

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ДИСТАНЦИОННОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**РАСЧЕТ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО
УСТРОЙСТВА СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*Методические указания к выполнению курсовой работы
по теории автоматического управления*

Составитель А.И. Мартяков

Москва 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цель курсовой работы	3
1. Исходные данные	3
2. Формулировка задания	5
3. Порядок выполнения задания	5
Требования к содержанию и оформлению курсовой работы	20
Контрольные вопросы для подготовки к защите курсовой работы	21
Список литературы	22
Приложение 1	23
Приложение 2	24
Приложение 3	25
Приложение 4	27

Цель курсовой работы

Целью выполнения курсовой работы студентами заочного обучения является закрепление теоретических сведений по синтезу корректирующих устройств, обеспечивающих определенные динамические показатели системы.

1. Исходные данные:

Номер варианта курсовой работы определяется студентом по первой букве его фамилии, а исходные данные по вариантам приводятся в таблицах 1 и 2 в соответствующих номерах Приложений 1 и 2.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Его соотв. алфавиту	А	Б	В	Г	Д	Е	Ё	Ж	З	И	Й	К	Л	М	Н
№ вар.	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Его соотв. алфавиту	О	П	Р	С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Э	Ю	Я

• Функциональная схема системы управления объектом (рис. 1), для которой необходимо выполнить синтез последовательного корректирующего устройства. В схеме приняты следующие обозначения:

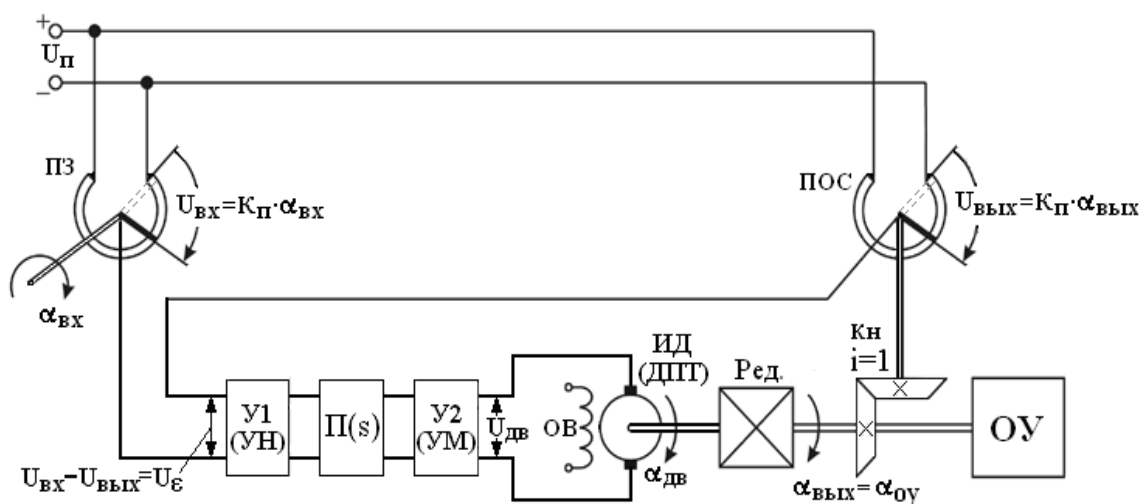


Рис. 1

ПЗ – потенциометр задатчика;

$\alpha_{ВХ}$ – угол поворота вала ПЗ;

ПОС – потенциометр обратной связи;

$\alpha_{\text{оу}} = \alpha_{\text{вых}}$ – угол поворота объекта управления;

У1 – усилитель напряжения (УН);

П(s) – последовательное корректирующее устройство;

У2 – усилитель мощности (УМ);

ИД – исполнительный двигатель;

ОВ – обмотка возбуждения;

Ред – редуктор;

Кн – коническая передача с передаточным отношением $i = 1$;

ОУ – объект управления;

$U_{\text{п}}$ – напряжение источника питания потенциометров.

• Закон гармонического управляющего воздействия $g(t) = g_m \cdot \sin \omega_p t$ с амплитудой g_m и рабочей частотой ω_p .¹⁾ Если закон в явной форме не задан, то его необходимо рассчитать по приводимым максимальным данным:

– скорости объекта управления – $\alpha'_{\text{оу}}$, рад / с;

– ускорению объекта управления – $\alpha''_{\text{оу}}$, рад / с².

• Требуемые от скорректированной системы показатели качества управления:

– амплитуда установившейся ошибки при гармоническом входном воздействии – ε_m , рад.;

– коэффициент перерегулирования – σ , %;

– время регулирования – t_p , с.

• Параметры элементов исходной системы:

◆ коэффициенты передачи элементов, входящих в систему:

– потенциометров $K_{\text{п}}$, В/рад;

– усилителя $K_{\text{у}}$;

– двигателя $K_{\text{дв}}$, рад/В·с;

– редуктора $K_{\text{р}}$

◆ постоянные времени:²⁾

– усилителя $T_{\text{у}}$, с;

– механическая двигателя $T_{\text{м}}$, с;

– электрическая двигателя $T_{\text{э}}$, с.

¹⁾ Требования к показателям качества и данные о параметрах исходной системы приводятся последовательно в Приложениях 1 и 2 в соответствии с вариантом задания.

²⁾ Все постоянные времени принадлежат апериодическим звеньям.

2. Формулировка задания:

- 1) Используя функциональную схему, составить структурную схему системы управления по исходным данным;
- 2) По заданным параметрам построить ЛАЧХ исходной системы;
- 3) В соответствии с рекомендациями построить асимптотическую ЛАЧХ желаемой системы первого приближения и записать ее передаточную функцию;
- 4) Методом математического моделирования, используя программный комплекс МВТУ¹⁾, проверить соответствие желаемой системы управления требуемым показателям качества;
- 5) Построить асимптотическую ЛАЧХ нескорректированной системы;
- 6) Получить ЛАЧХ корректирующего устройства, по которой выбрать схему его технической реализации;
- 7) Составить принципиальную электрическую схему системы управления с включенным в нее корректирующим устройством.

3. Порядок выполнения задания:

- 1) По функциональной схеме (рис. 1) составляются уравнения работы каждого из элементов системы (потенциометров, усилителя, двигателя, редуктора) в операторной форме (или в виде передаточных функций).
- 2) По передаточным функциям отдельных элементов составляется структурная схема исходной замкнутой системы с указанием физических величин на входе и выходе каждого элемента, (см. рис 1).
- 3) На основании составленной структурной схемы записывается передаточная функция исходной разомкнутой системы $W_H(s)$ и по ней на миллиметровой бумаге строится асимптотическая ЛАЧХ в координатах «амплитуда» и «частота»:
 - по оси абсцисс откладывается частота в логарифмическом масштабе $-(\lg \omega)$. Рекомендуемый масштаб декады – 50 мм;

¹⁾ Для индивидуального пользования Программный комплекс МВТУ можно переписать из интернета.

– по оси ординат откладывается амплитуда в децибелах $(20 \lg |W(j\omega)|)$ дБ. Рекомендуемый масштаб амплитуды: 20 дБ – 25 мм.

4) По заданному закону изменения входного воздействия (или рассчитанному эквивалентному закону управления) и заданной величине установившейся ошибки, рассчитываются

координаты рабочей точки: ω_p и $20 \lg \frac{g_m}{\varepsilon_m}$, дБ. С учетом порядка

астатизма исходной системы, от рабочей точки в стороны низких и высоких частот строится запрещенная зона, в которую не должна заходить желаемая ЛАЧХ.

Для гарантированного обеспечения необходимой точности на рабочей частоте создается запас коэффициента передачи желаемой системы (примерно $4 \div 6$ дБ), то есть рабочая точка поднимается на эту величину и считается принадлежащей желаемой ЛАЧХ.

5) Далее через эту точку проводится начальная низкочастотная асимптота с наклоном – 20 дБ/дек. (исходная система имеет первый порядок астатизма) до пересечения ею оси амплитуд. Значение амплитуды в децибелах, соответствующее точке пересечения, определяет коэффициент передачи $K_{ж}$ желаемой системы.

6) Следующей строится среднечастотная асимптота, «привязка» которой устанавливается частотой среза $\omega_{ср}$. Для её определения используются графики (рис. 2), позволяющие учесть требования двух других показателей качества регулирования – t_p и σ . Поясним на примере, как используются эти графики. Пусть коэффициент перерегулирования σ задан равным 30%. Исходя из этой величины, проводят горизонтальную линию до пересечения с кривой σ . Из точки пересечения ведут вертикальную линию до

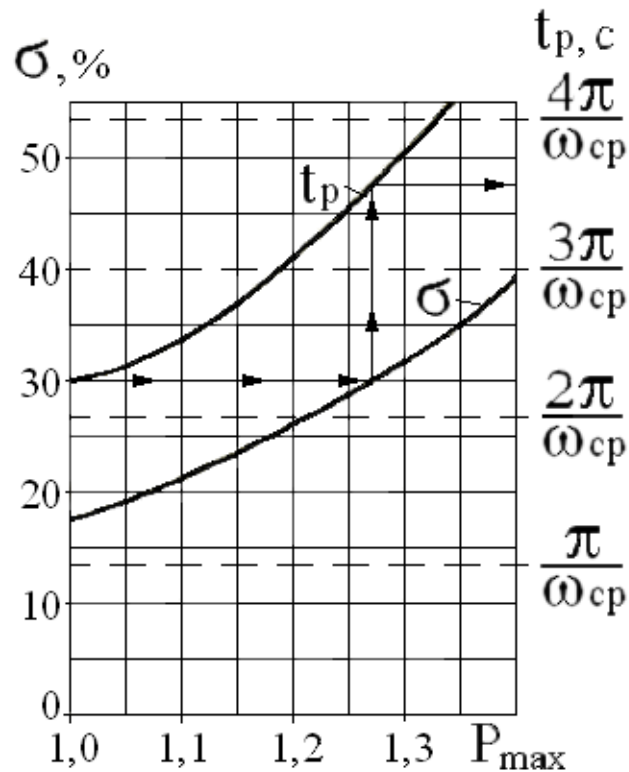


Рис. 2

пересечения с графиком t_p . Из последней точки пересечения проводится горизонтальная линия до правой шкалы времени регулирования. Все построения для примера указаны стрелками. Значение, полученное по этой шкале (для примера равно $3,57\pi/\omega_{cp}$), приравнивается к требуемой в задании величине времени регулирования, и вычисляется частота среза

$$\omega_{cp} = \frac{3,57 \pi}{t_p}. \quad (1)$$

Через полученное значение частоты среза проводится среднечастотная асимптота только с минус первым (-1) наклоном. На коэффициент перерегулирования влияет протяженность среднечастотной асимптоты, которая должна быть не меньше декады. Рекомендуется [1] продлевать среднечастотную асимптоту в область низких частот до уровня $10 \div 16$ дБ и в область высоких частот до уровня $-10 \div -16$ дБ.

Две параллельные асимптоты (низкочастотную и среднечастотную) соединяют прямой чаще всего с наклоном -40 дБ/дек. (наклон -2). Можно асимптоты сопрягать с наклоном -3 , но это несколько усложнит корректирующее устройство.

7) Из конечной точки среднечастотной асимптоты проводится прямая линия в область высоких частот с наклоном -2 .

Таким образом, будет сформирована ЛАЧХ желаемой системы первого приближения, которая в дальнейшем может уточняться в основном в области высоких частот с целью упрощения корректирующего устройства и достижения коэффициента передачи высокочастотных помех, меньшего единицы.

8) По построенной желаемой ЛАЧХ записывается отвечающая ей передаточная функция (2), используя которую проверяют систему на соответствие требуемым показателям регулирования методом математического моделирования.

$$W_{Ж1}(s) = \frac{K_{Ж} \left(\frac{1}{\omega_{comp2}} \cdot s + 1 \right)}{\left(\frac{1}{\omega_{comp1}} \cdot s + 1 \right) \left(\frac{1}{\omega_{comp3}} \cdot s + 1 \right) s} = \frac{K_{Ж} (T_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)s}, \quad (2)$$

где $\omega_{comp1} < \omega_{comp2} < \omega_{comp3}$ частоты сопряжения, а $T_1 > T_2 > T_3$ соответствующие им постоянные времени.

9) Для математического моделирования используется программный комплекс МВТУ, некоторые возможности которого и приемы работы в нем будут объяснены ниже.

Прежде всего, система управления проверяется по таким показателям качества, как коэффициент перерегулирования σ и время регулирования t_p . Эти показатели определяются по переходной функции $h(t)$ замкнутой системы.

После открытия программного комплекса для построения схемы моделирования желаемой системы (рис. 3)¹⁾ войдите в подменю

1) Индексы у постоянных времени в структурной схеме нумеруются условно и не обязательно должны соответствовать индексам постоянных времени в передаточной функции моделируемой системы

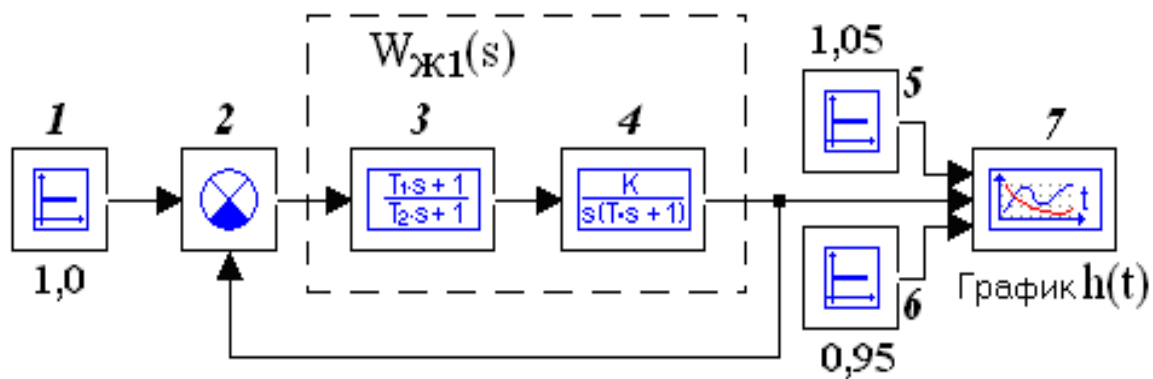


Рис. 3

«Источники» и активизируйте кнопку с символом, идентичным блокам 1, 5, 6, и названием «константа», щелкнув на ней один раз левой клавишей мыши. (В дальнейшем, если не уточняется, какая клавиша мыши используется, то по умолчанию считается левая). В необходимых местах файлового поля, указываемых стрелочным курсором, размещаются блоки щелчком мыши. Для размещения каждого подобного блока снова активизируется пиктограмма «константа».

Далее активизируйте подменю «Операции» и выберите блок «сравнивающее устройство» с символом 2 (рис. 3) и установите его последовательно с блоком 1.

Для установки звеньев (блоки 3 и 4) войдите в подменю «Динамические», найдите пиктограммы с соответствующими звеньями и последовательно, активизируя их, разместите в необходимых местах файлового поля.

Блоки 5 и 6 необходимы для установления допустимого отклонения выходной координаты от её конечного значения – $h(\infty)=1$ (в курсовой работе отклонения $\pm 5\%$ от $h(\infty)$ устанавливаются соответственно в блоках 5 и 6, где рядом показаны устанавливаемые значения).

Блок 7 «График» располагается в подменю «Данные» и при установке появляется с одним входным портом. Для получения нужного числа входов на пиктограмму «график» устанавливается стрелочный курсор и *правой* клавишей мыши делается щелчок. Меню блока выбирается команда «Свойства». После щелчка на этой команде появляется диалоговое окно «Свойства объектов», в котором в строке «Число входов» следует установить необходимую цифру и нажать кнопку « $\sqrt{\quad}$ Да». Выполненное сохранить. Далее, в

соответствии со схемой рис. 3, проводят линии связи. Для упрощения рисования структурной схемы целесообразно включить опцию *сетка*, для чего поместите курсор на кнопку, стилизованную под сетку, на дополнительной панели инструментов и щелкните мышью. Все поле файла представится усеянным точками, что позволит аккуратно проводить линии связи. После построения схемы сетку можно убрать повторным нажатием той же кнопки.

Блок 1 генерирует управляющее воздействие. Поставив курсор на *выходной* порт блока 1 (символ > с его правой стороны), сделайте щелчок мышью. Появится значок ⊕ «кружок с перекрестием», далее протяните линию связи до *входного* порта (символ > с левой стороны), необходимого по схеме блока. Снова сделайте щелчок мышью, и на входе блока появится типичная черная стрелка, свидетельствующая, что связь установлена, «кружок с перекрестием» пропадет.

Если в процессе формирования связи требуется сделать поворот, то достаточно щелкнуть мышью и далее тянуть линию в новом направлении.

Для прерывания линии связи нажмите клавишу «Shift» и, не отпуская ее, сделайте щелчок мышью: линия оборвется.

Существует и другой способ удаления, в соответствии с которым стрелочный курсор ставится на линию и нажимается *правая* клавиша мыши. После этого появляется выпадающее меню 6-ти команд, среди которых выбирается нужная команда.

При построении схемы моделирования может возникнуть необходимость в разветвлении сигналов. Для этого курсор ставится на линию связи, от которой пойдет ответвление, нажимается клавиша «Ctrl». Не отпуская её, сделайте щелчок мышью: появится точка. Отпустив клавиши, протяните линию к нужному блоку.

Следующий шаг к моделированию заключается в установлении параметров исследуемой структурной схемы. Процедура для всех блоков практически одна и та же: стрелочный курсор ставится на соответствующий блок и делается двойной щелчок, открывается диалоговое окно блока с активной закладкой «Параметры», где в соответствующих строках устанавливаются необходимые параметры в соответствии с полученным вариантом задания. (Это же диалоговое окно можно открыть щелчком *правой* клавиши мыши и затем щелчком на команде «Свойства»).

Установка параметров в виде десятичных дробей производится через **точку(!)**, а не через запятую. Процедура заканчивается нажатием кнопки «√ Да».

Перед тем как запустить задачу на решение, необходимо установить параметры расчета, для чего на клавиатуре нажмите клавишу F10 (параметры расчета можно найти и в меню «Моделирование»). В появившемся диалоговом окне с активной закладкой «**Основные**» установите: метод интегрирования «Адаптивный 1»; время интегрирования на начальном этапе 1 секунду (в дальнейшем при анализе полученных результатов моделирования время интегрирования может быть изменено в большую или меньшую сторону); минимальный шаг интегрирования 0.001 (с); максимальный шаг интегрирования 0.1 (с); шаг вывода результатов 0.001 (с); точность 0.001, завершив процедуру нажатием кнопки «√ Да».

Теперь можно перейти к процессу расчета, инициировав в меню режим «Моделирование». В выпадающем списке последовательно выбрать команды «Начать»(или F 9) и «Расчет» (или Ctrl+F9).

Результаты расчета можно увидеть, активизировав желаемый график, двойным щелчком на его пиктограмме. Появляется окно с названием «График», в котором изображаются поступающие в графический блок сигналы. Для редактирования полученных результатов переместите стрелочный курсор примерно в центр окна и щелкните *правой* клавишей мыши. Появится меню команд, среди которых наибольший интерес представляет «Свойства». После щелчка на этой команде появляется диалоговое окно «Настройка». Поместив курсор в поле «Заголовок», записываете название графика, например, «Переходная функция желаемой системы» – $h_{ж1}(t)$ и кнопками, расположенными выше, ориентируете надпись (по левому краю, по центру, по правому краю). Буквенные символы (F^f F), расположенные рядом, позволяют выбрать шрифт заголовка. В окошке под названием «Графики» можно установить цвет и тип линии, цвет и тип линии фоновой сетки, цвет фона графиков. Для этих целей служат кнопки ▼ и цветная кнопка. Поместив курсор на цветную кнопку, щелкните мышью, и появится цветной квадрат. На выбранном цвете щелкните мышью и на нем появятся буквы FG – это будет цвет линии графика, затем *правой*

клавишей мыши щелкните на выбранном цвете фона графика, и в квадратике этого цвета появятся буквы ВГ

По осям X и Y устанавливаются максимальные и минимальные значения аргумента и функции и число делений с целью наилучшего восприятия результатов. Минимальное значение как аргумента, так и функции равно нулю. Максимальное значение времени (по оси X) устанавливается вдвое большим, чем требуемое время регулирования. Число делений по горизонтальной оси выбирается таким, чтобы вся шкала имела одинаковую цену деления.

Максимальное значение по вертикальной оси Y выбирается с учетом коэффициента перерегулирования (1,2 ÷ 1,4), а число делений должно обеспечивать равномерность цены деления по всей шкале.

В нижней части окна «Настройка» под осью X имеется окошко с надписью «Метка», в котором справа ставится символ времени – t, с. В таком же окошке под осью Y вместо слова «Переменная» слева указываются символ переходной функции h(t) или выходной координаты – $\alpha_{oy}(t)$. По окончании редактирования нажимается кнопка «√ Да» и проверяется результат.

Чтобы графики были удобными для обработки, их можно растягивать по вертикали и по горизонтали, добиваясь рекомендуемого соотношения по осям Y:X = 300: 500.

Если желаемая система удовлетворяет требованиям σ и t_p , то дается команда на сохранение графика переходной функции для дальнейшей его распечатки. В противном случае продолжить редактирование.

10) По параметрам элементов исходной разомкнутой системы записывается её передаточная функция

$$W_{II}(s) = \frac{\alpha_{oy}(s)}{\alpha_{bx}(s)} = \frac{K_{II} \cdot K_Y \cdot K_{ДВ} \cdot K_P}{(T_Y s + 1)(T_M s + 1)(T_3 s + 1)s} = \frac{K_{II}}{(T_Y s + 1)(T_M s + 1)(T_3 s + 1)s}$$

по которой строится ЛАЧХ исходной системы, обозначаемая L_{II} .

Сопоставляя коэффициенты передачи $K_{Ж}$ и K_{II} , можно сделать вывод, что исходная система не обеспечит требуемой величины ошибки ввиду недостаточного коэффициента усиления. Чтобы удовлетворить требованию по ошибке, ЛАЧХ

L_{II} перемещается вверх вдоль оси амплитуд параллельно самой себе до совпадения её низкочастотной асимптоты с низкочастотной асимптотой ЛАЧХ желаемой системы ($L_{Ж}$).

Перемещенную ЛАЧХ L_{II} с измененным коэффициентом передачи, равным $K_{Ж}$, будем считать нескорректированной и обозначать L_{II} . По её передаточной функции

$$W_H(s) = \frac{\alpha_{oy}(s)}{\alpha_{vx}(s)} = \frac{K_{Ж}}{(T_y s + 1)(T_m s + 1)(T_g s + 1)s}, \quad (3)$$

используя логарифмический аналог критерия Найквиста, проверяется устойчивость системы. В том случае если система неустойчива или малы запасы устойчивости, её следует корректировать.

11) Для получения логарифмических частотных характеристик разомкнутой системы (или годографа Найквиста – так называют АФЧХ в программном комплексе) необходимо составить схему (рис. 4). Делается

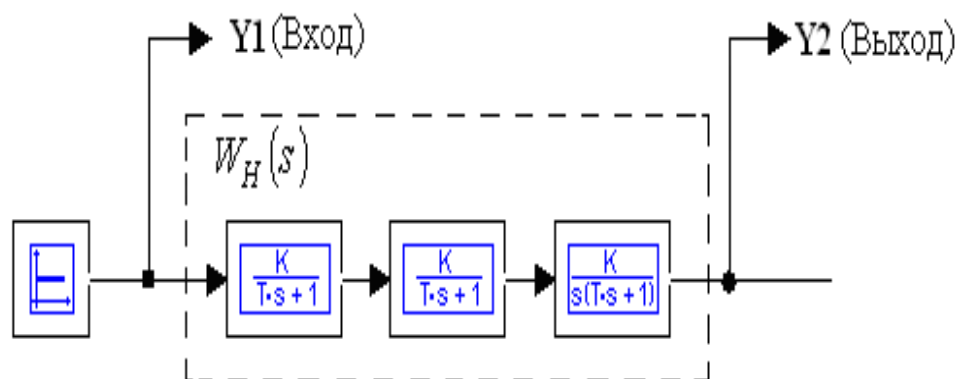



Рис. 4

это в следующем порядке. Строится цепочка из последовательно включенных блоков. Далее найдите в меню закладку «Субструктуры» и щелчком мыши инициализируйте каталог типовых блоков. Щелчком на пиктограмме  активизируйте блок «В память» и затем щелчком поставьте в месте, где находится надпись Вход. В схемном окне появится блок «В память» с именем Y1(Y2, и т.д.). Для присвоения этому блоку имени (можно оставить имя Y1) надо на его контуре двойным щелчком мыши открыть окно «В память», где в строке «Имя переменной» написать Вход. Далее можно дать название этому входу, для чего щелкните

правой клавишей мыши в контуре блока, появится список команд, из которого щелчком выбрать «Свойства». Откроется окно «Свойства объектов», в котором выбрать закладку «Общие» и в рамке «заголовок» выбранным шрифтом написать «Вход» и закончить нажатием кнопки «√ Да». Теперь линию связи от входного воздействия соединить с блоком Вход. Поставив курсор на линию при нажатой клавише «Ctrl», щелкните мышью. Появится точка (клавишу «Ctrl» можно отпустить) и следует провести линию связи до блока «Вход».

Снова обратитесь к закладке «Субструктуры», активизируйте блок «В память» и повторите вышеописанную процедуру для выхода.

Далее необходимо установить параметры системы. В первом апериодическом звене устанавливается $K = K_{ж1}$, а в остальных K принимается равным 1. Из числа заданных постоянных времени ($T_y, T_э, T_M$) устанавливаются: в первом апериодическом звене – наименьшая, а в остальных – по мере возрастания.

Теперь приступайте к получению частотных характеристик разомкнутой системы. Переместите курсор на надпись «Анализ» в основном меню и щелкните мышью. В открывшемся меню выберите «Частотный анализ», щелкните мышью и появится диалоговое окно «Параметры частотного анализа», в котором заполните первые три строчки:

Начальная частота – 0.01(десятичную дробь записывать через точку) или 1E-2;

Конечная частота – 1000 или 1E3;

Число точек вывода – не менее 1000 (при необходимости можно изменять в большую сторону). Остальные параметры оставьте без изменения.

Поставьте курсор на кнопку «Характеристик» и щелкните мышью, появится пустое графическое окно с заголовком «Частотные характеристики». Активизируйте окно «Параметры частотного анализа» путем щелчка на его бледно-голубом заголовке. В этом диалоговом окне поставьте курсор на крайнюю левую кнопку с синей стрелкой и красным символом «+» и щелкните мышью. Под знаком № появится цифра 1. Перейдите в соседнюю клетку этой же строки под названием «Входы» и щелкните на ней. Выпадет меню с названиями входов, выберите

одноименный (смотри на рис. 5). Перейдите в следующую графу этой же строки и также щелкните в ней. Появятся названия выходов, из которых выберите нужное. В последней графе под названием «Характеристика» после щелчка в строке под названием будут предложены различные характеристики: Вещественная, Мнимая, АЧХ (амплитудно-частотная характеристика), ЛАХ (логарифмическая амплитудно-частотная характеристика), ФЧХ (логарифмическая фазочастотная характеристика). Поскольку для оценки устойчивости требуются последние две, то в первой строке выберите щелчком ЛАХ. Затем снова вернитесь на кнопку с синей стрелкой и красным символом «+» и щелкните мышью на ней. Появится строка с номером 2. Соседняя кнопка с красным символом «-» удаляет строки. В графах «Входы» и «Выходы» поставьте те же названия, а в графе «Характеристика» выбираете ФЧХ. Для получения результата в графическом окне следует нажать кнопку «Расчет» – пиктограмма с секундомером и стартовым пистолетом. На графике появятся две кривые (ЛАХ и ФЧХ), которые можно редактировать следующим образом. В плоскости графика щелкните *правой* клавишей мыши и откроется меню команд, из которых выберите щелчком «Свойства». Появится знакомое диалоговое окно с названием «Настройка», где, пользуясь предложениями, можно хорошо отредактировать графики ЛАХ и ФЧХ. Чтобы графики были удобными для дополнительных построений, их растягивают по вертикали и горизонтали до рекомендуемого соотношения по осям $Y:X = 250:400$, после чего делаются распечатки.

Для получения годографа Найквиста (АФЧХ разомкнутой систем) используются приемы, аналогичные тем, которые применяются для получения логарифмических характеристик. Отличие заключается в выборе не характеристик, а годографа Найквиста.

Для удобства обработки полученных результатов целесообразно использовать еще одну команду – «Курсор». Поставьте стрелочный курсор на плоскость исследуемого графика и щелкните *правой* клавишей мыши. Появится меню команд, в котором выберите щелчком мыши «Курсор». В пределах графика появляются «плавающие» оси координат и курсор в форме креста, которые будут перемещаться по графику при движении мыши (рис.

5). Кроме того, рядом всплывает маленькое окно с названием «Курсор» (рис. 6).

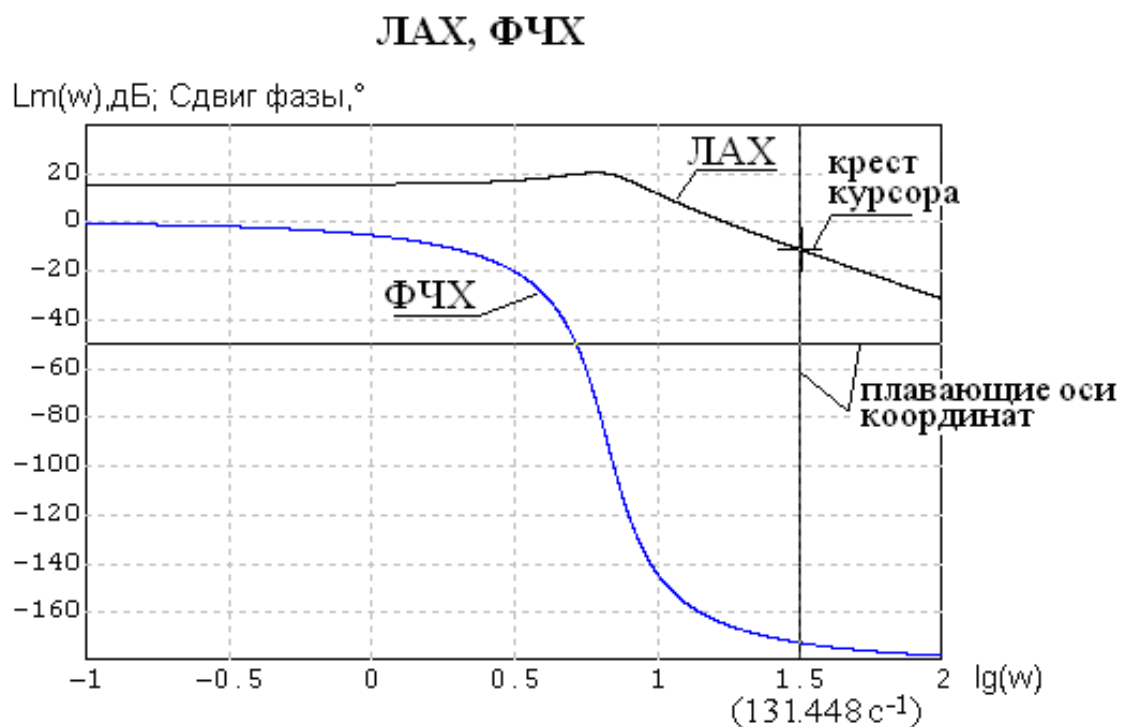


Рис. 5

Для примера графиков ЛАХ и ФЧХ рассмотрим состав окна. Оно содержит три графы, в центральной будут приведены значения

Курсор		
	131.448	-50.64
> лах	131.448	-11.06
сдвиг фаз	131.448	-172.41

Рис. 6

независимой переменной (в случае частотных характеристик это круговая частота в c^{-1}). В крайней правой отражаются значения функции, соответствующие текущей переменной (частоте $131,448 c^{-1}$). В первой строке приведены значения частоты ($131,448 c^{-1}$) и амплитуды ($-50,64$ дБ), соответствующие перекрестию плавающих осей координат. В третьей графе второй строки приведены текущие значения амплитуды ($-11,06$

дБ), соответствующие перекрестию курсора; в третьей графе третьей строки – текущие значения сдвига фазы в градусах (–172,41), соответствующие частоте $131,448 \text{ с}^{-1}$.

Плавающие оси координат удобны для определения запасов устойчивости по амплитуде и по фазе. Поставив вертикальную ось плавающих координат на значение частоты среза, по ФЧХ установим значение фазового сдвига и определим запас по фазе. Переместив вертикальную ось плавающих координат на значение инверсной частоты, по ЛАХ определим запас по амплитуде.

«Плавающие» оси координат и курсор удаляются нажатием **правой** клавиши мыши в плоскости графика и снятием щелчком мыши «флажка» у команды «Курсор».

12) По желаемой ЛАЧХ определяется частота среза, с которой сопоставляются большие частоты сопряжения исходной системы. Если частота сопряжения какого-либо звена в 8–10 раз больше частоты среза, то влиянием этого звена на показатели системы можно пренебречь. Например, если звено $\frac{1}{T_y s + 1}$ имеет

частоту $\omega_{сопр} = \frac{1}{T_y} (\text{с}^{-1})$ и $\omega_{сопр} \gg (8 \div 10) \omega_{ср}$, то данным звеном можно пренебречь и передаточная функция разомкнутой нескорректированной системы примет вид:

$$W_H(s) = \frac{K_{ж}}{(T_{\Theta} \cdot s + 1)(T_M \cdot s + 1)s}, \quad \text{а ее ЛАЧХ будет}$$

оканчиваться асимптотой с наклоном –3.

С учетом вышеизложенного замечания производится уточнение высокочастотной части желаемой ЛАЧХ, в которой второй наклон продолжается до пересечения с ЛАЧХ нескорректированной системы и далее совпадает с ней.

Когда высокочастотная часть желаемой ЛАЧХ проводится ниже и параллельно высокочастотной части ЛАЧХ нескорректированной системы, то после уточнения желаемой ЛАЧХ соответствующая ей передаточная функция приобретает еще одно аperiodическое звено. Постоянная времени этого звена будет определяться частотой перехода ЛАЧХ с наклоном –

наклон -3 . Структурная схема желаемой системы будет выглядеть как показано на рис. 7, а ее уточненная передаточная функция примет вид (4):

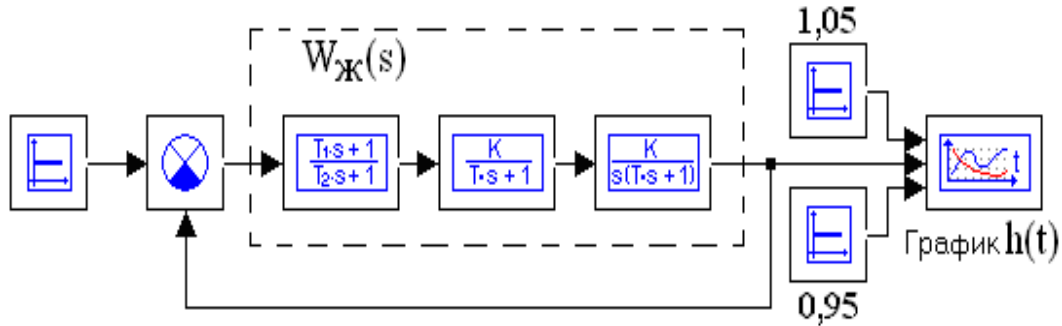


Рис. 7

$$W_{\text{ж}}(s) = \frac{K_{\text{ж}} \left(\frac{1}{\omega_2} \cdot s + 1 \right)}{\left(\frac{1}{\omega_1} \cdot s + 1 \right) \left(\frac{1}{\omega_3} \cdot s + 1 \right) \left(\frac{1}{\omega_4} \cdot s + 1 \right) s}, \quad (4)$$

где ω_4 – частота последнего излома желаемой ЛАЧХ.

По схеме рис. 7 после установки числовых значений параметров системы по переходной функции проверяют окончательно показатели качества σ и t_p .

13) Аналогично рис. 4 строят схему для получения частотных характеристик (ЛАХ, ФЧХ и годографа Найквиста) желаемой системы (4) методом математического моделирования.

14) Для оценки ошибки замкнутой системы при гармоническом синусоидальном входном воздействии строится схема

(рис. 8), где в блоке 1 устанавливаются через пробел амплитуда g_m , рабочая частота ω_p и фаза (берется равной нулю) заданного (или эквивалентного) входного воздействия. В блоках 2 и 3 соответственно устанавливаются положительная и отрицательная амплитуды ε_m заданной ошибки.

График ошибки должен иметь 5–6 периодов колебаний, а для этого в параметрах расчета (клавиша F10) надо установить соответствующее время интегрирования $t_{\text{инт}}$, рассчитываемое по формуле:

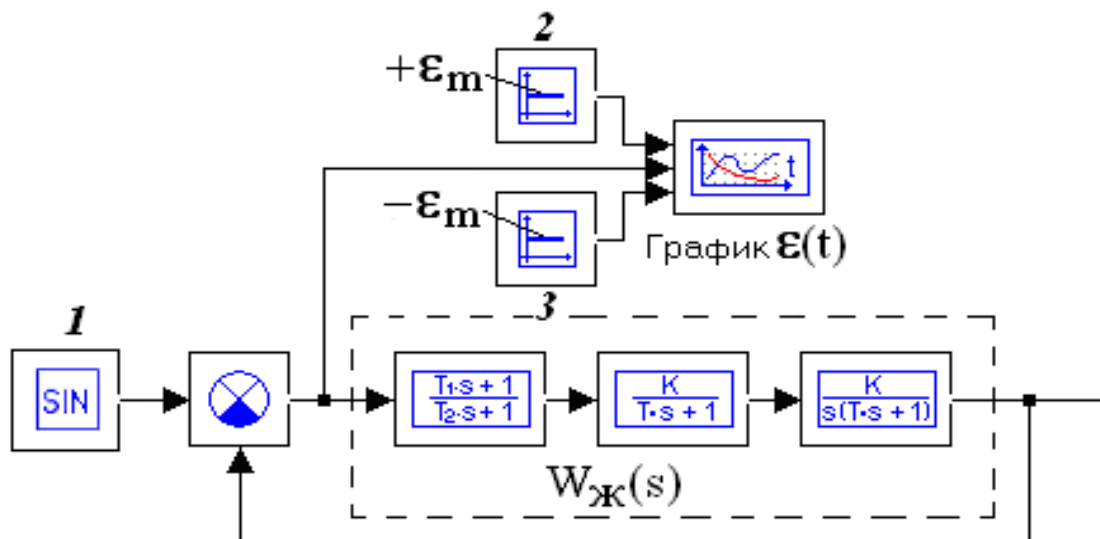


Рис. 8

$$t_{\text{ИНТ}} = (5-6) \frac{2\pi}{\omega_p},$$

где ω_p – рабочая частота.

Далее, инициировав программу (клавиша F9), запустить расчет (сочетание клавиш Ctrl+F9). Результат получается путем двойного щелчка на блоке «График $\varepsilon(t)$ ».

15) Передаточная функция скорректированной системы равна произведению передаточных функций последовательного корректирующего устройства и нескорректированной системы и, с другой стороны, передаточной функции желаемой системы.

Желаемая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика $L_{\text{Ж}}$ равна сумме логарифмических амплитудно-частотных характеристик последовательного корректирующего устройства $L_{\text{П}}$ и нескорректированной системы $L_{\text{Н}}$, то есть $L_{\text{Ж}} = L_{\text{П}} + L_{\text{Н}}$. Из последнего равенства следует, что для получения ЛАЧХ последовательного корректирующего устройства необходимо из ЛАЧХ желаемой вычесть ЛАЧХ нескорректированной системы.

16) По виду полученной ЛАЧХ последовательного корректирующего устройства подбирается схема его реализации и приводятся формулы расчета параметров (см. Приложение 3 и [1]).

Требования к содержанию и оформлению курсовой работы

Пояснительная записка должна содержать:

- функциональную схему системы автоматического управления (САУ) с пояснением ее работы;
- исходные данные своего варианта задания;
- передаточные функции каждого элемента системы, записанные в общей форме и с числовыми значениями параметров;
- структурную схему исходной замкнутой САУ (без корректирующего устройства);
- расчет координат рабочей точки и построенные на миллиметровой бумаге асимптотические ЛАЧХ: исходной, нескорректированной и желаемой систем;
- математические выкладки, обосновывающие получение асимптотической ЛАЧХ корректирующего устройства;
- схемы моделирования САУ с числовыми значениями передаточных функций для проверки устойчивости и показателей качества переходного процесса нескорректированной, желаемой и скорректированной систем;
- распечатки ЛЧХ, АФЧХ (годограф Найквиста) нескорректированной, желаемой и скорректированной систем с указаниями на них расположения и числовых значений: частоты среза $\omega_{ср}$, инверсной частоты $\omega_{и}$, запасов устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ и амплитуде ΔA ;
- для желаемой и скорректированной систем распечатки: переходных функций $h(t)$ с обозначением на них перерегулирования (расчета коэффициента перерегулирования – σ), времени регулирования t_p , графиков ошибки с указанием амплитуды ε_m и расчетом частоты колебаний;
- электрическую схему корректирующего устройства с его ЛАЧХ;
- функциональную схему скорректированной системы (см. рис. 14 Приложения 4).
- выводы по результатам синтеза.

Пояснительная записка курсовой работы представляется в печатном виде (шрифт «Times New Roman», размер 14–16, интервал одинарный) на листах формата А4 объемом пояснительной записки 15–20 стр.

В Приложении 4 приводится образец полного оформления курсовой работы с примерами обработки полученных необходимых результатов.

Контрольные вопросы для подготовки к защите курсовой работы

1. Из каких основных элементов состоит САУ?
2. Объясните принцип работы системы управления.
3. Приведите пример физического объекта, для управления которым может использоваться подобная система.
4. В чем смысл работоспособности системы?
5. Для чего необходима коррекция?
6. Какие существуют способы коррекции САУ? Дайте им сравнительную оценку.
7. Какие исходные данные необходимы для синтеза корректирующего устройства и как они используются?
8. Какие параметры элементов, входящие в исходную САУ можно изменять?
9. Что такое желаемая ЛАЧХ, какова методика её построения?
10. Какова методика синтеза последовательного корректирующего устройства?
11. Как по ЛАЧХ определяется соответствующая ей передаточная функция?
12. Перечислите основные показатели качества переходных процессов и дайте им физическое пояснение.
13. Как находится передаточная функция корректирующего устройства?
14. Как выбирается и реализуется корректирующее устройство?
15. Каков физический смысл запасов устойчивости по фазе и амплитуде? Какие числовые значения запасов по амплитуде и по фазе считаются удовлетворительными?
16. Как, используя ЛАЧХ и ЛФЧХ, определяются запасы устойчивости по амплитуде и по фазе?
17. Как, используя годограф Найквиста, подсчитать запас устойчивости по амплитуде?

Список литературы

1. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы – М.: Машиностроение, 1982.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб, Изд-во «Профессия», 2004. – 752 с. – (Серия: Специалист).
3. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. 1 / Под ред. А.А. Воронова – М.: Высш. шк., 1986.
4. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. – 2-е изд., – СПб.: Политехника, 2003.
5. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования: Учебное пособие для вузов – М.: Высш. шк., 2004. – 365 с.: ил.

Приложение 1

Таблица 1

Требования, предъявляемые к скорректированной системе управления

№ вар.	Закон входного воздействия	Максимальные		Требуемые показатели качества регулирования		
		Скорость $\alpha'_{\text{вых}}$, рад/с	Ускорение $\alpha''_{\text{вых}}$, рад/с ²	Установившаяся ошибка, $\varepsilon \cdot 10^{-3}$, рад, \leq	Коэффициент перерегулирования σ , % \leq	Время регулирования, t_p , с \leq
1	–	0,9	0,5	1,75	20	0,3
2	9sin 0,1t	–	–	1,5	25	0,3
3	–	1,25	0,6	3,5	30	0,4
4	4sin 0,4t	–	–	2,5	20	0,4
5	–	1,75	0,7	3,5	25	0,5
6	5sin 0,3t	–	–	2,0	25	0,4
7	–	2,8	0,7	7,0	30	0,6
8	5sin 0,4t	–	–	3,0	25	0,5
9	–	2,0	0,6	3,0	20	0,4
10	6sin 0,1t	–	–	1,75	20	0,25
11	–	0,9	0,18	2,0	20	0,3
12	5sin 0,2t	–	–	1,75	25	0,3
13	4sin 0,2t	–	–	3,5	20	0,25
14	–	0,7	0,07	3,5	25	0,4
15	8sin 0,2t	–	–	2,5	25	0,3
16	–	1,4	0,49	2,0	25	0,25
17	3sin 0,1t	–	–	1,75	25	0,3
18	–	1,75	0,7	2,5	20	0,4
19	4sin 0,1t	–	–	1,75	25	0,4
20	–	1,75	0,35	2,5	30	0,25
21	8sin 0,1t	–	–	2,0	25	0,3
22	–	1,2	0,3	1,5	20	0,3
23	4sin 0,3t	–	–	1,5	20	0,2
24	–	1,25	0,25	2,5	30	0,25
25	–	1,6	0,4	2,0	25	0,3
26	5sin 0,2t	–	–	2,0	25	0,2
27	–	2,8	0,7	3,5	30	0,25
28	–	2,4	1,0	2,0	30	0,3
29	6sin 0,25t	–	–	1,5	25	0,25
30	–	3,0	0,6	3,0	30	0,3
31	–	1,4	0,8	1,0	20	0,2
32	7sin 0,2t	–	–	1,75	25	0,3

Приложение 2

Таблица 2

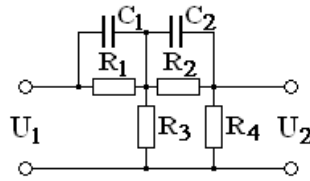
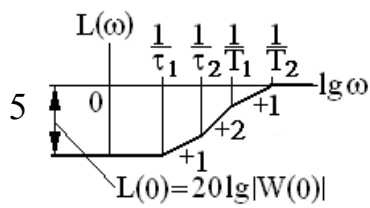
Параметры элементов исходной системы управления

№ вар.	Кп, В/рад	Ку	Кдв, рад/В·с	Кр	Постоянные времени, с		
					Ту	Тм	Тэ
1	5,0	100	2,5	0,001	0,001	0,04	0,005
2	4,5	1000	4,0	0,006	0,003	0,1	0,008
3	2,0	200	3,0	0,002	0,0008	0,04	0,006
4	4,0	500	2,1	0,004	0,001	0,03	0,004
5	3,0	400	4,0	0,0015	0,0006	0,04	0,004
6	2,5	700	2,4	0,005	0,0020	0,08	0,006
7	6,0	600	1,6	0,005	0,0010	0,05	0,005
8	4,0	300	1,5	0,0002	0,003	0,10	0,010
9	2,5	700	2,4	0,005	0,0020	0,08	0,006
10	3,5	800	2,0	0,0001	0,004	0,04	0,008
11	4,6	800	3,0	0,004	0,0012	0,01	0,001
12	4,0	300	1,5	0,0002	0,003	0,07	0,006
13	2,8	400	3,2	0,008	0,001	0,06	0,008
14	3,0	400	1,8	0,002	0,001	0,04	0,003
15	2,4	300	2,0	0,001	0,002	0,08	0,006
16	2,5	500	2,4	0,006	0,0008	0,05	0,002
17	5,0	200	1,8	0,004	0,002	0,05	0,008
18	2,0	600	1,5	0,006	0,002	0,04	0,004
19	1,8	1200	1,6	0,008	0,001	0,04	0,003
20	2,4	600	2,5	0,001	0,002	0,08	0,005
21	3,5	800	2,0	0,0001	0,003	0,06	0,008
22	2,8	400	3,2	0,008	0,001	0,08	0,004
23	3,6	800	2,8	0,005	0,0012	0,02	0,005
24	3,0	400	1,8	0,002	0,001	0,06	0,01
25	2,4	300	2,0	0,001	0,002	0,04	0,005
26	4,0	2000	4,0	0,005	0,004	0,02	0,005
27	2,5	500	2,4	0,006	0,0008	0,02	0,002
28	5,0	200	1,8	0,004	0,003	0,05	0,008
29	2,0	600	1,5	0,006	0,002	0,04	0,004
30	1,8	1200	1,6	0,008	0,001	0,04	0,003
31	2,4	600	2,5	0,001	0,002	0,02	0,006
32	4,5	400	2,0	0,001	0,002	0,025	0,004

Приложение 3

Логарифмические характеристики и электрические схемы корректирующих устройств

№	Вид асимптотической ЛАЧХ	Схема реализации корректирующего устройства	Передаточная функция, её параметры и предельные значения
1	<p>$L(0) = 20 \lg W(0)$</p>		$W(s) = \frac{K(\tau \cdot s + 1)}{T \cdot s + 1},$ <p>где $K = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$; $\tau = R_1 C$; $T = K \cdot \tau$; $W(0) = K$; $W(\infty) = 1$.</p>
2	<p>$L(0) = 20 \lg W(0)$ $L(\infty) = 20 \lg W(\infty)$</p>		$W(s) = \frac{K(\tau \cdot s + 1)}{T \cdot s + 1},$ <p>где $K = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$; $\tau = R C_2$; $T = K \cdot \tau$; $W(0) = K$; $W(\infty) = 1$.</p>
3	<p>$L(0) = 20 \lg W(0)$ $L(\infty) = 20 \lg W(\infty)$</p>		$W(s) = \frac{K(\tau \cdot s + 1)}{T \cdot s + 1},$ <p>где $K = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$; $\tau = R_2 C_2$; $T = \frac{(R_1 + R_2) C_1 C_2}{C_1 + C_2}$; $W(0) = K$; $W(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$.</p>
4	<p>$L(0) = 20 \lg W(0)$ $L(\infty) = 20 \lg W(\infty)$</p>		$W(s) = \frac{K(\tau \cdot s + 1)}{T \cdot s + 1},$ <p>где $K = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$; $\tau = R_2 C$; $T = \frac{(R_1 + R_3) R_2 C}{R_1 + R_2 + R_3}$; $W(0) = K$; $W(\infty) = \frac{R_3}{R_1 + R_3}$.</p>



$$W(s) = \frac{K(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)},$$

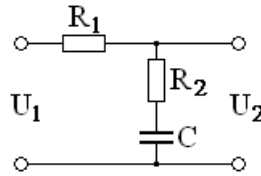
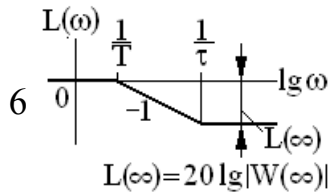
где $\tau_1 = R_1 C_1$; $\tau_2 = R_2 C_2$;

$$K = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_1(R_2 + R_3 + R_4) + R_3(R_2 + R_4)};$$

при $R_3 \ll R_2$, $T_1 = C_2 R_2 R_4 / (R_2 + R_4)$;

$$T_2 = C_1 R_1 R_3 R_4 / (R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_3 R_4)$$

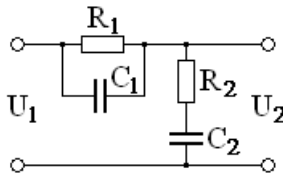
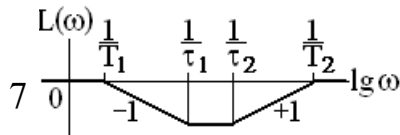
$$|W(0)| = K; |W(\infty)| = 1.$$



$$W(s) = \frac{\tau \cdot s + 1}{T \cdot s + 1},$$

где $\tau_1 = R_2 C$; $T = (R_1 + R_2) C$;

$$|W(0)| = 1; |W(\infty)| = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$



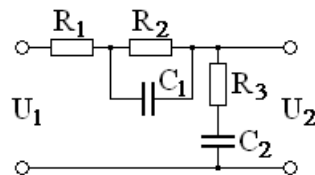
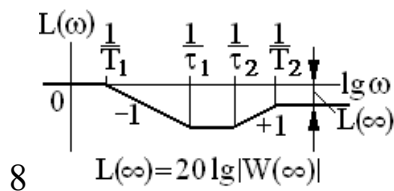
$$W(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{a_0 s^2 + a_1 s + 1},$$

где $\tau_1 = R_1 C_1$; $\tau_2 = R_2 C_2$;

$$a_0 = R_1 R_2 C_1 C_2;$$

$$a_1 = R_1 C_1 + (R_1 + R_2) C_2;$$

$$|W(0)| = |W(\infty)| = 1;$$



$$W(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{a_0 s^2 + a_1 s + 1},$$

где $\tau_1 = R_2 C_1$; $\tau_2 = R_3 C_2$;

$$a_0 = (R_1 + R_3) R_2 C_1 C_2;$$

$$a_1 = R_2 C_1 + (R_1 + R_2 + R_3) C_2;$$

$$|W(0)| = 1; |W(\infty)| = \frac{R_3}{R_1 + R_3}.$$

Приложение 4
Образец оформления курсовой работы

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Московский государственный индустриальный университет
(ГОУ МГИУ)
Институт дистанционного образования

Курсовая работа
по курсу «Теория автоматического управления».
«Синтез последовательного корректирующего устройства».

Вариант №

Группа: ... Ап

Студент:

Преподаватель:

Оценка

Москва 20... г.

Оглавление

Стр.

1. Исходные данные
2. Формулировка задания
3. Выполнение задания
 - 3.1. Составление структурной схемы исходной замкнутой системы
 - 3.2. Построение ЛАЧХ исходной разомкнутой системы
 - 3.3. Построение запрещенной области
 - 3.4. Расчет дополнительного коэффициента усиления
 - 3.5. Построение ЛАЧХ нескорректированной системы
 - 3.6. Моделирование частотных характеристик нескорректированной системы и их анализ
 - 3.7. Формирование желаемой ЛАЧХ
 - 3.8. Получение и анализ переходной функции желаемой системы
 - 3.9. Проверка установившейся ошибки желаемой системы
 - 3.10. Логарифмические частотные характеристики желаемой системы
 - 3.11. Годограф Найквиста
 - 3.12. Получение ЛАЧХ корректирующего устройства и его передаточной функции
 - 3.13. Функциональная схема скорректированной системы управления
4. Список литературы

1. Исходные данные:

- Функциональная схема системы управления объектом (рис. 1), где приняты следующие обозначения:

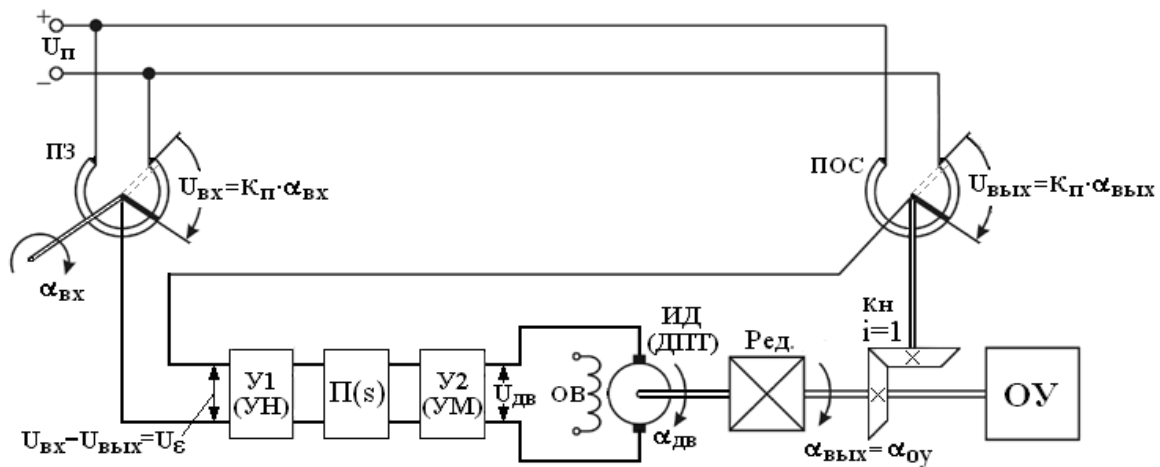


Рис. 1

ПЗ – потенциометр задатчика;

α_{BX} – угол поворота вала ПЗ;

ПОС – потенциометр обратной связи;

$\alpha_{OY} = \alpha_{BYX}$ – угол поворота объекта управления;

У1 – усилитель напряжения (УН);

$\Pi(s)$ – последовательное корректирующее устройство

У2 – усилитель мощности (УМ);

ИД – исполнительный двигатель;

ОВ – обмотка возбуждения;

Ред – редуктор;

Кн – коническая передача с передаточным отношением $i = 1$;

ОУ – объект управления;

U_{Π} – напряжение источника питания потенциометров.

- максимальные значения:

- скорости объекта управления – $\alpha'_{OY} = 1,4$ рад / с;

- ускорения объекта управления – $\alpha''_{OY} = 0,28$ рад / с².

- Требуемые показатели качества управления:

- установившаяся ошибка при гармоническом входном воздействии $\varepsilon = 0,0025$ рад;

- коэффициент перерегулирования $\sigma = 20\%$;

- время регулирования $t_p = 0.35c$.
- Параметры элементов исходной системы:
 - а) коэффициенты передачи элементов, входящих в систему:
 - потенциометров $K_{\Pi} = 4 B / рад$;
 - усилителя $K_Y = 210$;
 - двигателя $K_D = 2,5 рад / B \cdot c$;
 - редуктора $K_P = 0,006$
 - б) постоянные времени:
 - усилителя $T_Y = 0,001c$
 - двигателя:
 - механическая $T_M = 0,032c$
 - электрическая $T_{\mathcal{E}} = 0,006c$

2. Формулировка задания:

- По функциональной схеме составить структурную схему системы управления по исходным данным;
- Сформировать асимптотическую ЛАЧХ желаемой системы;
- Методом математического моделирования проверить соответствие желаемой системы управления требуемым показателям качества;
- Получить ЛАЧХ корректирующего устройства и выбрать схему его реализации;
- Представить схему системы управления с корректирующим устройством.

3. Выполнение задания

3.1. Составление структурной схемы исходной замкнутой системы

Для каждого элемента системы (кроме корректирующего устройства) запишем передаточные функции, следуя последовательности их расположения в функциональной схеме.

– потенциометр задатчика:

$$W_{\Pi}(s) = \frac{U_{BX}(s)}{\alpha_{BX}(s)} = K_{\Pi} = 4 \text{ В/рад};$$

– усилитель полностью (но без корректирующего устройства):

$$W_{Y}(s) = \frac{U_{ДВ}(s)}{U_{\varepsilon}(s)} = \frac{K_Y}{T_Y \cdot s + 1} = \frac{210}{0,001 \cdot s + 1};$$

– исполнительный двигатель постоянного тока:

$$W_{ДВ}(s) = \frac{\alpha_{ДВ}(s)}{U_{ДВ}(s)} = \frac{K_{ДВ}}{(T_{\varepsilon} \cdot s + 1)(T_M \cdot s + 1) \cdot s} = \frac{2,5}{(0,006 \cdot s + 1)(0,032 \cdot s + 1) \cdot s};$$

– редуктор:

$$W_{РЕД}(s) = \frac{\alpha_{ВЫХ}(s)}{\alpha_{ДВ}(s)} = K_P = 0,006;$$

– потенциометр обратной связи:

$$W_{\Pi}(s) = \frac{U_{ВЫХ}(s)}{\alpha_{ВЫХ}(s)} = K_{\Pi} = 4 \text{ В/рад}.$$

На основании полученных передаточных функций элементов составим структурную схему системы управления (рис. 2, а), где

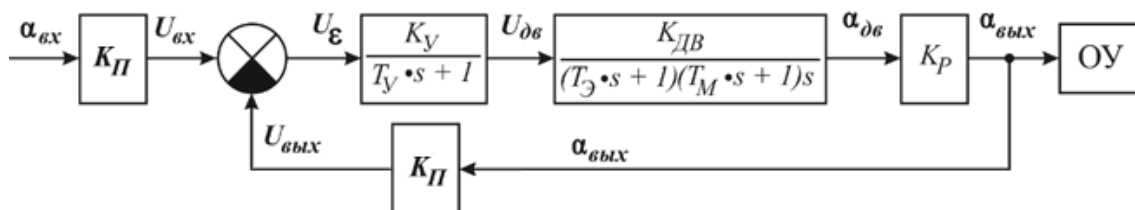


Рис. 2, а

элемент сравнения выполняет действия согласно уравнению:

$$U_{BX}(s) - U_{ВЫХ}(s) = U_{\varepsilon}(s).$$

После структурного преобразования схему окончательно можно представить в виде рис.2,б и на основании её записать передаточную функцию $W_{\dot{\epsilon}}(s)$ разомкнутой исходной системы.

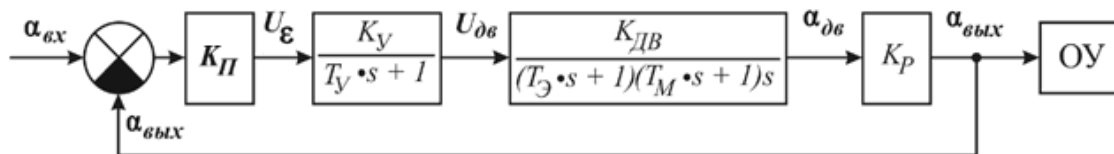


Рис. 2, б

$$\begin{aligned}
 W_{II}(s) &= \frac{K_{II} \cdot K_Y \cdot K_{ДВ} \cdot K_P}{(T_Y \cdot s + 1)(T_E \cdot s + 1)(T_M \cdot s + 1)s} = \\
 &= \frac{4 \cdot 210 \cdot 2,5 \cdot 0,006}{(0,001 \cdot s + 1)(0,006 \cdot s + 1)(0,032 \cdot s + 1) \cdot s} = \\
 &= \frac{12,6}{(0,001 \cdot s + 1)(0,006 \cdot s + 1)(0,032 \cdot s + 1) \cdot s}
 \end{aligned}$$

3.2. Построение ЛАЧХ исходной разомкнутой системы

Используя $W_{II}(s)$, построим ЛАЧХ в координатах «амплитуда-частота» на миллиметровой бумаге. Так как передаточная функция исходной системы содержит интегрирующее звено, то низкочастотная асимптота проводится с наклоном -1 , отсекая на оси амплитуд значение $20 \cdot \log 12,6 = 22$ дБ (рис. 3). Далее изменяем наклон ЛАЧХ на каждой частоте сопряжения ($31,25$; $166,7$ и 1000 s^{-1}). На рис. 3 эта ЛАЧХ обозначена L_{II} .

3.3. Построение запрещенной области

Исходя из заданных максимальных значений скорости и ускорения, определяем рабочую частоту:

$$\omega_{раб} = \frac{\alpha''_{OY}}{\alpha'_{OY}} = \frac{0,28}{1,4} = 0,2 \text{ c}^{-1},$$

амплитуду эквивалентного гармонического воздействия:

$$g_m = \frac{(\alpha'_{OY})^2}{\alpha''_{OY}} = \frac{(1,4)^2}{0,28} = 7 \text{ рад}$$

и минимальный требуемый коэффициент передачи системы на рабочей частоте в децибелах:

$$|W(j\omega_{РАБ})| = 20 \cdot \lg \frac{g_m}{\varepsilon_m} = 20 \cdot \lg \frac{7}{0,0025} = 68,9 \text{ дБ} \approx 69 \text{ дБ}$$

Рабочую точку с координатами: $\omega_{раб} = 0,2 \text{ с}^{-1}$ и $|W(j\omega_{РАБ})| = 69 \text{ дБ}$ отмечаем на миллиметровке (рис. 3). От рабочей точки в сторону низких частот проводим линию с наклоном -1 , а в сторону высоких частот – линию с наклоном -2 , выделяя, таким образом, запрещенную область, где не должна размещаться желаемая ЛАЧХ (на миллиметровке эти линии отмечены штриховкой).

3.4. Расчет дополнительного коэффициента усиления

Чтобы обеспечить получение необходимой точности скорректированной системы, увеличим на 4 дБ рассчитанное ранее значение коэффициента передачи на рабочей частоте (69 дБ).

Рабочая точка будет иметь амплитуду, равную 73 дБ, и принадлежать желаемой ЛАЧХ.

Так как исходная система – 1-го порядка астатизма, через рабочую точку (73 дБ) проводим низкочастотную асимптоту желаемой ЛАЧХ с наклоном -1 до пересечения ею оси амплитуд. Точка пересечения определяет искомый коэффициент передачи $K_{ж}$ желаемой ЛАЧХ, равный 58,8 дБ, что в безразмерных единицах составляет $K_{ж} = 871$. Так как коэффициент передачи исходной системы не обеспечивает требуемой точности ($K_{и} < K_{ж}$), то необходимо рассчитать дополнительный коэффициент усиления

$$K_{доп} = K_{ж} / K_{и} = 871 / 12,6 = 69,13. \quad (K_{доп} = 58,8 - 22 = 36,8 \text{ дБ}).$$

3.5. Построение ЛАЧХ нескорректированной системы

С учетом дополнительного коэффициента усиления проверим работоспособность нескорректированной системы, передаточную функцию которой обозначим $W_H(s)$:

$$W_H(s) = W_H(s) \cdot K_{\text{доп}} = \frac{12,6 \cdot 69,13}{(0,001 \cdot s + 1)(0,006 \cdot s + 1)(0,032 \cdot s + 1) \cdot s} =$$
$$= \frac{871}{(0,001 \cdot s + 1)(0,006 \cdot s + 1)(0,032 \cdot s + 1) \cdot s}$$

По этой передаточной функции нескорректированной системы строится ЛАЧХ L_H (рис. 3) и проверяется устойчивость методом математического моделирования логарифмических частотных характеристик.

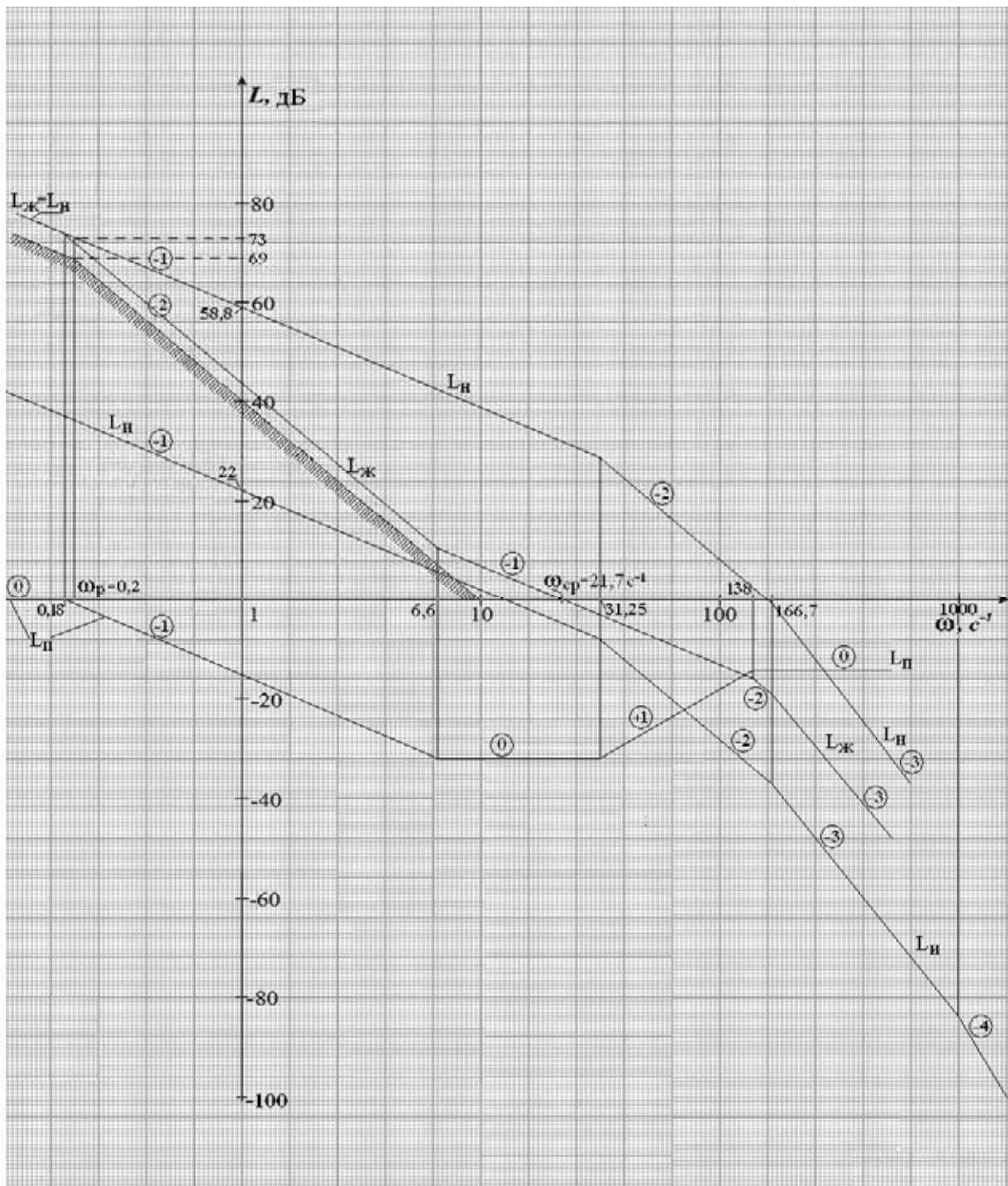


Рис. 3

3.6. Моделирование частотных характеристик нескорректированной системы и их анализ

Составим схему моделирования (рис. 4) и получим ЛЧХ (рис. 5).

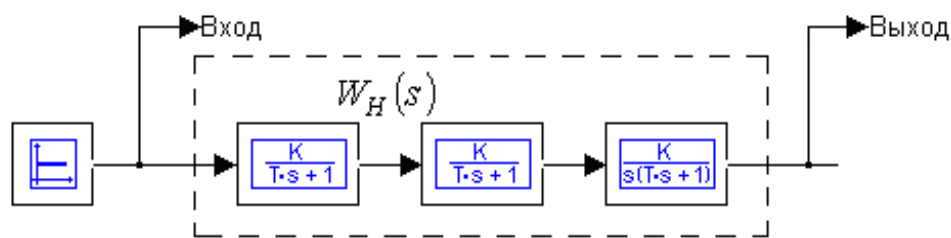


Рис. 4

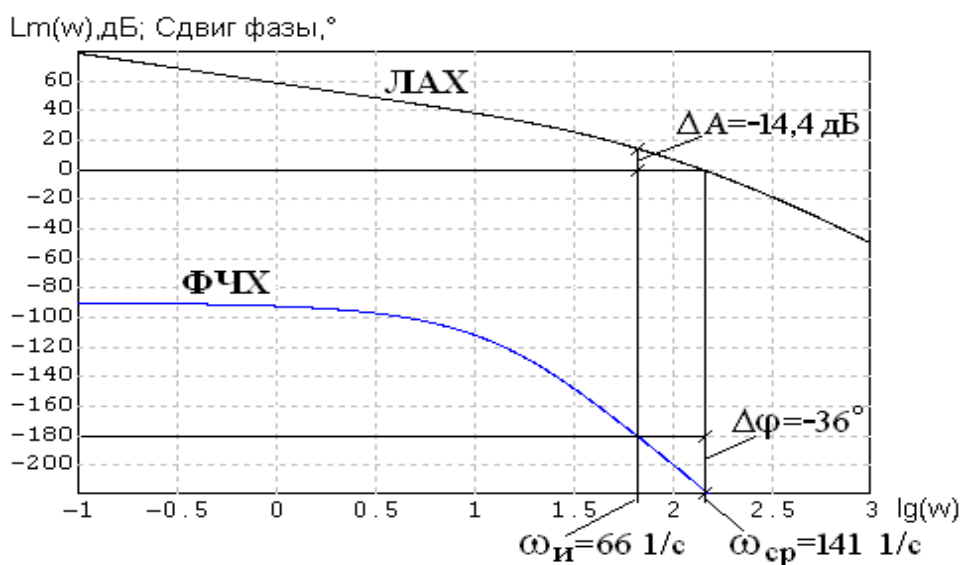


Рис. 5

Анализ частотных характеристик показывает, что нескорректированная система неустойчивая (имеет недостачу по амплитуде $\Delta A = -14,4 \text{ дБ}$ и по фазе $\Delta \varphi = -36^\circ$) и, следовательно, неработоспособна. Необходима коррекция.

3.7. Формирование желаемой ЛАЧХ

Продолжим формирование желаемой ЛАЧХ, перейдя к построению её среднечастотной части. С этой целью рассчитаем частоту среза, используя графики зависимости коэффициента перерегулирования σ и времени регулирования t_p (рис. 6) и

формулу $\omega_{CP} = \frac{n\pi}{t_p}$, где n – число, считываемое с графика и в

нашем случае равно 2,42. Частота среза

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{2,42 \pi}{0,35} = 21,7 \text{ с}^{-1}.$$

Отложим это значение на оси частот в логарифмическом масштабе (рис. 3) и через эту точку проводим асимптоту с наклоном -1 : в сторону низких частот до уровня 12 дБ, а в сторону высоких частот до уровня -16 дБ.

Соединяем низкочастотную и среднечастотную асимптоты линией с наклоном -2 .

При формировании высокочастотной части желаемой ЛАЧХ увеличиваем наклон, последовательно приближаясь к наибольшему наклону ЛАЧХ $-L_{\text{н}}$ нескорректированной системы (рис. 3). Точки изломов желаемой ЛАЧХ определяют частоты сопряжения и позволяют рассчитать постоянные времени звеньев передаточной функции желаемой системы.

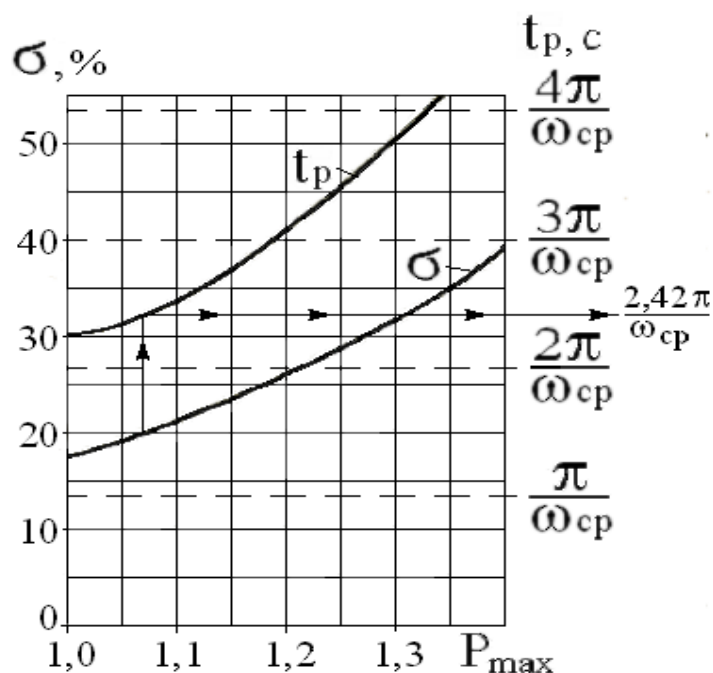


Рис. 6

Частоты сопряжения, принадлежащие желаемой ЛАЧХ, выпишем в порядке их возрастания.

$$\omega_1 = 0,18 \text{ с}^{-1}; \omega_2 = 6,6 \text{ с}^{-1}; \omega_3 = 138 \text{ с}^{-1}; \omega_4 = \omega_3 = 166,7 \text{ с}^{-1};$$

(звеном с частотой сопряжения $\omega_y = 1000 \text{ с}^{-1}$, превышающей частоту среза более, чем в 10 раз, можно пренебречь).

Постоянные времени, соответствующие частотам, равны $T_1 = 5,56 \text{ с}; T_2 = 0,151 \text{ с}; T_3 = 0,0072 \text{ с}; T_4 = 0,006 \text{ с}.$

Передаточная функция желаемой системы, по которой будут проверяться показатели качества управления, равна:

$$W_{\text{ж}}(s) = \frac{871 \cdot (0,151s + 1)}{(5,56s + 1) \cdot (0,0072s + 1) \cdot (0,006s + 1) \cdot s}$$

3.8. Получение и анализ переходной функции желаемой системы

Составим схему моделирования замкнутой системы для определения коэффициента перерегулирования и времени регулирования (рис. 7).

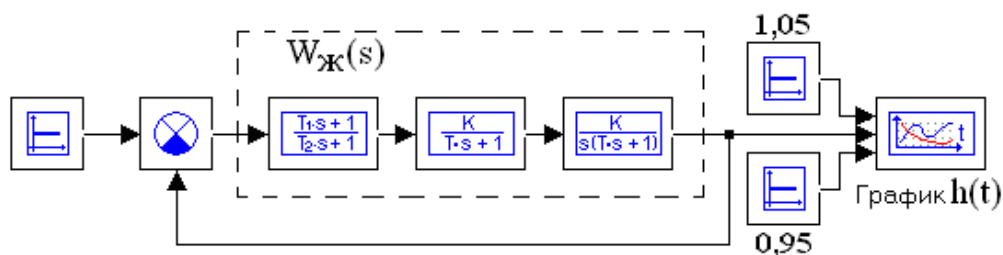


Рис. 7

Получим переходную функцию (рис.8) желаемой системы, по которой определим искомые показатели качества.

Коэффициент перерегулирования

$$\sigma = \frac{h_{\text{max}} - h(\infty)}{h(\infty)} \cdot 100\% = \frac{1,198 - 1}{1} \cdot 100\% = 19,8\% < 20\%$$

Время регулирования $t_p = 0,307 \text{ с} < 0,35 \text{ с}$.

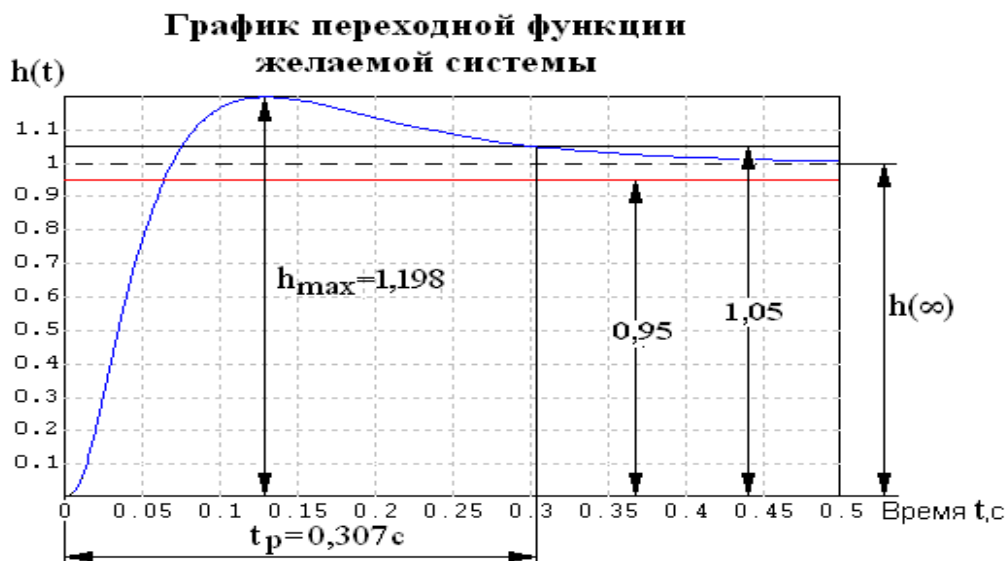


Рис. 8

3.9. Проверка установившейся ошибки желаемой системы

Перейдем к проверке точности системы на гармоническое входное воздействие $g(t) = g_m \cdot \sin \omega t = 7 \cdot \sin 0,2t$. Для этого составляем схему моделирования (рис. 9), позволяющую оценить величину ошибки ϵ_m желаемой замкнутой системы. При моделировании функции ошибки время интегрирования надо выбрать таким, чтобы достигнуть установившегося значения амплитуды ошибки.

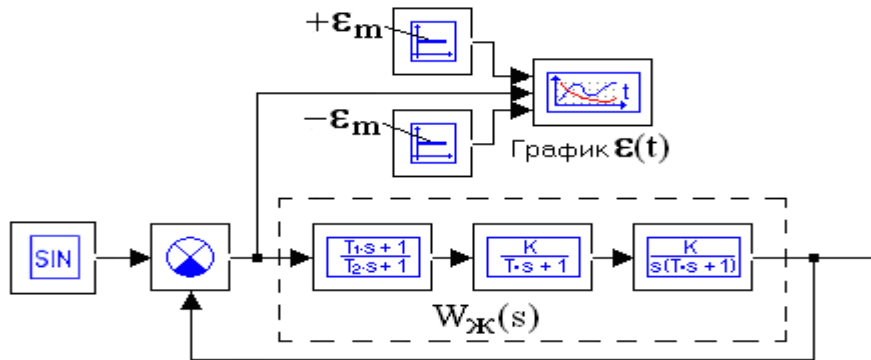


Рис. 9

Время интегрирования возьмем равным 5 периодам синусоидального входного воздействия

$$t_{\text{инт}} = 5 \cdot \frac{2\pi}{\omega_{\text{РАБ}}} = 5 \cdot \frac{2 \cdot 3,14}{0,2} = 157 \text{ с.}$$

Округленно берем $t_{\text{инт}} = 160$ с и

устанавливаем это время в параметрах расчета. Результаты моделирования приведены на рис. 10. По ним вычислим время одного периода и подсчитаем частоту

График функции ошибки желаемой системы $\epsilon(t)$, рад.

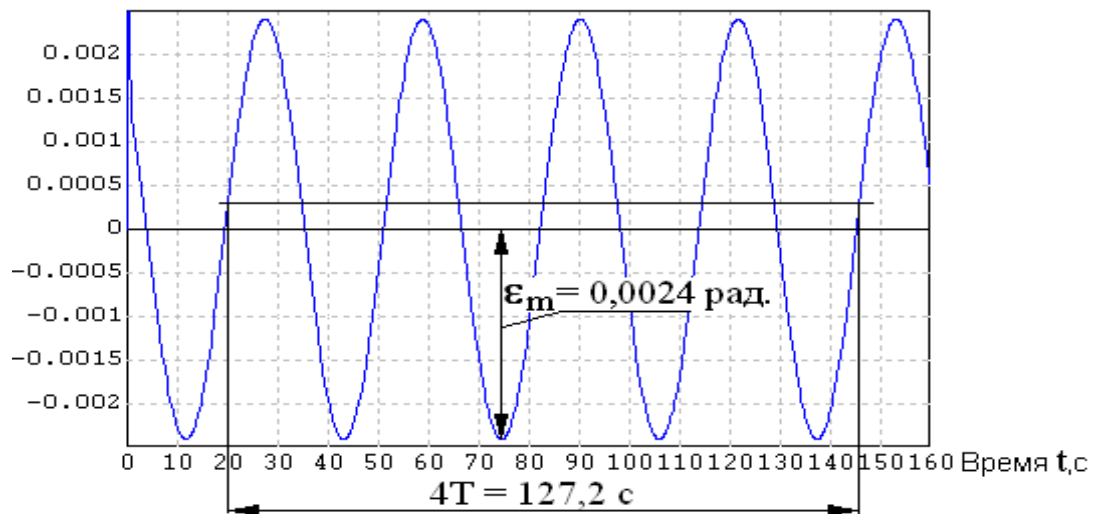


Рис. 10

входного воздействия, поступавшего на моделируемую систему.
 $T = 127,2/4 = 31,8c$,
 частота $\omega = 2\pi/T = 6,28/31,8 = 0,197c^{-1} \approx 0,2c^{-1}$, что соответствует заданию.

3.10. Логарифмические частотные характеристики желаемой системы

По схеме моделирования (рис. 11) для оценки запасов устойчивости желаемой системы получим её логарифмические частотные характеристики (рис. 12). и годограф Найквиста (рис. 13).

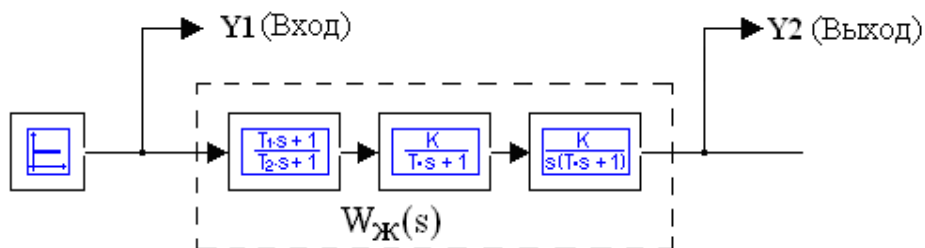


Рис. 11

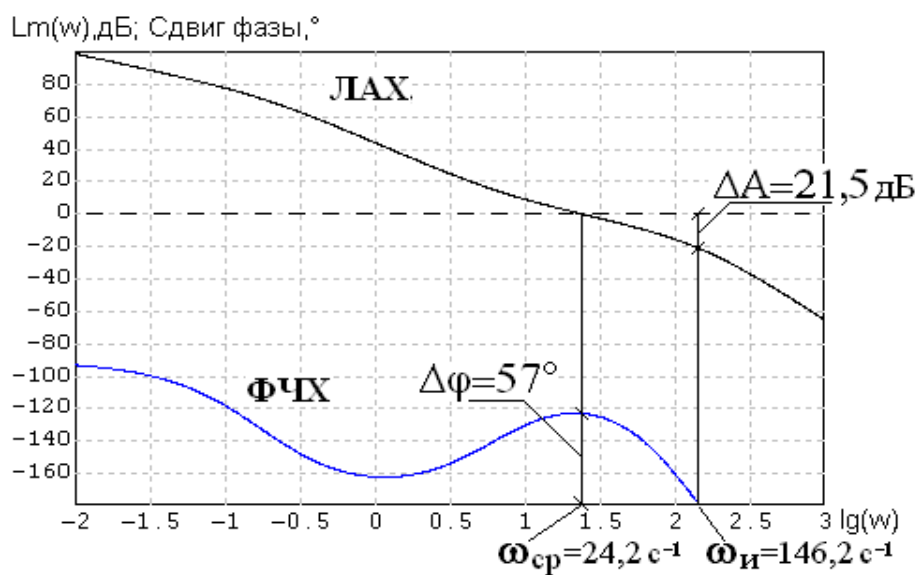


Рис. 12

Анализ логарифмических частотных характеристик показывает, что желаемая система имеет хорошие запасы устойчивости: 21,5 дБ по амплитуде и 57° по фазе.

3.11. Годограф Найквиста

Используя схему моделирования (рис. 11), получим годограф Найквиста (рис. 13), по которому выполним расчет запаса устойчивости по амплитуде ΔA :



Рис. 13

$$\Delta A = 20 \lg \frac{1}{|W(j\omega_n)|} = 20 \lg \frac{1}{0,084} = 21,51 \text{ дБ}.$$

3.12. Получение ЛАЧХ корректирующего устройства и его передаточной функции

Сформированная ЛАЧХ желаемой системы, как показало моделирование, удовлетворяет всем вышеизложенным требованиям качества управления. Поэтому путем введения последовательного корректирующего устройства необходимо так изменить ЛАЧХ– L_H неизменяемой системы, чтобы в диапазоне частот $0 < \omega < 1000$ 1/с ЛАЧХ скорректированной системы совпадала или была близка ЛАЧХ желаемой системы.

$$20 \lg |W_H(j\omega) \cdot \Pi(j\omega)| = 20 \lg |W_H(j\omega)| + 20 \lg |\Pi(j\omega)| = 20 \lg |W_{\text{Ж}}(j\omega)|$$

Обозначая: $20 \lg |W_H(j\omega)| = L_H$; $20 \lg |\Pi(j\omega)| = L_{\Pi}$ и $20 \lg |W_{\text{Ж}}(j\omega)| = L_{\text{Ж}}$, запишем в компактной форме $L_H + L_{\Pi} = L_{\text{Ж}}$. Из последнего вытекает, что для получения ЛАЧХ последовательного корректирующего устройства L_{Π} необходимо из желаемой ЛАЧХ – $L_{\text{Ж}}$ вычесть ЛАЧХ нескорректированной системы L_H , то есть $L_{\Pi} = L_{\text{Ж}} - L_H$.

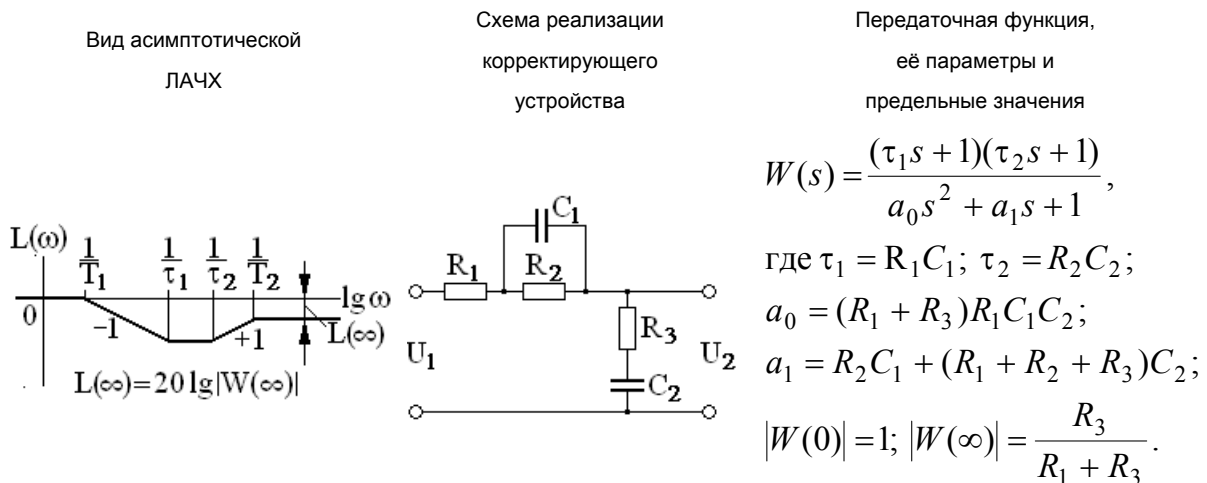
Выполняя процедуру вычитания для отдельных частотных диапазонов, получаем наклоны асимптот последовательного корректирующего устройства (рис. 3):

Диапазон частот, с ⁻¹	Наклон L _ж	Наклон L _н	Наклон L _п
0 < ω < 0,18	-1	-1	0
0,18 < ω < 6,6	-2	-1	-1
6,6 < ω < 31,25	-1	-1	0
31,25 < ω < 138	-1	-2	+1
138 < ω < 166,7	-2	-2	0
166,7 < ω < 1000	-3	-3	0

По полученному виду ЛАЧХ последовательного корректирующего устройства записываем его передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{(0,151s + 1)(0,032s + 1)}{(5,56s + 1)(0,0072s + 1)}$$

и далее из справочных данных (Приложение 3) выбираем схему его реализации под номером X.



По полученным числовым результатам постоянных времени передаточной функции корректирующего устройства рассчитываются величины сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов схемы.

3.13. Функциональная схема скорректированной системы управления

Произведение $\Pi(s) \cdot W_H(s)$ без учета малой постоянной времени $T_y = 0,001$ с равно передаточной функции желаемой системы $W_{\text{ж}}(s)$.

$$\frac{(0,151s + 1)(0,032s + 1)}{(5,56s + 1)(0,0072s + 1)} \cdot \frac{871}{(0,006 \cdot s + 1)(0,032 \cdot s + 1) \cdot s} = W_{\text{ж}}(s)$$

и, следовательно, все результаты моделирования динамики желаемой системы остаются справедливыми и для скорректированной системы.

Таким образом, процесс синтеза завершен, так как полученная система удовлетворяет всем заданным требованиям. Функциональная схема системы с включенным в неё корректирующим устройством приведена на рис. 14.

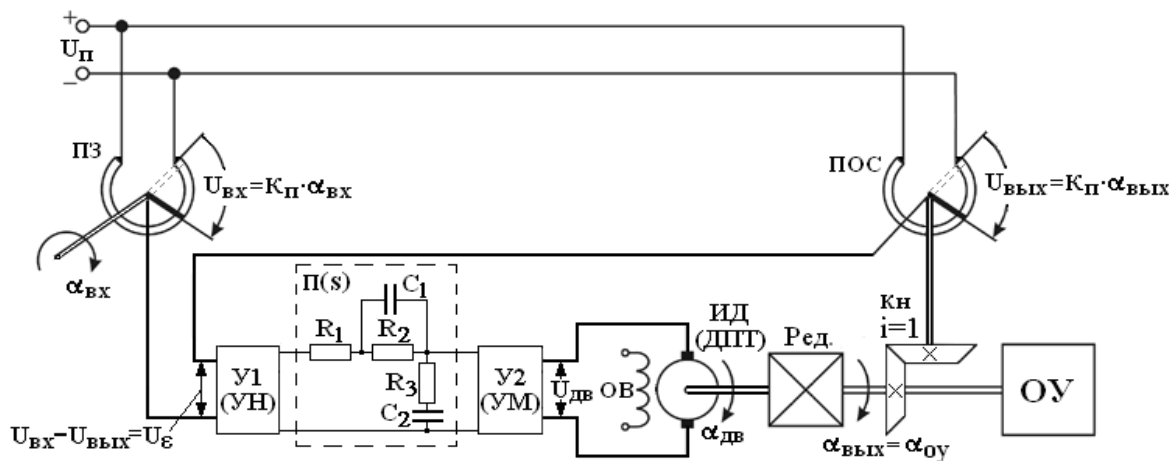


Рис. 14

4. Список литературы

1. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы. М.: Машиностроение, 1982.

2.

3. ...