

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

«ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»

основной образовательной программы подготовки бакалавров
по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению курсовой работы

Лысьва, 2021

Разработчик-составитель доцент Лопатин В.Г.

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры Общественных дисциплин «30» августа 2021 г, протокол № 1.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Методические указания по выполнению курсовой работы	5
2. Пример выполнения курсовой работы	7
3. Варианты расчетных заданий	19
Перечень рекомендуемой литературы.....	26
Приложение А. Пример оформления титульного листа	27

ВВЕДЕНИЕ

Предполагается, что к моменту начала выполнения курсовой работы студент твердо усвоил необходимые теоретические знания. Консультации руководителя курсовой работы служат для текущего контроля выполнения расчетов и, при необходимости, их коррекции.

Цель выполнения работы: углубление знаний основных разделов ТАУ, ознакомление с методами исследования и проектирования систем автоматического управления (САУ) с заданными параметрами и получение практических навыков автоматизированного проектирования и исследования систем регулирования с применением персональных компьютеров.

Задачи, решаемые в процессе выполнения курсовой работы:

- ознакомление с математическим описанием систем управления;
- изучение процедуры синтеза систем регулирования, базирующейся на принципах подчиненного регулирования координат;
- получение практических навыков проектирования типовых структур управления;
- приобретение практических навыков работы с компьютерной системой автоматизированного проектирования и исследования объектами управления.

Порядок выполнения курсовой работы:

- ознакомление с заданием на курсовую работу (вариант задает преподаватель);
- ознакомление с математическим описанием и процедурой синтеза САУ;
- преобразование структурной схемы с использованием пакета Microsoft Office Visio и определение передаточной функции разомкнутой системы;
- определение устойчивости системы по характеристикам, построенным с использованием пакета Matlab.

В методических указаниях кроме задания и примера выполнения, дается небольшой объем теоретического материала, способствующего наиболее быстрому вхождению в курс решаемых вопросов, однако наличие этого материала не исключает пользование справочной, научной и учебной литературой.

Курсовые работы выполняются в соответствии с требованиями, сформированными на основании ГОСТ 7.32 – 2001, и сопровождаются ясным текстом, поясняющими рисунками и схемами. Небрежно выполненные работы не принимаются.

Курсовые работы сдаются преподавателю для оценки не позднее, чем за месяц до экзаменов.

Окончательная оценка выставляется после защиты курсовой работы.

Все рисунки и графики выполняются четко на миллиметровой бумаге или на листах формата А4 с использованием прикладного программного обеспечения.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

По заданной системе дифференциальных уравнений, описывающих работу САУ необходимо:

1. Составить структурную схему САУ;
2. Найти передаточную функцию разомкнутой системы на основе использования правил структурных преобразований

$$W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)};$$

3. Построить асимптотическую ЛАЧХ, ЛФЧХ и АФХ разомкнутой САУ;
4. Определить устойчивость замкнутой САУ; найти предельный коэффициент усиления;
5. Определить статическую и кинетическую ошибки замкнутой системы.
6. Сделать выводы о результатах проделанной работы.

Для определения передаточной функции разомкнутой системы, структурную схему, составленную на основе заданной системы дифференциальных уравнений, следует привести к одноконтурной системе (к виду аналогичному, представленному на рис. 2, з).

Если САУ при заданном коэффициенте усиления окажется неустойчивой, то статическую и кинетическую ошибки следует определять для системы с коэффициентом усиления в 2 раза меньше предельного.

К оформлению расчетного задания предъявляются следующие требования:

- 1) На титульном листе указываются: тема расчетного задания, номер варианта, фамилия и инициалы студента и преподавателя, год выполнения (см. пример оформления на последней странице).
- 2) Выполненная курсовая работа оформляется на отдельных листах формата А4.
 - Поля: сверху, снизу, слева – 20 мм, справа – 10 мм.
 - Межстрочный интервал в тексте – 1,5.
 - Межстрочный интервал в заголовке (если больше 1 строки) – 1,0. Интервал после заголовка 12 пт.
 - По тексту работы установить интервал «перед» и «после» – 0 пт.
 - Шрифт – Times New Roman, 14 пт., обычный. Подчеркивание в тексте не допускается.
 - Отступ – 1,25. Использовать клавиши «Tab» и «Enter».

- Не допускается повышенная разряженность в последней строке абзаца. Для исключения этой ошибки следует использовать клавишу «Enter».

- Нумерация страниц – по центру снизу.

- Расположение текста на странице – по ширине.

- Расположение заголовков – по центру.

- Полуужирное выделение допускается для заголовков и, в порядке исключения, для ключевых понятий в тексте. Таковых на 1 странице не должно быть больше 4-5.

- Любые сокращения или аббревиатуры сначала должны быть полностью названы и обозначены. Только после этого ими можно пользоваться в тексте работы.

- Названия рисунка пишется снизу рисунка. Расположение названия – по центру. Для названия рисунка использовать шрифт «курсив». Текст оформляется шрифтом 12. Нумерация рисунков – сквозная.

- Название таблицы пишется сверху таблицы. Расположение названия – справа. Для названия таблиц использовать шрифт «курсив». Текст в таблицах оформляется шрифтом 12 с межстрочным интервалом – одинарный. Нумерация таблиц – сквозная.

- Каждый новый раздел (но не **параграф!!!**) следует начинать с новой страницы.

- Не допускать **пустых!!!** листов в тексте, когда на странице всего 2-3 строки. В этом случае нужно отредактировать текст таким образом, чтобы исключить эту ситуацию. Последний лист раздела должен быть заполнен, минимум, на 50÷75%.

При использовании литературы должна быть дана ссылка на литературный источник, откуда она взята.

3) Рисунки должны выполняются с помощью прикладных программ, а если вручную, то линеек, лекал и могут располагаться как по тексту, так и в конце. Рисунки должны иметь сквозную нумерацию со ссылками в тексте.

2. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Работа системы автоматического управления задана системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_3 = k_3(X_{BX} + X_2); \\ T_2 dX_2 / dt + X_2 = k_2 X_1; \\ X_1 = k_1 \delta; \\ X_4 = k_4(X_3 + \delta); \\ \delta = -X_6; \\ T_5 dX_5 / dt + X_5 = k_5 \delta; \\ X_6 = k_6 X_{BIX}; \\ X_7 = dX_2 / dt \\ X_{BIX} = X_7 + X_4 + X_5. \\ k_1 = 0,1; k_2 = 2; k_3 = 5; k_4 = 10; k_5 = 100; k_6 = 0,02; \\ T_2 = 0,5c; T_5 = 2c. \end{array} \right.$$

Решение

1. Составим структурную схему САУ. Перепишем в операторной форме исходную систему дифференциальных уравнений, приняв начальные условия нулевыми:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_3(p) = k_3(X_{BX}(p) + X_2(p)); \\ T_2 p X_2(p) + X_2(p) = k_2 X_1(p), \quad \Rightarrow X_2(p) = X_1(p) \frac{k_2}{T_2 p + 1}; \\ X_1(p) = k_1 \delta(p); \\ X_4(p) = k_4(X_3(p) + \delta(p)); \\ \delta(p) = -X_6(p); \\ T_5 p X_5(p) + X_5(p) = k_5 \delta(p), \quad \Rightarrow X_5(p) = \delta(p) \frac{k_5}{T_5 p + 1}; \\ X_6(p) = k_6 X_{BIX}(p); \\ X_7 = p X_2(p); \\ X_{BIX}(p) = X_7(p) + X_4(p) + X_5(p). \end{array} \right.$$

Полученной схеме уравнений соответствует структурная схема, представленная на рис. 1.

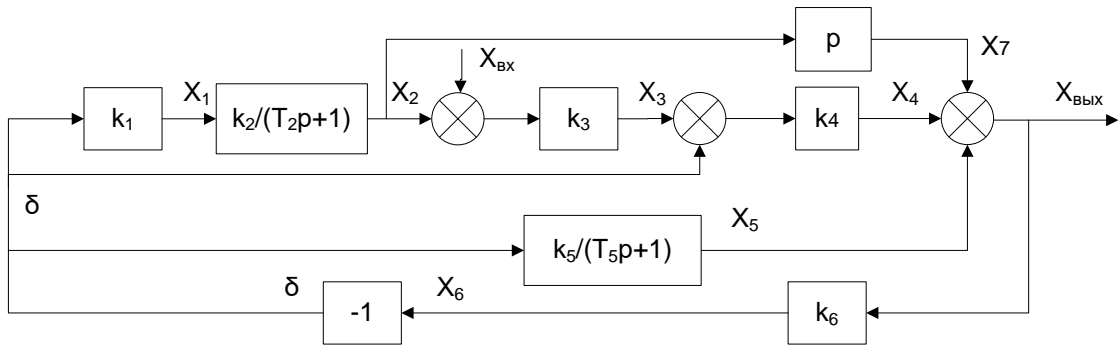


Рисунок 1. Структурная схема САУ

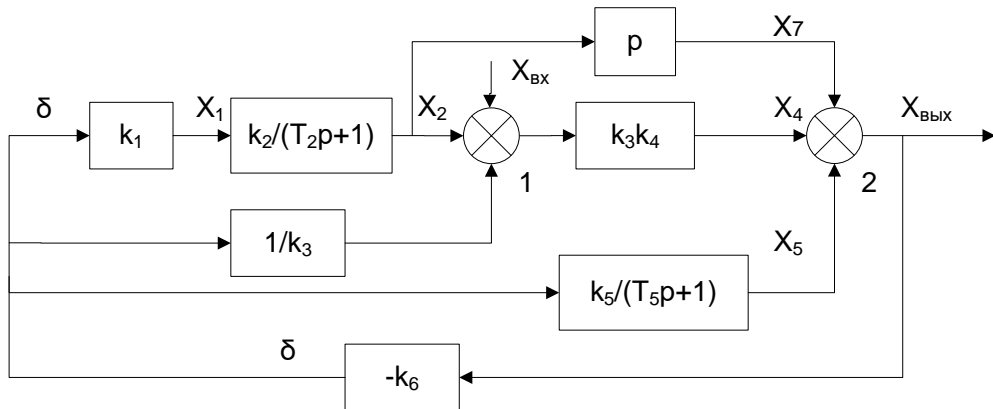


Рисунок 2 а. Преобразование исходной схемы САУ. 1-й этап

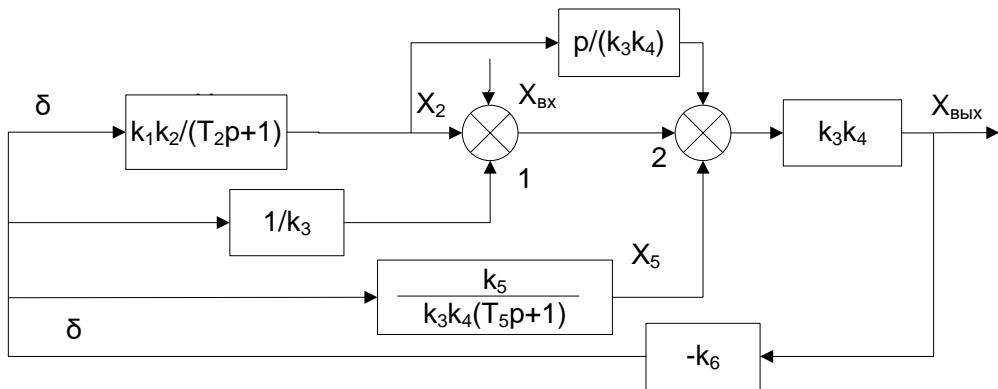


Рисунок 2 б. Преобразование исходной схемы САУ. 2-й этап

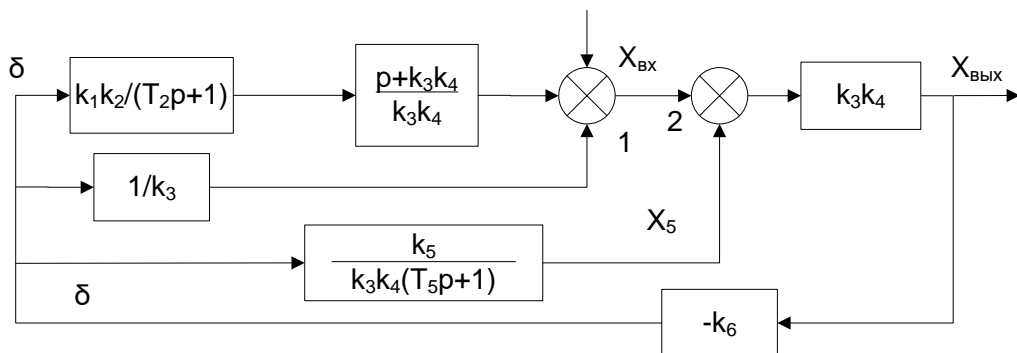


Рисунок 2 в. Преобразование исходной схемы САУ. 3-й этап

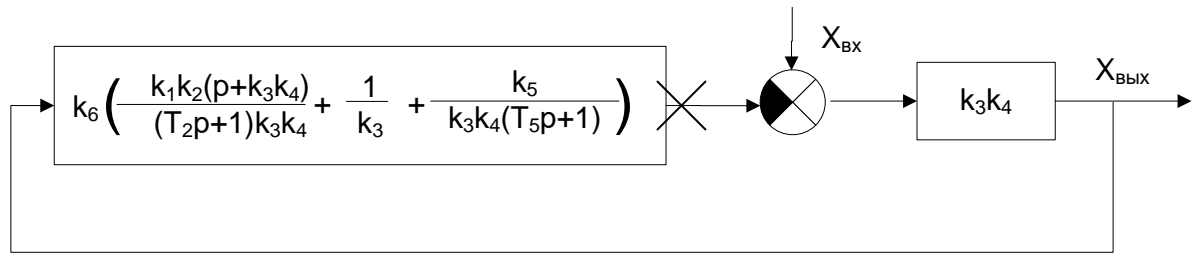


Рисунок 2 г. Преобразование исходной схемы САУ. 4-й этап

2. Для нахождения передаточной функции системы $W_p(p) = \frac{X_{\text{ВЫХ}}(p)}{X_{\text{ВХ}}(p)}$ преобразуем структурную схему САУ, изображенную на рис. 1. Для этого используем известные правила структурных преобразований. Последовательность преобразований показана (рис. 2, а, б, в, г). Затем разорвем обратную связь. Тогда искомая передаточная функция разомкнутой системы будет равна:

$$W_p(p) = k_3 k_4 k_6 \left[\frac{k_1 k_2 (p + k_3 k_4)}{k_3 k_4 (T_2 p + 1)} + \frac{1}{k_3} + \frac{k_5}{k_3 k_4 (T_5 p + 1)} \right]$$

После подстановки в выражение $W_p(p)$ численных значений параметров, получим:

$$\begin{aligned} W_p(p) &= 5 \cdot 10 \cdot 0,02 \cdot \left[\frac{0,1 \cdot 2 (p + 5 \cdot 10)}{5 \cdot 10 (0,5p + 1)} + \frac{1}{5} + \frac{100}{5 \cdot 10 (2p + 1)} \right] = \frac{0,2p + 10}{50(0,5p + 1)} + \frac{1}{5} + \frac{100}{50(2p + 1)} = \\ &= \frac{(0,2p + 10)(2p + 1) + 10(0,5p + 1)(2p + 1) + 100(0,5p + 1)}{50(0,5p + 1)(2p + 1)} = \frac{0,208p^2 + 1,904p + 2,4}{(0,5p + 1)(2p + 1)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Затем в числителе желательно получить коэффициент при p^0 равным единице. Для этого вынесем значение 2,4 за скобки.

$$W_p(p) = \frac{2,4(0,0867p^2 + 0,793p + 1)}{(0,5p + 1)(2p + 1)}.$$

Решим полученное в числителе квадратное уравнение в скобках

$$D = b^2 - 4ac = 0,793^2 - 4 \cdot 0,0867 \cdot 1 = 0,282.$$

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} = \frac{-0,793 + \sqrt{0,282}}{2 \cdot 0,0867} = -1,51;$$

$$x_2 = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a} = \frac{-0,793 - \sqrt{0,282}}{2 \cdot 0,0867} = -7,64.$$

Выполним замену $x \rightarrow p$, т.к. в передаточной функции используется параметр p , и, исходя из соотношения

$$ax^2 + bx + c = a(x - x_1)(x - x_2) \text{ найдем } c = x_1 \cdot x_2 = (-1,51) \cdot (-7,64) = 11,54.$$

Для получения в передаточной функции числителя коэффициента при p^0 равного единице с тем чтобы $c = 1$ преобразуем числитель следующим образом:

$$\begin{aligned} 2,4[0,0867(p+1,51)(p+7,64)] &= 2,4 \left[0,0867 \cdot 11,54 \left(\frac{1,51}{11,54} p + 1 \right) \left(\frac{7,64}{11,54} p + 1 \right) \right] = \\ &= 2,4 \cdot 0,0867 \cdot 11,54 (0,131p+1)(0,662p+1) = 2,4(0,131p+1)(0,662p+1). \end{aligned}$$

В результате получим удобное выражение преобразованной передаточной функции $W_p(p)$, в котором при каждом коэффициенте p^0 стоит 1

$$W_p(p) = \frac{2,4(0,131p+1)(0,662p+1)}{(0,5p+1)(2p+1)}.$$

Для построения ЛАЧХ, ЛФЧХ и АФХ разомкнутой САУ запишем выражения для:

а) комплексного коэффициента усиления:

$$W_p(j\omega) = \frac{2,4(0,131j\omega+1)(0,662j\omega+1)}{(0,5j\omega+1)(2j\omega+1)};$$

б) амплитудно–частотной характеристики:

$$A(\omega) = |W_p(j\omega)| = \frac{2,4\sqrt{(0,131\omega)^2+1}\sqrt{(0,662\omega)^2+1}}{\sqrt{(0,5\omega)^2+1}\sqrt{(2\omega)^2+1}};$$

в) фазо–частотной характеристики:

$$\varphi(\omega) = \text{Arg}W_p(j\omega) = \text{arctg}0,131\omega + \text{arctg}0,662\omega - \text{arctg}0,5\omega - \text{arctg}2\omega;$$

г) логарифмической амплитудно-частотной характеристики:

$$\begin{aligned} L(\omega) = 20\lg|W_p(j\omega)| &= 20\lg 2,4 + 20\lg\sqrt{(0,131\omega)^2+1} + 20\lg\sqrt{(0,662\omega)^2+1} - \\ &- 20\lg\sqrt{(0,5\omega)^2+1} - 20\lg\sqrt{(2\omega)^2+1}. \end{aligned}$$

Асимптотическая ЛАЧХ и соответствующая ей ЛФЧХ представлены на рис.3. Их можно построить с помощью графического редактора *Excel*, с помощью пакета *MathCAD*. Универсальным средством для моделирования систем является пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений *Matlab*. Воспользуемся функцией *Margin* из данного пакета для расчета и построения ЛАЧХ и ЛФЧХ в виде диаграммы Бode с одновременным определением относительной устойчивости системы.

Запишем скрипт *Matlab*

```
>> num=[0.208 1.904 2.4]; den=[1 2.5 1];  
>> sys=tf(num, den)
```

Transfer function:

$$0.208 s^2 + 1.904 s + 2.4$$

$$s^2 + 2.5 s + 1$$

```
>> margin(sys)
```

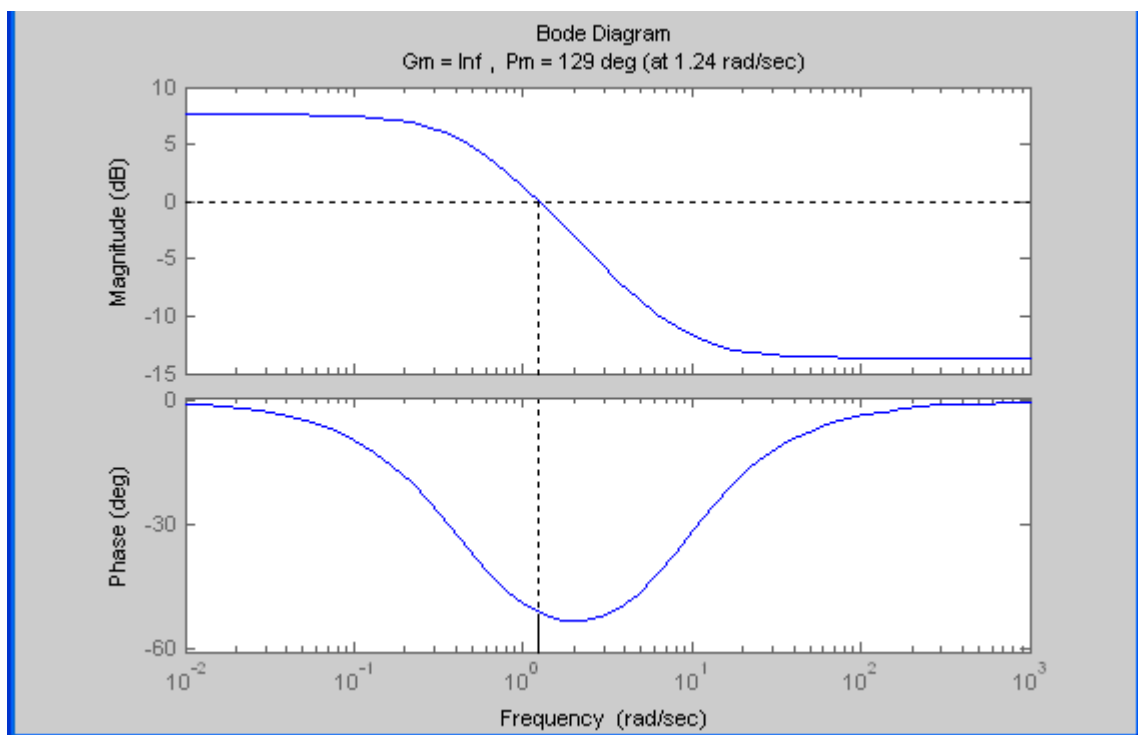


Рисунок 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ – диаграмма Бode с показателями относительной устойчивости

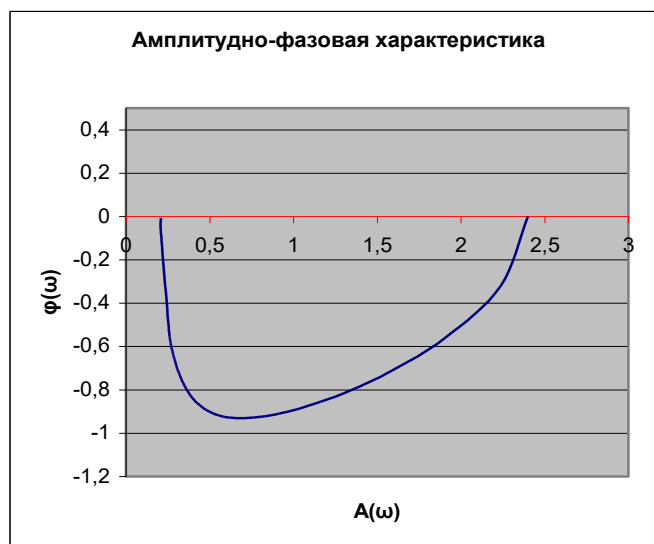


Рисунок 4. АФХ разомкнутой системы

Построение амплитудно-фазовых характеристик

Определение динамических свойств элементарных звеньев производится по амплитудно-фазовой характеристике (АФХ)

$$W(j\omega) = R(\omega) + jIm(\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)},$$

где $R(\omega)$ – вещественная часть амплитудно-фазовой характеристики (ВЧХ);

$I(\omega)$ – мнимая часть амплитудно-фазовой характеристики (МЧХ);

$A(\omega)$ – амплитудная характеристика;

$\varphi(\omega)$ – фазовая характеристика.

Амплитудно-фазовую характеристику можно построить в прямоугольной системе координат по значениям $R(\omega)$ и $Im(\omega)$. Для этого для каждого значения ω определяется $R(\omega)$ и откладывается по оси абсцисс, затем определяется $Im(\omega)$ и откладывается по оси ординат. Полученные точки с координатами $(R(\omega); Im(\omega))$ соединяются плавной кривой, которая и будет АФХ.

Построить АФХ можно в полярных координатах по значению $\varphi(\omega)$ и $A(\omega)$. Для этого для каждого значения частоты ω определяется угол сдвига фаз $\varphi(\omega)$ и откладывается от вектора $R(\omega)$. Затем определяется $A(\omega)$ и откладывается на луче с заданным $\varphi(\omega)$. Данные расчета помещены в табл. 11. Полученные точки соединяются плавной кривой, которая и будет амплитудно-фазовой характеристикой. АФХ разомкнутой системы представлена на рис. 4.

5. Определим устойчивость замкнутой САУ.

5.1. По критерию Найквиста определяем устойчивость разомкнутой системы, а по корням характеристического полинома устойчивость замкнутой системы.

Таблица 11

ω	$A(\omega)$	$\varphi(\omega)$	ω	$A(\omega)$	$\varphi(\omega)$
0	2,400	0,0000	5,2	0,358	-0,7925
0,2	2,237	-0,3223	5,4	0,349	-0,7808
0,4	1,904	-0,5609	5,6	0,342	-0,7693
0,6	1,588	-0,7110	5,8	0,335	-0,7578
0,8	1,344	-0,8012	6	0,328	-0,7464
1	1,161	-0,8558	6,2	0,322	-0,7351
1,2	1,023	-0,8892	6,4	0,317	-0,7240
1,4	0,917	-0,9097	6,6	0,312	-0,7130
1,6	0,832	-0,9219	6,8	0,307	-0,7022
1,8	0,763	-0,9285	7	0,302	-0,6916
2	0,706	-0,9311	7,2	0,298	-0,6811
2,2	0,658	-0,9306	7,4	0,294	-0,6709
2,4	0,617	-0,9278	7,6	0,290	-0,6608
2,6	0,581	-0,9232	7,8	0,287	-0,6509
2,8	0,550	-0,9170	8	0,283	-0,6412
3	0,523	-0,9097	8,2	0,280	-0,6317
3,2	0,499	-0,9013	8,4	0,277	-0,6224
3,4	0,477	-0,8921	8,6	0,275	-0,6132
3,6	0,458	-0,8823	8,8	0,272	-0,6043
3,8	0,441	-0,8720	9	0,270	-0,5956
4	0,425	-0,8612	9,2	0,267	-0,5870
4,2	0,411	-0,8501	9,4	0,265	-0,5786
4,4	0,399	-0,8388	9,6	0,263	-0,5704
4,6	0,387	-0,8274	9,8	0,261	-0,5624
4,8	0,376	-0,8158	10	0,259	-0,5546
5	0,367	-0,8041	100	0,209	-0,0663
			1000	0,208	-0,0066

Критерий Найквиста позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по амплитудно-фазовой характеристике разомкнутого контура системы.

Построим диаграмму Найквиста с использованием функции *nyquist* системы программирования *Matlab*. Для этого возьмем передаточную функцию разомкнутой САУ, представленную в уравнении (1)

$$W_p(p) = \frac{0,208p^2 + 1,904p + 2,4}{(0,5p + 1)(2p + 1)} = \frac{0,208p^2 + 1,904p + 2,4}{p^2 + 2,5p + 1}.$$

Передаточная функция замкнутой САУ:

$$\begin{aligned}
W_3(p) &= \frac{k_3 k_4}{1+k_3 k_4 k_6 \left[\frac{k_1 k_2 (p+k_3 k_4)}{k_3 k_4 (T_2 p+1)} + \frac{1}{k_3} + \frac{k_5}{k_3 k_4 (T_5 p+1)} \right]} = \\
&= \frac{k_3 k_4}{1+k_3 k_4 k_6 \left[\frac{k_1 k_2 (p+k_3 k_4)(T_5 p+1) + k_4 (T_2 p+1)(T_5 p+1) + k_5 (T_2 p+1)}{k_3 k_4 (T_2 p+1)(T_5 p+1)} \right]} = \\
&= \frac{k_3 k_4}{(T_2 p+1)(T_5 p+1) + k_6 \left[\frac{k_1 k_2 (p+k_3 k_4)(T_5 p+1) + k_4 (T_2 p+1)(T_5 p+1) + k_5 (T_2 p+1)}{(T_2 p+1)(T_5 p+1)} \right]} = \\
&= \frac{k_3 k_4 (T_2 p+1)(T_5 p+1)}{(T_2 p+1)(T_5 p+1) + k_1 k_2 k_6 (p+k_3 k_4)(T_5 p+1) + k_4 k_6 (T_2 p+1)(T_5 p+1) + k_5 k_6 (T_2 p+1)} = \\
&= \frac{5 \cdot 10 \cdot (0,5 p+1)(2 p+1)}{(0,5 p+1)(2 p+1) + 0,1 \cdot 2 \cdot 0,02 \cdot (p+5 \cdot 10)(2 p+1) + 10 \cdot 0,02 \cdot (0,5 p+1)(2 p+1) + 100 \cdot 0,02 \cdot (0,5 p+1)} = \\
&= \frac{50 p^2 + 125 p + 50}{p^2 + 2,5 p + 1 + 0,008 p^2 + 0,404 p + 0,2 + 0,2 p^2 + 0,5 p + 0,2 + p + 2} = \frac{50 p^2 + 125 p + 50}{1,208 p^2 + 4,404 p + 3,4}. \quad (2)
\end{aligned}$$

Запишем скрипт *Matlab* с переменными *num* и *den* для разомкнутой САУ и *numz* и *denz* для замкнутой САУ соответственно:

```

>> num=[0.208 1.904 2.4]; den=[1 2.5 1]; numz=[50 125 50]; denz=[1.208 4.404
3.4];
>> sys=tf(num, den);
>> roots(den)
ans =

    -2.0000
    -0.5000
>> roots(denz)
ans =

    -2.5357
    -1.1100.
>> nyquist (sys).

```

Команда *roots(den)* возвращает значения корней разомкнутой САУ, а команда *roots(denz)* определяет значения корней замкнутой САУ. Как видим, все корни замкнутой САУ имеют отрицательные вещественные части, а значит, система устойчива.

На рис. 5 приведена диаграмма Найквиста, которая, как видим, не охватывает точку $(-1; j0)$ комплексной плоскости. Это позволяет говорить об устойчивости замкнутой САУ без нахождения корней характеристического уравнения.

Поскольку функция *nyquist* применена без указания параметров, то диаграмма строится автоматически для всего диапазона регулирования частоты

$\omega \in (-\infty; +\infty)$ и полный годограф Найквиста симметричен относительно действительной оси.

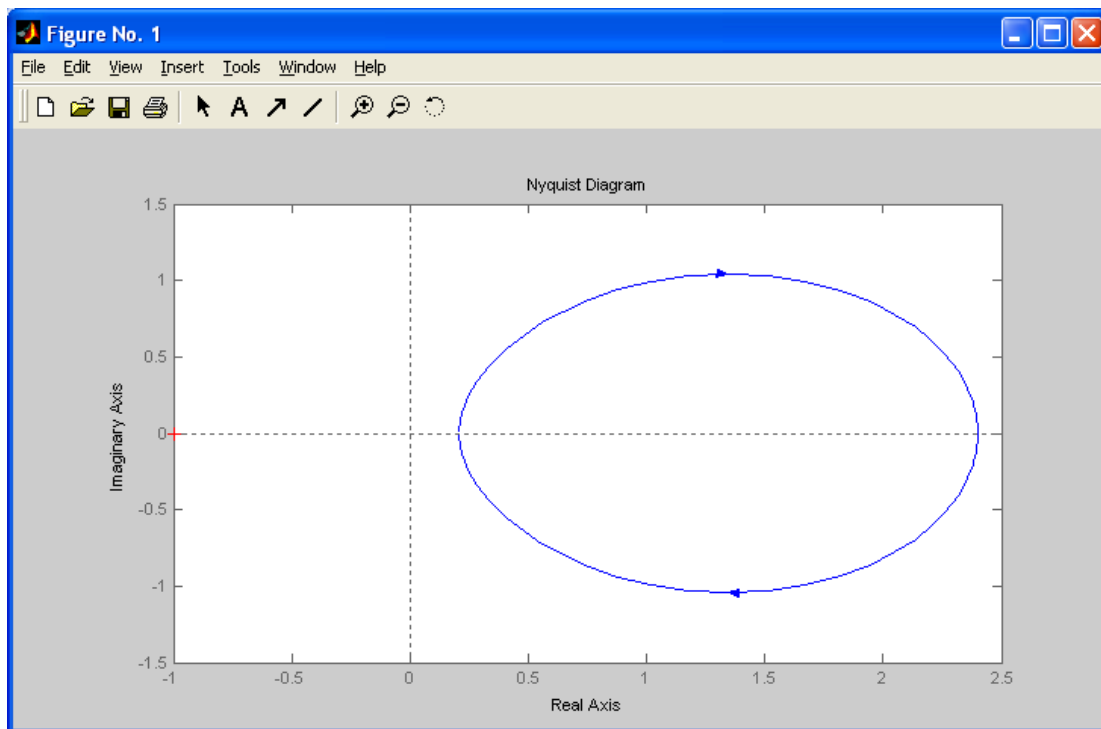


Рисунок5 Годограф Найквиста разомкнутой САУ

5.2. По критерию Гурвица: для этого передаточную функцию замкнутой САУ (2):

$$W_3(p) = \frac{50p^2 + 125p + 50}{1,208p^2 + 4,404p + 3,4}.$$

Составим определители Гурвица из коэффициентов характеристического полинома замкнутой системы 2-го порядка:

$$1,208p^2 + 4,404p + 3,4 = 0$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 4,404 & 0 \\ 1,208 & 3,4 \end{vmatrix} = 4,404 \cdot 3,4 - 1,208 \cdot 0 = 14,9736 > 0.$$

Определитель положительный при положительном коэффициенте a_0 , следовательно, замкнутая система устойчива.

Все корни характеристического полинома имеют отрицательную действительную часть, следовательно, в соответствии с необходимым и достаточным условием устойчивости, замкнутая система неустойчива.

6. Проверим полученный результат с помощью системы программирования *Matlab*, непосредственно вычислив корни характеристического уравнения: замкну-

той системы. Для этого воспользуемся функцией «*pole*». Ниже приведен скрипт и результат вычисления и результат вычисления корней, а также их расположение на комплексной плоскости (рис. 6).

```
>> numz=[50 125 50]; denz=[1.208 4.404 3.4];  
>> sysz=tf(numz, denz);  
>> sys=feedback(sysz,[0])
```

Transfer function:

```
50 s^2 + 125 s + 50  
-----  
1.208 s^2 + 4.404 s + 3.4
```

```
>> pole(sys)
```

ans =

```
-2.5357  
-1.1100
```

```
>> pzmap(sys)
```

7. Построим временные характеристики системы, для чего воспользуемся пакетом *MatLab* и библиотекой *Simulink*. Для построения воспользуемся передаточной функцией замкнутой системы (2). На вход 1-го звена подадим входное ступенчатое воздействие с задержкой 1 с, на вход второго – импульсное воздействие с параметрами (Period – 10 sec; Pulse Width – 1 %).

В результате путем моделирования замкнутой САУ получим переходную и импульсную переходные характеристики системы. Установившееся значение на выходе системы составило 15 единиц.

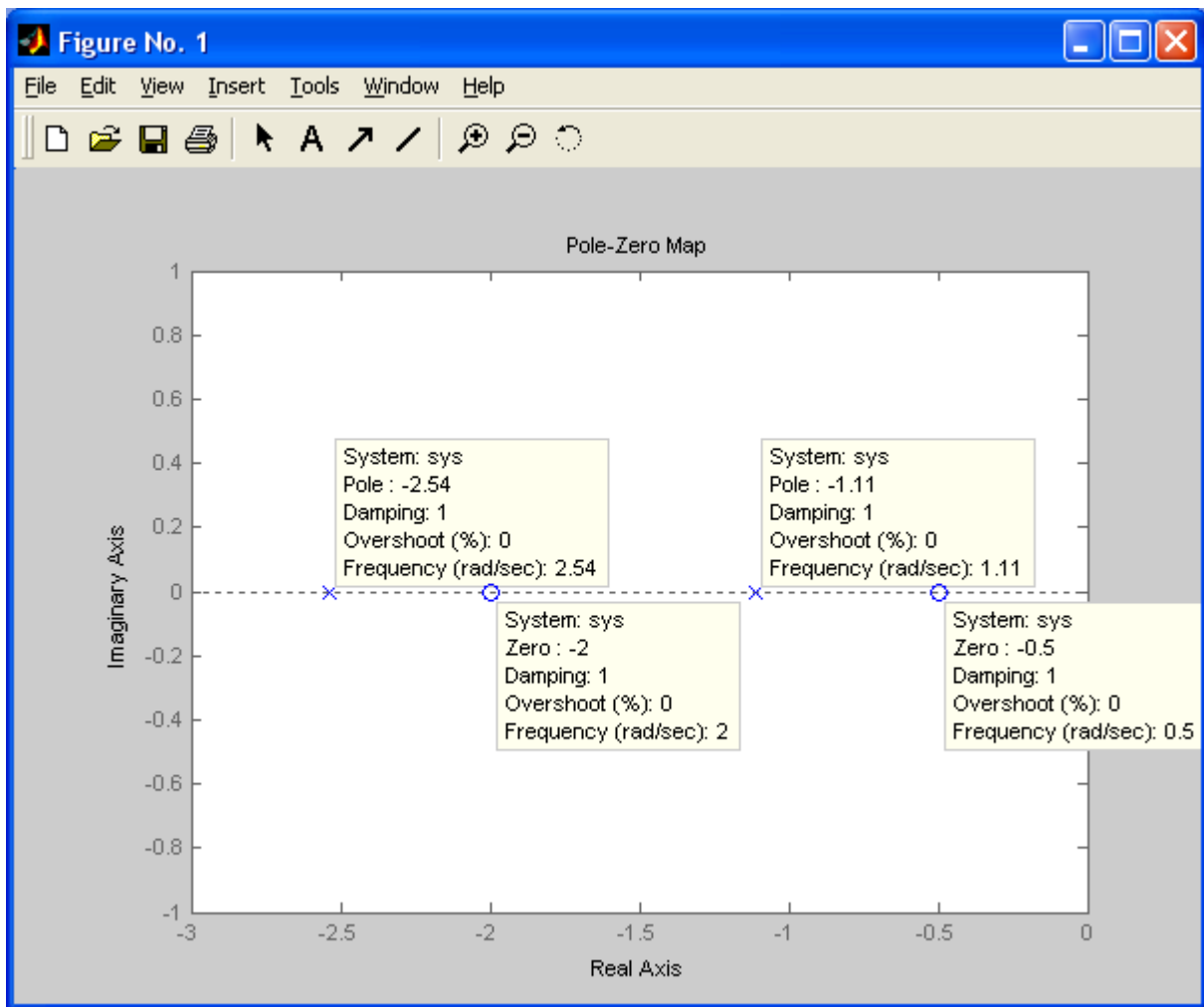


Рисунок 6. Расположение корней характеристического полинома на комплексной плоскости

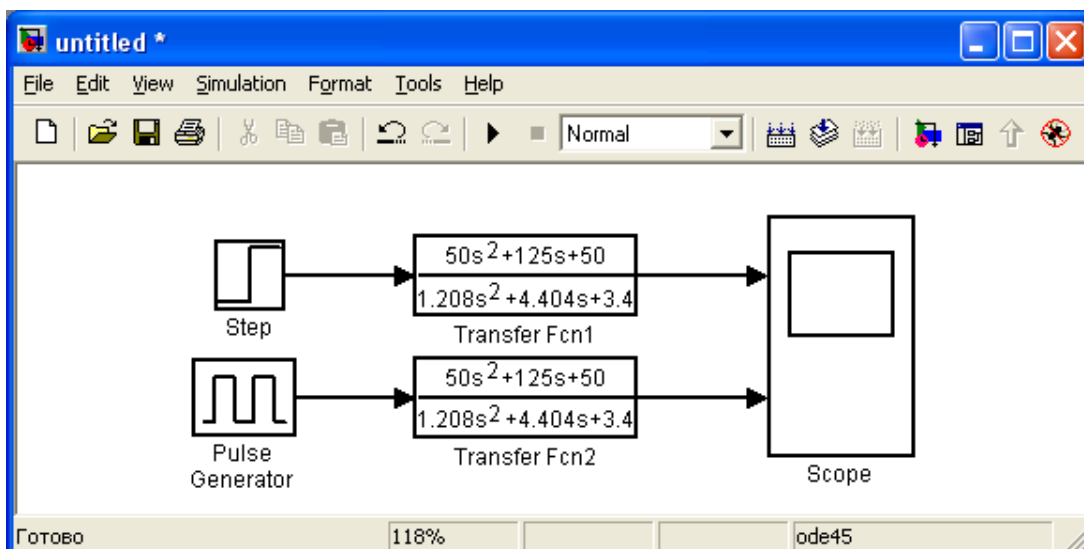


Рисунок 7. Схема для получения временных характеристик

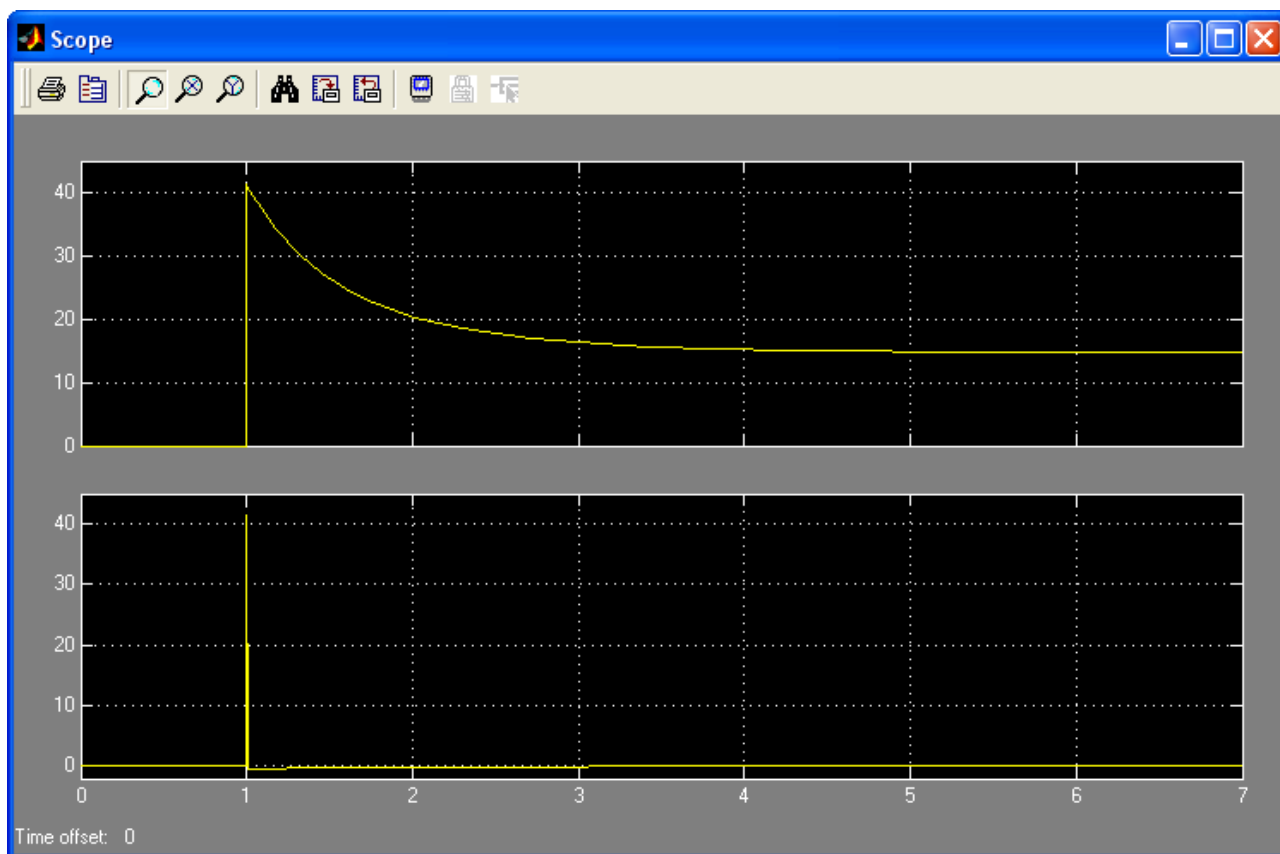


Рисунок7 Схема для получения временных характеристик

В завершении работы необходимо:

- оценить устойчивость системы;
- сравнить показатели устойчивости системы, полученные с использованием различных критериев устойчивости;
- сделать вывод о качественных показателях регулирования рассматриваемой системы, о ее работоспособности и целесообразности внедрения её в реальную систему управления.

3. ВАРИАНТЫ РАСЧЕТНЫХ ЗАДАНИЙ

1.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_3 d^2 X_3 / dt^2 + dX_3 / dt = K_3 (X_{BX} + X_6); \\ T_2 dX_2 / dt + X_2 = K_2 \delta; \\ X_{BBIX} = X_3 + X_4; \\ T_5 dX_5 / dt + X_5 = K_5 dX_{BBIX} / dt; \\ \delta = -(X_5 + X_{BBIX}); \\ X_1 = K_1 \delta; \\ X_6 = K_6 (X_1 + X_2); \\ X_4 = K_4 X_2. \\ K_1 = 2,5; \quad K_2 = 1,5; \quad K_3 = 0,1; \quad K_4 = 5; \quad K_5 = 10; \quad K_6 = 20; \\ T_2 = 10c; \quad T_3 = 5c; \quad T_5 = 10c. \end{array} \right.$$

2.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_3 d^2 X_3 / dt^2 + dX_3 / dt = K_3 (X_{BX} + X_2); \\ T_2 dX_2 / dt + X_2 = K_2 X_1; \\ T_1 dX_1 / dt + X_1 = K_1 \delta; \\ \delta = -X_8; \\ X_8 = X_5 + X_6; \\ X_5 = K_5 dX_7 / dt; \\ X_6 = K_6 X_7; \\ X_7 = K_7 X_{BBIX}; \\ X_4 = K_4 X_1; \\ X_{BBIX} = X_3 + X_4; \\ K_1 = 2; \quad K_2 = 5; \quad K_3 = 0,5; \quad K_4 = 10; \quad K_5 = 100; \quad K_6 = 0,02; \\ K_7 = 2; \quad T_1 = 10c; \quad T_2 = 5c; \quad T_3 = 2c. \end{array} \right.$$

3.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_3 d^2 X_3 / dt^2 + dX_3 / dt = K_3 (X_{BX} + X_2); \\ X_{BBIX} = X_3 + X_4; \\ X_5 = K_5 dX_{BBIX} / dt; \\ X_6 = K_6 X_{BBIX}; \\ X_7 = X_5 + X_6; \\ \delta = -X_7; \\ T_1 dX_1 / dt + X_1 = K_1 \delta; \\ T_2 dX_2 / dt + X_2 = K_2 X_1; \\ X_4 = K_4 X_1; \\ K_1 = 2; \quad K_2 = 5; \quad K_3 = 10; \quad K_4 = 50; \quad K_5 = 0,01; \quad K_6 = 0,1; \\ T_1 = 10c; \quad T_2 = 2c; \quad T_3 = 0,5c. \end{array} \right.$$

4.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_3 = K_3 (X_{BX} + X_2); \\ X_{BBIX} = X_2 + X_6; \\ T_5 d^2 X_5 / dt^2 + dX_5 / dt = K_5 \delta; \\ X_6 = X_5 + X_3; \\ X_1 = K_1 \delta; \\ \delta = -X_{BBIX}; \\ T_2 dX_2 / dt + X_2 = K_2 X_1; \\ K_1 = 1,5; \quad K_2 = 10; \quad K_3 = 150; \quad K_4 = 0,01; \quad K_5 = 15; \\ T_2 = 0,1c; \quad T_5 = 5c. \end{array} \right.$$

5.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_2 d^2 X_3 / dt^2 + T_1 dX_3 / dt + X_3 = K_3 (X_{BX} + X_1 + X_2); \\ X_4 = K_4 X_2; \\ X_{BbIX} = X_3 + X_4; \\ X_7 = K_7 X_{BbIX}; \\ T_5 dX_5 / dt + X_5 = K_5 X_7; \\ X_6 = K_6 X_7; \\ \delta = -(X_5 + X_6); \\ X_1 = K_1 d\delta / dt; \\ X_2 = K_2 \delta; \\ K_1 = 5; \quad K_2 = 10; \quad K_3 = 2; \quad K_4 = 0,1; \quad K_5 = 0,05; \quad K_6 = 7; \\ K_7 = 0,7c; \quad T_1 = 0,7c; \quad T_2 = 1c. \quad T_5 = 5c. \end{array} \right.$$

6.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_2 dX_2 / dt + X_2 = K_2 X_1; \\ X_3 = K_3 (X_{BX} + X_2); \\ X_1 = K_1 \delta; \\ \delta = -(X_{BbIX} + X_3); \\ T_5 d^2 X_5 / dt^2 + dX_5 / dt = K_5 \delta; \\ X_6 = K_6 X_5; \\ X_{BbIX} = X_2 + X_6; \\ K_1 = 0,1; \quad K_2 = 1,5; \quad K_3 = 10; \quad K_4 = 5; \quad K_5 = 0,5; \quad K_6 = 15; \\ T_2 = 0,2c; \quad T_5 = 5c. \end{array} \right.$$

7.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_3 d^2 X_3 / dt^2 + dX_3 / dt = K_3 (X_{BX} + X_2); \\ T_2 dX_2 / dt + X_2 = K_2 X_1; \\ T_1 dX_1 / dt + X_1 = K_1 \delta; \\ \delta = -X_7; \\ X_7 = X_5 + X_6; \\ X_5 = K_5 dX_{BbIX} / dt; \\ X_6 = K_6 X_{BbIX}; \\ X_4 = K_4 X_1; \\ X_{BbIX} = X_3 + X_4; \\ K_1 = 2; \quad K_2 = 4; \quad K_3 = 0,1; \quad K_4 = 15; \quad K_5 = 100; \quad K_6 = 7; \\ T_1 = 0,5c; \quad T_2 = 2c; \quad T_3 = 5c. \end{array} \right.$$

8.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_3 dX_3 / dt + X_3 = K_3 X_{BbIX}; \\ T_1 dX_{BbIX} / dt = X_4; \\ X_1 = K_1 X_{BX}; \\ X_4 = X_1 - X_2; \\ X_{BX} - X_{BbIX} = \delta; \\ X_2 = \delta + X_3; \\ K_1 = 2; \quad K_3 = 4; \quad T_1 = 0,01c; \quad T_3 = 0,5c. \end{array} \right.$$

9.
$$\begin{cases} X_1 = -K_1\delta; \\ T_3 dX_{BbIX}/dt + X_{BbIX} = K_3(X_2 + X_4 + \delta); \\ X_4 = K_4 X_{BX}; \\ T_2 dX_2/dt + X_2 = K_2 X_1; \\ X_{BX} - X_{BbIX} = \delta; \\ K_1 = 2; \quad K_2 = 5; \quad K_3 = 3; \quad K_4 = 8; \\ T_2 = 0,1c; \quad T_3 = 1c. \end{cases}$$
10.
$$\begin{cases} T_1 dX_2/dt + X_2 = K_2(X_{BX} + X_1 - X_4); \\ X_1 = K_1(\delta - X_5); \\ X_4 = K_4 X_{BbIX}; \\ T_2 d^2 X_{BbIX}/dt^2 + dX_{BbIX}/dt = K_3 X_2; \\ X_5 = K_5 X_{BbIX}; \\ \delta = -X_5 \\ K_1 = 0,5; \quad K_2 = 2; \quad K_3 = 100; \quad K_4 = 0,02; \quad K_5 = 15; \\ T_1 = 0,1c; \quad T_2 = 2c. \end{cases}$$
11.
$$\begin{cases} X_{BbIX} = X_{BX} - X_3; \\ T_3 dX_3/dt + X_3 = K_3(T_2 dX_2/dt + X_2); \\ X_2 = X_4 - X_{BbIX} + \delta; \\ T_4 dX_4/dt + X_4 = K_4 X_{BbIX}; \\ \delta = X_{BX} - X_{BbIX} \\ K_3 = 4; \quad K_4 = 7; \quad T_2 = 0,1c; \quad T_3 = 1c; \quad T_4 = 10c. \end{cases}$$
12.
$$\begin{cases} X_1 = X_{BX} - X_4 + \delta; \\ X_2 = T_1 dX_1/dt; \\ X_3 = K_1 X_1; \\ X_{BbIX} = X_2 + X_3; \\ \delta = X_{BX} - X_{BbIX}; \\ T_2 dX_4/dt + X_4 = K_2 X_{BbIX}; \\ K_1 = 5; \quad K_4 = 8; \quad T_1 = 0,1c; \quad T_2 = 5c. \end{cases}$$
13.
$$\begin{cases} T_2 d^2 X_3/dt^2 + T_1 dX_3/dt + X_3 = K_3(X_{BX} + X_1 + X_2); \\ X_4 = K_4 X_2; \\ X_{BbIX} = X_3 + X_4; \\ T_5 dX_5/dt + X_5 = K_5 X_{BbIX}; \\ T_6 dX_6/dt + X_6 = K_6 X_{BbIX}; \\ X_1 = K_1 d\delta/dt; \\ \delta = -(X_5 + X_6); \\ X_2 = K_2 \delta; \\ K_1 = 100; \quad K_2 = 2; \quad K_3 = 3; \quad K_4 = 0,1; \quad K_5 = 5; \quad K_6 = 2; \\ T_1 = 1c; \quad T_2 = 2c; \quad T_5 = 10c; \quad T_6 = 50c. \end{cases}$$

$$14. \left\{ \begin{array}{l} X_7 = X_{BX} + X_2; \\ X_{BBIX} = K_3 (X_7 + X_5); \\ X_6 = K_6 X_{BBIX} \\ T_2 d^2 X_5 / dt^2 + T_3 dX_5 / dt + X_5 = K_5 \delta; \\ T_1 dX_4 / dt + X_4 = K_4 \delta; \\ X_1 = K_1 \delta; \\ X_2 = K_2 (X_1 + X_4); \\ \delta = -X_6; \\ K_1 = 0,5; \quad K_2 = 2; \quad K_3 = 150; \quad K_4 = 0,01; \quad K_5 = 7; \quad K_6 = 3; \\ T_1 = 0,2c; \quad T_2 = 5c; \quad T_3 = 2c. \end{array} \right.$$

$$15. \left\{ \begin{array}{l} X_6 = X_{BX} + X_2; \\ \delta = -X_{BBIX}; \\ X_{BBIX} = K_3 (X_5 + X_6); \\ T_2 d^2 X_5 / dt^2 + T_3 dX_5 / dt = K_5 \delta; \\ T_1 dX_4 / dt + X_4 = K_4 \delta; \\ X_1 = K_1 X_{BX}; \\ X_2 = K_2 (dX_1 / dt + dX_4 / dt); \\ K_1 = 5; \quad K_2 = 2,5; \quad K_3 = 0,02; \quad K_4 = 100; \quad K_5 = 7; \\ T_1 = 2c; \quad T_2 = 5c; \quad T_3 = 0,5c. \end{array} \right.$$

$$16. \left\{ \begin{array}{l} T_2 d^2 X_3 / dt^2 + T_1 dX_3 / dt + X_3 = K_3 (X_{BX} + X_1 + X_2); \\ X_4 = K_4 X_2; \\ X_{BBIX} = X_3 + X_4; \\ X_7 = K_7 X_{BBIX}; \\ T_5 dX_5 / dt + X_5 = K_5 X_7; \\ T_6 dX_6 / dt + X_6 = K_6 X_7; \\ \delta = -(X_5 + X_6); \\ X_1 = K_1 d\delta / dt; \\ X_2 = K_2 \delta; \\ K_1 = 0,5; \quad K_2 = 0,8; \quad K_3 = 100; \quad K_4 = 4; \quad K_5 = 5; \quad K_6 = 0,02; \\ K_7 = 5; \quad T_1 = 0,75c; \quad T_2 = 2c; \quad T_5 = 10c; \quad T_6 = 50c. \end{array} \right.$$

$$17. \left\{ \begin{array}{l} T_1 dX_2 / dt + X_2 = K_2 (X_{BX} + X_1 - X_6); \\ X_4 = K_4 (X_{BX} + X_1 - X_6); \\ dX_3 / dt = K_3 X_2; \\ X_{BBIX} = X_3 + X_4; \\ X_6 = K_6 X_{BBIX}; \\ T_2 dX_5 / dt + X_5 = K_5 dX_2 / dt; \\ X_7 = K_7 X_{BBIX}; \\ \delta = -X_7; \\ X_1 = X_5 + \delta; \\ K_2 = 5; \quad K_3 = 10,5; \quad K_4 = 150; \quad K_5 = 0,01; \quad K_6 = 7 \quad K_7 = 0,5 \\ T_1 = 0,5c; \quad T_2 = 2c. \end{array} \right.$$

$$18. \left\{ \begin{array}{l} T_1 dX_2/dt + X_2 = K_2(X_{BX} + X_1 - X_6); \\ T_2 d^2 X_3/dt^2 + dX_3/dt = K_3 X_2; \\ X_4 = K_4(X_{BX} + X_1 - X_6); \\ X_{BbIX} = X_3 + X_4; \\ X_6 = K_6 dX_{BbIX}/dt; \\ X_7 = K_7 X_{BbIX}; \\ T_3 dX_5/dt + X_5 = K_5 dX_2/dt; \\ \delta = -X_7; \\ X_1 = K_1(\delta - X_5); \\ K_1 = 1,5; \quad K_2 = 10; \quad K_3 = 0,05; \quad K_4 = 120; \quad K_5 = 15; \quad K_6 = 0,2; \quad K_7 = 2; \\ T_1 = 0,1c; \quad T_2 = 2c; \quad T_3 = 8c. \end{array} \right.$$

$$19. \left\{ \begin{array}{l} T_2 d^2 X_3/dt^2 + T_1 dX_3/dt + X_3 = K_3(X_{BX} + X_1 + X_2); \\ X_4 = K_4 X_2 \\ X_{BbIX} = X_3 + X_4; \\ X_6 = K_6 X_{BbIX}; \\ T_3 dX_5/dt + X_5 = K_5 X_{BbIX}; \\ \delta = -(X_5 + X_6); \\ X_1 = K_1 d\delta/dt; \\ X_2 = K_2 \delta; \\ K_1 = 2; \quad K_2 = 10; \quad K_3 = 5; \quad K_4 = 100; \quad K_5 = 0,1; \quad K_6 = 0,02; \\ T_1 = 1c; \quad T_2 = 2c; \quad T_3 = 10c. \end{array} \right.$$

$$20. \left\{ \begin{array}{l} dX_3/dt = K_3(X_{BX} + X_{BbIX} - X_4); \\ X_4 = K_4 X_3; \\ \delta = -X_3; \\ T_1 d^2 X_{BbIX}/dt^2 + dX_{BbIX}/dt = K_2(X_1 - X_{BbIX}); \\ X_1 = K_1 \delta; \\ K_1 = 100; \quad K_2 = 5; \quad K_3 = 0,02; \quad K_4 = 0,1; \\ T_1 = 10c. \end{array} \right.$$

$$21. \left\{ \begin{array}{l} T_2 d^2 X_3/dt^2 + T_1 dX_3/dt + X_3 = K_3(X_{BX} + X_1 - X_2); \\ T_4 dX_4/dt + X_4 = K_4 X_2; \\ X_{BbIX} = X_3 + X_4; \\ X_5 = K_5 X_{BbIX}; \\ \delta = -(X_5 + X_{BbIX}); \\ X_1 = K_1 \delta; \\ dX_2/dt = K_2 \delta \\ K_1 = 10; \quad K_2 = 100; \quad K_3 = 3; \quad K_4 = 0,1; \quad K_5 = 0,5; \quad K_6 = 1; \\ T_1 = 0,5c; \quad T_2 = 1c; \quad T_4 = 10c. \end{array} \right.$$

22.
$$\begin{cases} \delta = X_{BX} - X_{BBIX}; \\ X_1 = 5\delta; \\ X_4 = 0,1dX_{BX}/dt; \\ 0,3dX_2/dt + X_2 = 20(X_1 + X_4); \\ 2d^2X_{BBIX}/dt^2 + dX_{BBIX}/dt = X_2. \end{cases}$$
23.
$$\begin{cases} T_2 d^2X_{BBIX}/dt^2 + dX_{BBIX}/dt = K_2(X_{BX} + X_1 - X_4); \\ X_3 = K_3X_{BBIX}; \\ T_3dX_4/dt + X_4 = K_4dX_3/dt; \\ X_6 = K_6X_3; \\ X_5 = K_5X_{BBIX}; \\ \delta = -(X_5 + X_6); \\ T_1dX_1/dt + X_1 = K_1\delta; \\ K_1 = 10,5; \quad K_2 = 0,1; \quad K_3 = 100; \quad K_4 = 0,015; \quad K_5 = 2; \quad K_6 = 6; \\ T_1 = 1c; \quad T_2 = 5c; \quad T_3 = 0,2c. \end{cases}$$
24.
$$\begin{cases} T_1dX_1/dt + X_1 = K_1X_{BBIX}; \\ \delta = X_{BX} - X_{BBIX}; \\ T_2dX_2/dt + X_2 = K_2(X_1 - X_4); \\ X_3 = K_3dX_2/dt + X_2; \\ dX_4/dt = K_4X_3; \\ T_5dX_{BBIX}/dt + X_{BBIX} = K_5(\delta - X_4); \\ K_1 = 0,5; \quad K_2 = 2; \quad K_3 = 10; \quad K_4 = 2; \quad K_5 = 5; \\ T_1 = 0,1c; \quad T_2 = 2c; \quad T_5 = 10c. \end{cases}$$
25.
$$\begin{cases} X_1 = K_1X_{BBIX}; \\ \delta = X_{BX} - X_{BBIX}; \\ T_2dX_2/dt + X_2 = K_2(X_1 - X_3); \\ dX_3/dt = K_3(X_1 + X_2); \\ T_4dX_{BBIX}/dt + X_{BBIX} = K_4(\delta - X_3); \\ K_1 = 10; \quad K_2 = 2; \quad K_3 = 0,5; \quad K_4 = 7; \\ T_2 = 1c; \quad T_4 = 5c. \end{cases}$$
26.
$$\begin{cases} \delta = X_{BX} - X_{BBIX}; \\ X_1 = K_1\delta; \\ dX_2/dt = K_2X_1; \\ T_3dX_3/dt + X_3 = X_1 + X_2; \\ T_4dX_{BBIX}/dt + X_{BBIX} = K_4X_2; \\ K_1 = 50; \quad K_2 = 5; \quad K_4 = 30; \\ T_3 = 0,05c; \quad T_4 = 0,01c. \end{cases}$$

$$27. \quad \begin{cases} \delta = X_{BX} - X_{BbIX}; \\ T_1 dX_3/dt = K_1 \delta - X_2; \\ X_2 = X_{BX} + X_{BbIX}; \\ T_2 dX_{BbIX}/dt + X_{BbIX} = K_2 X_3; \\ K_1 = 10; \quad K_2 = 5; \\ T_1 = 0,1c; \quad T_2 = 2c. \end{cases}$$

$$28. \quad \begin{cases} \delta = X_{BX} - X_{BbIX}; \\ X_1 = 0,5\delta; \\ X_4 = dX_{BX}/dt; \\ 0,5dX_2/dt + X_2 = 100(X_1 + X_4); \\ d^3 X_{BbIX}/dt^3 + d^2 X_{BbIX}/dt^2 + dX_{BbIX}/dt = X_2; \end{cases}$$

4. ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория автоматического управления: учебник для вузов/ под ред. В.Б. Яковлева. – 2-е изд., перераб. – М. : Высшая школа, 2005. – 567 с.
2. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: учебник для вузов / А.А. Ерофеев. - 2-е изд., доп. и перераб. - СПб.: Политехника, 2002. - 302 с.
3. Бесекерский В.А. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления. 5-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука, 1987. – 512 с.
4. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1985. – 195 с.
5. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами. – М.: Изд-во МГТУ, 1993.
6. Топчиев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.: ил.
7. Фатеев А.В. Расчет автоматических систем. – М.: Высшая школа, 1973. – 336 с.

Приложение А. Пример оформления титульного листа

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

КУРСОВАЯ РАБОТА

По дисциплине «ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»
тема: «Расчет системы автоматического управления»

Вариант № __

Выполнил студент _____

подпись, дата

И.О. Фамилия

Группа _____

Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Руководитель (должность, ученая степень, звание) _____

подпись, дата

В.Г. Лопатин

Лысьва 20__г.