

Министерство образования Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Ульяновский государственный технический университет

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания к выполнению курсовой работы для студентов
энергетического факультета дневной и заочной форм обучения

Составители
профессор М. А. Боровиков,
доцент М. В. Петрова

Ульяновск 2004

УДК 681.3.06 (076)

ББК 32.815 Я7

Т 33

Рецензент доктор технических наук В. Р. Крашенинников

Одобрено секцией методических пособий
научно-методического совета университета

Т33 Теория автоматического управления: Методические указания к выполнению курсовой работы для студентов энергетического факультета дневной и заочной форм обучения / Сост.: М. А. Боровиков, М. В. Петрова. – Ульяновск, : УлГТУ 2004. – 32 с.

Разработаны на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Составлены в соответствии с программой курса «Теория автоматического управления» для студентов вузов специальности 180400 дневной и заочной форм обучения.

Содержат задания на курсовую работу, перечень вопросов, подлежащих рассмотрению, методические указания по их выполнению и оформлению пояснительной записки. Наряду с традиционными методами ТАУ в «Методических указаниях» отражен оригинальный метод упреждающей коррекции, разработанный в УлГТУ на кафедре «ЭП и АПУ».

УДК 681.3.06 (076)
ББК 32.815 Я7

Учебное издание
Теория автоматического управления
Составители: Боровиков Михаил Алексеевич
Петрова Марина Валерьевна
Методические указания
Редактор Н. А. Евдокимова

Подписано в печать 02.04.2004. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,86
Уч. изд. л. 1,80. Тираж 100 экз. Заказ .

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32
Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Задания на курсовую работу	5
2. Перечень вопросов подлежащих рассмотрению	13
3. Методические указания по выполнению курсовой работы	13
3.1. Составление уравнений и передаточных функций отдельных звеньев и системы регулирования.....	14
3.2. Построение структурной схемы САУ и определение ее передаточных функций.....	14
3.3. Исследование системы на устойчивость и выполнение D – разбиения.....	16
3.4. Вывод уравнения статической характеристики и его исследование.....	17
3.5. Расчет параметров корректирующих звеньев.....	17
3.6. Синтез последовательных и параллельных корректирующих устройств методом логарифмических частотных характеристик.....	18
3.7. Синтез устройства упреждающей коррекции.....	21
3.7.1. Рекомендации по построению систем с упреждающей коррекцией.....	21
3.7.2. Порядок синтеза устройств упреждающей коррекции.....	25
3.8. Построение вещественной частотной характеристики замкнутой системы.....	27
3.9. Расчет переходных процессов методом трапеций.....	29
3.10. Расчет переходных процессов на ПЭВМ.....	30
Библиографический список	32

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с учебным планом специальности 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» при изучении теории автоматического управления (ТАУ) студенты выполняют курсовую работу, которая является заключительным этапом изучения дисциплины.

Цель курсовой работы – систематизировать, закрепить и расширить знания, полученные на лекциях и при выполнении лабораторных работ; развить навыки самостоятельной работы с технической литературой; приобрести творческие навыки при самостоятельном решении технических задач, связанных с различными этапами проектирования систем автоматического управления.

Исходными данными при выполнении курсовой работы являются принципиальная схема системы автоматического управления в исходном варианте (без коррекции), параметры неизменяемой части и технические требования, которым должна удовлетворять спроектированная система.

К техническим требованиям при выполнении курсовой работы по ТАУ относятся показатели качества, основными из которых являются время регулирования и максимальное перерегулирование при отработке управляющих воздействий.

В методических указаниях приведены пять заданий, каждое из которых содержит несколько вариантов. Перечень вопросов, подлежащих рассмотрению, для всех заданий один и тот же. Кроме упомянутых заданий студентам, активно занимающимся научно-исследовательской работой, могут выдаваться задания по ее профилю, при этом руководителями курсового проектирования могут быть руководители НИРС.

Результатом курсовой работы является расчетно-пояснительная записка, в которой должны быть приведены обоснования принятых при выполнении разделов работы решений, основные результаты расчетов по всем этапам проектирования и заключение по его итогам. Записка должна быть оформлена в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД, объем ее 20–30 страниц формата А4.

1. ЗАДАНИЯ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Задание 1

Расчет статической системы стабилизации напряжения генератора

Принципиальная схема САУ

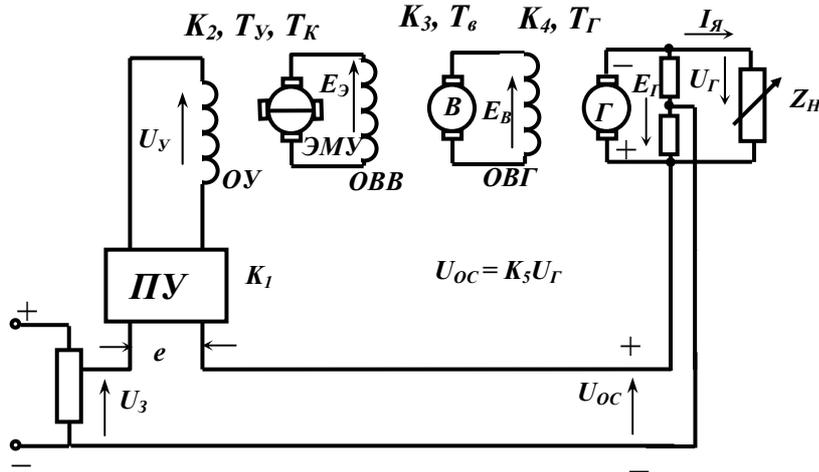


Рис. 1.1

Данные задания приведены в таблице 1.1.

Задание 2

Расчет астатической системы стабилизации напряжения генератора

Принципиальная схема САУ

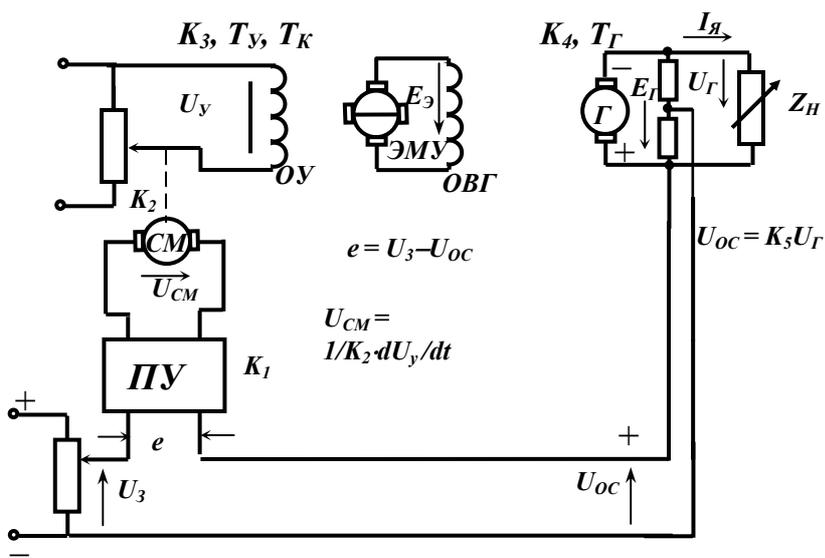


Рис. 1.2.

Данные задания приведены в таблице 1.2.

Задание 3

Расчет статической системы стабилизации скорости электродвигателя постоянного тока

Принципиальная схема САУ

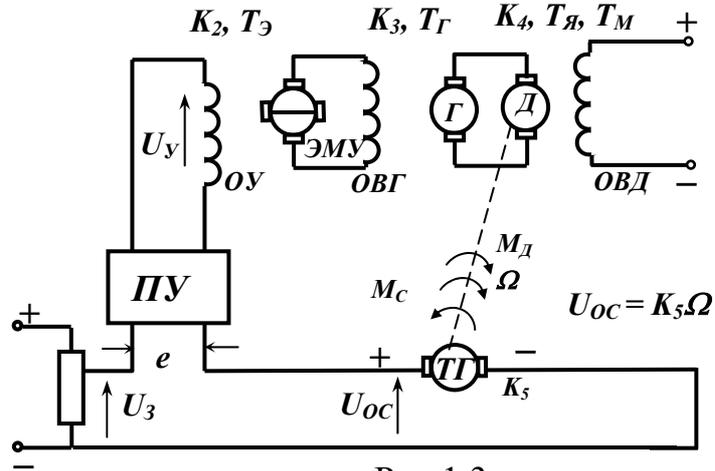


Рис.1.3

Данные задания сведены в таблицу 1.3.

Задание 4

Расчет астатической системы стабилизации скорости электродвигателя постоянного тока

Принципиальная схема САУ

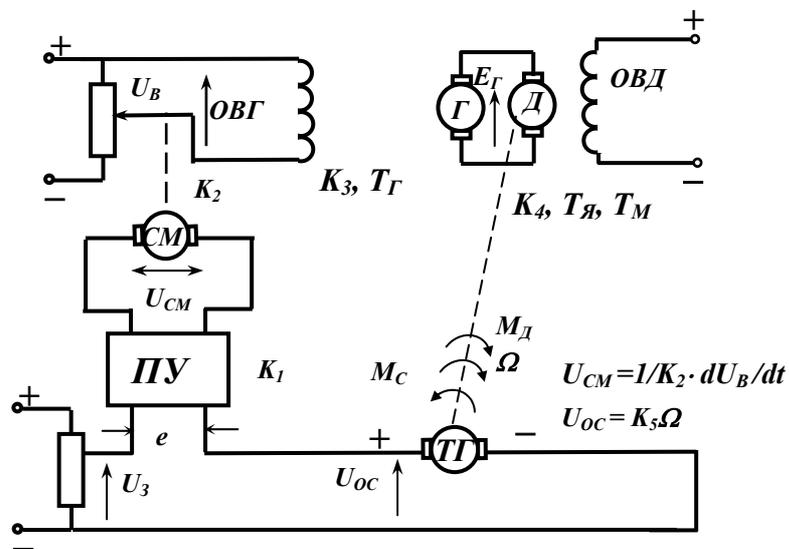


Рис. 1.4.

Данные задания сведены в таблицу 1.4.

Задание 5 Расчет следящей системы

Принципиальная схема САУ

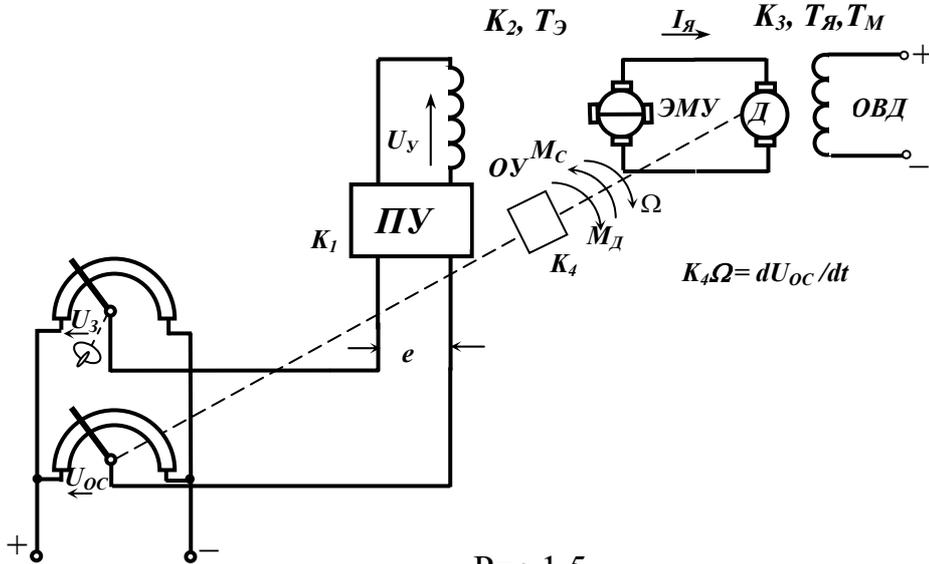


Рис.1.5

Данные задания сведены в таблицу 1.5.

Обозначения на схемах 1.1 – 1.5

$K_1 = \frac{\Delta U_y}{\Delta e}$ – коэффициент усиления промежуточного усилителя ПУ;

K_2, K_3, K_4, K_5 – коэффициенты передачи других звеньев систем;

$T_y, T_k = T_э$ – постоянные времени электромашинного усилителя;

T_b, T_g – постоянные времени возбудителя и генератора;

$T_я, T_м$ – постоянные времени двигателя;

$I_я, \Omega$ – ток якоря и скорость двигателя;

$M_д, M_с$ – электромагнитный момент двигателя и момент статический (сопротивления движению);

$e = U_3 - U_{oc}$ – сигнал ошибки (отклонение) в системах.

Таблица 1.1

№ вар.	Данные элементов САР									Требования задания				
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	T _У , с	T _К , с	T _В , с	T _Г , с	t _{рег} , с	σ _м , %	Критерии	Д-разбиение	Тип коррекции
1	10	1,5	1,5	5	0,8	0,01	0,1	0,2	0,5	0,6	5,0	Рауса	по K ₁	Последовательная
2	12	2,5	1,8	4,5	0,5	0,015	0,09	0,25	0,6	0,75	5,0	Гурвица	по T ₄	Упреждающая
3	15	2,0	1,6	4,0	0,45	0,02	0,085	0,15	0,45	0,45	5,0	Михайлова	по T ₂	Параллельная
4	10	3,0	2,0	3,5	0,48	0,01	0,12	0,21	0,55	0,65	5,0	Найквиста	по K _{общ}	Упреждающая
5	20	5,0	1,8	2,5	0,4	0,15	0,11	0,24	0,6	0,68	5,0	Рауса	по T ₃	Последовательная
6	15	2,0	2,6	3,5	0,45	0,02	0,13	0,25	0,55	0,75	5,0	Гурвица	по T ₂	Упреждающая
7	10	3,0	2,5	5,0	0,52	0,018	0,15	0,24	0,62	0,72	5,0	Михайлова	по K ₁	Параллельная
8	20	2,5	3,0	3,5	0,6	0,01	0,1	0,25	0,65	0,72	5,0	Найквиста	по K _{общ}	Упреждающая
9	15	3,5	2,4	3,5	0,62	0,02	0,15	0,3	0,6	0,9	5,0	Рауса	по T ₄	Параллельная
10	12	2,5	2,2	2,9	0,64	0,015	0,12	0,24	0,55	0,72	5,0	Гурвица	по K ₁	Параллельная
11	15	2,0	2,1	3,0	0,55	0,012	0,14	0,28	0,6	0,84	5,0	Михайлова	по T ₃	Упреждающая
12	18	2,8	2,0	2,5	0,6	0,01	0,15	0,3	0,45	0,9	5,0	Найквиста	по K ₁	Параллельная

Таблица 1.2

№ вар.	Данные элементов САР								Требования задания				
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	T _γ , с	T _κ , с	T _Γ , с	t _{рег} , с	σ _м , %	Критерии	Д-разбиение	Тип коррекции
1	10	0,4	10	2	0,85	0,05	0,3	0,9	1,3	35	Гурвица	по K _{общ}	Последовательная
2	10,4	0,4	12	2	0,9	0,05	0,2	0,8	1,3	35	Рауса	по T _γ	Упреждающая
3	9,8	0,5	10	2	1	0,05	0,3	0,7	1,2	35	Михайлова	по T _B	Параллельная
4	9,5	0,4	10	2	0,9	0,04	0,2	0,8	1,2	35	Найквиста	по T _κ	Упреждающая
5	9,6	0,6	12	2	0,85	0,05	0,3	0,9	1,3	35	Михайлова	по K _{общ}	Последовательная
6	10,2	0,5	12	2	0,75	0,03	0,15	0,7	1,2	35	Рауса	по T _κ	Упреждающая
7	9,8	0,4	10	1,5	0,8	0,03	0,2	0,9	1,2	35	Гурвица	по T _B	Параллельная
8	9,7	0,45	10	2	0,8	0,04	0,3	0,8	1,3	35	Найквиста	по T _γ	Упреждающая
9	10	0,4	10	1,5	1	0,02	0,1	0,6	1,3	35	Гурвица	по K _{общ}	Последовательная
10	10,2	0,5	10	1,8	0,9	0,03	0,13	0,5	1,2	35	Михайлова	по T _γ	Упреждающая
11	10,5	0,45	10	2	0,8	0,05	0,15	0,6	1,2	35	Рауса	по T ₁	Параллельная
12	10	0,55	11	1,5	0,9	0,04	0,2	0,48	1,2	35	Найквиста	по T _κ	Последовательная

Примечания: 1. Инерционностью сервомотора СМ и наличием момента трения на его валу можно пренебречь.
2. Основным возмущающим воздействием считать изменения тока нагрузки генератора.

Таблица 1.3

№ вар.	Данные элементов САР									Требования задания				
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄ с ⁻¹ /В	K ₅ в/с ⁻¹	T _Э , с	T _М , с	T _Я , с	T _Г , с	t _{рег} , с	σ _м , %	Критерии	Д-разбиение	Тип коррекции
1	9,5	6	2	0,81	1,1	0,2	0,15	0,03	0,16	0,4	5,0	Гурвица	по K _{общ}	Последовательная
2	10	5	2,1	0,73	1,2	0,03	0,2	0,04	0,18	0,4	5,0	Михайлова	по T _В	Параллельная
3	10,5	6	2,4	0,9	1,1	0,04	0,1	0,02	0,2	0,4	5,0	Найквиста	по T _Я	Упреждающая
4	11	5	2,2	0,75	1,2	0,05	0,12	0,02	0,15	0,4	5,0	Гурвица	по T _М	Параллельная
5	9,5	6	1,8	0,85	1,0	0,04	0,11	0,02	0,14	0,4	5,0	Михайлова	по K _{общ}	Упреждающая
6	10	5	2	0,72	1,3	0,05	0,13	0,03	0,16	0,4	5,0	Найквиста	по T _В	Последовательная
7	9,5	6	2,5	0,83	1,4	0,04	0,16	0,03	0,17	0,4	5,0	Рауса	по K _{общ}	Упреждающая
8	10	5	2,3	0,74	1,2	0,05	0,14	0,03	0,19	0,4	5,0	Гурвица	по T _М	Параллельная
9	9,5	6	2,2	0,81	1,0	0,03	0,15	0,03	0,2	0,4	5,0	Михайлова	по T _Э	Упреждающая
10	10	5	1,9	0,84	1,1	0,04	0,1	0,02	0,16	0,4	5,0	Найквиста	по K _{общ}	Упреждающая
11	10,5	6	2,1	0,8	1,2	0,05	0,12	0,02	0,18	0,4	5,0	Рауса	по T _М	Последовательная
12	9,5	5	2,2	0,85	1,3	0,045	0,15	0,03	0,2	0,5	5,0	Гурвица	по T _В	Параллельная

$$R_{Я} = 0,5 \text{ Ом}$$

Таблица 1.4

№ вар.	Данные элементов САР								Требования задания				
	K_1	K_2, c^{-1}	K_3	$K_4, c^{-1}/B$	$K_5, B/c^{-1}$	T_M, c	$T_{я}, c$	$T_{Г}, c$	$t_{пер}, c$	$\sigma_m, \%$	Критерии	Д-разбиение	Тип коррекции
1	10	2	10	0,82	1,1	0,15	0,25	0,16	1,25	40	Рауса	по T_M	Последовательная
2	10	2,5	12	0,83	1,2	0,2	0,04	0,18	1,3	40	Гурвица	по T_B	Параллельная
3	10	1,8	10	0,85	1,1	0,11	0,025	0,2	1,3	40	Михайлова	по K_1	Упреждающая
4	11	2,5	10	0,81	1,2	0,12	0,02	0,16	1,25	40	Найквиста	по K_2	Упреждающая
5	10	2	12	0,78	1,1	0,11	0,025	0,15	1,25	40	Рауса	по $K_{общ}$	Упреждающая
6	11	1,8	12	0,8	1,3	0,13	0,03	0,16	1,3	40	Гурвица	по $T_{я}$	Последовательная
7	11	2,3	10	0,81	1,2	0,16	0,03	0,17	1,25	40	Михайлова	по T_B	Упреждающая
8	10	1,8	10	0,85	1,1	0,14	0,03	0,19	1,3	40	Найквиста	по T_M	Последовательная
9	10	2	10	0,8	1,2	0,15	0,03	0,2	1,25	40	Рауса	по $K_{общ}$	Упреждающая
10	10	2,5	10	0,82	1,1	0,12	0,02	0,16	1,3	40	Гурвица	по T_B	Последовательная
11	10	2	10	0,83	1,2	0,13	0,02	0,18	1,25	40	Найквиста	по T_M	Упреждающая
12	10	2	11	0,84	1,3	0,15	0,03	0,2	1,3	40	Михайлова	по K_2	Последовательная

Примечание: Инерционностью сервомотора СМ и наличием момента трения на его валу можно пренебречь.

$$R_{я} = 0,5 \text{ Ом}$$

Таблица 1.5

№ вар.	Данные элементов САР							Требования задания				
	K ₁	K ₂	K ₃ , I/(C·B)	K ₄ , B	T _Э , с	T _М , с	T _Я , с	t _{рег} , с	σ _м , %	Критерии	Д-разбиение	Тип коррекции
1	10	4	5	0,0385	0,04	0,17	0,03	0,85	35	Рауса	по K _{общ}	Последовательная
2	40	2	3	0,73	0,02	0,06	0,01	0,45	35	Гурвица	по T _Э	Упреждающая
3	30	2,5	4	0,58	0,02	0,14	0,02	0,9	35	Михайлова	по T _М	Параллельная
4	20	2	4	0,625	0,014	0,06	0,01	0,7	35	Найквиста	по K ₄	Последовательная
5	20	3	5	0,443	0,02	0,10	0,02	0,8	35	Рауса	по K _{общ}	Упреждающая
6	100	2	2	0,625	0,014	0,14	0,04	0,85	35	Гурвица	по T _Э	Параллельная
7	100	1,5	3	0,735	0,02	0,17	0,03	0,8	40	Михайлова	по T _Я	Последовательная
8	20	2	4	0,357	0,035	0,125	0,02	0,9	35	Найквиста	по K _{общ}	Упреждающая
9	30	2	3,5	0,83	0,015	0,14	0,03	0,75	35	Михайлова	по T _М	Упреждающая
10	30	2	3	0,7	0,025	0,17	0,04	1	40	Найквиста	по K ₄	Последовательная
11	40	1,5	3,5	0,36	0,015	0,18	0,03	0,9	35	Рауса	по T _Э	Упреждающая
12	30	2	4	0,45	0,02	0,2	0,03	1	40	Гурвица	по K ₃	Последовательная

$$R_d = 1 \text{ Ом}$$

2. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ, ПОДЛЕЖАЩИХ РАССМОТРЕНИЮ

2.1. Дать краткое описание принципа действия системы.

2.2. Расчленить систему на элементы (звенья) и составить линеаризованные дифференциальные уравнения и передаточные функции для каждого звена. Получить выражения для коэффициентов передачи и постоянных времени.

2.3. Построить структурную схему САУ.

2.4. Вывести выражения для передаточных функций системы в разомкнутом и замкнутом состояниях по управляющему и возмущающему воздействиям.

2.5. Проверить исходную систему на устойчивость по указанным в таблицах 1.1–1.5 критериям.

2.6. Выполнить D – разбиение по указанным в таблицах 1.1–1.5 параметрам.

2.7. Вывести выражение для статической характеристики системы и произвести его качественное исследование.

2.8. Рассчитать параметры корректирующего звена, указанного в таблице типа, обеспечивающего показатели качества не хуже требуемых заданием. Привести схему системы с заключенными цепями коррекции.

2.9. Построить вещественную частотную характеристику замкнутой скорректированной системы по управляющему воздействию.

2.10. Рассчитать кривую переходного процесса отработки единичного скачка по управляющему воздействию методом трапеций.

2.11. Рассчитать кривую переходного процесса отработки единичных скачков управляющего воздействия на ПЭВМ. Построить рассчитанные вручную и на ПЭВМ кривые и сравнить полученные результаты.

2.12. Составить краткие выводы о выполненной работе.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Прежде чем приступить к выполнению расчетной части работы, необходимо четко уяснить принцип действия системы, которая подлежит расчету в соответствии с заданием. При этом нужно иметь в виду, что система построена по принципу отклонения, повторить особенности функционирования каждого элемента системы при передаче им управляющего или возмущающего воздействий и на основании этого дать краткое, но исчерпывающее описание переходного процесса уменьшения (ликвидирования) отклонения регулируемой величины от заданного значения, возникшего под действием изменения управляющего или возмущающего воздействий.

3.1. Составление уравнений и передаточных функций отдельных звеньев и системы регулирования

Первым этапом расчетной части работы является составление дифференциальных уравнений и передаточных функций, входящих в систему звеньев. Общий порядок составления дифференциальных уравнений заключается в следующем.

1. Принимаются допущения, позволяющие упростить рассмотрение динамических свойств звеньев и их математическое описание.

2. С учетом допущений записываются исходные уравнения, отражающие физические законы, которым подчиняется каждое звено.

3. В настоящей курсовой работе расчет ведется с позиций линейной теории, поэтому исходные уравнения необходимо линеаризовать. С этой целью для каждой координаты рассматриваются малые отклонения (приращения) относительно установившегося режима. В окрестности этих малых отклонений необходимо произвести линеаризацию имеющихся нелинейных зависимостей путем разложения их в ряд Тейлора и отбрасывания членов разложения, содержащих приращения выше первого порядка. Подставляя линеаризованные зависимости в исходные дифференциальные уравнения и исключая из них уравнения статики, получают линейные (а точнее, линеаризованные) уравнения, справедливые для малых отклонений.

4. Приводя линеаризованные уравнения к принятой в теории автоматического управления форме, т. е. располагая их по старшинству производных, получают окончательные уравнения, которые представляют собой исходные данные для построения структурной схемы и дальнейших исследований системы. При выводе уравнений целесообразно ознакомиться с примерами, приведенными в пособиях по расчету систем автоматического управления и регулирования, например в [5,6,7]. Аналогичные примеры имеются в учебниках и учебных пособиях [1-4].

3.2. Построение структурной схемы САУ и определение ее передаточных функций

Структурная схема САУ строится по уравнениям в операторной форме для отдельных звеньев и представляет собой одну из форм математического описания системы. Исходные уравнения отдельных звеньев разрешают относительно выходных координат так, что в правой части находилась алгебраическая сумма произведений передаточных функций звена на изображения управляющих и возмущающих воздействий, после чего можно построить структурную схему.

Построение ее целесообразно начать с уравнения элемента сравнения, для чего в левой части рисунка стрелками отображаются задающее воздействие, приложенное к одному из входов, а к второму входу – сигнал обратной связи, приложенный с другим знаком. Это обстоятельство подчеркивается затемнением соответствующего сектора в изображении элемента сравнения (рис.3.1).

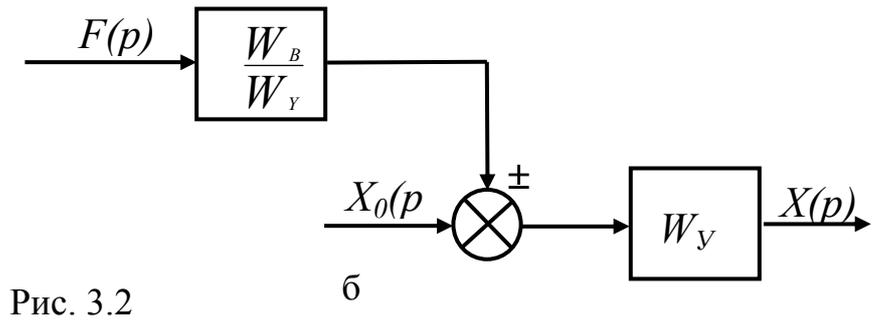
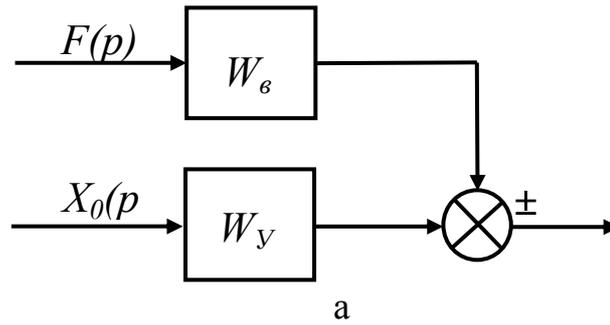
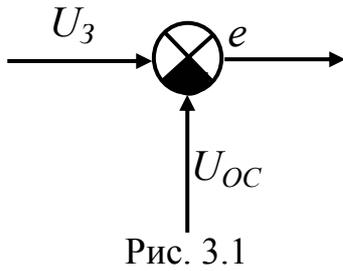


Рис. 3.2

Далее изображается структурная схема каждого звена с учетом действующих управляющих и возмущающих воздействий, причем суммирование составляющих можно производить и на выходе, и на входе звена в зависимости от того, как представить его уравнение. Так, если уравнение звена приведено к виду

$$X(p) = W_Y(p)X_0(p) \pm W_\epsilon(p)F(p), \quad (3.1)$$

где W_Y, W_B – передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям;

$X_0(p), F(p)$ – изображения воздействий.

Структурная схема звена приводится к виду рис. 3.2, а. Если вынести в выражении (3.1) $W_Y(p)$ за скобки, то получим выражение

$$X(p) = W_Y(p) \left[X_0 \pm \frac{W_B(p)}{W_Y(p)} F(p) \right]. \quad (3.2)$$

При этом структурная схема приобретает вид рис. 3.2, б, на которой воздействия суммируются на входе звена. Отметим, что такую же структурную схему можно было получить, пользуясь правилами переноса воздействий при преобразовании структурных схем [1,2].

Объединяя структурные схемы отдельных звеньев путем соединения соответствующих входных и выходных воздействий, получим полную структурную схему. Пользуясь соответствующими правилами преобразования

структурных схем, далее можно получить необходимые выражения передаточных функций замкнутой и разомкнутой системы по управляющему и возмущающему воздействиям.

3.3. Исследование системы на устойчивость и выполнение D-разбиения

Исследование системы на устойчивость при выполнении курсовой работы производится по указанному в задании критерию. При этом следует иметь в виду следующие особенности.

Исходным при проверке системы по критериям Рауса и Гурвица является характеристическое уравнение замкнутой системы, которое определяется как приравненный нулю знаменатель передаточной функции замкнутой же системы. Оба критерия относятся к группе алгебраических, проверка по которым сводится к вычислению ряда определителей.

При исследовании по критерию Михайлова анализируется поведение характеристического полинома **замкнутой** системы (знаменателя ее передаточной функции) при подстановке в него $p = j\omega$ и изменении ω от 0 до ∞ (годограф Михайлова). Построив годограф или исследовав поведение его вещественной и мнимой частей, можно сделать суждение об устойчивости системы.

Исследование системы на устойчивость по критерию Найквиста производится путем построения амплитудно-фазовой характеристики **разомкнутой** системы, которая определяется ее передаточной функцией при замене $p = j\omega$. При проверке системы по критерию Найквиста можно разрывать систему в любой точке, однако в месте разрыва определяется и вход, и выход системы. Как правило, размыкают систему по цепи главной обратной связи. При этом, для того чтобы обратная связь была единичной, достаточно за выход системы принимать сигнал обратной связи.

Для проверки влияния некоторых параметров системы на ее устойчивость выполняется D-разбиение. Для этого в характеристическом уравнении замкнутой системы делается замена $p = j\omega$, и оно разрешается относительно интересующих параметров, которые в таком случае представляются как комплексные. Построив годограф этих параметров на комплексной плоскости при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$, тем самым получают границу разбиения плоскости параметров на области с различным распределением корней. После выполнения штриховки определяется область – претендент на устойчивость. Для того чтобы убедиться, является ли этот претендент действительно областью устойчивости, необходимо проверить систему на устойчивость при любых значениях параметра, взятых из найденной области. После этого можно сделать окончательный вывод, в каких пределах можно изменять параметры без

потери устойчивости или вообще о наличии или отсутствии области устойчивости при изменении конкретных параметров.

3.4. Вывод уравнения статической характеристики и его исследование

Уравнение статической характеристики замкнутой системы может быть получено путем разрешения выражений для передаточных функций замкнутой системы по управляющему и возмущающим воздействиям относительно выходной координаты и применения принципа наложения. При этом результирующее выражение приобретает вид, аналогичный (3.1) для одного звена:

$$\begin{aligned} X(p) &= W_{3v}(p) X_0(p) \pm W_{3b1}(p) F_1(p) \pm \dots \pm W_{3bk}(p) F_k(p) = \\ &= W_{3v}(p) X_0(p) \pm \sum_{i=1}^K W_{3bi}(p) F_i(p). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Полагая в выражении (3.3) $p=0$, получим уравнение статической характеристики, справедливое для малых отклонений управляющих и возмущающих воздействий от установившихся значений, в окрестности которых заданы параметры звеньев. Так как в данной курсовой работе заданием предусмотрен учет лишь одного возмущающего воздействия, то в выражении (3.3) $i=K=1$.

Имея выражение для статической характеристики, нетрудно выявить влияние возмущений и коэффициентов усиления отдельных звеньев и общего на ее точность. В этом заключается сущность исследования статических свойств системы.

3.5. Расчет параметров корректирующих звеньев

Расчет параметров корректирующих звеньев (синтез корректирующих звеньев) является важнейшим этапом проектирования систем автоматического управления вообще и выполнения данной курсовой работы в частности. Корректирующие звенья должны не только обеспечить устойчивость системы, но и придать ей требуемые показатели качества переходных процессов.

При выполнении этапа синтеза корректирующих звеньев в данной работе следует учитывать следующие особенности:

1. Общий коэффициент усиления как для случая статических, так и для астатических систем следует считать заданными, причем его значение должно сохраниться (не уменьшиться) при введении корректирующих устройств. Поэтому при синтезе корректирующих устройств последовательного и параллельного типов, например с использованием метода логарифмических амплитудных частотных характеристик (ЛАЧХ), низкочастотная асимптота ЛАЧХ скорректированной системы считается заданной, совпадающей с асимптотой характеристики исходной, не скорректированной системы. При

синтезе устройства упреждающей коррекции нет необходимости в построении ЛАЧХ, однако указанное требование также должно найти отражение, как при построении структуры скорректированной системы, так и при расчете вещественной частотной характеристики $p(\omega)$ скорректированной системы.

2. Синтез следует осуществлять, предполагая, что будут выбраны корректирующие звенья, относящиеся к категории физически реализуемых и не приводящие к уменьшению помехозащищенности системы. Такими звеньями являются, например, упругие звенья интегрирующего и интегро-дифференцирующего типа, включаемые последовательно в основной тракт системы, и их аналоги, образуемые антипараллельными соединениями некоторых участков системы (параллельная коррекция), а также суммирующие звенья и фильтры низких и высоких частот (апериодические звенья) – при синтезе устройств упреждающей коррекции.

Наибольшее распространение при синтезе последовательных и параллельных корректирующих звеньев получили методы, базирующиеся на построении логарифмических амплитудно-частотных характеристик. Эти методы исходят из теоретически обоснованного и экспериментально подтверждаемого факта существования связи между видом ЛАЧХ разомкнутой системы и показателями качества замкнутой. Отмеченная связь отражена в ряде диаграмм (номограмм), существенно облегчающих расчет. Следует только подчеркнуть, что приводимые в литературе [1-7] номограммы получены как результаты обобщения переходных процессов следящих систем, которые являются астатическими и для которых при традиционных методах коррекции трудно получить переходные процессы отработки скачка с перерегулированием менее 35÷30%. Для случая статических систем можно обойтись и без привлечения ниже приводимых номограмм по определению чистоты среза $L_{СК}(\omega)$, так как на них нет точек, соответствующих легко реализуемым и предписанным заданием значениям перерегулирования σ_m .

При синтезе устройств упреждающей коррекции задача сводится к реализации структуры с дифференциальными связями, правила наложения которых и номинальные значения параметров определяются из исходной структуры не скорректированной системы.

Рассмотрим кратко порядок синтеза корректирующих звеньев различных типов.

3.6. Синтез последовательных и параллельных корректирующих устройств методом логарифмических частотных характеристик

Синтез традиционных корректирующих устройств производится путем сопоставления ЛАЧХ не скорректированной системы (исходной) системы $L_{ИС}(\omega)$ и ЛАЧХ скорректированной системы $L_{СК}(\omega)$, которую в некоторых источниках называют «желаемой ЛАЧХ». Стержневым вопросом при этом

является построение $L_{CK}(\omega)$, которая строится в соответствии с требованиями задания t_{pez} и σ_m по методике, изложенной, например, в [3, §12.5]. Методика базируется на использовании номограмм $\sigma_m = f_1(P_{max})$ и $t_{pez} = f_2(\sigma_m, P_{max})$, а также $\Delta L = f_3(\sigma_m)$ и $\Delta\varphi = f_4(\sigma_m)$, приведенных на рис. 3.3 и рис. 3.4.

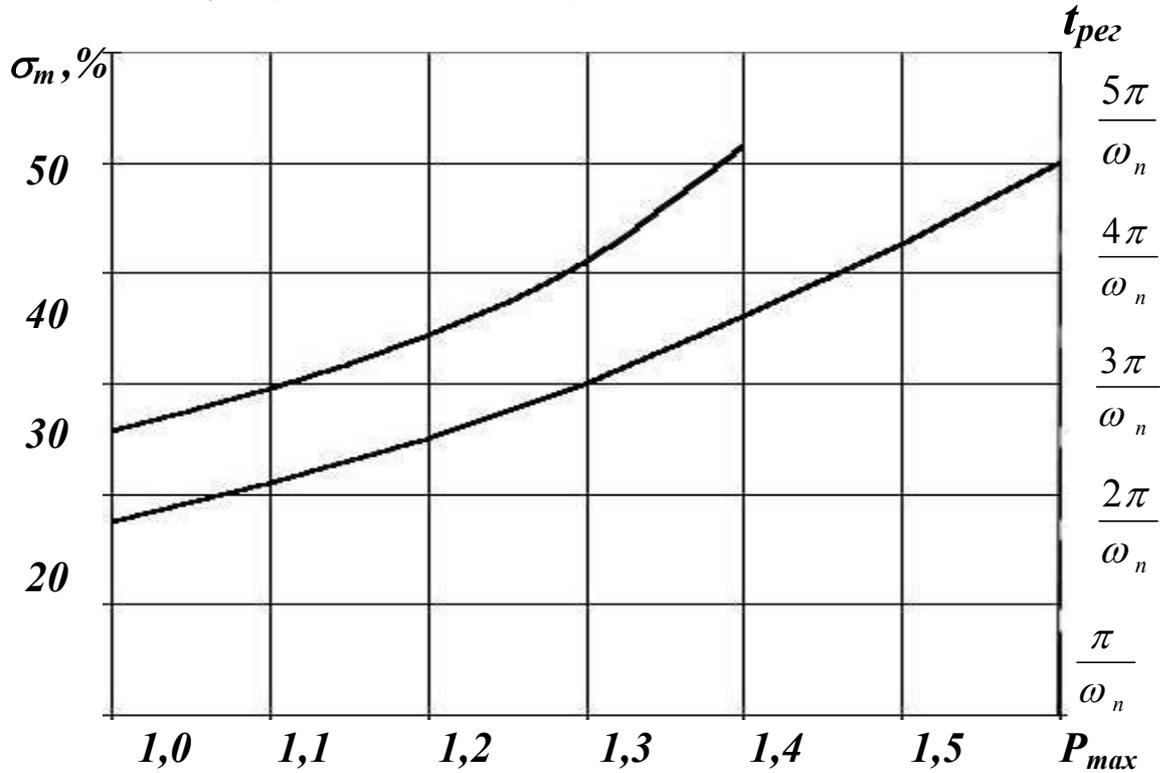


Рис. 3.3

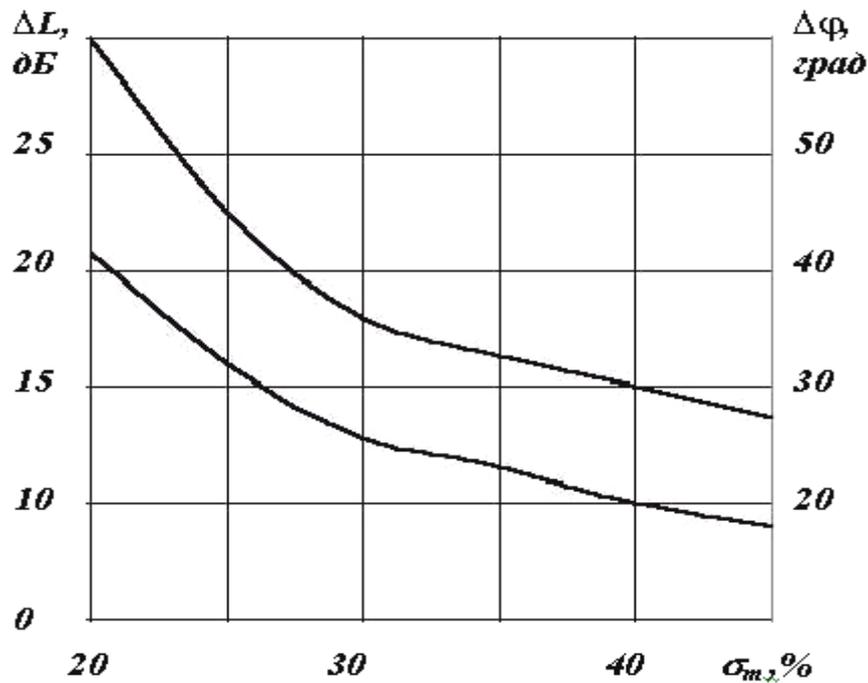


Рис. 3.4

Однако, анализ многолетнего опыта использования результатов этой методики показывает, что она часто приводит к построению $L_{СК}(\omega)$, не удовлетворяющей требованиям физической реализуемости корректирующих устройств, что проявляется в условии

$$\omega_{с\text{ СК}} < \omega_{с\text{ ИС}} \quad (3.4)$$

Поэтому предпочтение следует отдавать построению $L_{СК}(\omega)$, которая потребует применения корректирующих звеньев, заведомо физически реализуемых.

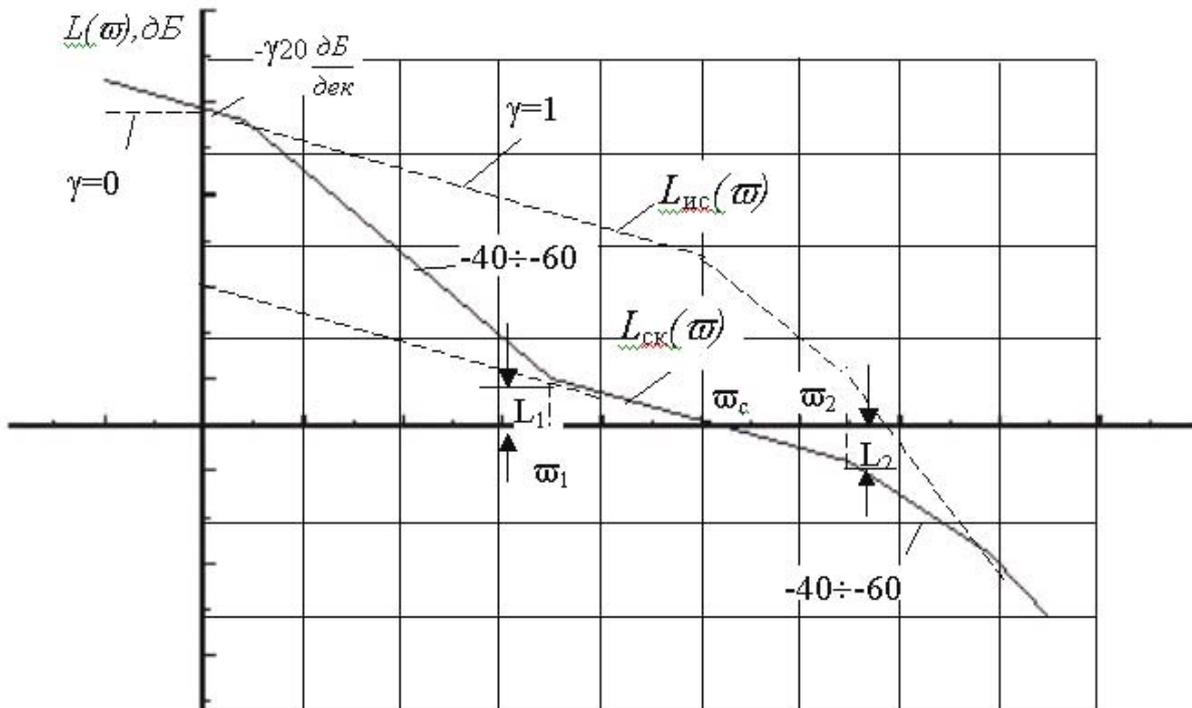


Рис. 3.5.

Порядок построения $L_{СК}(\omega)$ в этом случае выглядит так.

1. При частоте ω_2 перегиба асимптотической $L_{ИС}(\omega)$ от наклона $-40 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$ к наклону $-60 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$ назначается ордината $L_2 \approx -(6 \div 9) \text{дБ}$ и от найденной таким образом точки проводится среднечастотная часть $L_{СК}(\omega)$ с наклоном $-20 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$. Полученная при этом частота среза принимается как предварительная на данном этапе расчета и далее уточняется в зависимости от определенных запасов устойчивости ΔL и $\Delta \varphi$ и удобства реализации корректирующего устройства.

2. Если система статическая, то среднечастотная часть (участок с наклоном $-20 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$) продолжается до точки пересечения с горизонтальным участком $L_{ис}(\omega)$.

3. Если система астатическая, причем $\nu=1$, как это имеет место в рассматриваемых заданиях, то среднечастотный участок определяется условием $L_1 \approx |L_2|$ (рис. 3.5).

4. Сопряжение среднечастотного участка $L_{ск}(\omega)$ с низкочастотным и высокочастотным производится асимптотами с наклоном $-40 \div -60 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$. Примерный вид $L_{ск}(\omega)$ и ее расположение относительно $L_{ис}(\omega)$ приведены на рис. 3.5.

После окончательного формирования $L_{ск}(\omega)$ необходимо проверить действительные запасы по модулю и фазе и избыток фазы на границах среднечастотного участка. Для этого по $L_{ск}(\omega)$ определяется выражение для фазочастотной характеристики $\varphi_{ск}(\omega)$ и рассчитываются ее значения в интересующих точках.

5. Далее по желаемой и исходной ЛАЧХ определяется, в зависимости от задания, логарифмическая амплитудная характеристика последовательного корректирующего звена или звена обратной связи, находится передаточная функция и рассчитываются параметры, обеспечивающие ее реализацию. При этом следует руководствоваться порядком, изложенным, например в [2, § 11.3] или в [6 § 4.4].

3.7. Синтез устройства упреждающей коррекции

Системы с упреждающей коррекцией по способу [8], разработанному в Ульяновском политехническом институте, обладают пониженной чувствительностью к вариациям параметров и более высоким быстродействием «в малом», чем системы с традиционными последовательным и параллельным способами коррекции при существующих методах их расчета. Вопросы теории и расчета систем с упреждающей коррекцией подробно изложены в [9].

В настоящем пособии даны лишь рекомендации по реализации систем с упреждающей коррекцией и расчету параметров устройств коррекции (модели и фильтров).

3.7.1. Рекомендации по построению систем с упреждающей коррекцией

Сущность способа упреждающей коррекции, применительно к одноконтурным системам поясняется структурой рис. 3.6, а и заключается в том, что в системе производится компенсация влияния некоторых звеньев W_x на устойчивость, для чего необходимо их входной сигнал x_1 пропустить

через безынерционное звено K_{XM} , коэффициент передачи которого должен быть равным коэффициенту передачи K_X звеньев W_X , сравнить с выходным сигналом x_2 , в результате сформировать упреждающий сигнал x_{VII} , пропустить его через модель W_{OM} звеньев W_0 , оставшихся вне дополнительного контура коррекции, и полученный сигнал x_K подать на вход регулятора W_P системы как сигнал отрицательной обратной связи.

Рациональное использование метода упреждающей коррекции обеспечивается при соблюдении следующих рекомендаций:

1. В качестве звеньев W_X желательно выбирать звенья с малой инерционностью, меньше чем у звена W_0 , хотя порядок W_X может быть и высоким. Звено W_0 должно иметь первый порядок, то есть это может быть апериодическое или интегрирующее звено. Регулятор W_P в системе с упреждающей коррекцией может выполняться в виде безынерционного звена (П–регулятора по терминологии [10]), то есть

$$W_P(p) = K_P, \quad (3.5)$$

причем значение K_P может быть как угодно большим ($K_P \rightarrow \infty$) без изменения запаса устойчивости системы.

Регулятор W_P может выполняться и в виде ПИ–регулятора с передаточной функцией

$$W_P(p) = K_K \frac{T_K p + 1}{T_K p}, \quad (3.6)$$

причем в этом случае, начиная с некоторых значений K_K и T_K , система оказывается нечувствительной к параметрам W_P .

2. Нормальная компенсация или нормальная настройка коррекции обеспечивается при выборе модели по условию

$$\nu_M = 1, \quad \text{то есть} \quad W_{OM}(p) = W_0(p). \quad (3.7)$$

В этом случае, как правило, легко определяются корни характеристического полинома замкнутой системы и ее переходная характеристика. Переходный процесс системы по управляющему воздействию при этом апериодический, что свидетельствует об избыточном запасе устойчивости и возможности повышения быстродействия за счет обеспечения допустимого перерегулирования.

3. Управление перерегулированием осуществляется путем изменения коэффициента передачи K_{OM} модели в устройстве коррекции. Вводится понятие «степень коррекции» ν_M как отношение коэффициента передачи модели W_{OM} к коэффициенту передачи объекта W_0

$$V_M = \frac{K_{OM}}{K_0}. \quad (3.8)$$

На структурах рис.3.6 степень коррекции может быть учтена введением масштабного звена с коэффициентом передачи V_M .

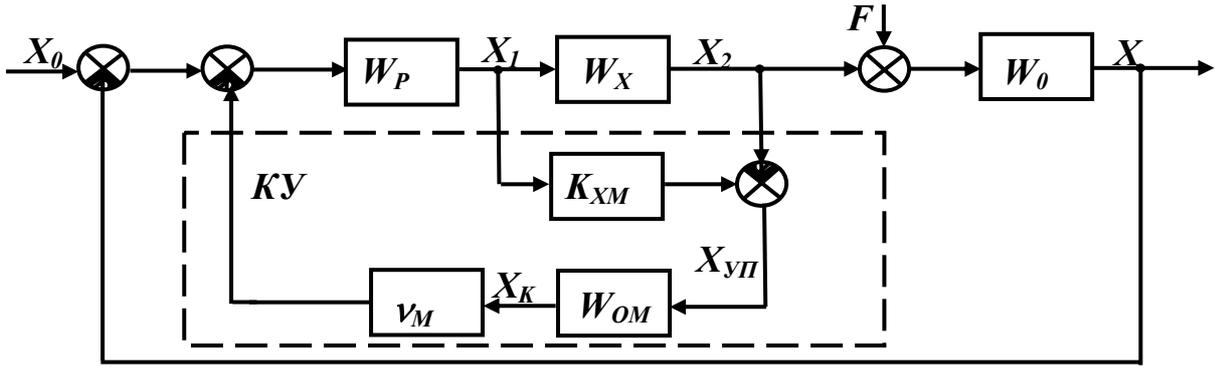
Оптимальной степенью коррекции $V_{МОПТ}$ назовем такое значение, при котором достигается перерегулирование $\sigma_m \approx 5\%$. Величина $V_{МОПТ} < 1$ зависит, главным образом, от соотношения постоянных времени системы. Для систем 3-го порядка, состоящих только из апериодических звеньев, диаграмма оптимальных настроек коррекции приведена на рис. 3.7. Следует отметить, что эта диаграмма остается неизменной при значениях общего коэффициента усиления

$$K > 2 + \frac{T_1}{T_2} + \frac{T_1}{T_3} + \frac{T_2}{T_1} + \frac{T_2}{T_3} + \frac{T_3}{T_1} + \frac{T_3}{T_2}. \quad (3.9)$$

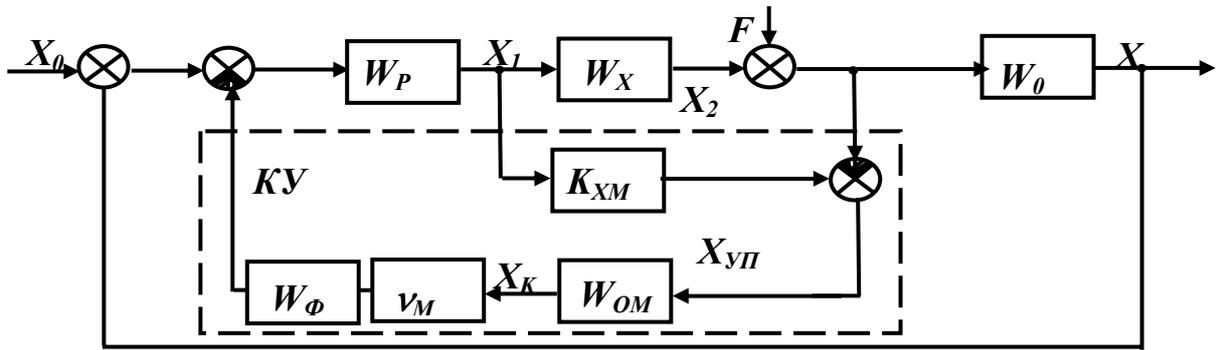
4. Если звено W_0 с наибольшей инерционностью, в том числе и интегрирующее, расположено ранее малоинерционных звеньев W_x , система с упреждающей коррекцией выполняется, как показано на рис. 3.6, в. В этом случае устройство коррекции даже упрощается, так как не требуется выполнять модель W_{OM} звеньев W_0 .

5. Если звено W_0 с наибольшей инерционностью расположено между малоинерционными звеньями W_{x1} и W_{x2} , как показано на рис. 3.6,г, то устройство коррекции реализуется путем организации двух дифференциальных вилок вокруг звеньев W_{x1} и W_{x2} и суммирования соответствующих корректирующих сигналов, причем в канале первого упреждающего сигнала $x_{уп1}$ устанавливается модель W_{OM} звеньев W_0 , а в канале второго упреждающего сигнала $x_{уп2}$ устанавливать модель нет необходимости.

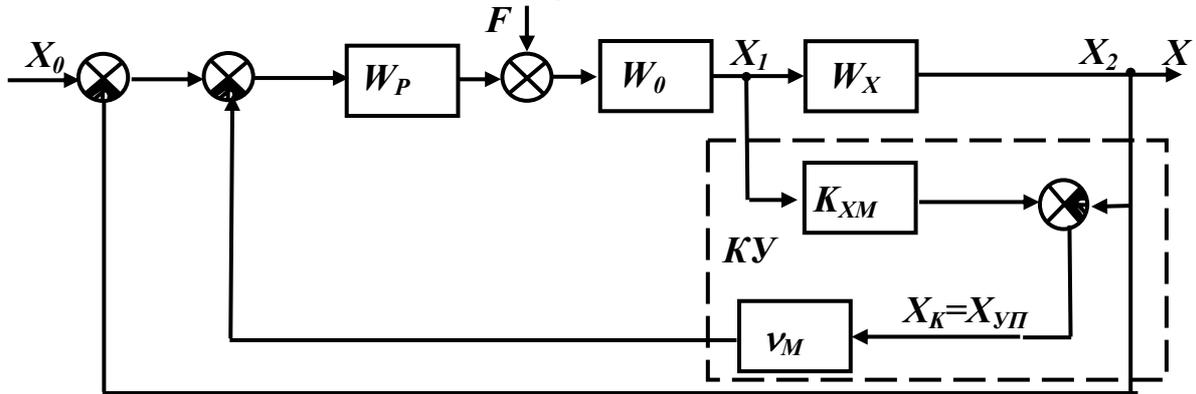
Для оптимизации переходных процессов в цепи суммарного корректирующего сигнала $x_K = x_{K1} + x_{K2}$ необходимо установить усилительное (масштабное) звено V_M , позволяющее регулировать степень коррекции.



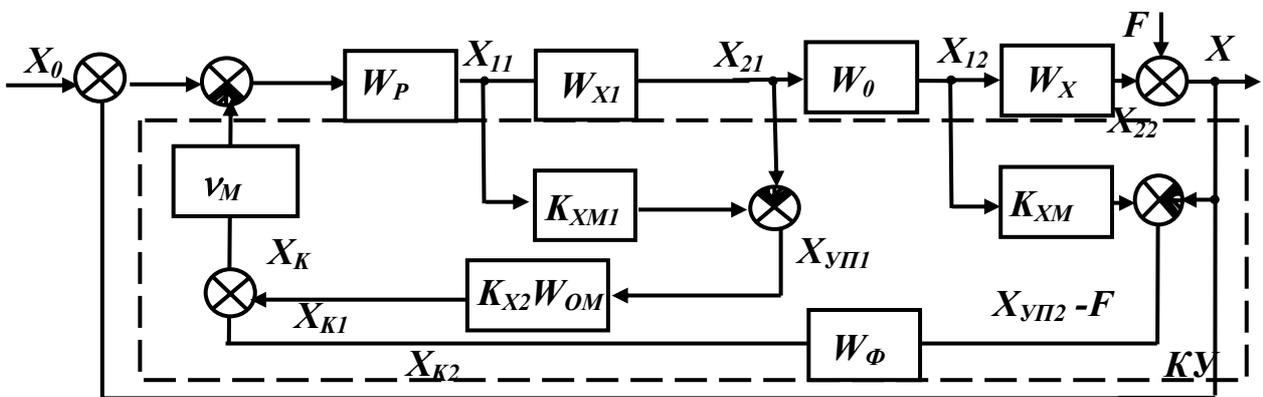
a



b



6



2

Рис. 3.6

6. По соображениям обеспечения высокой точности системы съём сигналов x_{1i} и x_{2i} необходимо организовать так, чтобы ни в одном контуре сформированных дифференциальных «вилкок» $x_{1i} \div x_{2i}$ не попадало возмущающее воздействие F_i . Если этого обеспечить по каким-либо причинам не удастся, необходимо последовательно с моделью W_{OM} (рис. 3.6, б) или в тракте соответствующего упреждающего сигнала $x_{упi}$ (рис.3.6, г) установить фильтр низких частот с оператором

$$W_{\phi} = T_{\phi} p / (T_{\phi} p + 1). \quad (3.10)$$

3.7.2. Порядок синтеза устройств упреждающей коррекции

1. После анализа исходной структурной схемы системы выбирается наиболее предпочтительная для реализации схема построения устройств упреждающей коррекции.

2. Параметры статической модели в цепях дифференциальных связей для любой схемы определяются по условию

$$K_{xMi} = K_{xi}. \quad (3.11)$$

3. Модель W_{OM} в устройстве упреждающей коррекции всегда выполняется в виде апериодического звена

$$W_{OM} = \frac{K_{OM}}{T_{K1} p + 1} = \frac{v_M}{T_{K1} p + 1}. \quad (3.12)$$

Причем, если W_0 – апериодическое звено, то параметры K_{OM} и T_{K1} выбираются из условий:

$$K_{OM} = K_0; \quad T_{K1} = T_0. \quad (3.13)$$

Если W_0 – интегрирующее звено

$$W_0 = \frac{K_{II}}{p} = \frac{1}{T_{II} p},$$

то параметры модели выбираются из условия

$$\frac{K_{OM}}{T_{K1}} = K_{II} = \frac{1}{T_{II}}. \quad (3.14)$$

Значение K_{OM} в этом случае можно назначить так:

$$5 < K_M \leq 10, \quad (3.15)$$

а величину T_{K1} определить из условия (3.14).

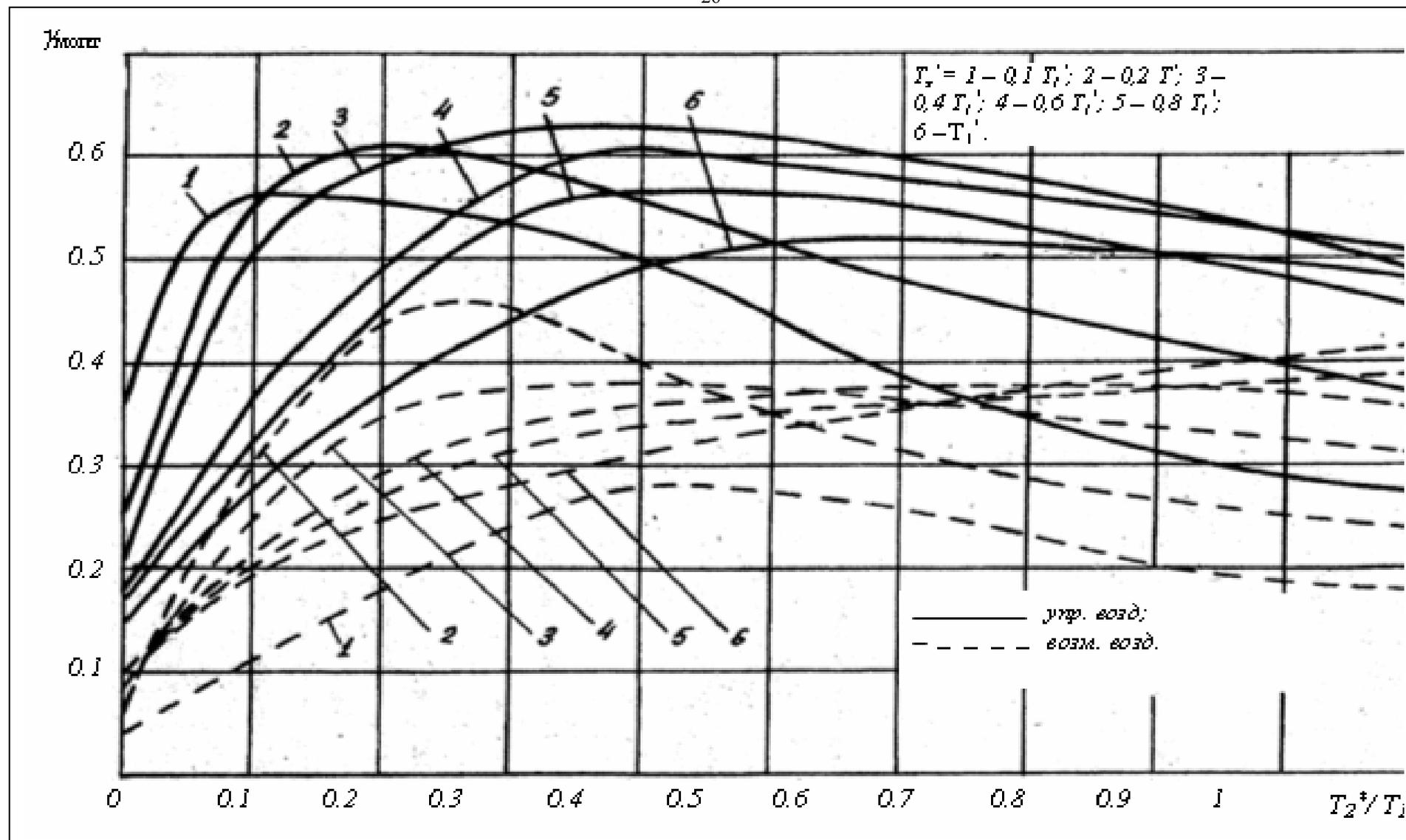


Рис. 3.7. Диаграмма оптимальных настроек коррекции по управляющему и возмущающему воздействиям для структур рис. 3.6

4. Степень коррекции V_M для астатических систем принимается равной единице. Для статических систем по диаграммам рис. 3.7 можно определить оптимальную степень коррекции $V_{\text{Мопт}} < 1$. Диаграммы рис. 3.7 справедливы для систем 3-го порядка. Однако этими диаграммами можно воспользоваться и для систем более высокого порядка, понизив их порядок до 3-го путем объединения малых постоянных времени в одну. Например:

$$(T_3 p + 1)(T_4 p + 1) \approx T_3^* p + 1, \quad \text{где } T_3^* = T_3 + T_4. \quad (3.16)$$

Для предварительной оценки динамических показателей проектируемых систем и возможности сравнения результатов расчетов переходных процессов с теоретически достижимыми данными можно воспользоваться [9] приближенной формулой

$$t_{\text{пер}} \approx 4,1 \frac{T_2^* T_3^*}{T_2^* + T_3^*}. \quad (3.17)$$

3.8. Построение вещественной частотной характеристики замкнутой системы

Вещественная частотная характеристика замкнутой системы, определяемой по выражению

$$p(\omega) = R_e W_3(j\omega) = R_e \frac{W_{\text{CK}}(j\omega)}{1 + W_{\text{CK}}(j\omega)}, \quad (3.18)$$

используется при расчетах переходных процессов частотными методами.

Если обозначить

$$W_{\text{CK}}(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = R_{\text{CK}} e^{j\varphi_{\text{CK}}(\omega)} \quad (3.19)$$

и учесть очевидные соотношения

$$U(\omega) = R_{\text{CK}} \cos \varphi_{\text{CK}}; \quad V(\omega) = R_{\text{CK}} \sin \varphi_{\text{CK}}(\omega); \quad (3.20)$$

$$L_{\text{CK}}(\omega) = 20 \lg R_{\text{CK}}(\omega); \quad R_{\text{CK}}(\omega) = 10^{\frac{L_{\text{CK}}(\omega)}{20}},$$

то из (3.18) путем алгебраических преобразований можно получить следующее расчетное выражение:

$$R(\omega) = \frac{U(\omega)[1+U(\omega)]+V^2(\omega)}{[1+U(\omega)]^2+V^2(\omega)}. \quad (3.21)$$

Можно получить выражение для расчета $P(\omega)$ и на основе тригонометрических преобразований

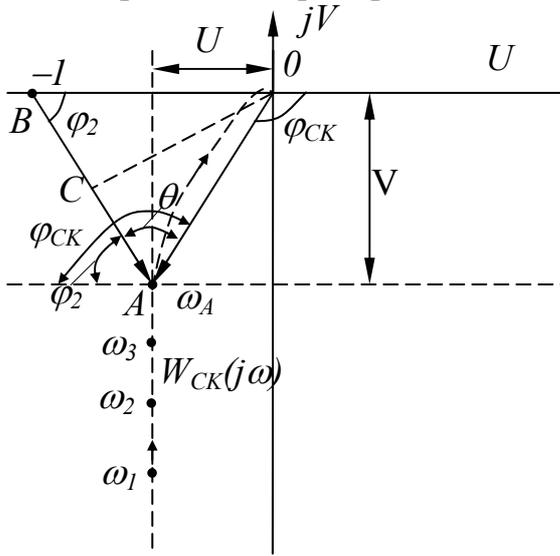


Рис.3.8

Перепишем (3.18) следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P(\omega) &= R_e \frac{|W_{CK}(j\omega)| e^{j\varphi_{CK}(\omega)}}{|1+W_{CK}(j\omega)| e^{j\varphi_2(\omega)}} = \\
 &= R_e \frac{|W_{CK}(j\omega)| e^{j[\varphi_{CK}-\varphi_2]}}{|1+W_{CK}(j\omega)|} = \\
 &= \frac{R_{CK}(\omega) \cos[\varphi_{CK}(\omega) - \varphi_2(\omega)]}{|1+W_{CK}(j\omega)|}.
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Из анализа тригонометрических соотношений для треугольника OAB (на рис. 3.8), образованного при любой частоте ω_A векторами $OA=W_{CK}(j\omega_A)$ и $BA=1+W_{CK}(j\omega_A)$, получаем

$$\varphi_2(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{1+U(\omega)} = \arctg \frac{R_{CK} \sin \varphi_{CK}(\omega)}{1+R_{CK} \cos \varphi_{CK}(\omega)}. \tag{3.23}$$

Из условия

$$\sin \varphi_2(\omega) = \frac{V(\omega)}{|1+W_{CK}(j\omega)|}, \tag{3.24}$$

находим

$$|1+W_{CK}(j\omega)| = \frac{R_{CK}(\omega) \sin \varphi_{CK}(\omega)}{\sin \varphi_2(\omega)}. \tag{3.25}$$

Подставляем (3.25) в (3.22) и получаем расчетное выражение для $P(\omega)$ в следующем виде:

$$P(\omega) = \frac{\cos[\varphi_{ck}(\omega) - \varphi_2(\omega)] \sin \varphi_2(\omega)}{\sin \varphi_{ck}(\omega)}. \quad (3.26)$$

Выражения (3.21) и (3.26) равноценны с формальной, математической точки зрения, но неравноценны с точки зрения рационального использования устройств вычислительной техники и соответствующих процедур численных методов. Поэтому студентам предоставляется право самим отдать предпочтение одному из них. Обоснование объективности предпочтения может быть предметом НИРС.

Строго говоря, значения $R_{ck}(\omega)$ и $\varphi_{ck}(\omega)$ необходимо определять по передаточной функции скорректированной системы $W_{ck}(p)$ в результате преобразования структурной схемы с включенным корректирующим звеном. Однако допустимо воспользоваться $L_{ck}(\omega)$, по которой определить упрощенное выражение для $W_{ck}(p)$ (это относится к устройствам параллельной коррекции), а по нему рассчитать $\varphi_{ck}(\omega)$, а далее выполнить расчеты по формулам (3.20).

Для систем с упреждающей коррекцией расчет $P(\omega)$ осуществляется непосредственно по выражению для $W_3(j\omega)$ при $V_M = 1$, так как оно имеет вид, пригодный для логарифмирования, т. е. представляет собой произведение сомножителей, для которых модуль и фаза легко определяются. Выражение для $W_3(j\omega)$ приводится к виду

$$W_3(j\omega) = R_3(\omega) e^{j\varphi_3(\omega)}, \quad (3.27)$$

а $P(\omega)$ определяется по выражению

$$P(\omega) = R_3(\omega) \cos \varphi_3(\omega). \quad (3.28)$$

3.9. Расчет переходных процессов методом трапеций

Метод базируется на определенной ранее вещественной частотной характеристике $P(\omega)$, которая раскладывается на трапецеидальные характеристики так, чтобы сумма их практически была равна исходной характеристике. Разложение на трапеции осуществляется путем замены полученной характеристики $P(\omega)$ сопрягающимися прямолинейными отрезками, причем в окрестности экстремумов прямолинейные отрезки должны располагаться параллельно оси ω . При этом нужно соблюдать условие, чтобы

сумма начальных ординат всех трапеций была равна начальной ординате $P(0)$ исходной вещественной частотной характеристики, так как последняя определяет установившееся значение регулируемой величины. Участок вещественной частотной характеристики, на котором ее значения становятся меньше 0,05 (так называемый «хвост»), может быть отброшен без существенного влияния на определение показателей качества.

После того как $P(\omega)$ разбита на трапеции, для каждой из них определяются начальные ординаты $P_i(0)$, коэффициенты наклонов $\alpha_i = \omega_{di} / \omega_{oi}$ и полоса пропускания ω_{oi} . По значениям α_i и таблицам h -функций, которые приводятся во всех пособиях по ТАУ [1-7], выписывают значения $h_i(\tau)$ для каждой трапеции. Соответствующая составляющая кривой переходного процесса определяется пересчетом h -функций по формуле

$$x_i(t) = P_i(0) h_i\left(\frac{\tau}{\omega_{oi}}\right). \quad (3.29)$$

Суммируя все составляющие, находим кривую переходного процесса:

$$x(t) = \sum x_i(t). \quad (3.30)$$

3.10. Расчет переходных процессов на ПЭВМ

Расчет переходных процессов в САУ с помощью ПЭВМ целесообразно производить используя диалоговую систему проектирования автоматических систем «ДИСПАС», разработанную Московским авиационным институтом.

Для расчета переходных процесса с помощью этой системы необходимо составить структурную схему САУ и отработать на ПЭВМ последовательность операций в диалоговом режиме. Особенности и возможности системы ДИСПАС подробно изложены в руководстве пользователю [11]. Однако одним из ее достоинств является возможность получения необходимого результата без детального знакомства с руководством, располагая только знаниями в области ТАУ и не имея специальной подготовки по программированию и вычислительной технике.

В качестве примеров на рис. 3.8 приведены структурные схемы системы стабилизации скорости двигателя по заданию 3 при реализации последовательной (рис. 3.8, а) и упреждающей коррекций (рис. 3.8, б).

Если для пользователя-студента доступны программные продукты PSPICE, Electronics Workbench, Matlab, позволяющие исследовать САУ по структурным схемам, то не воспрещается применить их вместо системы ДИСПАС, которая на сегодняшний день является отнюдь не лучшей. Сравнение эффективности и возможностей различных пакетов в условиях УЛГТУ также может быть предметом НИРС.

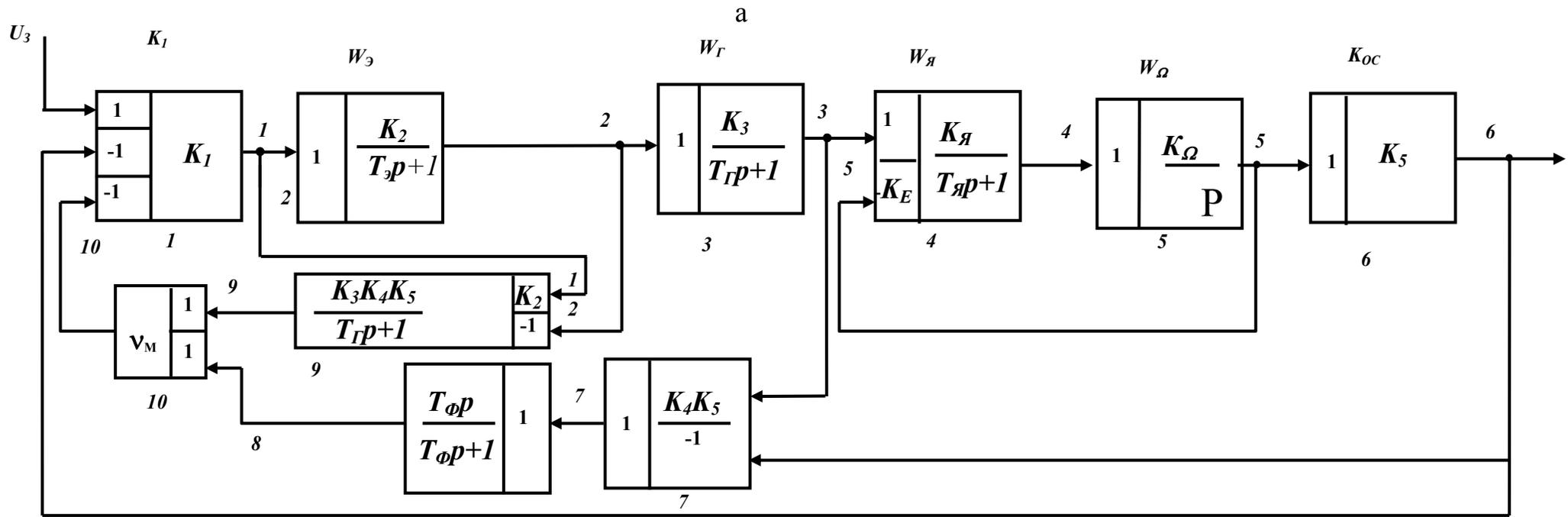
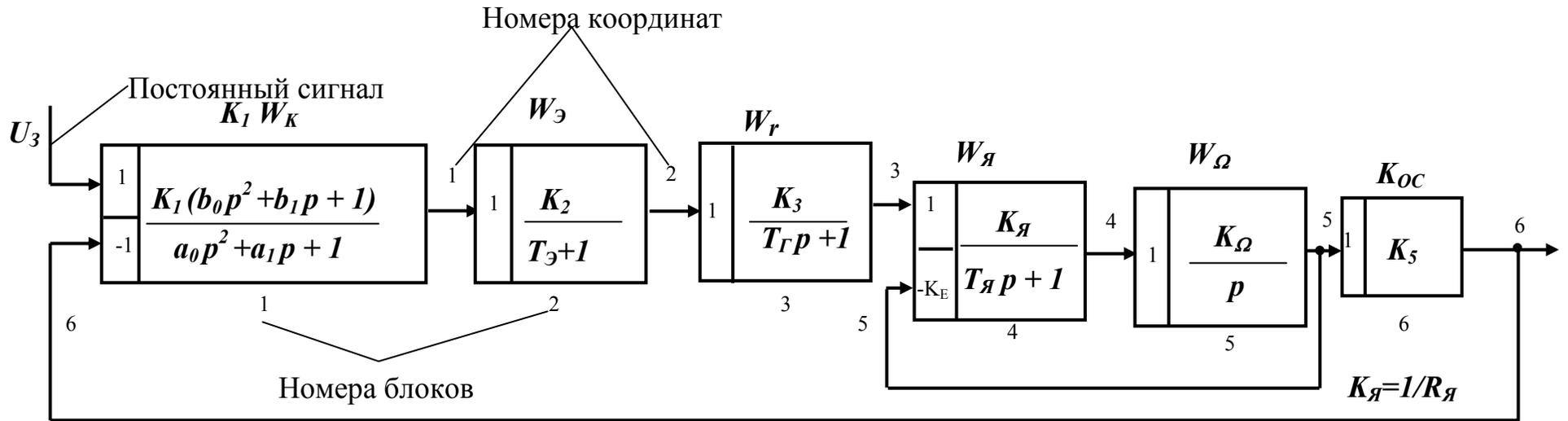


Рис.3.9

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика», ч. 1/Под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
2. Куропаткин П. В. Теория автоматического управления/П.В. Куропаткин. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с.
3. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования– 3-е изд. /В. А. Бесекерский, Е. П. Попов.– М.: Наука, 1975. – 768 с.
4. Расчет автоматических систем / А. В. Фатеев, А. А. Вавилов, Л. П. Смольников, Л. И. Солодовников, В. Б. Яковлев; Под ред. А. В. Фатеева. – М.: Высшая школа, 1973. – 336 с.
5. Васильев Д. В. Системы автоматического управления/Д. В. Васильев, В. Г. Чуич.– М.: Высшая школа, 1967. – 419 с.
6. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / Под ред. В. А. Бесекерского. – 5-е изд. – М.: Наука, 1978, – 512 с.
7. Топчеев Ю. И. Задачник по теории автоматического регулирования/ Ю. И. Топчеев, А. П. Цыпляков.– М.: Машиностроение, 1977. – 592 с.
8. Боровиков М. А., Инешин А. П. Способ коррекции систем автоматического регулирования // Электричество. – 1972. –№9. – С. 59-63.
9. Боровиков М. А. Расчет быстродействующих систем автоматизированного электропривода и автоматики/М. А. Боровиков.– Саратов: Изд-во СГУ, 1980. – 390 с.
- 10.Фрер Ф. Введение в электронную технику регулирования: Пер. с нем. / Ф. Фрер, Ф. Ортенбургер.– М.: Энергия, 1973. – 192 с.
- 11.Белов И. Н. Методические указания по использованию системы ДИСПАС при изучении основных дисциплин специальности 180400/ И. Н. Белов. –Ульяновск: УлГТУ, 1996.