

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия  
(СибАДИ)»

Кафедра «Автоматизация производственных процессов  
и электротехника»

## ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания  
по выполнению курсовых работ  
(для студентов специальностей 220301, 140607)

*Составители: В.С. Щербаков, Р.Ю. Сухарев*

Омск  
СибАДИ  
2011

УДК 681.5  
ББК 32.965-01

*Рецензент:* д.т.н., профессор, зав. каф. «Электроника и автотракторное электрооборудование» Денисов В.П.

Работа одобрена НМСС 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств» в качестве методических указаний по выполнению курсовых работ и учебно–методических материалов к самостоятельной работе по дисциплине «Теория автоматического управления» для студентов специальностей 220301, 140607.

**Теория автоматического управления:** методические указания по выполнению курсовых работ (для студентов специальностей 220301, 140607) / Сост.: В.С. Щербаков, Р.Ю. Сухарев. – Омск: СибАДИ, 2011. – 36 с.

Рассматриваются вопросы анализа линейных систем, исследования на устойчивость, нахождения показателей качества переходных процессов. Даются примеры расчета корректирующих звеньев и их настройки.

Табл. 2. Ил. 20 Прил. 4. Библиогр. 6 назв.

## Оглавление

Введение.....	4
1. Задание на курсовую работу .....	4
2. Исходная схема системы стабилизации угловой скорости двигателя постоянного тока и принцип ее действия.....	5
3. Структурная схема системы стабилизации и передаточные функции ее элементов .....	7
4. Проверка статической ошибки.....	8
5. Корректирующее звено.....	8
6. Критерий устойчивости Гурвица.....	11
7. Критерий устойчивости Михайлова .....	13
8. Критерий устойчивости Найквиста.....	15
9. Логарифмический критерий устойчивости .....	18
10. Построение графика переходного процесса .....	21
11. Проверка расчетов с помощью моделирования системы в среде MATLAB Simulink .....	22
12. Требования к оформлению работ.....	25
13. Порядок защиты курсовых работ.....	27
Библиографический список.....	28
Приложение 1 .....	29
Приложение 2.....	31
Приложение 3.....	33
Приложение 4.....	34

## **Введение**

В курсовой работе по теории автоматического управления (ТАУ) требуется провести анализ и синтез системы автоматического регулирования (САР), содержащей контур с жесткой отрицательной обратной связью. Учитывая тот факт, что расчет систем различной физической природы, принадлежащих к определенному классу, одинаков, предложена САР угловой скорости двигателя постоянного тока.

Система, предназначенная для расчета, является линейной системой третьего порядка, дифференциальные уравнения каждого звена которой могут быть составлены с применением известных в электромеханике законов.

САР состоит из регулируемого объекта и элементов управления, которые воздействуют на объект при изменении одной или нескольких регулируемых переменных. Под влиянием входных сигналов (управления или возмущения) изменяются регулируемые переменные. Цель регулирования заключается в формировании таких законов, при которых выходные регулируемые переменные мало отличались бы от требуемых значений. Решение данной задачи во многих случаях осложняется наличием случайных возмущений (помех). При этом необходимо выбрать такой закон регулирования, при котором сигналы управления проходили бы через систему с малыми искажениями, а сигналы шума практически не пропускались.

Курсовая работа выполняется в течение семестра и способствует закреплению знаний по дисциплине «Теория автоматического управления». Выполнение работы позволит студентам получить навык исследования одноконтурных систем управления на устойчивость различными способами как с использованием ЭВМ, так и без их использования.

### **1. Задание на курсовую работу**

1. Подробно описать назначение и принцип действия САР.
2. Составить структурную схему системы и определить передаточные функции звеньев.
3. Исследовать систему на устойчивость по 4 критериям устойчивости.



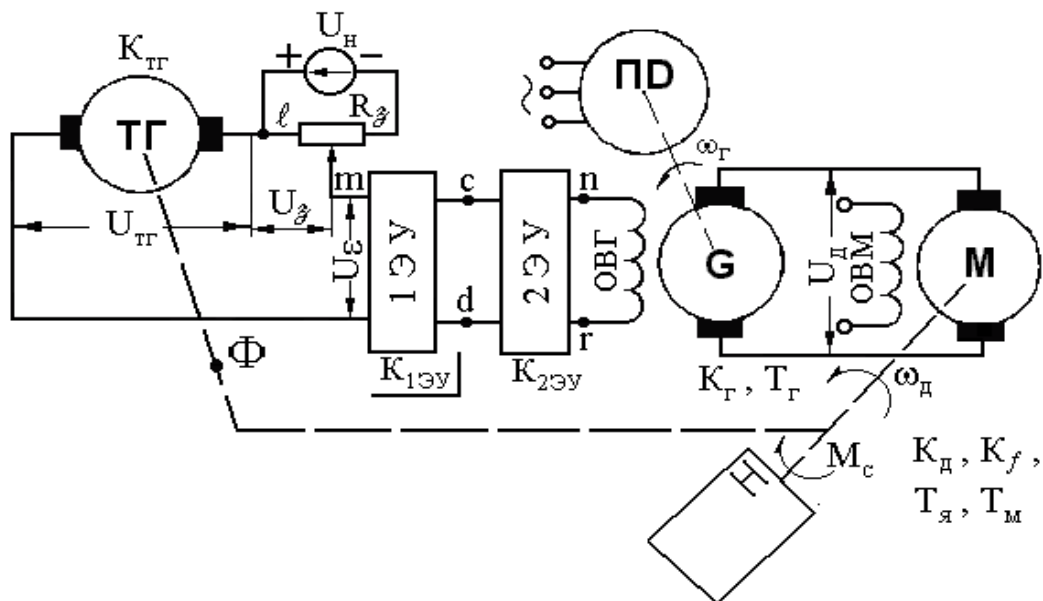


Рис. 2. Принципиальная схема системы стабилизации угловой скорости ДПТ для четных вариантов

### Принцип работы исходной системы

Скорость вращения вала двигателя постоянного тока (ДПТ) задается напряжением  $U_3$ , которое через сопротивление  $R_3$  подается на вход операционного усилителя (рис.1). Также на него подается через сопротивление  $R_1$  напряжение с тахогенератора  $U_{ТГ}$ . При увеличении нагрузки  $M_C$  уменьшается скорость вращения вала двигателя  $\omega_D$  и соответственно снижается напряжение тахогенератора  $U_{ТГ}$ . Суммарное напряжение  $U_\Sigma$  увеличивается, следовательно, увеличивается напряжение обмотки возбуждения генератора (ОВГ), напряжение на двигателе и угловая скорость. При уменьшении нагрузки  $M_C$  увеличивается напряжение тахогенератора  $U_{ТГ}$ . Суммарное напряжение  $U_\Sigma$  уменьшается, при этом уменьшается напряжение ОВГ и угловая скорость ДПТ снижается.

Принцип работы системы стабилизации, представленной на рис. 2 аналогичен.

Угловая скорость  $\omega_D$  изменяется с изменением нагрузки на валу двигателя  $M_C$ . В результате можно записать, что помеха равна:

$$f(t) = k_f \cdot M_C(t), \quad (1)$$

где  $k_f$  – передаточный коэффициент по каналу помехи.

Стабилизация угловой скорости  $\omega_D$  достигается за счет подачи напряжения  $U_D$  на якорную обмотку двигателя. САР является статической, поэтому работает со статической ошибкой, которая не должна превысить заданной величины.

### 3. Структурная схема системы стабилизации и передаточные функции ее элементов

Принципиальные схемы систем стабилизации (рис. 1,2) преобразуются в блок-схемы (рис. 3,4), по которым выводятся дифференциальные уравнения отдельных элементов.

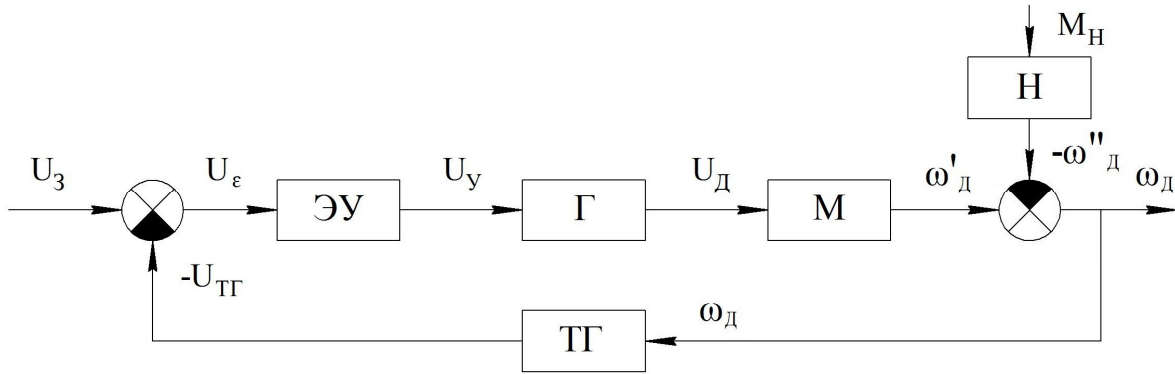


Рис. 3. Блок-схема системы стабилизации угловой скорости ДПТ для нечетных вариантов

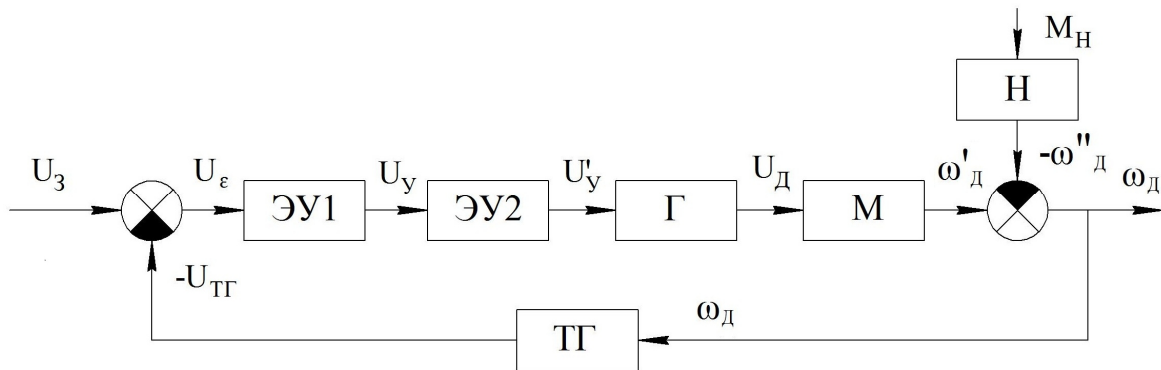


Рис. 4. Блок-схема системы стабилизации угловой скорости ДПТ для четных вариантов

*Дифференциальные уравнения элементов системы:*

1. ЭУ – электронный усилитель:

$$U_y = U_\epsilon \cdot k_{\text{ЭУ}}. \quad (2)$$

2. Г – генератор:

$$T_1 \cdot \frac{dU_D}{dt} + U_D = k_1 \cdot U_y. \quad (3)$$

3. М – двигатель постоянного тока:

$$T_{Я} \cdot T_{М} \cdot \frac{d^2 \omega_{Д}}{dt^2} + T_{М} \cdot \frac{d\omega_{Д}}{dt} + \omega_{Д} = k_{Д} \cdot U_{У} - k_{f} \left( T_{Я} \cdot \frac{dM_{Н}}{dt} + M_{Н} \right). \quad (4)$$

4. ТГ – тахогенератор:

$$U_{ТГ} = \omega_{Д} \cdot k_{ТГ}. \quad (5)$$

По уравнениям звеньев САР вывести передаточные функции.

#### 4. Проверка статической ошибки

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_{РАЗ}(p) = W_{ЭУ}(p) \cdot W_{Г}(p) \cdot W_{Д}(p) \cdot W_{ТГ}(p); \quad (6)$$

$$W_{РАЗ}(p) = k_{ЭУ} \cdot \frac{k_1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{k_{Д}}{T_{Я} T_{М} p^2 + T_{М} p + 1} \cdot k_{ТГ}; \quad (7)$$

$$W_{РАЗ}(p) = \frac{k_{РС}}{(T_1 p + 1) \cdot (T_{Я} T_{М} p^2 + T_{М} p + 1)}, \quad (8)$$

где  $k_{РС} = k_{ЭУ} \cdot k_1 \cdot k_{Д} \cdot k_{ТГ}$  – коэффициент передачи разомкнутой системы.

Статическая ошибка

$$\Delta \omega_{СТ} = \frac{f(t)}{1 + k_{РС}} = \frac{k_f \cdot M_C(t)}{1 + k_{РС}}. \quad (9)$$

Полученную статическую ошибку необходимо сравнить с разрешенной (см. прил. 1) и принять решение о необходимости ввода в систему корректирующего звена.

#### 5. Корректирующее звено

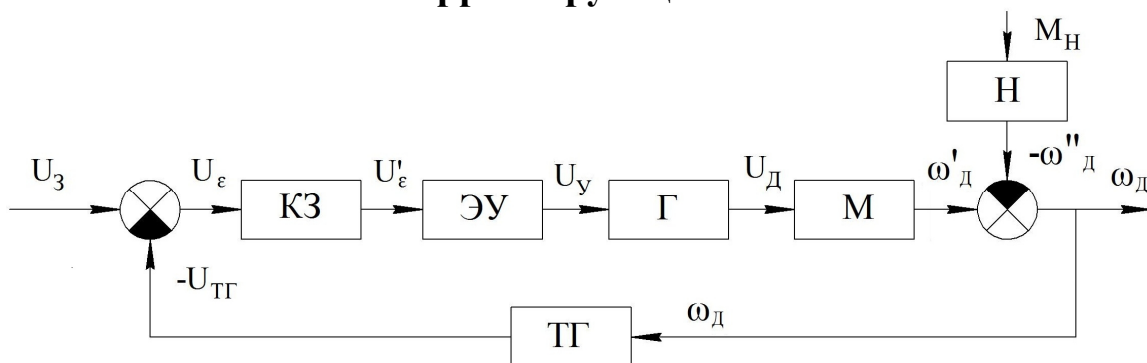


Рис. 5. Блок–схема системы стабилизации угловой скорости ДПТ с корректирующим звеном для нечетных вариантов



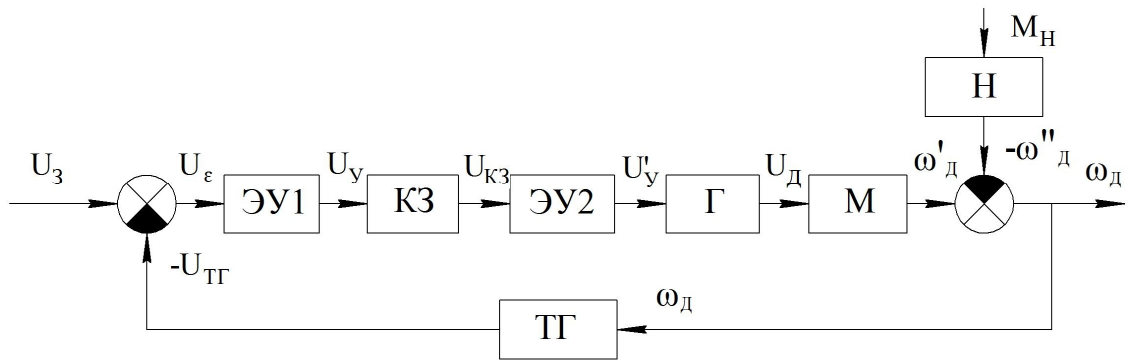


Рис. 6. Блок–схема системы стабилизации угловой скорости ДПТ с корректирующим звеном для четных вариантов

Корректирующее звено подбирается из прил. 2 и подключается в основную схему в указанных точках (рис. 7,8).

**Пример расчета активного корректирующего звена (рис. 7):**

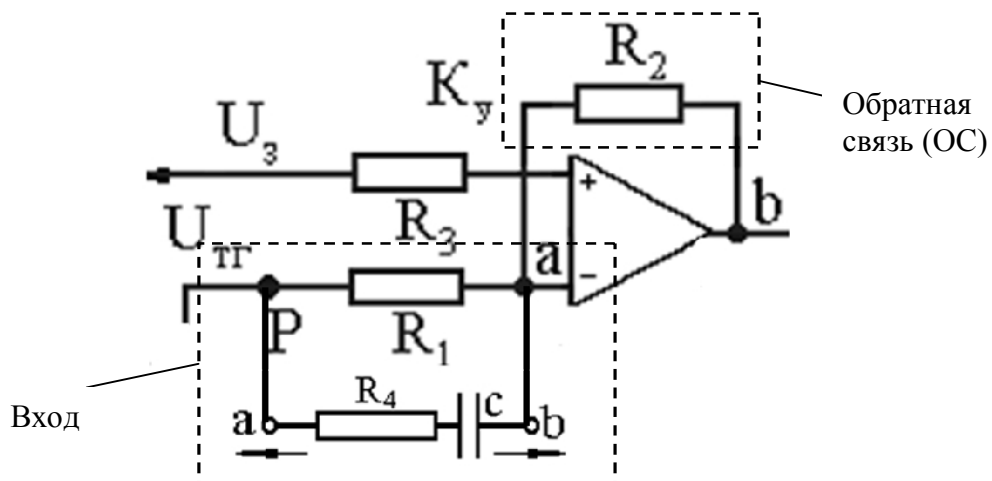


Рис. 7. Активное корректирующее звено

Передаточная функция активного корректирующего звена:

$$W_{КЗ}(p) = \frac{Z_{ОС}}{Z_{ВХОД}}; \quad (10)$$

$$Z_{ОС} = R_2; \quad (11)$$

$$\frac{1}{Z_{ВХОД}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4 + \frac{1}{Cp}}; \quad (12)$$

$$\frac{1}{Z_{ВХОД}} = \frac{(R_4 + 1) \cdot C \cdot p + 1}{R_1 \cdot (R_4 \cdot C \cdot p + 1)}; \quad (13)$$

$$\frac{Z_{OC}}{Z_{ВХОД}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{(R_4 + 1) \cdot C \cdot p + 1}{R_4 \cdot C \cdot p + 1}; \quad (14)$$

$$W_{K3}(p) = k_0 \cdot \frac{T_{02} \cdot p + 1}{T_{01} \cdot p + 1}, \quad (15)$$

где  $k_0 = \frac{R_2}{R_1}$ ;  $T_{01} = R_4 \cdot C$ ;  $T_{02} = (R_4 + 1) \cdot C$ .

**Пример расчета пассивного корректирующего звена (рис. 8):**

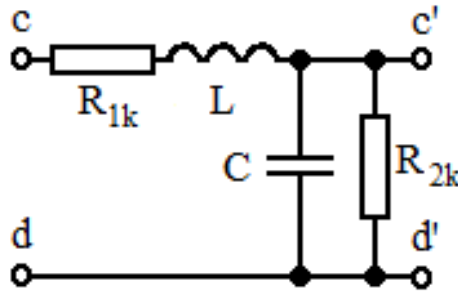


Рис. 8. Пассивное корректирующее звено

Передаточная функция пассивного корректирующего звена:

$$W_{K3}(p) = \frac{Z_{ВЫХ}}{Z_{ВХОД}}; \quad (16)$$

$$\frac{1}{Z_{ВЫХ}} = \frac{1}{R_{2k}} + Cp; \quad (17)$$

$$Z_{ВХОД} = R_{1k} + Lp + \frac{R_{2k}}{R_{2k}Cp + 1}; \quad (18)$$

$$\frac{1}{Z_{ВХОД}} = \frac{R_{2k} \cdot C \cdot p + 1}{L \cdot R_{2k} \cdot C \cdot p^2 + (R_{1k} \cdot R_{2k} \cdot C + L)p + R_{1k} + R_{2k}}; \quad (19)$$

$$Z_{OC} = \frac{R_{2k}}{R_{2k} \cdot C \cdot p + 1}; \quad (20)$$

$$\frac{Z_{ВЫХ}}{Z_{ВХОД}} = \frac{R_{2k}}{L \cdot R_{2k} \cdot C \cdot p^2 + (R_{1k} \cdot R_{2k} \cdot C + L)p + R_{1k} + R_{2k}}; \quad (21)$$

$$W_{K3}(p) = \frac{k_0}{T_{01}^2 \cdot p^2 + T_{02} \cdot p + 1}, \quad (22)$$

где  $k_0 = \frac{R_{2k}}{R_{1k} + R_{2k}}$ ;  $T_{01}^2 = \frac{L \cdot R_{2k} \cdot C}{R_{1k} + R_{2k}}$ ;  $T_{02} = \frac{R_{1k} \cdot R_{2k} \cdot C + L}{R_{1k} + R_{2k}}$ .

Передаточная функция разомкнутой системы с корректирующим звеном:

$$W_{PA3}(p) = W_{K3}(p) \cdot W_{ЭУ}(p) \cdot W_{Г}(p) \cdot W_{Д}(p) \cdot W_{ТГ}(p); \quad (23)$$

$$W_{PA3}(p) = \frac{k_0(T_{02}p + 1)}{T_{01}p + 1} \cdot k_{ЭУ} \cdot \frac{k_1}{T_1p + 1} \cdot \frac{k_D}{T_ЯT_M p^2 + T_M p + 1} \cdot k_{ТГ}; \quad (24)$$

$$W_{PA3}(p) = \frac{k_{PC}}{(T_{01}p + 1) \frac{1}{(T_{02}p + 1)} (T_1p + 1) \cdot (T_ЯT_M p^2 + T_M p + 1)}, \quad (25)$$

где  $k_{PC} = k_0 \cdot k_{ЭУ} \cdot k_1 \cdot k_D \cdot k_{ТГ}$ .

Находим такое значение  $k_0$ , чтобы статическая ошибка соответствовала разрешенной:

$$\Delta\omega_{СТ} = \frac{f(t)}{1 + k_{PC}} = \frac{k_f \cdot M_C(t)}{1 + k_{PC}} = \frac{k_f \cdot M_C(t)}{1 + k_0 \cdot k_{ЭУ} \cdot k_1 \cdot k_D \cdot k_{ТГ}}; \quad (26)$$

$$k_0 = \frac{\left( \frac{k_f \cdot M_C(t)}{\Delta\omega_{СТ}} - 1 \right)}{k_{ЭУ} \cdot k_1 \cdot k_D \cdot k_{ТГ}}. \quad (27)$$

Вычислить параметры передаточной функции корректирующего звена.

## 6. Критерий устойчивости Гурвица

Для исследования устойчивости замкнутой САР по критерию устойчивости Гурвица необходимо составить определитель Гурвица. Для этого понадобится характеристическое уравнение замкнутой системы.

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_{PA3}(p) = W_{K3}(p) \cdot W_{ЭУ}(p) \cdot W_{Г}(p) \cdot W_{Д}(p) \cdot W_{ТГ}(p). \quad (28)$$

После подстановки численных значений получим:

$$W_{PA3}(p) = \frac{c_0p^n + c_1p^{n-1} + \dots + c_{n-1}p + c_n}{b_0p^n + b_1p^{n-1} + \dots + b_{n-1}p + b_n}. \quad (29)$$

Характеристическое уравнение:

$$a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1}\lambda^1 + a_n\lambda^0 = 0, \quad (30)$$

где  $a_0 = b_0 + c_0, a_1 = b_1 + c_1, \dots, a_{n-1} = b_{n-1} + c_{n-1}, a_n = b_n + c_n$ .

Определитель Гурвица системы  $n$ -го порядка:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & a_{n-4} & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix}. \quad (31)$$

*Алгоритм составления определителя Гурвица:*

1)  $a_0 > 0$  – это условие всегда выполнимо, т.к. левую и правую части характеристического уравнения при необходимости можно умножить на  $(-1)$ ;

2) по главной диагонали последовательно записываются  $n$  коэффициентов, начиная от первого и кончая  $a_n$ ;

3) столбцы определителя заполняются вверх от диагональных элементов по возрастающим индексам, а вниз по убывающим индексам;

4) коэффициенты с индексами меньше 0 и больше  $n$  заменяются на 0.

Условие устойчивости системы заключается в требовании положительности определителя Гурвица и всех его диагональных миноров.

*Критерий устойчивости САР четвертого порядка*

Характеристическое уравнение четвертого порядка:

$$a_0\lambda^4 + a_1\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_3\lambda + a_4 = 0. \quad (32)$$

Определитель Гурвица:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix}; \quad (33)$$

$$\Delta_1 = a_1 > 0; \quad (34)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3 > 0; \quad (35)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 \begin{vmatrix} a_2 & a_4 \\ a_1 & a_3 \end{vmatrix} - a_3 \begin{vmatrix} a_0 & 0 \\ 0 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_3^2 a_0 > 0; \quad (36)$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = a_4 \cdot \Delta_3 = a_1 a_2 a_3 a_4 - a_1^2 a_4^2 - a_0 a_3^2 a_4 > 0. \quad (37)$$

## 7. Критерий устойчивости Михайлова

Для исследования системы на устойчивость по критерию Михайлова необходимо составить передаточную функцию разомкнутой системы и подставить в нее численные значения коэффициентов:

$$W_{PAZ}(p) = \frac{c_0 p^n + c_1 p^{n-1} + \dots + c_{n-1} p + c_n}{b_0 p^n + b_1 p^{n-1} + \dots + b_{n-1} p + b_n}. \quad (38)$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы:

$$a_0 \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1} \lambda^1 + a_n \lambda^0 = 0, \quad (39)$$

где  $a_0 = b_0 + c_0$ ;  $a_1 = b_1 + c_1$ ; ...;  $a_{n-1} = b_{n-1} + c_{n-1}$ ;  $a_n = b_n + c_n$ .

Для перехода к частотной форме записи характеристического уравнения делается следующая подстановка:  $\lambda \rightarrow i\omega$ .

$$D(i\omega) = U_D(\omega) + i \cdot V_D(\omega), \quad (40)$$

где  $U_D(\omega)$  – действительная часть комплексного числа, полученная из слагаемых уравнения (40), содержащих четные степени  $\lambda$ ;  $i \cdot V_D(\omega)$  – мнимая часть комплексного числа, полученная из слагаемых уравнения (40), содержащих нечетные степени  $\lambda$ ;  $i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

### *Правило построения годографа*

Задавая значения частот  $\omega = 0 \div \infty$ , вычисляются значения  $U_D(\omega)$  и  $i \cdot V_D(\omega)$ . На комплексной плоскости строится годограф Михайлова (рис. 9).

### *Формулировка критерия Михайлова*

Система устойчива, если годограф начинается на положительной действительной полуоси и огибает против часовой стрелки начало координат, проходя последовательно  $n$  квадрантов, где  $n$  – порядок характеристического уравнения.

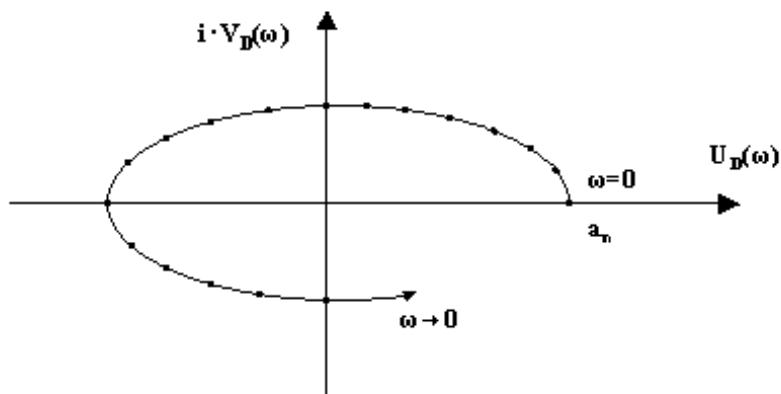


Рис. 9. Годограф Михайлова

Пример.

$$W_{PA3}(p) = \frac{20}{0,1 \cdot p^4 + 2 \cdot p^3 + 11 \cdot p^2 + 23p + 1};$$

$$0,1 \cdot \lambda^4 + 2 \cdot \lambda^3 + 11 \cdot \lambda^2 + 23 \cdot \lambda^1 + 21 \cdot \lambda^0 = 0.$$

Производим замену  $\lambda \rightarrow i\omega$

$$0,1 \cdot \omega^4 - 2 \cdot i \cdot \omega^3 - 11 \cdot \omega^2 + 23 \cdot i \cdot \omega + 21 = 0;$$

$$U_D(\omega) = 0,1 \cdot \omega^4 - 11 \cdot \omega^2 + 21;$$

$$i \cdot V_D(\omega) = -2 \cdot \omega^3 + 23 \cdot \omega.$$

Составляем таблицу:

$\omega$	$U_D(\omega)$	$i \cdot V_D(\omega)$
0	21	0
1	10,1	21
2	-21,4	30
3	-69,9	15
...	...	...

По таблице строим годограф (рис. 10):

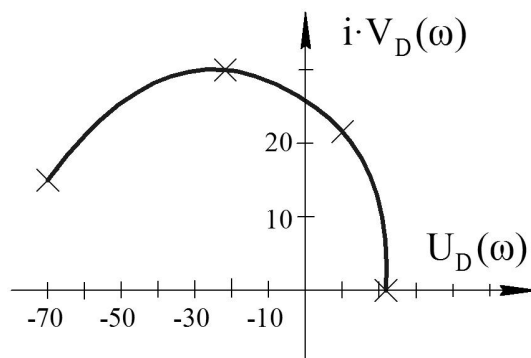


Рис. 10. Пример построения годографа Михайлова

## 8. Критерий устойчивости Найквиста

Критерий Найквиста позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по виду АФЧХ разомкнутой системы.

Чтобы построить АФЧХ, необходимо перейти к частотной форме записи передаточной функции разомкнутой системы. Передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_{PA3}(p) = W_{K3}(p) \cdot W_{ЭУ}(p) \cdot W_{Г}(p) \cdot W_{Д}(p) \cdot W_{ТГ}(p); \quad (41)$$

$$W_{PA3}(p) = \frac{k_0(T_{02}p + 1)}{T_{01}p + 1} \cdot k_{ЭУ} \cdot \frac{k_1}{T_1p + 1} \cdot \frac{k_D}{T_Я T_M p^2 + T_M p + 1} \cdot k_{ТГ}; \quad (42)$$

$$W_{PA3}(p) = (T_{02}p + 1) \cdot \frac{1}{(T_{01}p + 1)} \cdot \frac{k_{PC}}{(T_1p + 1)} \cdot \frac{1}{(T_2p + 1)} \cdot \frac{1}{(T_3p + 1)}; \quad (43)$$

$$T_{2,3} = \frac{T_M}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{T_M}{2}\right)^2 - T_Я \cdot T_M}. \quad (44)$$

Амплитуда частотной передаточной функции находится как отношение модулей числителя и знаменателя, а фаза – как разность аргументов числителя и знаменателя (табл. 1).

Амплитуда передаточной функции разомкнутой системы равна произведению амплитуд отдельных звеньев, а фаза – сумме фаз звеньев.

$$A(\omega) = A_1(\omega) \cdot A_2(\omega) \cdot A_3(\omega) \cdot A_4(\omega); \quad (45)$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) + \varphi_3(\omega) + \varphi_4(\omega). \quad (46)$$

Задавая значения частот  $\omega = 0 \div \infty$ , вычисляются значения  $A(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$ . В полярной системе координат строится АФЧХ (рис. 11).

Таблица 1

Примеры вычисления АЧХ и ФЧХ

Передаточная функция	Амплитуда	Фаза
$W(p) = (T_{02}p + 1)$	$A(\omega) = \sqrt{T_{02}^2 \omega^2 + 1}$	$\varphi(\omega) = \arctg(T_{02} \cdot \omega)$
$W(p) = \frac{1}{(T_{01}p + 1)}$	$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{T_{01}^2 \omega^2 + 1}}$	$\varphi(\omega) = -\arctg(T_{01} \cdot \omega)$
$W(p) = \frac{k_{PC}}{(T_1p + 1)}$	$A(\omega) = \frac{k_{PC}}{\sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1}}$	$\varphi(\omega) = -\arctg(T_1 \cdot \omega)$

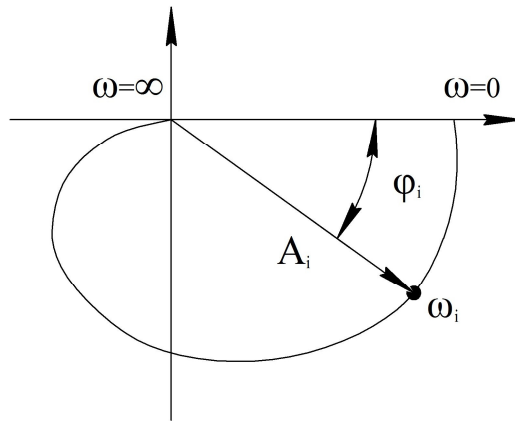


Рис. 11. Амплитудно–фазовая частотная характеристика

*Условие устойчивости по критерию Найквиста*

Для устойчивости замкнутой САР необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы  $W(i\omega)$  при изменении частоты  $\omega = 0 \div \infty$  не охватывала точку с координатами  $(-1;0)$  (см. рис. 12).

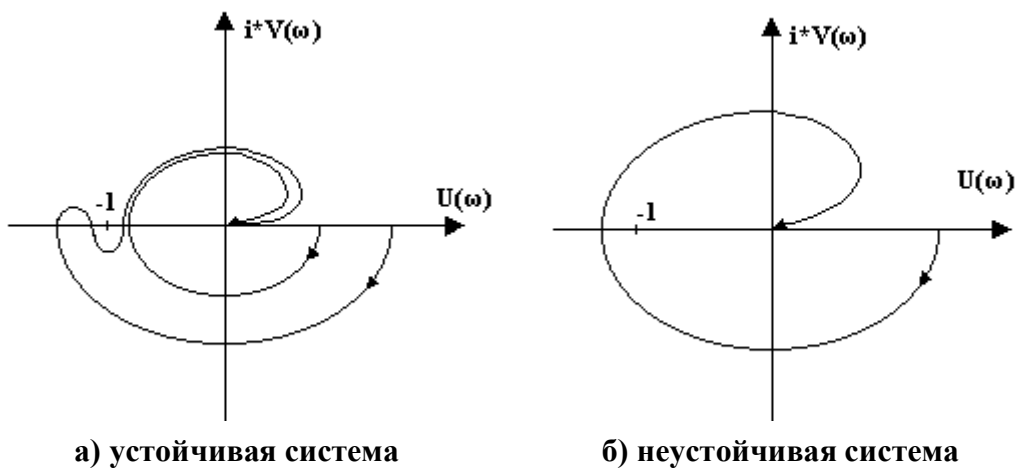


Рис. 12. Примеры АФЧХ устойчивых и неустойчивых систем

*Пример.*

Исследуем на устойчивость систему с передаточной функцией:

$$W_{PA3}(p) = (0,1 \cdot p + 1) \cdot \frac{1}{(10 \cdot p + 1)} \cdot \frac{10}{(1 \cdot p + 1)}$$



Найдем амплитуду и фазу каждого звена:

Передаточная функция	Амплитуда	Фаза
$W_1(p) = (0,1 \cdot p + 1)$	$A_1(\omega) = \sqrt{0,01 \cdot \omega^2 + 1}$	$\varphi_1(\omega) = \arctg(0,1 \cdot \omega)$
$W_2(p) = \frac{1}{(10 \cdot p + 1)}$	$A_2(\omega) = \frac{1}{\sqrt{100 \cdot \omega^2 + 1}}$	$\varphi_2(\omega) = -\arctg(10 \cdot \omega)$
$W_3(p) = \frac{10}{(1 \cdot p + 1)}$	$A_3(\omega) = \frac{10}{\sqrt{1 \cdot \omega^2 + 1}}$	$\varphi_3(\omega) = -\arctg(1 \cdot \omega)$

Составим таблицу значений:

$\omega$	$A_1(\omega)$	$A_2(\omega)$	$A_3(\omega)$	$\varphi_1(\omega)$	$\varphi_2(\omega)$	$\varphi_3(\omega)$	$A(\omega)$	$\varphi(\omega)$
0	1	1	10	0	0	0	10	0
0,01	1	0,99	9,99	0,06	-5,71	-0,57	9,94	-6,226
0,02	1	0,98	9,99	0,11	-11,31	-1,15	9,80	-12,341
0,03	1	0,95	9,99	0,17	-16,70	-1,72	9,57	-18,246
0,04	1	0,92	9,99	0,23	-21,80	-2,29	9,27	-23,863
0,05	1	0,89	9,98	0,29	-26,57	-2,86	8,93	-29,141
0,06	1	0,85	9,98	0,34	-30,96	-3,43	8,55	-34,054
0,07	1	0,81	9,97	0,40	-34,99	-4,00	8,17	-38,595
0,08	1	0,78	9,96	0,46	-38,66	-4,57	7,78	-42,775
0,09	1	0,74	9,95	0,52	-41,99	-5,14	7,40	-46,614
0,1	1	0,70	9,95	0,57	-45,00	-5,71	7,03	-50,138
0,11	1,0001	0,67	9,94	0,63	-47,73	-6,28	6,68	-53,373
0,12	1,0001	0,64	9,92	0,69	-50,19	-6,84	6,35	-56,350
0,13	1,0001	0,60	9,91	0,74	-52,43	-7,41	6,04	-59,094
0,14	1,0001	0,58	9,90	0,80	-54,46	-7,97	5,75	-61,630
0,15	1,0001	0,55	9,88	0,86	-56,31	-8,53	5,48	-63,981
0,16	1,0001	0,53	9,87	0,92	-57,99	-9,09	5,23	-66,168
0,17	1,0001	0,50	9,85	0,97	-59,53	-9,65	4,99	-68,209
0,18	1,0002	0,48	9,84	1,03	-60,95	-10,20	4,78	-70,118
0,19	1,0002	0,46	9,82	1,09	-62,24	-10,76	4,57	-71,911
0,2	1,0002	0,44	9,80	1,15	-63,43	-11,31	4,38	-73,599
0,3	1,0004	0,31	9,57	1,72	-71,57	-16,70	3,03	-86,546
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Построим график АФЧХ (рис. 13):

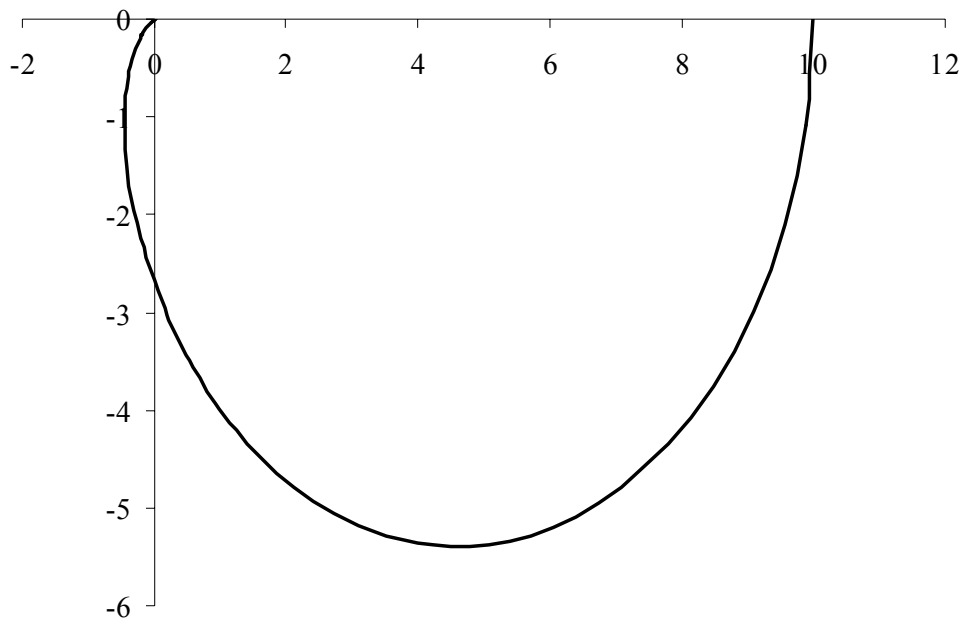


Рис. 13. Пример построения АФЧХ

## 9. Логарифмический критерий устойчивости

Для построения ЛАХ и ЛФХ системы необходимо разложить передаточную функцию разомкнутой системы на элементарные звенья так, как было описано в п. 8 – уравнения (41) – (44).

Затем на плоскости строятся ЛАХ и ЛФХ каждого отдельного звена и методом графического суммирования находятся результирующие ЛАХ и ЛФХ разомкнутой системы.

Логарифмические критерии, так же как и критерии Найквиста, позволяют судить об устойчивости замкнутой системы по виду ЛАХ и ЛФХ разомкнутой системы.

Для систем устойчивых в замкнутом состоянии ЛАХ разомкнутой системы должна пересечь ось абсцисс раньше, чем ЛФХ, спадая окончательно, перейдет через значение  $-\pi$  (рис. 14). Или на частоте среза  $\omega_c$  величина фазы  $\varphi$  должна быть меньше значения  $-\pi$ , т.е.  $\varphi < |-\pi|$ .

*Запас устойчивости по фазе* ( $\Delta\varphi$ ) – это величина, на которую должно возрасти запаздывание по фазе в системе на частоте среза  $\omega_c$ , чтобы система оказалась на границе устойчивости.

*Запас устойчивости по амплитуде* ( $\Delta L$ ) – это величина допустимого подъема ЛАХ, при котором система окажется на границе устойчивости.

При проектировании САР рекомендуется обеспечить:  $\Delta\varphi \geq 30^\circ$  и  $\Delta L \geq 6\text{дБ}$ .

Таблица 2

Примеры построения ЛАХ и ЛФХ

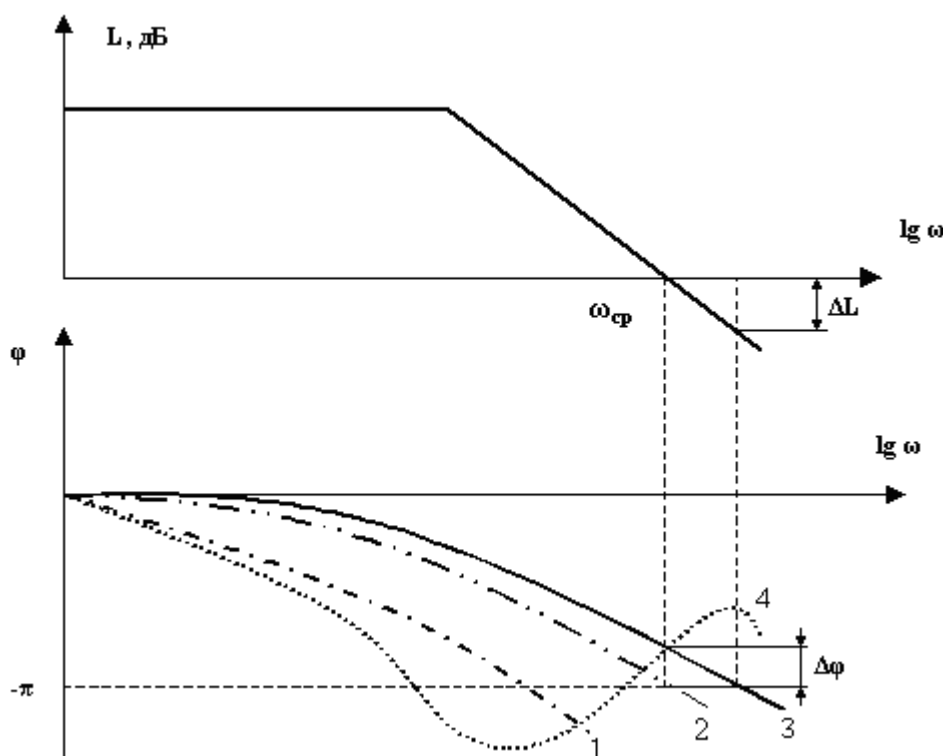
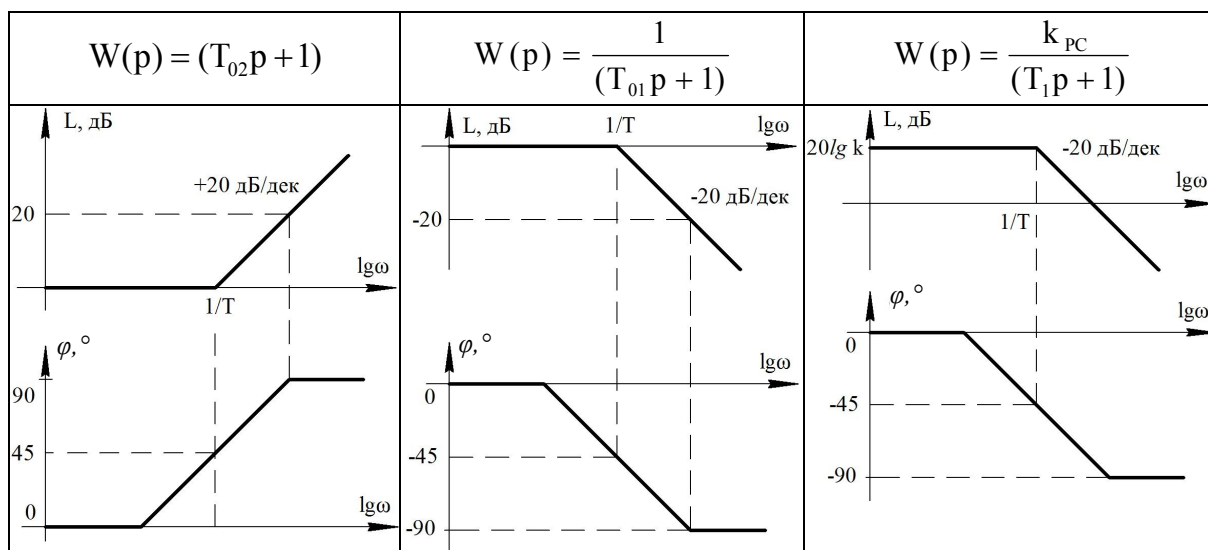


Рис. 14. Пример ЛАХ и ЛФХ устойчивых и неустойчивых систем (1 и 4 – замкнутая система устойчивая; 2 – замкнутая система на границе устойчивости; 3 – замкнутая система не устойчивая)

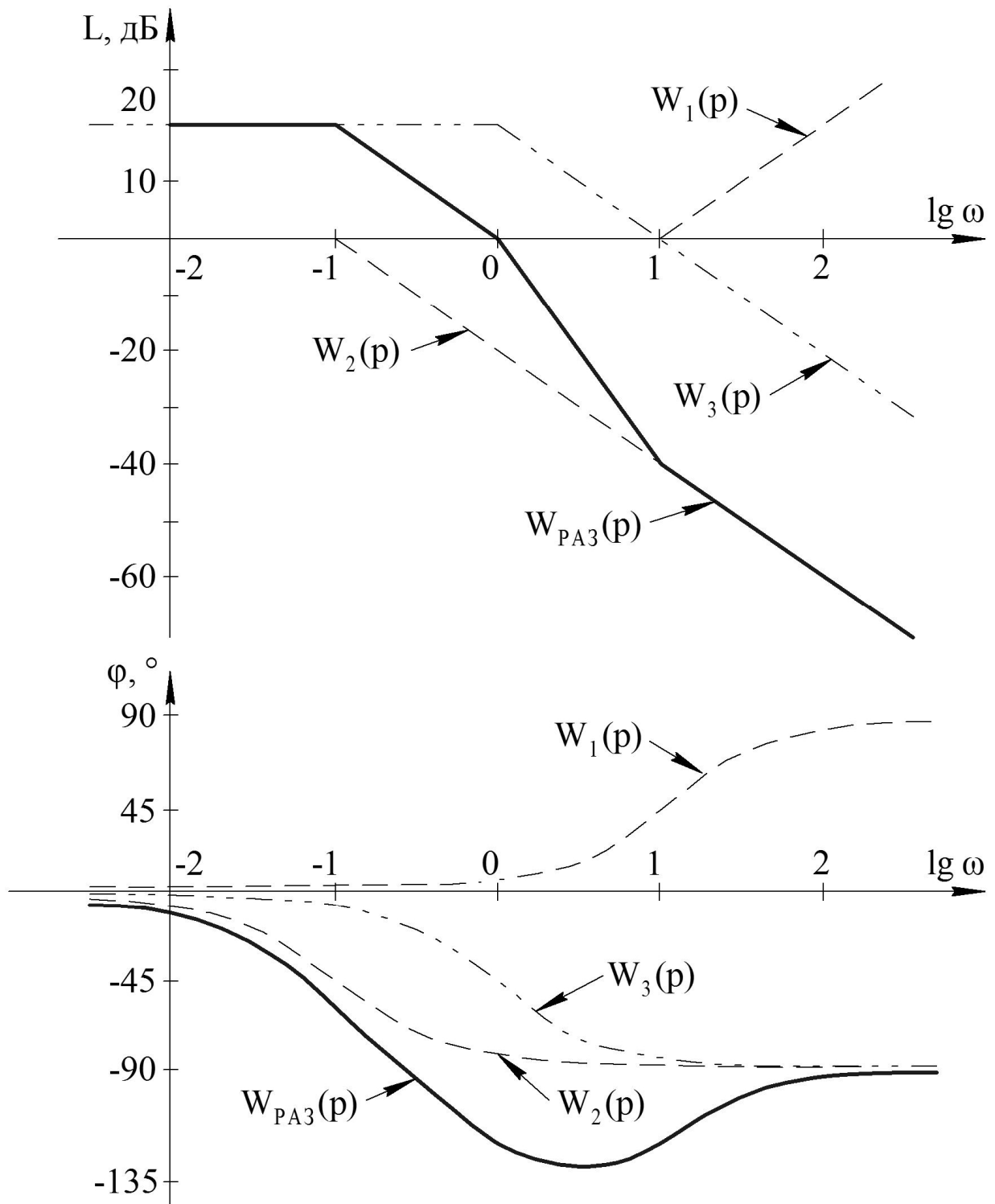


Рис. 15. ЛАХ и ЛФХ

*Пример.*

Исследуем на устойчивость систему с передаточной функцией:

$$W_{PA3}(p) = (0,1 \cdot p + 1) \cdot \frac{1}{(10 \cdot p + 1)} \cdot \frac{10}{(1 \cdot p + 1)}.$$

Найдем параметры ЛАХ:

Передаточная функция	$\lg(\omega_{CP})$	$20 \lg k$
$W_1(p) = 0,1 \cdot p + 1$	1	–
$W_2(p) = \frac{1}{10 \cdot p + 1}$	–1	0
$W_3(p) = \frac{10}{1 \cdot p + 1}$	0	20

Построим ЛАХ и ЛФХ отдельных звеньев и результирующие ЛАХ и ЛФХ (рис. 15).

## 10. Построение графика переходного процесса

Для построения графика переходного процесса необходимо составить дифференциальное уравнение замкнутой системы.

$$W_{PA3}(p) = W_{K3}(p) \cdot W_{ЭV}(p) \cdot W_{Г}(p) \cdot W_{Д}(p) \cdot W_{ТГ}(p); \quad (47)$$

$$W_{PA3}(p) = \frac{k_0(T_{02}p + 1)}{T_{01}p + 1} \cdot k_{ЭV} \cdot \frac{k_1}{T_1p + 1} \cdot \frac{k_D}{T_ЯT_Mp^2 + T_Mp + 1} \cdot k_{ТГ}; \quad (48)$$

$$W_{PA3}(p) = \frac{k_{PC}(T_{02}p + 1)}{(T_{01}p + 1)(T_1p + 1)(T_ЯT_Mp^2 + T_Mp + 1)}. \quad (49)$$

Передаточную функцию замкнутой системы можно найти из выражения

$$W_{ЗАМ}(p) = \frac{W_{PA3}(p)}{1 + W_{PA3}(p)}; \quad (50)$$

$$W_{ЗАМ}(p) = \frac{k_{PC}(T_{02}p + 1)}{k_{PC}(T_{02}p + 1) + (T_{01}p + 1)(T_1p + 1)(T_ЯT_Mp^2 + T_Mp + 1)}; \quad (51)$$

$$W_{ЗАМ}(p) = \frac{b_1 \cdot p + b_0}{a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}. \quad (52)$$

Передаточная функция – это отношение выходного сигнала к входному, представленное в операторной форме:

$$W_{3AM}(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{b_1 \cdot p + b_0}{a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}. \quad (53)$$

Проведем обратное преобразование Лапласа:

$$a_4 \cdot y^{IV}(t) + a_3 \cdot y^{III}(t) + a_2 \cdot y^{II}(t) + a_1 \cdot y^I(t) + a_0 \cdot y(t) = b_1 \cdot x^I(t) + b_0 \cdot x(t); \quad (54)$$

$$y^{IV}(t) = -\frac{a_3}{a_4} \cdot y^{III}(t) - \frac{a_2}{a_4} \cdot y^{II}(t) - \frac{a_1}{a_4} \cdot y^I(t) - \frac{a_0}{a_4} \cdot y(t) + \frac{b_1}{a_4} \cdot x^I(t) + \frac{b_0}{a_4} \cdot x(t); \quad (55)$$

$$y^{IV}(t) = -c_1 \cdot y^{III}(t) - c_2 \cdot y^{II}(t) - c_3 \cdot y^I(t) - c_4 \cdot y(t) + c_5 \cdot x^I(t) + c_6 \cdot x(t). \quad (56)$$

Полученное дифференциальное уравнение можно решить с помощью MATLAB Simulink. Для этого необходимо составить схему, представленную на рис. 16, и построить график переходного процесса.

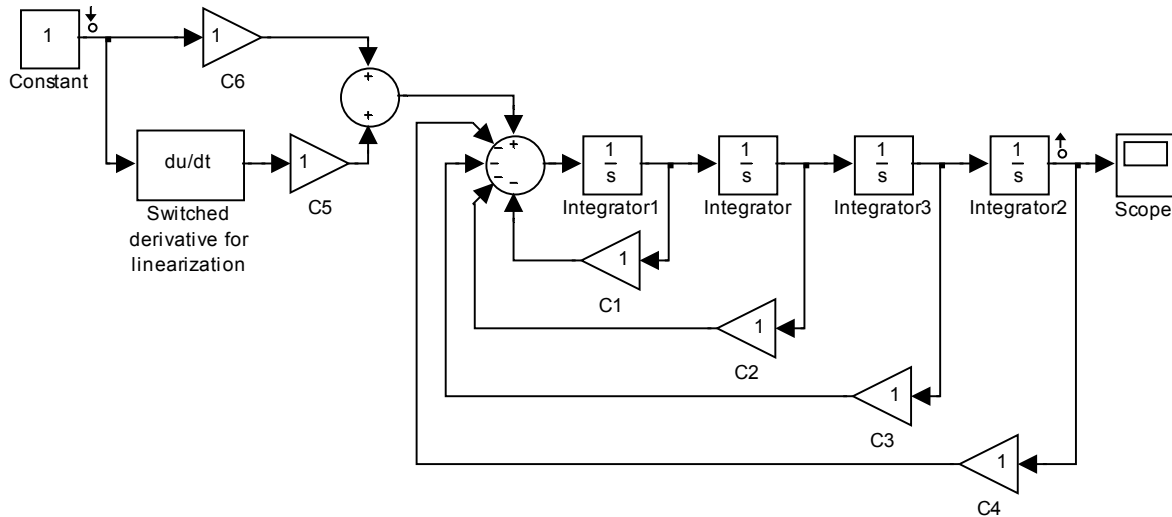


Рис. 16. Решение дифференциального уравнения (56) в MATLAB Simulink

## 11. Проверка расчетов с помощью моделирования системы в среде MATLAB Simulink

Для проверки расчетов необходимо:

1. Составить структурную схему САП в среде Simulink (рис. 17).
2. С помощью средства Linear Analysis построить график переходного процесса системы (см. рис. 18) и найти показатели качества (время переходного процесса, перерегулирование, статическую ошибку).

3. Разомкнуть систему, построить ЛАХ, ЛФХ (см. рис. 19) и АФЧХ системы (см. рис. 20).

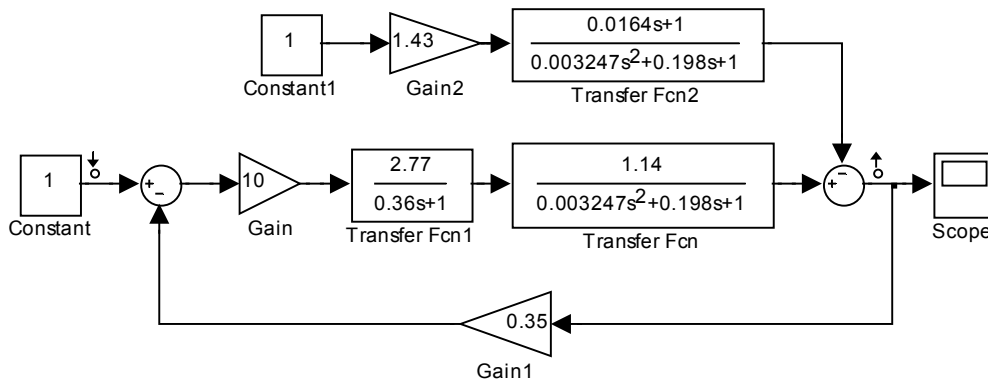


Рис. 17. Структурная схема САУ без корректирующего звена в Simulink

4. Сделать вывод об устойчивости системы и, если система устойчива, найти запасы устойчивости по амплитуде и по фазе.

5. Сравнить показатели, найденные ранее, с показателями, полученными в среде Simulink.

6. Сделать соответствующие выводы.

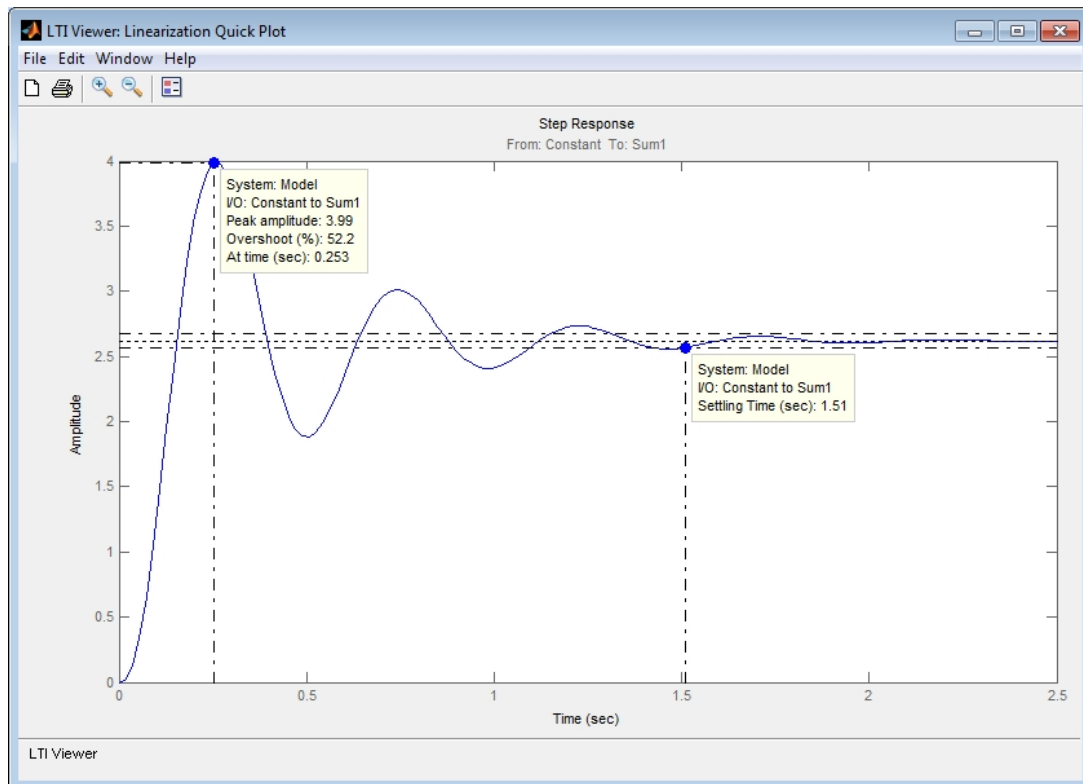


Рис. 18. График переходного процесса

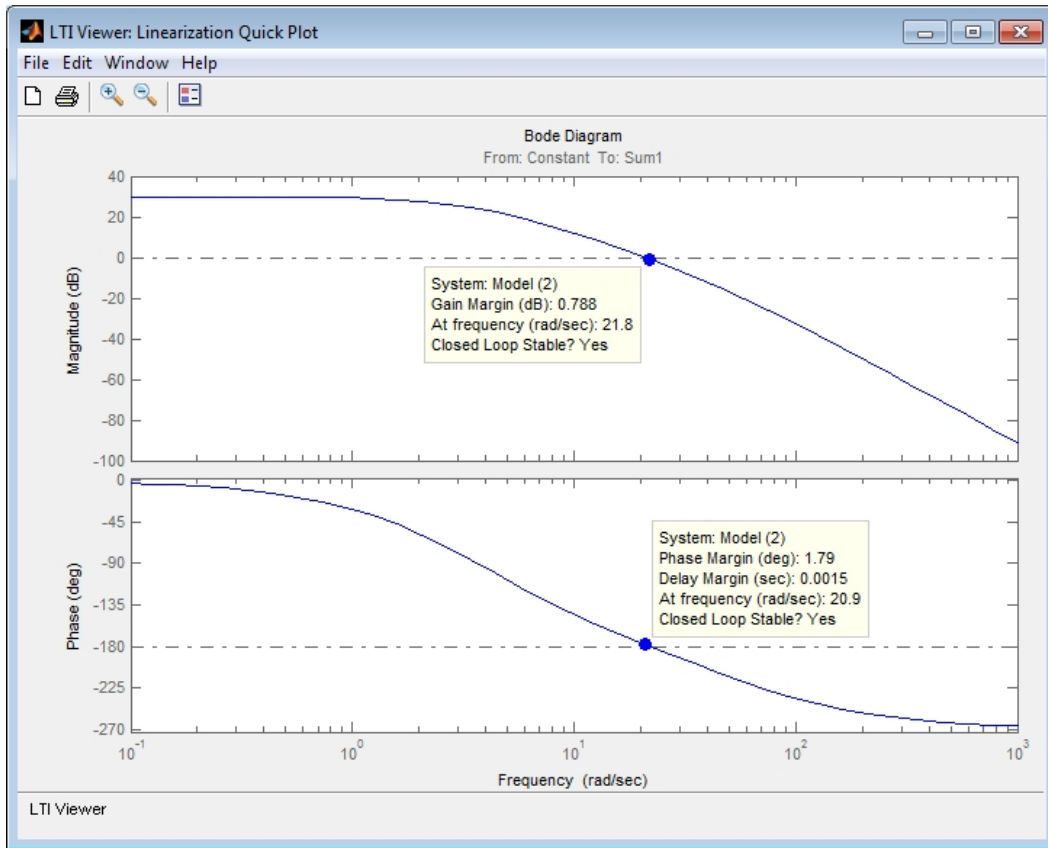


Рис. 19. ЛАХ и ЛФХ

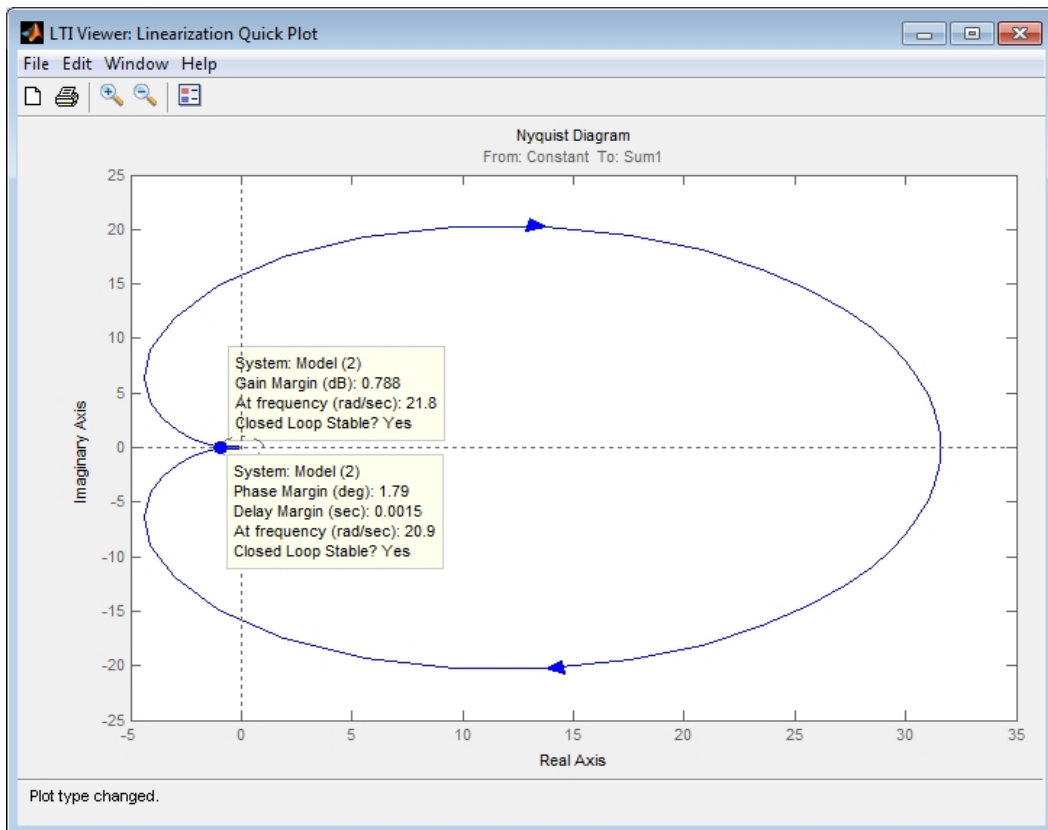


Рис. 20. АФЧХ



## 12. Требования к оформлению работ

### *Общее оформление пояснительной записки*

Пояснительную записку выполняют с применением печатных и графических устройств вывода ЭВМ на листах формата А4. По четырем сторонам листа должны быть оставлены поля. Размер левого поля листа – 30 мм, правого – 10 мм, верхнего – 20 мм, нижнего – 20 мм. Все страницы пояснительной записки (кроме титульного листа и листа задания) выполняются в рамке (прил. 4).

Текст пояснительной записки набирается шрифтом Times New Roman, кегль 14, подрисовочные подписи и таблицы – кегль 12.

Титульный лист оформляется в соответствии с прил. 4. Вторым идет лист задания, выданный преподавателем.

В содержание пояснительной записки входят разделы, подразделы, пункты и подпункты. Каждый из разделов следует начинать с новой страницы. Слова, выполненные на отдельной строке («Содержание», «Введение», «Заключение», «Литература»), служащие заголовками соответствующих разделов, не должны нумероваться.

Нумерация разделов начинается с обзора литературы и выполняется арабскими цифрами. Подразделы начинаются с красной строки и нумеруются арабскими цифрами в пределах каждого раздела. Номер подраздела должен состоять из номера раздела и номера подраздела, разделенных точкой, например: «2.1.3» (пункт третий подраздела первого раздела второго).

Разделы, отражающие содержание и результаты работы, должны иметь содержательные заголовки. Их пишут прописными буквами, а заголовки подразделов – строчными (кроме первой прописной).

Цифра, указывающая номер пункта, не должна выступать за границу абзаца. Расстояние между заголовками и последующим текстом – не менее 10 мм. Расстояние между текстом и последующим заголовком – не менее 15 мм.

Пояснительная записка должна быть сброшюрована. Допускается переплетать.

Нумерация страниц пояснительной записки должна быть сквозной: первая страница – титульный лист, вторая – задание на курсовую работу и т.д. Номер страницы проставляют внизу в середине арабскими цифрами. На титульном листе номер страницы не ставят. Рисунки, графики, таблицы, расположенные на отдельных листах, необходимо включать в общую нумерацию.

### *Построение таблиц*

Название таблицы должно отражать ее содержание, быть точным и кратким. Название помещается над таблицей. Таблицы следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией.

Заголовок граф и строк таблицы следует писать с прописной буквы, а подзаголовки граф со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставят. Заголовки и подзаголовки граф указывают в единственном числе.

### *Оформление иллюстраций*

Иллюстрации, за исключением иллюстраций приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Иллюстрации, при необходимости, могут иметь наименование и пояснительные данные. Сокращение «Рис.» и наименование помещают после пояснительных данных и располагают по центру.

### *Написание формул*

Формулы нумеруют в пределах раздела арабскими цифрами. Номер должен состоять из номеров раздела и порядкового номера формулы, разделенной точкой, например (1.2) – (формула вторая первого раздела).

Номер следует заключать в скобки и помещать в правом поле на уровне нижней строки формулы, к которой он относится, причем правая скобка, заключающая номер формулы, должна находиться на границе текста. При ссылке в тексте на формулу необходимо писать, например: «В формуле (1.2)...».

В эксплуатации (расшифровке) значения символов и числовых коэффициентов должны приводиться непосредственно под формулой. Значение каждого символа и числового коэффициента рекомендуется давать с новой строки. Первую строку эксплуатации начинают со слова «где» без абзацного отступа и двоеточия после него.

Например: «... емкость плоского конденсатора в фарадах находится по формуле

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (1.1)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость, и т.д.»

### *Ссылки на литературу*

При ссылке в тексте на источники документальной информации следует приводить порядковый номер по списку литературы, заключая его в квадратные скобки. Например: «В [1] приводятся...».

В список литературы заносят все употребляемые в процессе работы над курсовой работой источники.

Список литературы проектом должен иметь заголовки «Библиографический список». Список оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003. Каждый источник информации указывается с новой строки и начинается с порядкового номера источника.

### **13. Порядок защиты курсовых работ**

#### *Порядок представления на проверку*

Работа считается готовой при условии выполнения всех требований, предусмотренных заданием и настоящими методическими указаниями. Оформленная пояснительная записка должна быть представлена для проверки руководителю в срок, указанный в задании.

Внесение исправлений в пояснительной записке курсовых работ в соответствии с замечаниями руководителя должно осуществляться следующим образом:

- ошибочная часть очерчивается и аккуратно перечёркивается крест–накрест;
- на отдельном листе делается новая редакция вычеркнутой части;
- лист с исправленной частью вклеивается или вшивается в записку листа, где руководителем сделано замечание.

Запрещается вычёркивать, стирать и заклеивать пометки, внесённые руководителем проекта.

#### *Защита курсовых работ*

Принимать защиту курсовых работ может либо преподаватель, либо комиссия, состоящая из сотрудников кафедры.

Защита курсовых работ состоит из доклада и ответа на вопросы. В докладе студент должен чётко и ясно изложить суть представленной работы, а также основные полученные результаты. После доклада студент должен ответить на вопросы.

По результатам защиты работы выставляется оценка с учётом:

- объёма и качества выполненной работы, оригинальности и самостоятельности решений;
- знания студентом объекта исследования, теоретических положений, в том числе физико-математических и общетехнических, связанных с объектом исследования;
- умения излагать результаты работы, обосновывать принятые решения и отвечать на заданные вопросы.

## Библиографический список

1. Общая электротехника: учебное пособие для вузов / под редакцией д-ра техн. наук Блажкина А. Т. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1986. – 592 с.
2. Бечева М. К., Златенков И. Д. и др. Электротехника и электроника: учебное пособие для ПТУ. – М.: Высшая школа, 1991. – 224 с.
3. Алиев И. И. Электротехнический справочник. – М.: РадиоСофт, 2002. – 383 с.
4. Герман–Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем MatLab 6.0: учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
5. Щербаков В.С. «Лекции по ТАУ», 4 семестр.
6. Щербаков В.С. «Лекции по ТАУ», 5 семестр.

Приложение 1

Вариант	$T_1$ ,	$T_M$ ,	$T_{я}$ ,	$K_1$ ,	$K_D$ ,	$K_f$ ,	$K_{П}$ ,	$K_{эу}$ ,	$M_C^{НОМ}$ ,	$\omega_D^{НОМ}$ ,	$\Delta\omega_D^{СТ}$ ,
	с	с	с	$\frac{В}{В}$	$\frac{рад}{Вс}$	$\frac{рад}{снм}$	$\frac{Вс}{рад}$	$\frac{В}{В}$	Н·м	$\frac{рад}{С}$	$\frac{рад}{С}$
1	0,12	0,066	0,00545	4,0	1,37	14,4	0,5	10	3,33	300	1,2
3	0,16	0,088	0,00727	3,36	1,37	7,2	0,5	10	6,66	300	1,2
5	0,2	0,11	0,0091	3,56	1,37	4,8	0,47	10	10	300	1,2
7	0,24	0,132	0,0109	3,09	1,37	3,6	0,45	10	13,4	300	1,2
9	0,28	0,154	0,0127	2,6	1,14	2,0	0,44	10	20	250	1,0
11	0,32	0,176	0,0145	2,91	1,14	1,67	0,42	10	24	250	1,0
13	0,36	0,198	0,0164	2,77	1,14	1,43	0,35	10	28	250	1,0
15	0,4	0,22	0,0182	2,64	0,91	0,80	0,37	10	40	200	0,8
17	0,44	0,242	0,02	2,5	0,91	0,71	0,36	10	45	200	0,8
19	0,48	0,264	0,0218	2,45	0,91	0,64	0,35	10	50	200	0,8
21	0,52	0,286	0,0237	2,4	0,91	0,58	0,34	10	55	200	0,8
23	0,56	0,308	0,0255	2,38	0,91	0,53	0,33	10	60	200	0,8
25	0,6	0,33	0,0273	2,32	0,68	0,28	0,3	11	87	150	0,6
27	0,64	0,352	0,0291	2,06	0,68	0,26	0,3	12	93	150	0,6
29	0,68	0,374	0,0309	1,82	0,68	0,24	0,31	13	100	150	0,6
31	0,72	0,396	0,0327	1,79	0,68	0,22	0,32	14	107	150	0,6
33	0,76	0,418	0,0345	1,89	0,68	0,21	0,30	15	113	150	0,6
35	0,8	0,44	0,0363	1,64	0,68	0,2	0,35	15	120	150	0,6
37	0,84	0,462	0,0382	1,46	0,68	0,19	0,4	15	127	150	0,6
39	0,88	0,484	0,04	1,42	0,68	0,18	0,42	15	133	150	0,6
41	0,92	0,506	0,0417	1,28	0,68	0,17	0,45	16	140	150	0,6
43	0,96	0,528	0,0437	1,13	0,68	0,16	0,4	17	147	150	0,6
45	1,0	0,55	0,0454	1,05	0,68	0,15	0,35	18	153	150	0,6
47	1,04	0,572	0,0472	0,84	0,68	0,15	0,4	19	160	150	0,6
49	1,08	0,594	0,0491	0,79	0,68	0,14	0,35	20	167	150	0,6
51	1,12	0,616	0,0509	0,61	0,68	0,13	0,4	20	173	150	0,6
53	1,16	0,638	0,0527	0,54	0,455	0,06	0,4	20	270	100	0,4
55	1,20	0,66	0,0545	0,44	0,455	0,06	0,45	20	280	100	0,4
57	1,24	0,682	0,0564	0,36	0,455	0,06	0,5	20	290	100	0,4
59	1,28	0,704	0,0583	0,31	0,455	0,05	0,5	20	300	100	0,4
	Постоянная времени генератора	Электромагнитическая постоянная времени двигателя	Электромагнитная постоянная времени двигателя	Передаточный коэффициент генератора	Пер. коэф. двигателя по управлению воздействию	Пер. коэф. двигателя по воздействию	Передаточный коэффициент тахогенератора	Передаточный коэффициент электронного усилителя	Номинальный момент сопротивления	Номинальная угловая скорость	Требуемая статическая ошибка системы

## Окончание прил. 1

Вариант	$T_1$ ,	$T_M$ ,	$T_{я}$ ,	$K_1$ ,	$K_{дr}$ ,	$K_f$ ,	$K_{тr}$ ,	$K_{эy}$ ,	$M_C^{НОМ}$ ,	$\omega_D^{НОМ}$ ,	$\Delta\omega_D^{ст}$ ,
	с	с	с	$\frac{В}{В}$	$\frac{рад}{Вс}$	$\frac{рад}{снм}$	$\frac{Вс}{рад}$	$\frac{В}{В}$	Н·м	$\frac{рад}{С}$	$\frac{рад}{С}$
2	0,134	0,1	0,0224	0,40	1,46	9,15	0,345	10	7,0	320	4,27
4	0,174	0,13	0,029	0,45	1,41	7,75	0,355	10	8,0	310	4,15
6	0,214	0,16	0,0357	0,50	1,36	6,65	0,367	10	9,0	300	4,00
8	0,254	0,19	0,0425	0,55	1,32	4,83	0,380	10	12,0	290	3,88
10	0,294	0,22	0,049	0,60	1,27	4,00	0,394	12,6	14,0	280	3,74
12	0,334	0,25	0,0557	0,65	1,23	3,37	0,406	10	16,0	270	3,62
14	0,374	0,28	0,0625	0,70	1,18	2,90	0,424	12,6	18,0	260	3,48
16	0,414	0,31	0,069	0,75	1,14	2,50	0,440	10	20,0	250	3,34
18	0,454	0,34	0,0758	0,80	1,09	1,92	0,460	21	25	240	3,20
20	0,494	0,37	0,0825	0,85	1,05	1,53	0,479	12,6	30	230	3,08
22	0,534	0,4	0,089	0,90	1,00	1,25	0,500	12,6	35	220	2,94
24	0,574	0,315	0,026	0,95	1,91	1,05	0,515	60	40	210	1,03
26	0,614	0,46	0,102	1,00	1,82	0,89	0,550	25,2	45	200	2,68
28	0,654	0,49	0,109	1,05	1,73	0,76	0,580	37,8	50	190	2,54
30	0,694	0,52	0,116	1,10	1,64	0,65	0,612	12,6	55	180	2,40
32	0,734	0,404	0,0334	1,15	1,55	0,57	0,650	20	60	170	0,83
34	0,774	0,426	0,0352	1,20	1,45	0,49	0,690	10	65	160	0,785
36	0,814	0,447	0,037	1,25	1,36	0,43	0,735	10	70	150	0,735
38	0,854	0,47	0,0388	1,30	1,27	0,373	0,790	10	75	140	0,686
40	0,894	0,492	0,0406	1,35	1,18	0,326	0,850	10	80	130	0,637
42	0,934	0,514	0,0425	1,40	1,09	0,283	0,920	10	85	120	0,588
44	0,974	0,535	0,0443	1,45	1,00	0,245	1,0	30	90	110	0,54
46	1,01	0,555	0,046	1,50	0,91	0,210	1,10	60	95	100	0,49
48	1,05	0,577	0,0478	1,55	0,82	0,180	1,22	30	100	90	0,44
50	1,09	0,6	0,0496	1,60	0,73	0,153	1,37	60	105	80	0,392
52	1,13	0,621	0,0515	1,65	0,64	0,127	0,79	15	110	70	0,344
54	1,17	0,642	0,0532	1,70	0,55	0,105	0,92	60	115	60	0,294
56	1,21	0,665	0,055	1,75	0,45	0,083	1,10	20	120	50	0,245
58	1,25	0,688	0,0569	1,80	1,36	0,240	0,735	60	125	150	0,735
60	1,29	0,708	0,0588	1,85	1,36	0,200	0,735	20	150	150	0,735
	Постоянная времени генератора	Электрохимическая постоянная времени двигателя	Электромагнитная постоянная времени двигателя	Передачный коэффициент генератора	Пер. коэф. двигателя по углу вращению воздействию	Пер. коэф. двигателя по возмущающему воздействию	Передачный коэффициент тахогенератора	Передачный коэффициент электронного усилителя	Номинальный момент сопротивления	Номинальная угловая скорость	Требуемая статическая ошибка системы

**Схемы и точки подключения корректирующих звеньев  
для нечетных вариантов**

СХЕМА	№	Параметры корректирующего звена
	1	$C = 10^{-5} \Phi$ ; $R_2 = 10^6 \text{ Ом}$ .
	5	$C = 16 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_2 = 10^6 \text{ Ом}$ .
	9	$C = 23 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_2 = 10^6 \text{ Ом}$ .
	13	$C = 29 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_2 = 10^6 \text{ Ом}$ .
	3	$C = 62,7 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_4 = 2,55 \cdot 10^3 \text{ Ом}$ ; $R_2 = 10^5 \text{ Ом}$ .
	7	$C = 9,35 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_4 = 2,55 \cdot 10^4 \text{ Ом}$ ; $R_2 = 10^6 \text{ Ом}$ .
	11	$C = 12,5 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_4 = 2,55 \cdot 10^4 \text{ Ом}$ ; $R_2 = 10^6 \text{ Ом}$ .
	15	$C = 15,6 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_4 = 2,55 \cdot 10^4 \text{ Ом}$ ; $R_2 = 10^6 \text{ Ом}$ .
	17	$C = 62,7 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_4 = 1,11 \cdot 10^3 \text{ Ом}$ ; $R_1 = 10^4 \text{ Ом}$ .
	21	$C = 14,8 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_4 = 5,55 \cdot 10^3 \text{ Ом}$ ; $R_1 = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом}$ .
	25	$C = 10,6 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_4 = 8,90 \cdot 10^3 \text{ Ом}$ ; $R_1 = 8 \cdot 10^4 \text{ Ом}$ .
	29	$C = 9,65 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_4 = 1,11 \cdot 10^4 \text{ Ом}$ ; $R_1 = 10^5 \text{ Ом}$ .
	19	$C = 76 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_5 = 10^4 \text{ Ом}$ ; $R_4 = R_2 \geq 10^5 \text{ Ом}$ .
	23	$C = 44,2 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_5 = 2 \cdot 10^4 \text{ Ом}$ ; $R_4 = R_2 \geq 2 \cdot 10^5 \text{ Ом}$ .
	27	$C = 20 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_5 = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом}$ ; $R_4 = R_2 \geq 5 \cdot 10^5 \text{ Ом}$ .
	31	$C = 11,4 \cdot 10^{-6} \Phi$ ; $R_5 = 10^5 \text{ Ом}$ ; $R_4 = R_2 = 10^6 \text{ Ом}$ .
	33	$L_1 = 100 \text{ Гн}$ ; $r_1 = 100 \text{ Ом}$ ; $W_1 = 100$ ; $W_2 = 260$ ; $R_2 = R_4$ .
	37	$L_1 = 51 \text{ Гн}$ ; $r_1 = 61 \text{ Ом}$ ; $W_1 = 200$ ; $W_2 = 520$ ; $R_2 = R_4$ .
	41	$L_1 = 46 \text{ Гн}$ ; $r_1 = 50 \text{ Ом}$ ; $W_1 = 300$ ; $W_2 = 1230$ ; $R_2 = R_4$ .
	45	$L_1 = 40 \text{ Гн}$ ; $r_1 = 400 \text{ Ом}$ ; $W_1 = 36$ ; $W_2 = 78$ ; $R_2 = R_4$ .
	35	$R_4 = 0,385 R_2$ ; $C = 2,07 : R_2$ .
	39	$R_4 = 0,385 R_2$ ; $C = 2,28 : R_2$ .
	43	$R_4 = 0,436 R_2$ ; $C = 2,20 : R_2$ .
	47	$R_4 = 0,487 R_2$ ; $C = 2,13 : R_2$ .
	49	$L_1 = 85,5 \text{ Гн}$ ; $r_1 = 500 \text{ Ом}$ ; $W_1 = 100$ ; $W_2 = 900$
	51	$L_1 = 71 \text{ Гн}$ ; $r_1 = 400 \text{ Ом}$ ; $W_1 = 150$ ; $W_2 = 1350$
	53	$L_1 = 55 \text{ Гн}$ ; $r_1 = 300 \text{ Ом}$ ; $W_1 = 200$ ; $W_2 = 1800$
	55	$L_1 = 57 \text{ Гн}$ ; $r_1 = 300 \text{ Ом}$ ; $W_1 = 250$ ; $W_2 = 2250$
	57	$L_1 = 49 \text{ Гн}$ ; $r_1 = 250 \text{ Ом}$ ; $W_1 = 300$ ; $W_2 = 2700$
	59	$L_1 = 40,5 \text{ Гн}$ ; $r_1 = 200 \text{ Ом}$ ; $W_1 = 350$ ; $W_2 = 3150$

**Схемы и точки подключения корректирующих звеньев  
для четных вариантов**

Схема подключения	№	Параметры корректирующей цепи.
	2	$R_{1K} = 10^3 \text{ Ом}; R_{2K} = 12,7 \cdot 10^3 \text{ Ом}; C = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$
	14	$R_{1K} = 10^4 \text{ Ом}; R_{2K} = 1,27 \cdot 10^5 \text{ Ом}; C = 3,68 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$
	26	$R_{1K} = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{2K} = 6,35 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$
	38	$R_{1K} = 7 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{2K} = 8,35 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$
	50	$R_{1K} = 4 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{2K} = 4,35 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 6,3 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$
	4	$C = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; R_{1K} = 3 \cdot 10^5 \text{ Ом}$
	16	$C = 10^{-4} \text{ Ф}; R_{1K} = 10^5 \text{ Ом}$
	28	$C = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; R_{1K} = 4,3 \cdot 10^5 \text{ Ом}$
	40	$C = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; R_{1K} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ Ом}$
	52	$C = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; R_{1K} = 2,8 \cdot 10^5 \text{ Ом}$
	6	$R_K = 3,46 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$
	18	$R_K = 3,75 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 7 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$
	30	$R_K = 1,19 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 10^{-4} \text{ Ф}$
	42	$R_K = 1,11 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$
	54	$R_K = 2,41 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$
	8	$R_{1K} = 6,12 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{2K} = 2,45 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
	20	$R_{1K} = 5,35 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{2K} = 2,14 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
	32	$R_{1K} = 4,82 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{2K} = 1,93 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
	44	$R_{1K} = 4,40 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{2K} = 1,76 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
	56	$R_{1K} = 4,10 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{2K} = 1,64 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 9 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$
	10	$C = 3,32 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; R_{2K} = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{1K} = 2,5 \cdot 10^2 \text{ Ом}$
	22	$C = 4,17 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; R_{2K} = 7 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{1K} = 3,5 \cdot 10^2 \text{ Ом}$
	34	$C = 3,50 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; R_{2K} = 9 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{1K} = 4,5 \cdot 10^2 \text{ Ом}$
	46	$C = 2,81 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; R_{2K} = 1,2 \cdot 10^4 \text{ Ом}; R_{1K} = 6 \cdot 10^2 \text{ Ом}$
	58	$C = 2,41 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; R_{2K} = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}; R_{1K} = 7,5 \cdot 10^2 \text{ Ом}$
	12	$R_{1K} = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 3,08 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; L = 1,1 \cdot 10^3 \text{ Гн}$
	24	$R_{1K} = 7,5 \cdot 10^3 \text{ Ом}; C = 5,52 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; L = 2 \cdot 10^3 \text{ Гн}$
	36	$R_{1K} = 6 \cdot 10^3 \text{ Ом}; C = 4,32 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; L = 2,3 \cdot 10^3 \text{ Гн}$
	48	$R_{1K} = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}; C = 6,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; L = 2,7 \cdot 10^3 \text{ Гн}$
	60	$R_{1K} = 1,16 \cdot 10^4 \text{ Ом}; C = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}; L = 0,8 \cdot 10^3 \text{ Гн}$



Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия  
(СибАДИ)»

Кафедра «АПП и электротехника»

Пояснительная записка к курсовой работе  
по дисциплине «Теория автоматического управления»

Тема работы: «Анализ и синтез линейной САУ»

Руководитель

\_\_\_\_\_

Должность, уч. степень, звание

\_\_\_\_\_

Ф.И.О.

Студент: \_\_\_\_\_

Группа: \_\_\_\_\_

Оценка

\_\_\_\_\_

Дата сдачи работы:

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ г. « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ г.

Омск – 2011

					<i>КР-02068982-220301-вар.-ПЗ</i>					
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Анализ и синтез линейной САУ</i>					
<i>Разраб.</i>	<i>Иванов И.И.</i>							<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Петров П.П.</i>								<i>3</i>	<i>100</i>
<i>Реценз.</i>								<i>СибАДИ гр. АП-00Т1</i>		
<i>Н. Контр.</i>										
<i>Утверд.</i>										

Рис. П4.1. Основная надпись листа «Содержание»

					<i>КР-02068982-220301-вар.-ПЗ</i>		<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			<i>4</i>

Рис. П4.2. Основная надпись стандартных листов

*Учебное издание*

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания по выполнению курсовых работ  
(для студентов специальностей 220301, 140607)

*Составители:*

Щербаков Виталий Сергеевич,  
Сухарев Роман Юрьевич

\*\*\*

Редактор Т.И. Калинина

\*\*\*

Подписано к печати \_\_\_\_ . \_\_\_\_ .2011  
Формат 60x90 1/16. Бумага писчая  
Оперативный способ печати  
Гарнитура Times New Roman  
Усл. п. л. 2,25, уч.-изд. л. 1,8  
Тираж 70 экз. Заказ № \_\_\_\_  
Цена договорная

Издательство СибАДИ  
644099, г. Омск, ул. П. Некрасова, 10  
Отпечатано в подразделении ОП издательства СибАДИ  
644099, г. Омск, ул. П. Некрасова, 10