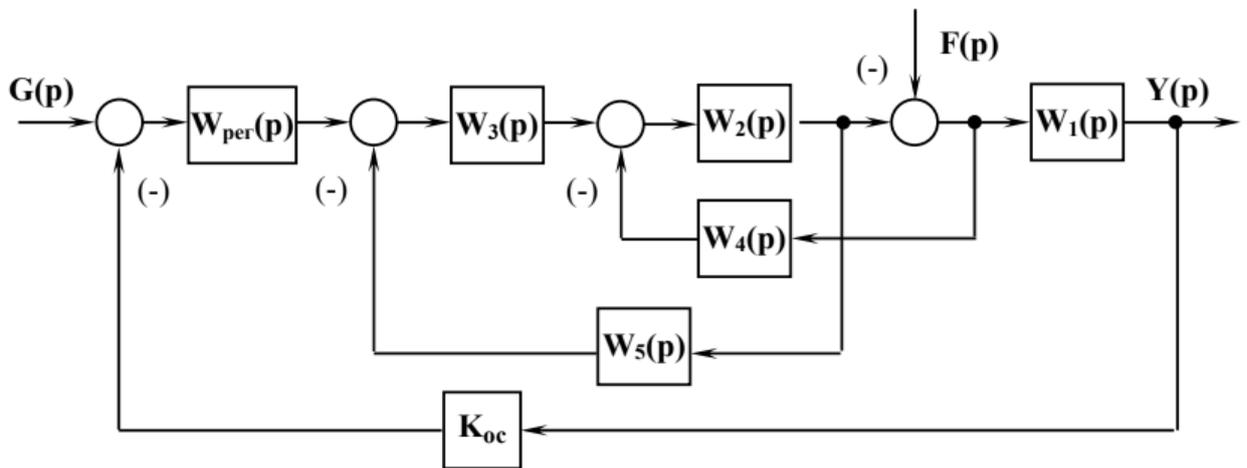


Рисунок 2.23 – Структурная схема для варианта 17

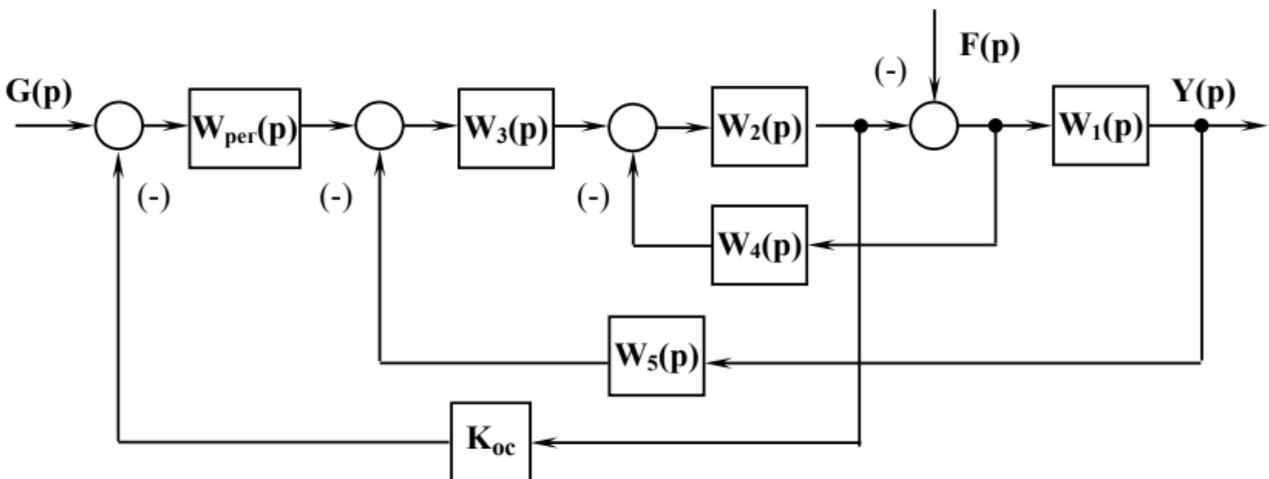


Рисунок 2.24 – Структурная схема для варианта 18

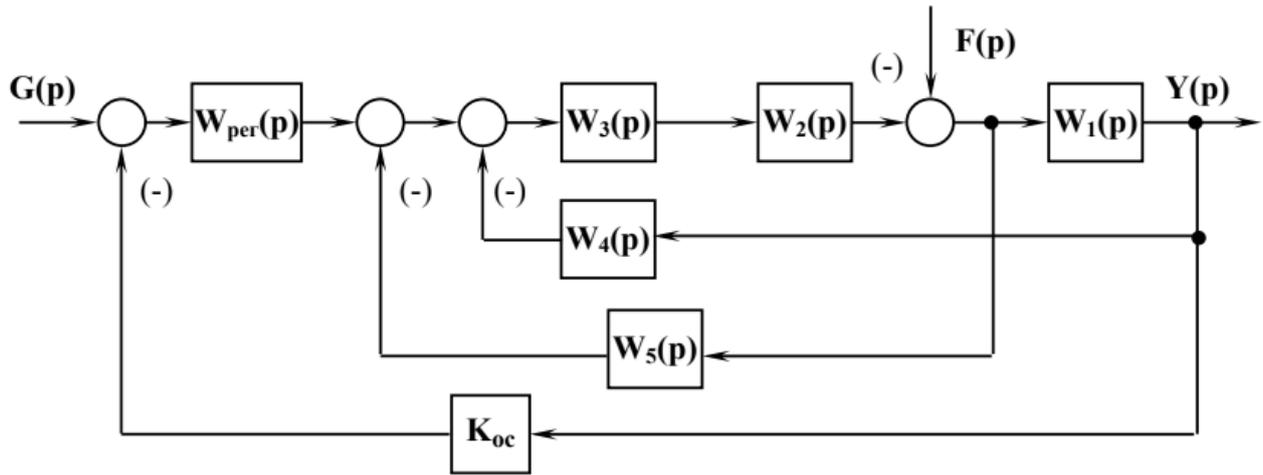


Рисунок 2.25 – Структурная схема для варианта 19

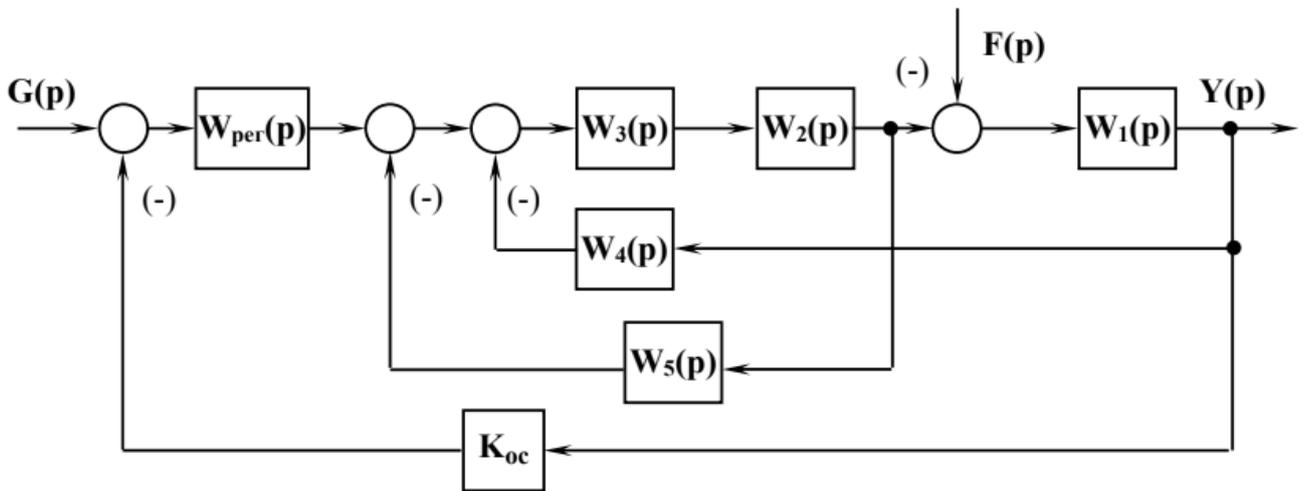


Рисунок 2.26 – Структурная схема для варианта 20

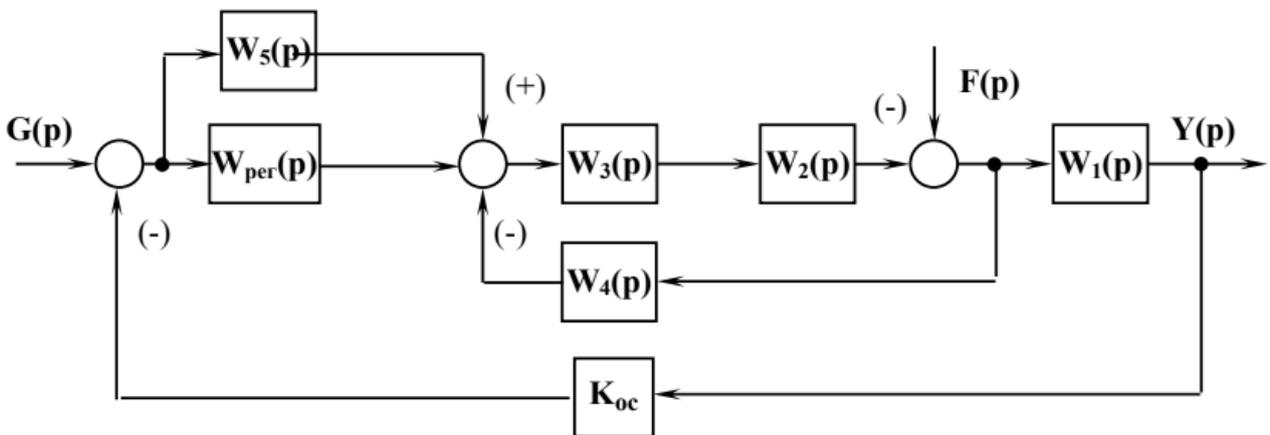


Рисунок 2.27 – Структурная схема для варианта 21

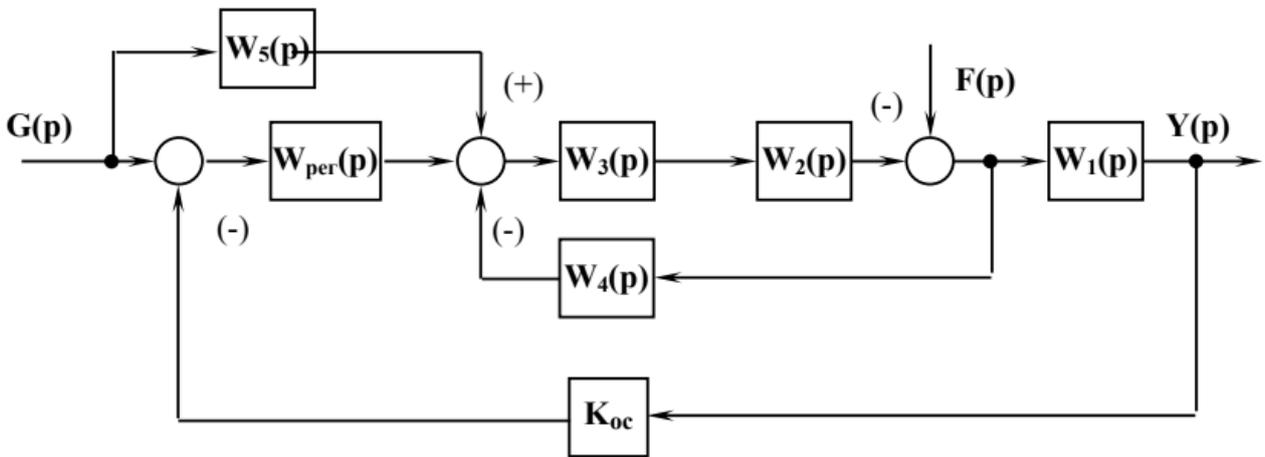


Рисунок 2.28 – Структурная схема для варианта 22

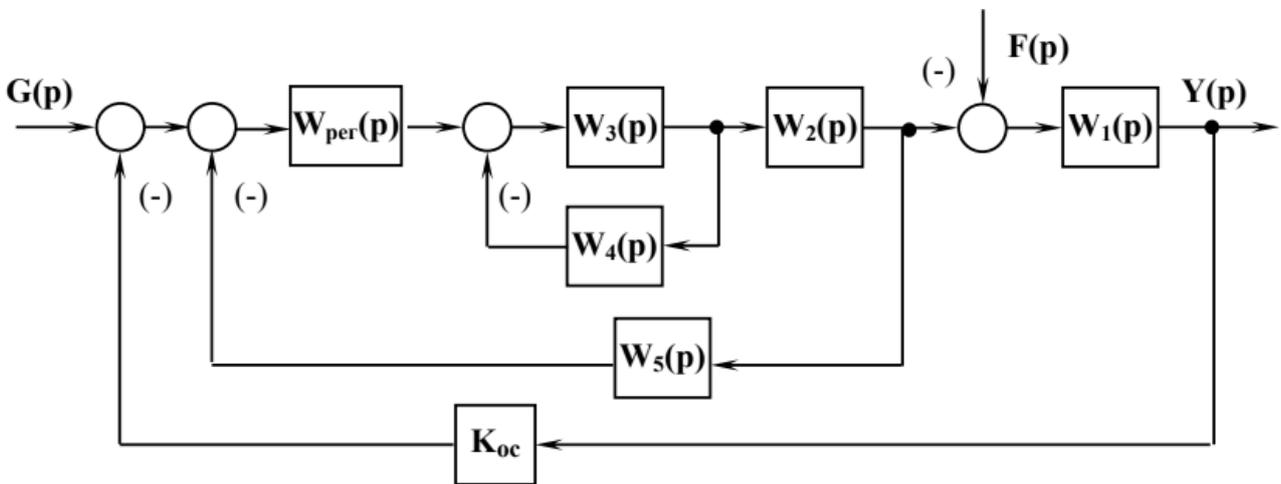


Рисунок 2.29 – Структурная схема для варианта 23

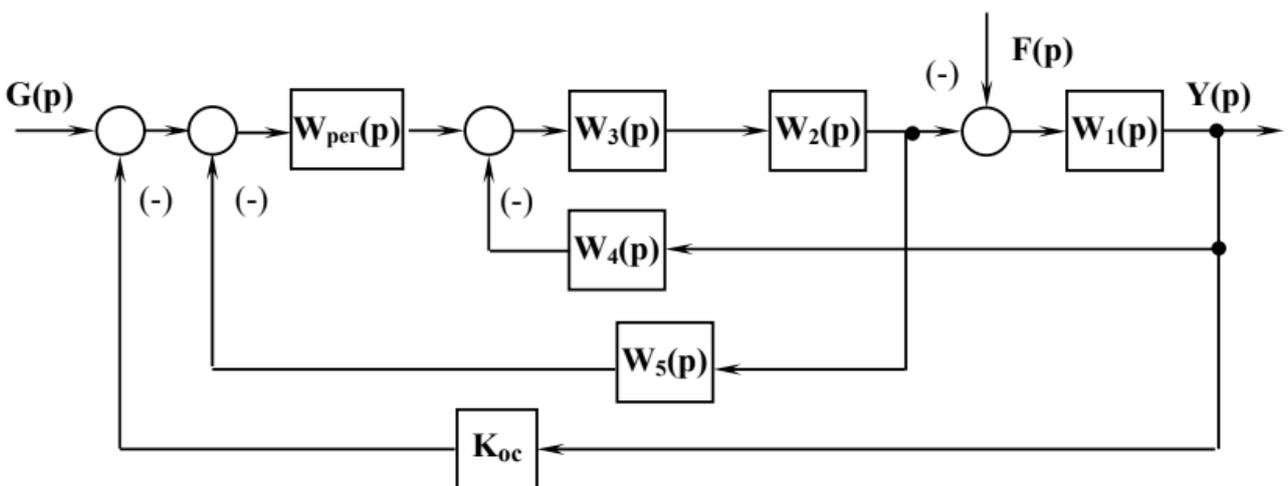


Рисунок 2.30 – Структурная схема для варианта 24

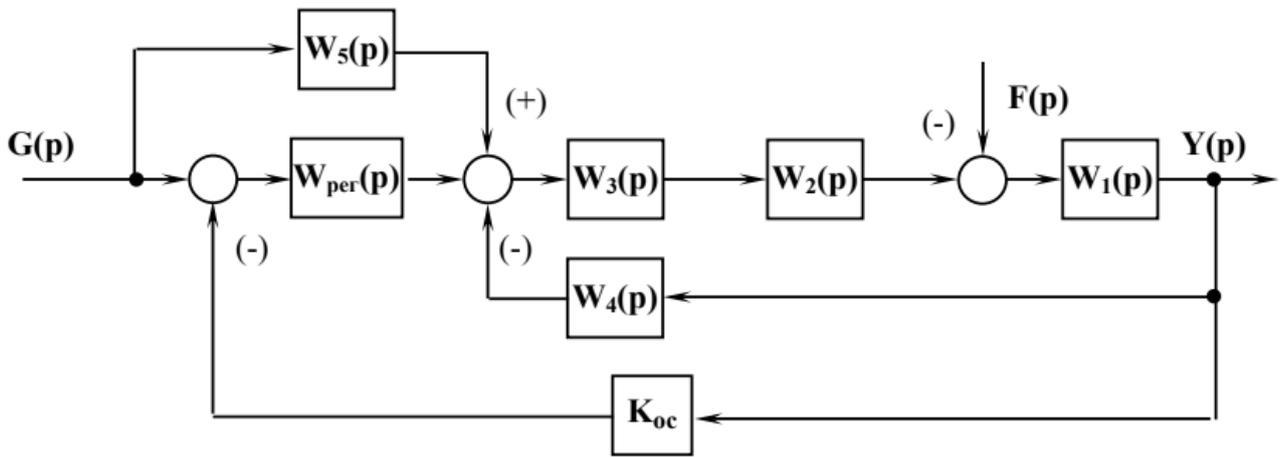


Рисунок 2.31 – Структурная схема для варианта 25

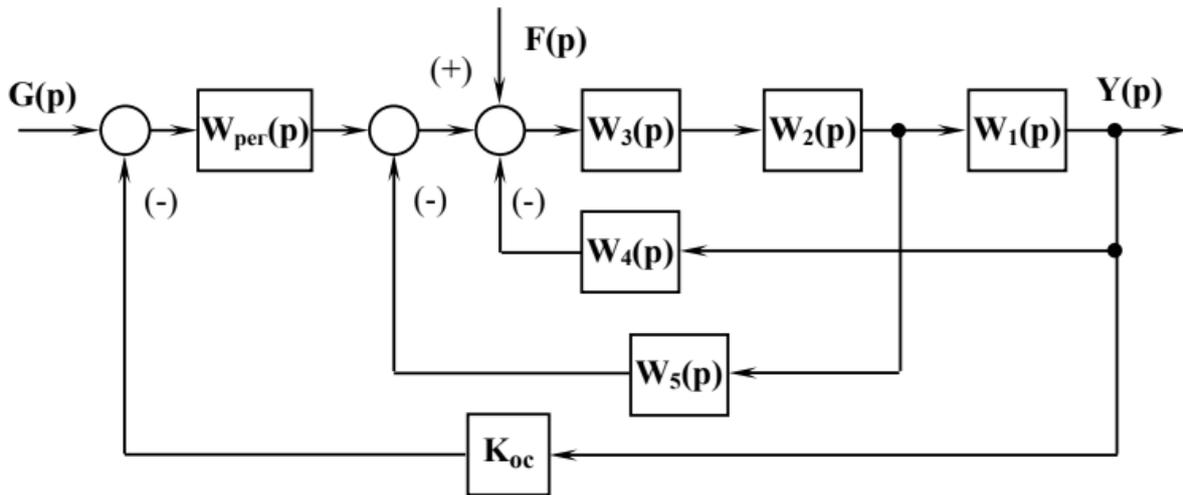


Рисунок 2.32 – Структурная схема для варианта 26

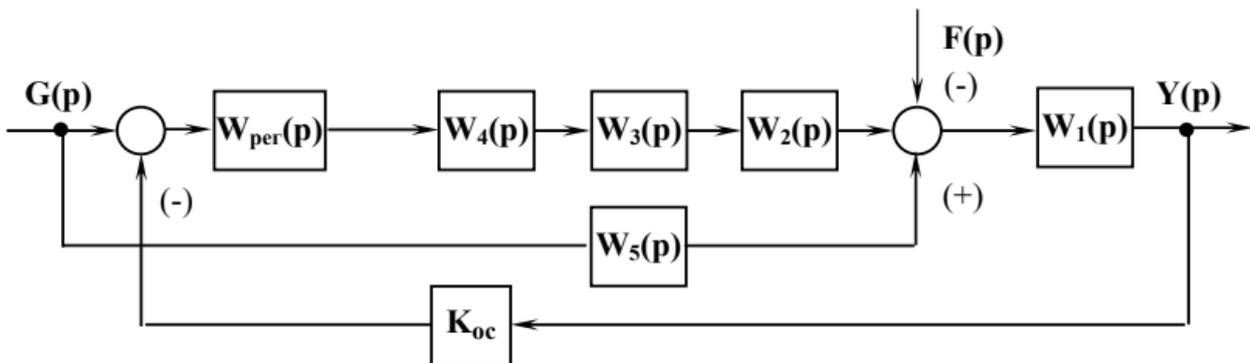


Рисунок 2.33 – Структурная схема для варианта 27

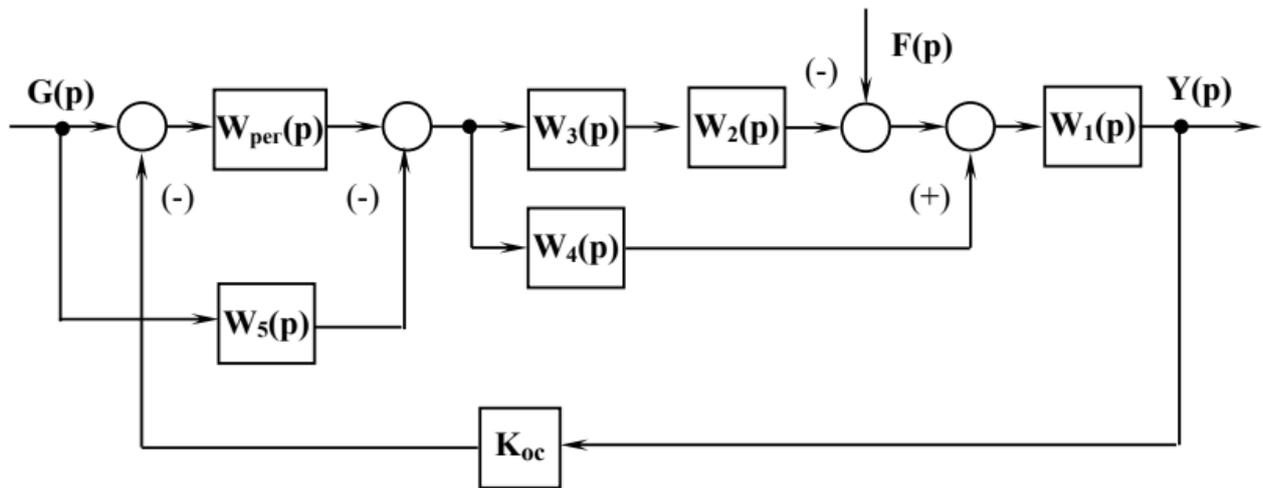


Рисунок 2.34 – Структурная схема для варианта 28

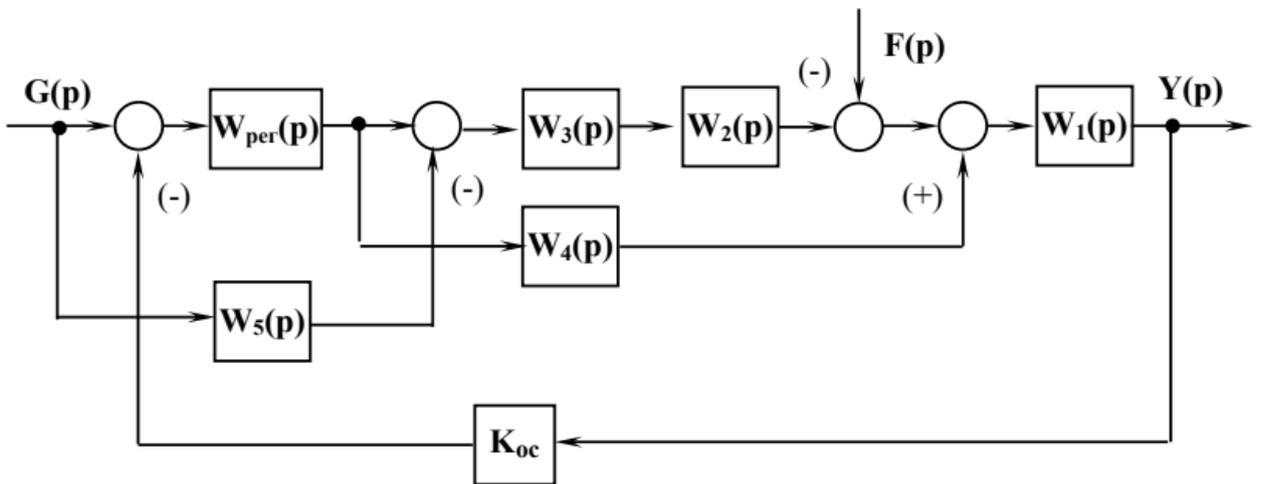


Рисунок 2.35 – Структурная схема для варианта 29

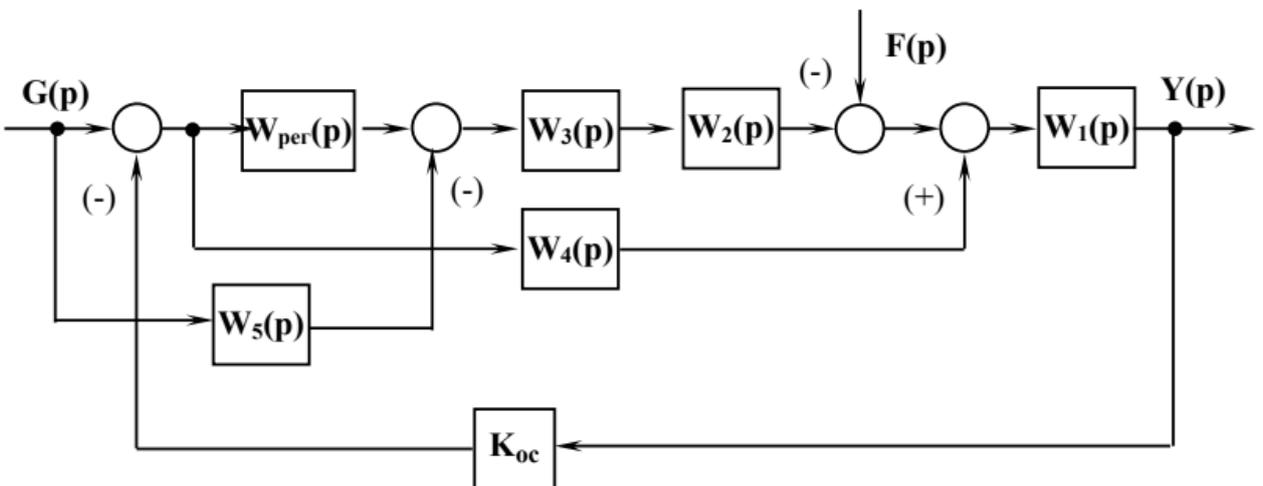


Рисунок 2.36 – Структурная схема для варианта 30

Контрольные вопросы

- 1 Правила выполнения преобразования последовательного соединения элементов линейной САУ.
- 2 Правила выполнения преобразования параллельного соединения элементов линейной САУ.
- 3 Правила выполнения преобразования встречно-параллельного соединения элементов линейной САУ (с обратной связью).
- 4 Правила переноса узла структурной схемы.
- 5 Получение ПФ разомкнутой САУ по задающему воздействию.
- 6 Получение ПФ замкнутой САУ по задающему воздействию.
- 7 Получение ПФ замкнутой САУ по возмущающему воздействию.
- 8 Получение ПФ ошибки замкнутой САУ от задающего воздействия.
- 9 Получение ПФ ошибки замкнутой САУ от возмущающего воздействия.
- 10 Определение статического коэффициента передачи по ПФ САУ.
- 11 Дать определение понятия «устойчивость» для САУ.
- 12 Перечислить основные критерии устойчивости.
- 13 Оценка устойчивости линейной САУ по корням характеристического уравнения системы.
- 14 Оценка устойчивости линейной САУ по критерию Гурвица.
- 15 Оценка устойчивости линейной САУ по критерию Михайлова.
- 16 Оценка устойчивости линейной САУ по критерию Найквиста.
- 17 Оценка устойчивости линейной САУ методом логарифмических частотных характеристик.
- 18 Понятие о частоте среза системы.
- 19 Определение запасов устойчивости.

3 Лабораторная работа № 3. Синтез ПИД-регулятора

Целью лабораторной работы является:

- 1) изучение методов синтеза последовательных корректирующих устройств (регуляторов) САУ;
- 2) получение практических навыков синтеза регуляторов, настроенных на модульный и технический оптимумы, и определение их параметров;
- 3) приобретение навыков расчета показателей качества процесса регулирования скорректированных САУ.

3.1 Ход работы

3.1.1 Изучение вопросов техники безопасности.

В начале нового учебного семестра следует повторно изучить инструкцию по технике безопасности лаборатории, утвержденную соответствующим образом. По окончании инструктажа по технике безопасности производится каждым

студентом индивидуальная отметка о прохождении техники безопасности в специальном протоколе (журнале).

3.1.2 Получение варианта индивидуального задания.

У преподавателя необходимо получить вариант индивидуального задания. Параметры структурной схемы нескорректированной САУ определяются на основе данных таблицы 3.1 на основе полученного номера варианта.

Таблица 3.1 – Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Параметры $W_1(p)$				Параметры $W_2(p)$				K_{oc}
	K_1	τ_1	T_1	k_{01}	K_2	τ_2	T_2	k_{02}	
1	5	0	0	1	2	0	0,45	1	0,25
2	2	0	0,5	1	2,5	0	0	1	0,5
3	10	0	0	4	0,5	0	0,25	1	0,2
4	4	0	0,4	1	6	0	0	3	0,05
5	10	0	0,05	1	1	0	0,25	0	0,1
6	1	0	0,2	0	5	0	0,04	1	0,2
7	2,5	0	0,1	1	4	0	0,5	1	0,25
8	5	0	0,15	1	1	0	0,6	0	0,15
9	1	0	0,4	0	10	0	0,2	1	0,4
10	4	0	0,5	1	2	0	0,4	1	0,05
11	3	0	0	1	3	0,1	0,25	1	0,2
12	2,5	0,15	0,5	1	4	0	0	2	0,5
13	4	0,1	0,2	1	6	0	0,4	1	0,05
14	8	0	0,1	0	5	0,2	0,5	1	0,15
15	2	0,25	0,15	1	2,5	0,4	0	0	0,2
16	6	0	0,4	1	8	0,25	0,1	1	0,25
17	7	0,2	0,25	1	5	0	0,4	1	0,1
18	9	0,15	0,3	1	1	0,1	0,2	1	0,15
19	4	0,1	0,2	1	2	0,05	0,25	1	0,2
20	10	0,25	1	0	9	0,15	0,5	1	0,05

3.1.3 Определение передаточной функции объекта компенсации.

3.1.3.1 Изображение структурной схемы заданной САУ.

Для заданного варианта выбираются из подраздела 3.3 параметры ПФ $W_1(p)$ и $W_2(p)$ исходной САУ. Изображается структурная схема с учетом ненулевых параметров заданных ПФ.

Пример выполнения этапа для следующего варианта задания представлен ниже. В таблице 3.2 представлены исходные данные для примера.

Таблица 3.2 – Исходные данные задания

Вариант	Параметры $W_1(p)$				Параметры $W_2(p)$				K_{oc}
	K_1	τ_1	T_1	k_{01}	K_2	τ_2	T_2	k_{02}	
21	4	0,1	0,2	1	5	0,25	0,15	1	0,05

ПФ элементов САУ принимают вид:

$$W_1(p) = 4 \cdot \frac{0,1 \cdot p + 1}{0,2 \cdot p + 1}; \quad (3.1)$$

$$W_2(p) = 5 \cdot \frac{0,25 \cdot p + 1}{0,15 \cdot p + 1}. \quad (3.2)$$

Пример схемы САУ задания представлен на рисунке 3.1.

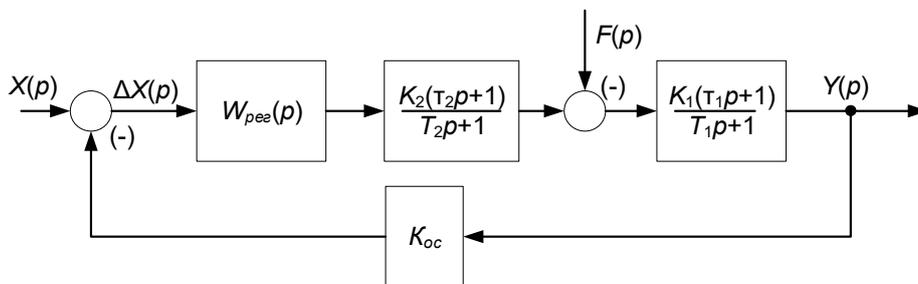


Рисунок 3.1 – Пример схемы САУ

3.1.4 Задание параметров передаточных функций САУ.

3.1.4.1 Использование команд настройки среды MATLAB.

В начале командного файла рекомендуется вызвать команды очистки экрана **clc**, удаления ранее созданных переменных из рабочей области (**clear all**) и закрытия всех ранее открытых графических окон (**close all**). В конце строки команды рекомендуется помещать комментарии, которые начинаются после символа процента и действуют до конца строки.

```
clc      % очистка окна
clear all % очистка старых переменных
close all % закрытие всех открытых окон графиков
```

3.1.4.2 Объявление переменных с параметрами ПФ.

Далее следует объявить переменные с ненулевыми параметрами заданных ПФ, используя оператор присваивания (=). При этом для имен следует применять только латинские символы и цифры. Необходимо помнить, что имена переменных MATLAB чувствительны к регистру. Пример состава командного файла с заданными переменными представлен на рисунке 3.2.

```

1 -   clc           % очистка окна
2 -   clear all    % очистка старых переменных
3 -   close all   % закрытие всех открытых окон графиков
4 -   K1=4        % задание параметров передаточных функций варианта работы
5 -   tt1=0.1
6 -   T1=0.2
7 -   K2=5
8 -   tt2=0.25
9 -   T2=0.15
10 -  Koc=0.01

```

Рисунок 3.2 – Пример состава командного файла с заданными переменными

3.1.4.3 Выполнение командного файла работы.

Выполнение командного файла производится нажатием кнопки *Run* или функциональной клавиши *F5*. При необходимости система предложит сменить текущий каталог (папку) на ту, где находится командный файл. При этом будет выведено сообщение рисунка 3.3. Для продолжения в окне диалога следует нажать кнопку «Change Folder».

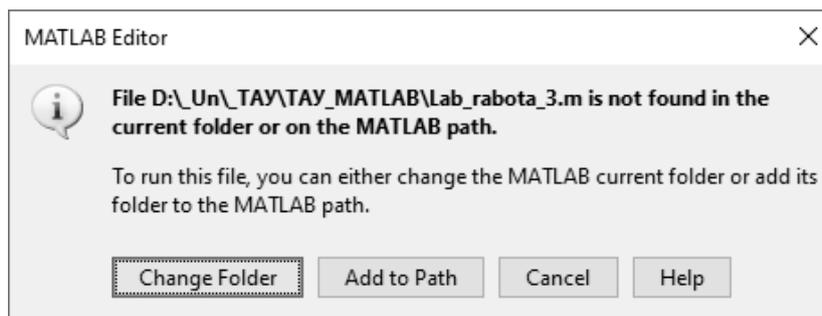


Рисунок 3.3 – Диалоговое окно «Смена текущей папки среды MATLAB»

Результаты расчета отображаются в командном окне Command Window и в рабочей области MATLAB (окне Workspace). Из командного окна результаты копируются через буфер обмена ОС в электронный документ отчета по лабораторной работе.

3.1.5 Построение динамической Simulink-модели скорректированной системы.

3.1.5.1 Запуск среды пакета Simulink.

Для расчета динамических характеристик скорректированной САУ при двух воздействиях (задающем и возмущающем) используется пакет Simulink. Его запуск в MATLAB возможен с помощью клика по одноименной кнопке или вводом в окне Command Windows команды **simulink**.

3.1.5.2 Формирование динамической Simulink-модели САУ.

В распахнувшемся окне выбирается пиктограмма Blank Model или New Model, что приводит к раскрытию окна заготовки Simulink-модели (S-модели).

С помощью раздела File/Save As следует сразу сохранить модель под уникальным именем (используя латинские буквы и цифры без пробелов) в рабочей папке MATLAB.

3.1.5.3 Построение динамической модели САУ.

Динамическая модель скомпенсированной САУ формируется на основе типовых моделей динамических звеньев Transfer Fcn, единичных воздействий (задающего и возмущающего) Const и блоков фиксации динамических графиков Scope и численных данных Display. Параметрами ПФ являются имена переменных рабочей области MATLAB, использованные ранее в *m*-файле. Для этого вызывается окно библиотеки Simulink нажатием кнопки Library Browser, которая для версии MATLAB R2017a имеет вид рисунка 3.4.

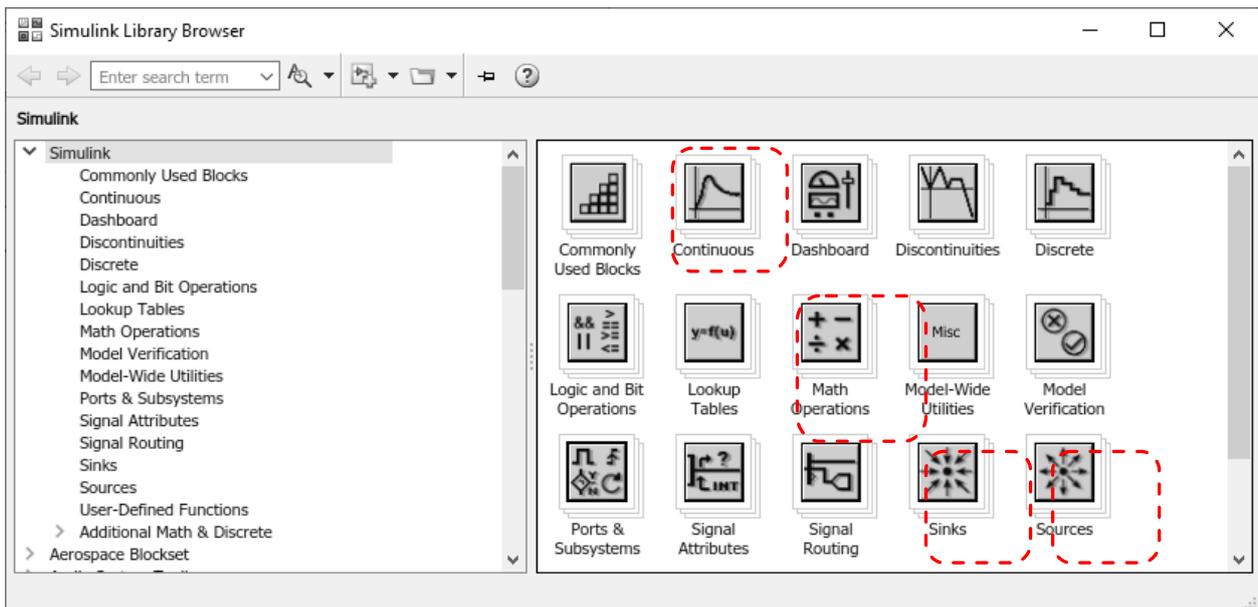


Рисунок 3.4 – Окно обозревателя библиотеки стандартных моделей Simulink

Сначала устанавливаются модели **Transfer Fcn** для элементов регулятора, а также W_1 и W_2 заданной САУ из раздела **Continuous**, показанной на рисунке 3.5. Блок выделяется мышкой и перетаскивается в окно заготовки модели.

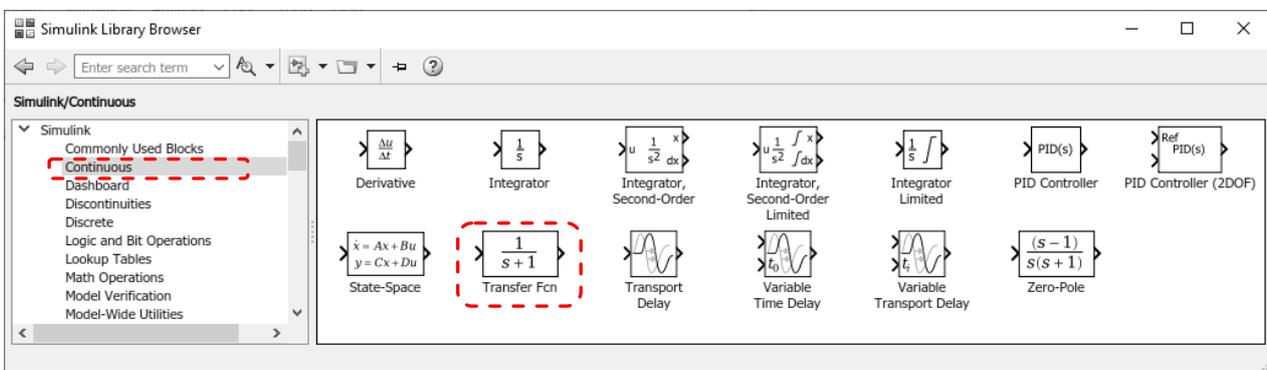


Рисунок 3.5 – Состав библиотеки непрерывных моделей Continuous

Размещение блоков моделей ПФ представлен на рисунке 3.6.

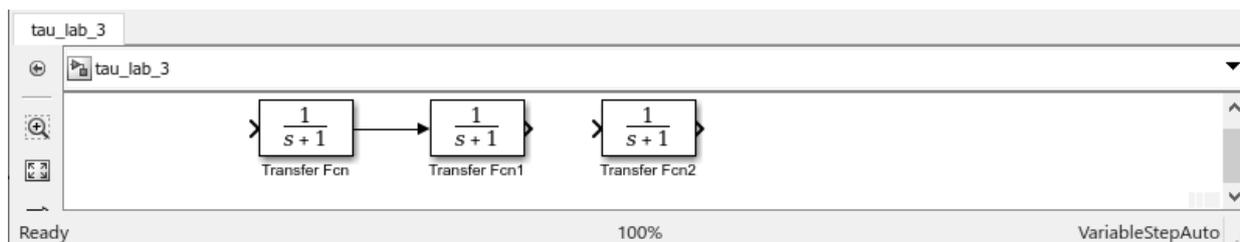


Рисунок 3.6 – Размещение блоков моделей передаточных функций

3.1.6 Оформление отчета.

3.2 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется индивидуально каждым студентом на листах формата А4. Отчет должен содержать следующее:

- 1) титульный лист;
- 2) исходная структурная схема САУ со значениями параметров элементов согласно номера заданного варианта;
- 3) ПФ объекта компенсации;
- 4) желаемые ПФ разомкнутой скорректированной САУ;
- 5) ПФ регуляторов при настройке на технический и симметричный оптимумы;
- 6) *m*-файл с расчетом ПФ регуляторов в среде MATLAB;
- 7) переходные характеристики вариантов скорректированной САУ при настройке на технический и симметричный оптимумы с анализом показателей качества регулирования;
- 8) графики ЛАЧХ и ЛФЧХ с анализом показателей качества для разомкнутых ПФ вариантов коррекции системы при техническом и симметричном оптимуме с анализом запасов устойчивости;
- 9) расположение корней на комплексной плоскости для характеристического уравнения замкнутой скорректированной САУ при настройках на технический и симметричный оптимумы;
- 10) статические характеристики:
 - для некомпенсированной САУ;
 - для скорректированной САУ на модульный оптимум (МО);
 - для скорректированной САУ, настроенной на симметричный оптимум (СО);
- 11) Simulink-модели САУ после расчета динамических характеристик с настройками регулятора на МО и СО;
- 12) динамические характеристики выхода САУ при настройке регуляторов на МО и СО.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105–95.

3.3 Варианты индивидуальных заданий

Необходимо выполнить синтез последовательного корректирующего устройства для САУ, показанного на рисунке 3.7, для случаев настроек на модульный и симметричный оптимум. Следует произвести анализ показателей качества скорректированной САУ и разработать аппаратную реализацию синтезированных регуляторов.

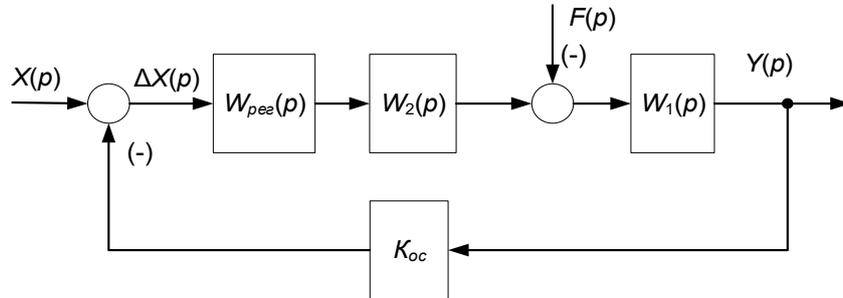


Рисунок 3.7 – Исходная структурная схема САУ

ПФ САУ из рисунка 3.7 определяются следующими выражениями:

$$W_1(p) = K_1 \cdot \frac{\tau_1 \cdot p + 1}{T_1 \cdot p + k_{01}}; \quad (3.3)$$

$$W_2(p) = K_2 \cdot \frac{\tau_2 \cdot p + 1}{T_2 \cdot p + k_{02}}. \quad (3.4)$$

Параметры ПФ объекта регулирования САУ рисунка 3.7 заданы в таблице 3.1.

Контрольные вопросы

- 1 Каким образом выполняется синтез последовательного корректирующего устройства?
- 2 Каким образом выполняется настройка регулятора на модульный оптимум?
- 3 Каким образом выполняется настройка регулятора на симметричный оптимум?
- 4 Какие группы показателей качества регулирования используются в САУ?
- 5 Как определить частотные показатели качества скорректированной САУ?
- 6 Какие прямые показатели используются для оценки качества регулирования САУ?
- 7 Какие интегральные показатели качества используются для оценки качества регулирования САУ?
- 8 Каким образом выполняется определение малой некомпенсированной постоянной времени?

9 Какие типы регуляторов используются в САУ?

10 Каким образом выполняется аппаратная реализация регуляторов для линейных непрерывных САУ?

11 Каким образом определяются статические характеристики САУ?

12 Какие блоки Simulink используются при моделировании ПФ САУ?

13 Какие блоки Simulink используются при моделировании задающих и возмущающих воздействий САУ?

14 Какие блоки Simulink используются для фиксации результатов моделирования в САУ?

15 Каким образом выполняется настройка параметров модели Transfer Fcn в среде MATLAB/Simulink?

16 Как выполняется настройка параметров численного решения модели в среде Simulink?

Список литературы

1 **Ким, Д. П.** Теория автоматического управления. Линейные системы: учебник и практикум для академического бакалавриата / Д. П. Ким. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2018. – 309 с.

2 Теория автоматического управления: учебник / Под ред. Ю. М. Соломенцева. – 3-е изд., стер. – Москва: Высшая школа, 2000. – 268 с.

3 **Анхимюк, В. Л.** Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк. – Минск: Вышэйшая школа, 2002. – 352 с.

4 **Ерофеев, А. А.** Теория автоматического управления: учебник / А. А. Ерофеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Политехника, 2002. – 302 с.

5 Теория автоматического управления: учебник / Под ред. Ю. М. Соломенцева. – 4-е изд., стер. – Москва: Высшая школа, 2003. – 268 с.

6 **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Профессия, 2003. – 752 с.

7 **Ощепков, А. Ю.** Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB: учебное пособие / А. Ю. Ощепков. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 208 с.

8 **Ротач, В. Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов / В. Я. Ротач. – 4-е изд., стер. – Москва: МЭИ, 2007. – 400 с.