

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический
университет»
Кафедра «Микропроцессорные средства автоматизации»

В.Г. Коломыцев

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
Контрольные работы

Издательство Пермского национального исследовательского политехнического
университета
2013

УДК 62.52

Рецензенты:

Коломыцев В.Г.

Теория автоматического управления. Контрольные работы: учеб. пособие / В.Г.Коломыцев.- Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013.- с.

Приведены сорок вариантов контрольных работ по базовым разделам теории автоматического управления. В приложении излагается в доступной форме теоретический материал по всем пяти задачам контрольных заданий, сопровождаемый примерами выполнения.

Пособие содержит методические указания по работе в программной системе Matlab.

Предназначено для выполнения контрольных работ по соответствующим темам дисциплины «Теория автоматического управления» студентами - заочниками инженерно-технических специальностей.

УДК 62.52

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список аббревиатур и буквенных обозначений	4
1. Введение	5
2. Контрольные задания: варианты №№1-40	6 – 43
3. Исходная структурная схема системы регулирования частоты вращения ротора двигателя (рис. 1)	6
4. Структурная схема САУ (расчёт параметров ПИД – регулятора по временному модифицированному методу Зиглера – Никольса, рис. 2)	7
5. Исходные данные для расчета устойчивости систем (табл. 1)	7
6. Исходные данные для расчета параметров ПИД – регулятора по временному методу Зиглера – Никольса (табл. 2)	8
7. Варианты заданий к программированию управляющих алгоритмов цифровых контроллеров (табл.3)	9
8. Исходные данные для расчета параметров ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса (табл. 4)	11
9. Структурная схема САУ (расчёт параметров ПИД – регулятора по методу СНР, рис. 3)	12
10. Исходные данные для расчета параметров ПИД – регулятора по методу СНР (табл. 5)	13
11. Структурная схема системы (расчёт параметров регулятора по критерию модульного (технического) оптимума, рис. 4)	14
12. Исходные данные для расчета параметров регулятора по критерию модульного (технического) оптимума (табл.6)	14
13. Структурная схема системы (расчёт параметров регулятора системы с апериодической реакцией, рис. 5)	15
14. Исходные данные для расчета параметров регулятора систем с апериодической реакцией (табл. 7)	16
15. Способы определения передаточных функций замкнутых САУ (приложение 1)	44
16. Методика построения логарифмических частотных характеристик САУ (приложение 2)	48
17. Пример рекомендуемой последовательности действий при анализе устойчивости системы (приложение 3)	54
18. Методы настройки параметров ПИД – регулятора (приложение 4)	55
19. Реализация цифровых регуляторов (приложение 5)	81
20. Греческий алфавит	86
21. Список литературы	87
22. Основы работы в MATLAB	88
23. Основы Simulink	96
24. Режимы работы в MATLAB	107
25. Библиографический список (описание работы в MATLAB)	109

СПИСОК АББРЕВИАТУР И БУКВЕННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

САУ – система автоматического управления

ЛЧХ – логарифмические частотные характеристики

ПИД – пропорционально – интегрально – дифференциальный регулятор

CHR - Chien – Hrones – Reswick

ЛАЧХ – логарифмические амплитудно–частотные характеристики

ЛФЧХ – логарифмические фазо-частотные характеристики

MATLAB - интерактивная среда для научных и инженерных вычислений

Simulink - интерактивный инструмент, эффективно использующий графический интерфейс

П - пропорциональный регулятор

И - интегральный регулятор

ПИ - пропорционально – интегральный регулятор

ПД - пропорционально-дифференциальный регулятор

МО - модульный оптимум

СО - симметричный оптимум

$W_{sr}(p)$ - передаточная функция замкнутой системы по каналу управления

$W_{sf}(p)$ - передаточная функция замкнутой системы по каналу возмущения

$W_p(z)$ - дискретная передаточная функция регулятора

$W_p(p)$ - передаточная функция регулятора

T - период квантования сигналов, с

T_o - постоянная времени объекта, с

T_i - время изодрома, с

T_d - время предварения, с

ВВЕДЕНИЕ

Теория автоматического управления преподается с целью формирования у студентов научной базы и системного подхода для изучения и исследования сложных объектов, позволяющих им успешно изучать основы автоматизации технологических процессов.

Задачами изучения дисциплины являются приобретение студентами знаний роли и места автоматических систем в задаче автоматизации технических объектов и производств, основных принципов и схем автоматического управления, основных типов систем автоматического управления и их математическое описание, основ теории линейных, нелинейных и цифровых систем и умение разрабатывать структурные схемы и динамические модели исследуемых САУ, владеть методами исследования линеаризованных САУ на устойчивость и способами их стабилизации, уметь повышать качество САУ, овладеть способностью осваивать самостоятельно и применять в своей работе новые достижения в теории и практике управления техническими системами.

В контрольных заданиях отражены семь тем курса «Теории автоматического управления»: основы теории управления и математическое описание динамических звеньев и систем, устойчивость САУ, анализ качества САУ в статике и динамике, типовые регуляторы, системы управления с микроЭВМ.

Учебный материал содержится в учебных пособиях библиографического списка.

При выполнении и оформлении контрольных заданий необходимо соблюдать следующие указания:

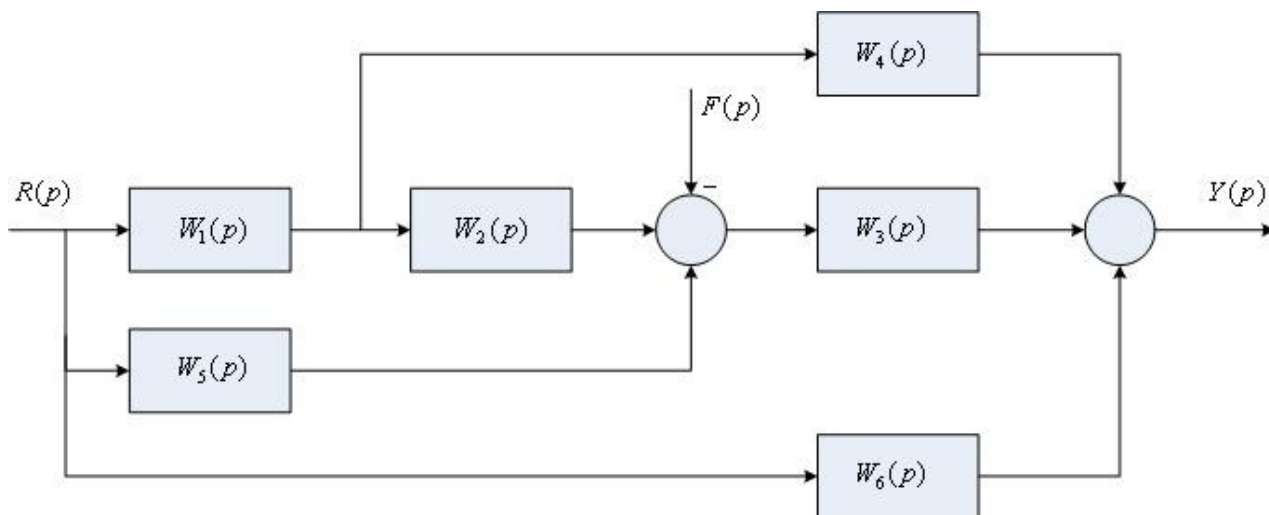
1. Контрольную работу следует выполнять на листах формата А4: текстовую часть – пастой любого цвета, кроме красного, оставляя поля шириной 40-50 мм для замечаний рецензента, либо печатным способом, графическую часть – ручным, печатным, копировальным или фото-способами.
2. На титульном листе должны быть написаны фамилия и инициалы студента, учебный шифр и дата отсылки работы в университет.
3. Текстовый материал следует излагать подробно и аккуратно. Одинаковые тексты у разных студентов не зачитываются.

После получения из университета прорецензированной работы студент обязан исправить все отмеченные в работе недостатки; в случае незачета – в кратчайший срок выполнить все требования преподавателя и предоставить работу на повторную проверку, приложив при этом первоначальную работу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Вариант №1

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{10}{p(0,1p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 1-го варианта – в табл. 1.

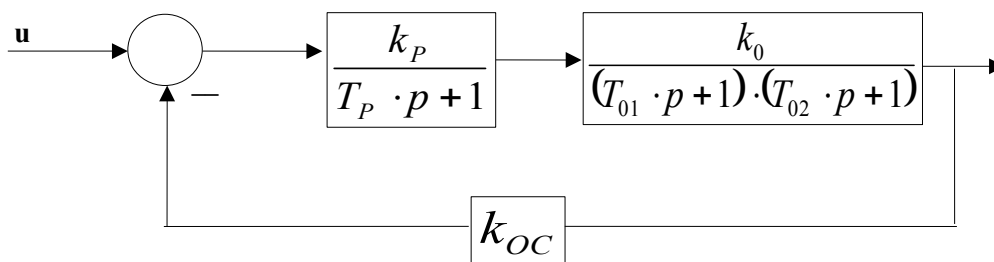


Рис. 1. Исходная структурная схема системы регулирования частоты вращения ротора двигателя (k_p – передаточный коэффициент; T_p – постоянная времени, с; k_0 – передаточный коэффициент двигателя (объекта) по каналу управления; T_{01} и T_{02} – постоянные времени двигателя, с; k_{oc} – передаточный коэффициент обратной связи)

4. Настройте параметры ПИД – регулятора по временному модифицированному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для первого варианта – в табл. 2.

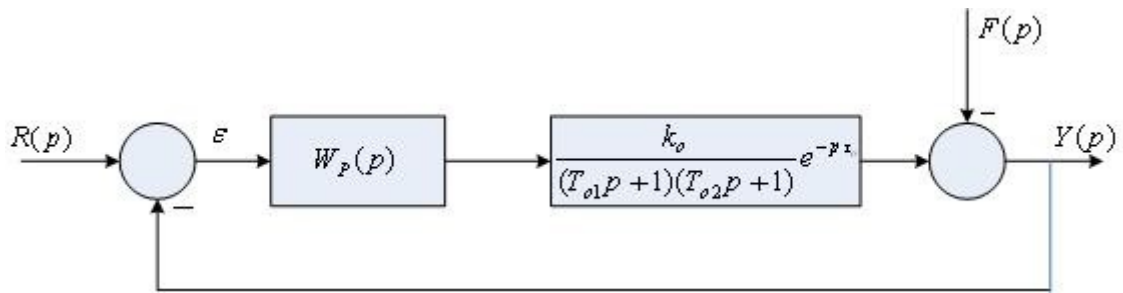


Рис. 2. Структурная схема САУ

5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 1 таблицы 3.

Таблица 1

Исходные данные для расчета устойчивости систем

№№ вариантов	Параметры динамических звеньев						Примечание
	k_p	T_p, c	k_0	T_{01}, c	T_{02}, c	k_{oc}	
1	430	$4 \cdot 10^{-3}$	3	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$	0,02	
2	220	$4,2 \cdot 10^{-3}$	3,2	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$	0,022	
3	140	$3,8 \cdot 10^{-3}$	3,3	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$	0,028	
4	450	$4,1 \cdot 10^{-3}$	3,1	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$	0,019	
5	240	$3,7 \cdot 10^{-3}$	2,9	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	0,021	
6	410	$4,3 \cdot 10^{-3}$	3,5	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	0,024	
7	380	$4,4 \cdot 10^{-3}$	2,8	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	0,022	
8	400	$2,8 \cdot 10^{-3}$	3,6	$2 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,023	
9	290	$3 \cdot 10^{-3}$	3,4	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	0,018	
10	310	$3,9 \cdot 10^{-3}$	3,3	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	0,019	
11	440	$4,5 \cdot 10^{-3}$	3,7	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-3}$	0,024	
12	390	$3,6 \cdot 10^{-3}$	2,9	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,025	
13	260	$3,1 \cdot 10^{-3}$	2,8	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	0,02	
14	210	$3,2 \cdot 10^{-3}$	3	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$	0,018	
15	300	$4 \cdot 10^{-3}$	2,9	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	0,023	
16	460	$3,8 \cdot 10^{-3}$	3,3	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	0,026	
17	320	$4,2 \cdot 10^{-3}$	3,4	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	0,024	
18	270	$3,7 \cdot 10^{-3}$	3,1	$2 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	0,021	
19	340	$3,5 \cdot 10^{-3}$	2,8	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	0,022	
20	410	$4,1 \cdot 10^{-3}$	2,6	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	0,027	
21	310	$6,1 \cdot 10^{-3}$	1,5	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	0,03	
22	250	$4,3 \cdot 10^{-3}$	3,2	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	0,024	
23	400	$2,6 \cdot 10^{-3}$	3,3	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	0,019	

24	250	$1,5 \cdot 10^{-3}$	2,4	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,02	
25	350	$5,4 \cdot 10^{-3}$	5	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	0,025	
26	420	$2,3 \cdot 10^{-3}$	1,8	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	0,012	
27	120	$1,2 \cdot 10^{-3}$	4,1	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	0,021	
28	240	$3,2 \cdot 10^{-3}$	3,5	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	0,032	
29	340	$6,5 \cdot 10^{-3}$	3,7	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,014	
30	170	$4,7 \cdot 10^{-3}$	4.3	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	0,022	
31	330	$2,8 \cdot 10^{-3}$	1,5	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	0,015	
32	290	$5,3 \cdot 10^{-3}$	2,6	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	0,016	
33	110	$3,7 \cdot 10^{-3}$	4,8	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	0,017	
34	390	$1,7 \cdot 10^{-3}$	5,4	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,023	
35	420	$2,9 \cdot 10^{-3}$	2,4	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	0,011	
36	240	$2,1 \cdot 10^{-3}$	3,8	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	0,019	
37	160	$4,9 \cdot 10^{-3}$	5,1	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	0,023	
38	250	$1,1 \cdot 10^{-3}$	4,7	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	0,013	
39	270	$1,8 \cdot 10^{-3}$	3,9	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	0,024	
40	270	$4,4 \cdot 10^{-3}$	2,1	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,028	

Таблица 2
Исходные данные для расчета параметров ПИД – регулятора
по временному методу Зиглера - Никольса

№№ вариантов	Параметры динамических звеньев			
	k_0	T_{01}, c	T_{02}, c	τ_o
1	1	0,1	0,12	0,01
2	1,2	0,11	0,14	0,011
3	1,5	0,09	0,13	0,012
4	1,8	0,12	0,08	0,013
5	2	0,07	0,15	0,014
6	4	0,06	0,12	0,02
7	5	0,09	0,16	0,01
8	6	0,02	0,08	0,012

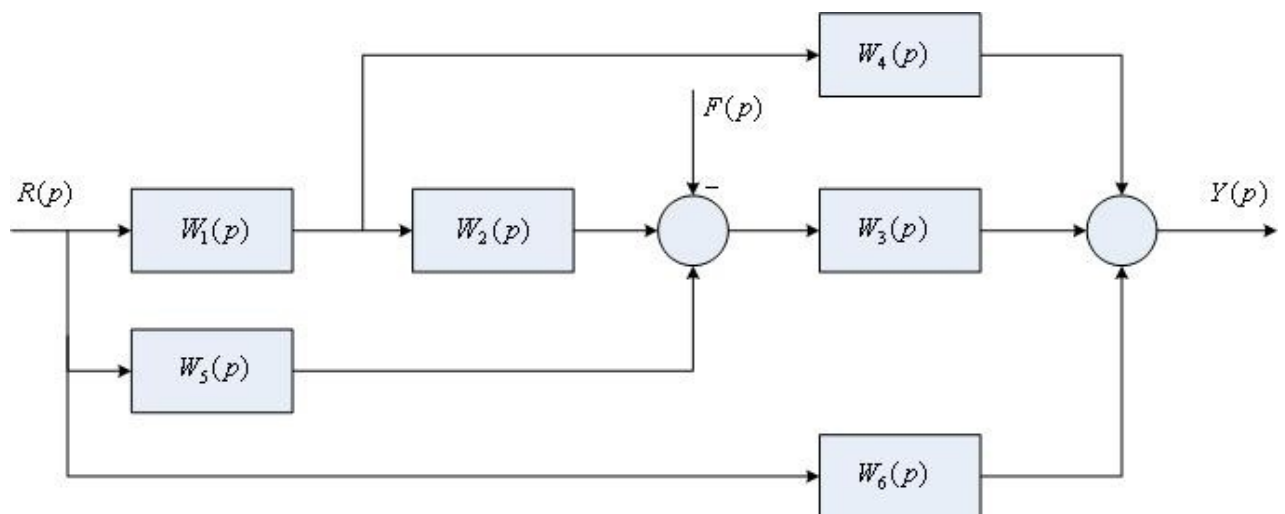
Варианты заданий к программированию управляющих алгоритмов цифровых контроллеров

Номера вариантов	Дискретные передаточные функции регуляторов	k_p	k_d	k_i	T, c
1		1,45	0,43	1	0,1
2		1,5	0,48	1,3	0,12
3		1,4	0,42	1,2	0,11
4		2	1,5	0,8	0,09
5		3,2	0,4	0,5	0,05
6		2,2	1,2	1,5	0,04
7		1,3	0,38	0,9	0,08
8		3	2,2	1,1	0,07
9	$W_p(z) = k_p + \frac{k_i T(z+1)}{2(z-1)} + \frac{k_d(z-1)}{Tz}$	1	0,44	1,4	0,02
10		1,6	1,1	0,7	0,14
11		1,55	0,52	0,6	0,095
12		2,1	0,45	0,85	0,03
13		2,3	1,43	0,95	0,06
14		3,8	0,39	0,93	0,065
15		1,65	0,47	0,77	0,13
16		1,47	0,54	1,06	0,097
17		1,49	0,62	1,12	0,032
18		1,2	2,3	0,8	0,14
19		1,3	1,7	1,4	0,04
20		1,8	2,4	0,82	0,07
21	$W_p(z) = \frac{(1-0,2z^{-1})(1-0,1z^{-1})}{(1-0,5z^{-1})(1-0,8z^{-1})}$				
22	$W_p(z) = \frac{(1-0,905z^{-1})(1-0,819z^{-1})}{0,0453(1-z^{-1})(1+0,904z^{-1})}$				
23	$W_p(z) = \frac{1840(1-0,286z^{-1})(1-0,636z^{-1})}{(1+0,2z^{-1})(1+1,277z^{-1})}$				
24	$W_p(z) = \frac{0,4(1-0,83z^{-1})(1-0,67z^{-1})}{(1-0,92z^{-1})(1-0,43z^{-1})}$				
25	$W_p(z) = \frac{0,366-0,185z^{-1}+0,019z^{-2}}{(1-z^{-1})(1+0,267z^{-1})}$				
26	$W_p(z) = \frac{(1-0,4z^{-1})(1-0,9z^{-1})}{(1-0,8z^{-1})(1-0,5z^{-1})}$				
27	$W_p(z) = \frac{(1-0,82z^{-1})(1-0,34z^{-1})}{0,12(1-z^{-1})(1+0,62z^{-1})}$				
28	$W_p(z) = \frac{185(1-0,36z^{-1})(1-0,526z^{-1})}{(1+0,11z^{-1})(1+1,214z^{-1})}$				
29	$W_p(z) = \frac{0,25(1-0,33z^{-1})(1-0,57z^{-1})}{(1-0,73z^{-1})(1-0,87z^{-1})}$				

30	$W_p(z) = \frac{0,56 - 0,485z^{-1} + 0,119z^{-2}}{(1-z^{-1})(1+0,234z^{-1})}$				
31	$W_p(z) = \frac{(1-0,641z^{-1})(1-0,953z^{-1})}{0,171(1-z^{-1})(1+0,459z^{-1})}$				
32	$W_p(z) = \frac{(1-0,427z^{-1})(1-0,54z^{-1})}{(1-0,287z^{-1})(1-0,431z^{-1})}$				
33	$W_p(z) = \frac{44(1-0,562z^{-1})(1-0,749z^{-1})}{(1+0,45z^{-1})(1+1,391z^{-1})}$				
34	$W_p(z) = \frac{0,25(1-0,749z^{-1})(1-0,439z^{-1})}{(1-0,628z^{-1})(1-0,714z^{-1})}$				
35	$W_p(z) = \frac{0,875 - 0,234z^{-1} + 0,016z^{-2}}{(1-z^{-1})(1+0,525z^{-1})}$				
36	$W_p(z) = \frac{(1-0,843z^{-1})(1-0,258z^{-1})}{0,267(1-z^{-1})(1+0,375z^{-1})}$				
37	$W_p(z) = \frac{(1-0,421z^{-1})(1-0,598z^{-1})}{(1-0,168z^{-1})(1-0,439z^{-1})}$				
38	$W_p(z) = \frac{47(1-0,951z^{-1})(1-0,625z^{-1})}{(1+0,361z^{-1})(1+1,534z^{-1})}$				
39	$W_p(z) = \frac{0,92(1-0,384z^{-1})(1-0,845z^{-1})}{(1-0,238z^{-1})(1-0,491z^{-1})}$				
40	$W_p(z) = \frac{0,389 - 0,379z^{-1} + 0,167z^{-2}}{(1-z^{-1})(1+0,135z^{-1})}$				

Вариант №2

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения $W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{20}{(0,5p+1)^2}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 2-го варианта – в табл.1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для первого варианта – в табл. 4.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 2 таблицы 3.

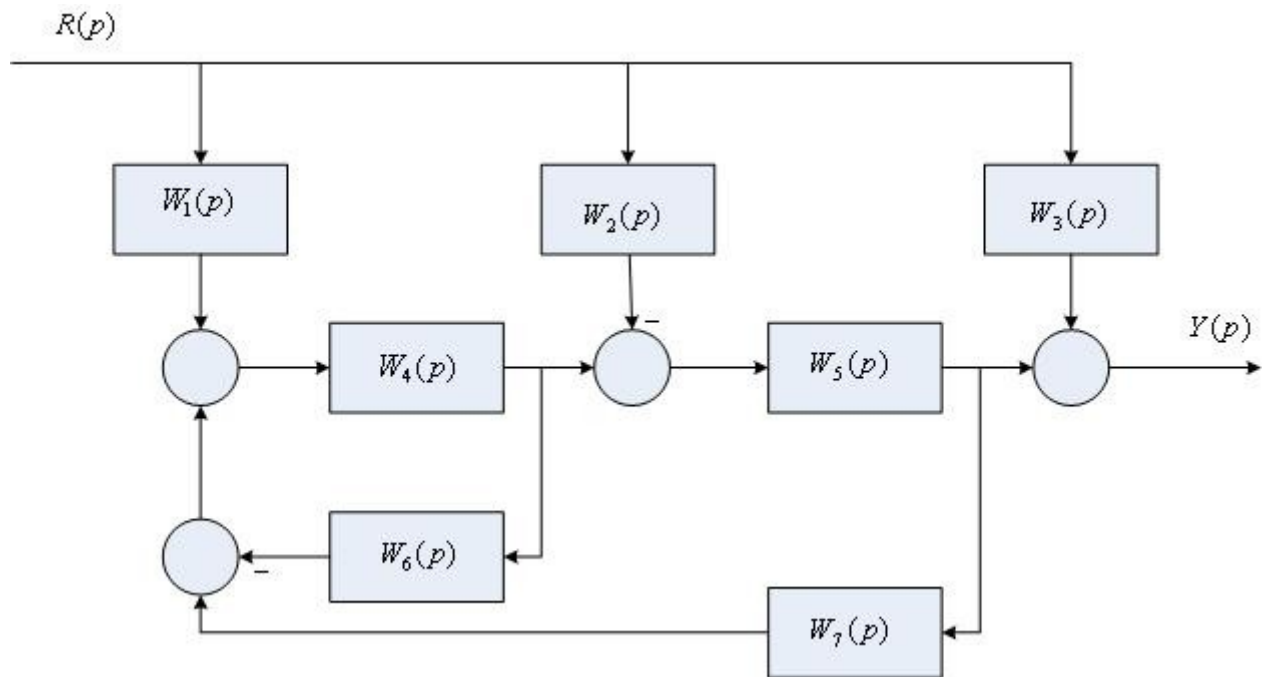
Таблица 4

Исходные данные для расчета параметров ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера - Никольса

№№ вариантов	Параметры динамических звеньев			
	k_0	T_{01}, c	T_{02}, c	$\tau_{o,c}$
1	4	2	8	0,3
2	5	1	9	0,2
3	6	3	8	0,1
4	3	1	7	0,25
5	2	4	6	0,14
6	1	1	11	0,15
7	4	2	12	0,18
8	2	0,8	7	0,3

Вариант №3

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{100(0,001p+1)}{p^2}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 3-го варианта – в табл.1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по методу СНР системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 3, исходные данные для первого варианта – в табл. 5.

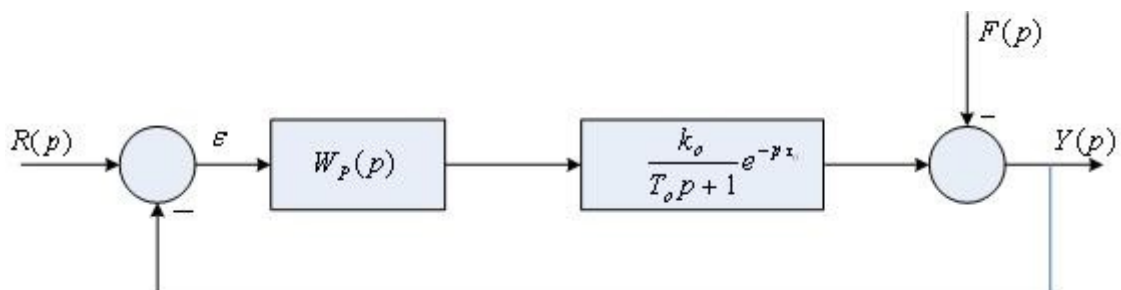


Рис. 3. Структурная схема САУ

5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 3 таблицы 3.

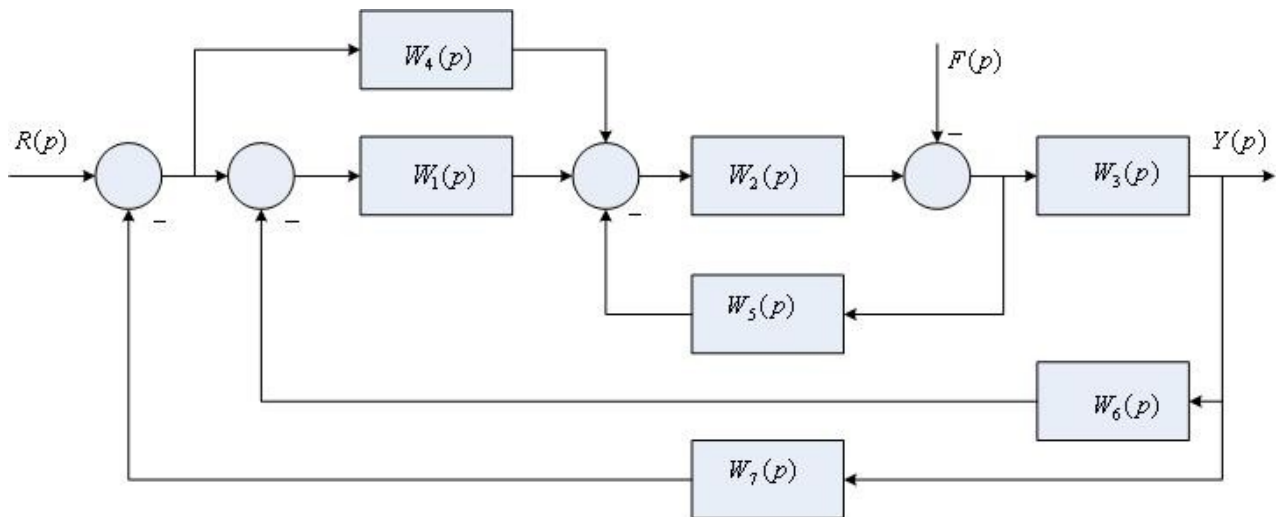
Таблица 5

Исходные данные для расчета параметров ПИД – регулятора по методу CHR

№№ вариантов	Параметры динамических звеньев		
	k_0	T_0, c	$\tau_{o,c}$
1	1	3	0,4
2	2	2	0,2
3	3	4	0,3
4	4	2,3	0,25
5	1	2,5	0,35
6	2	3	0,1
7	3	3,5	0,38
8	4	2,8	0,15

Вариант №4

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{15}{p^2(0,2p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 4-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора по критерию модульного (технического) оптимума системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 4, исходные данные для первого варианта – в табл. 6.

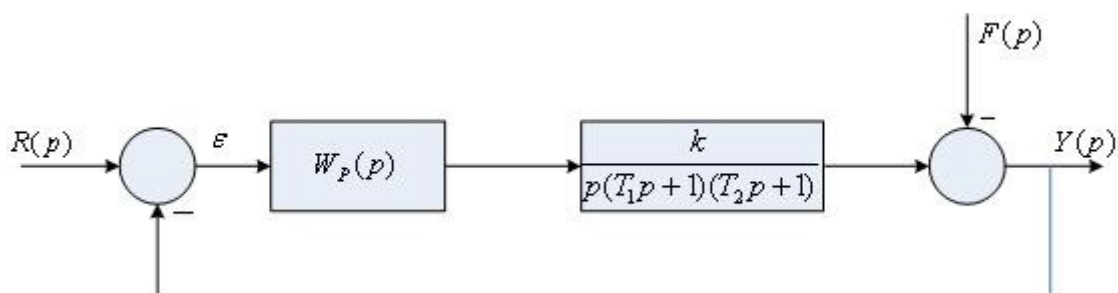


Рис. 4. Структурная схема системы

5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 4 таблицы 3.

Таблица 6

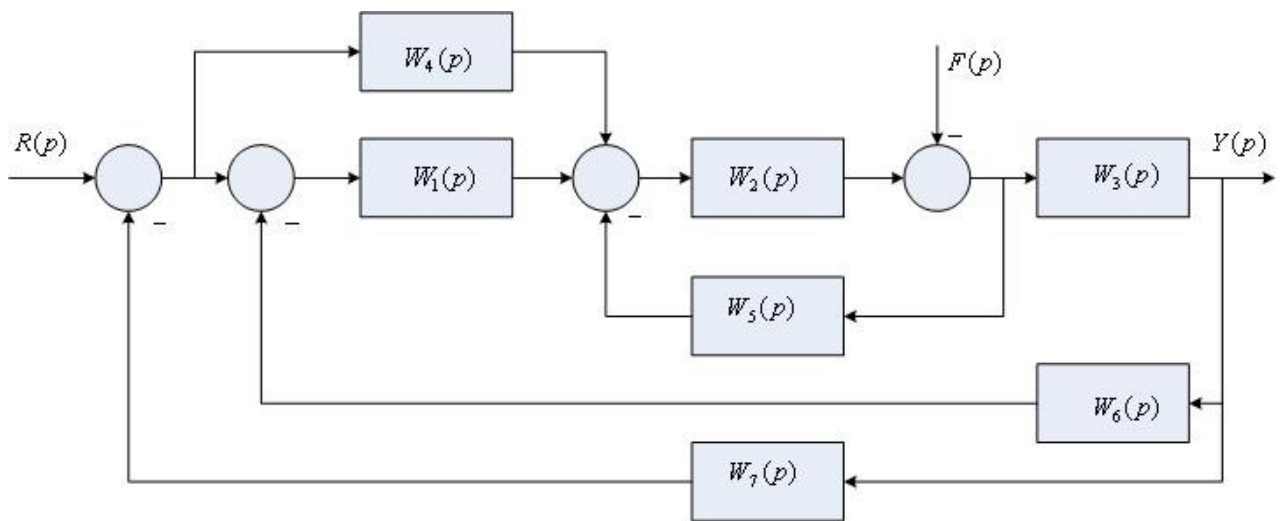
Исходные данные для расчета параметров регулятора по критерию модульного (технического) оптимума

№№ вариантов	Параметры динамических звеньев			
	$T_{1,c}$	$T_{2,c}$	$t_{n,c}$	
1	0,9	2,5	5	
2	0,8	3,2	4	
3	0,7	3	6	
4	1,1	1,5	3	
5	1,2	3,2	7	
6	0,6	2	4,5	
7	1,2	2,3	5,5	
8	1,3	2,4	6,2	

Вариант №5

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения

$W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{25}{(0,8p+1)(0,2p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора системы с аperiodической реакцией, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 5, исходные данные для первого варианта – в табл. 7.

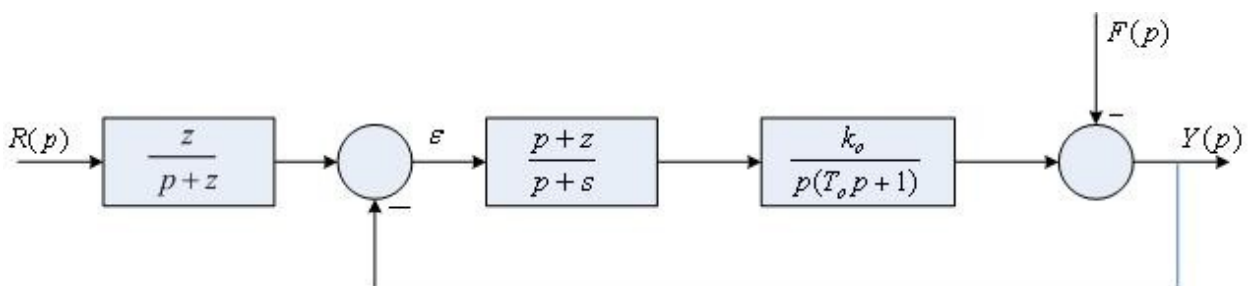


Рис. 5. Структурная схема САУ

5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 5 таблицы 3.

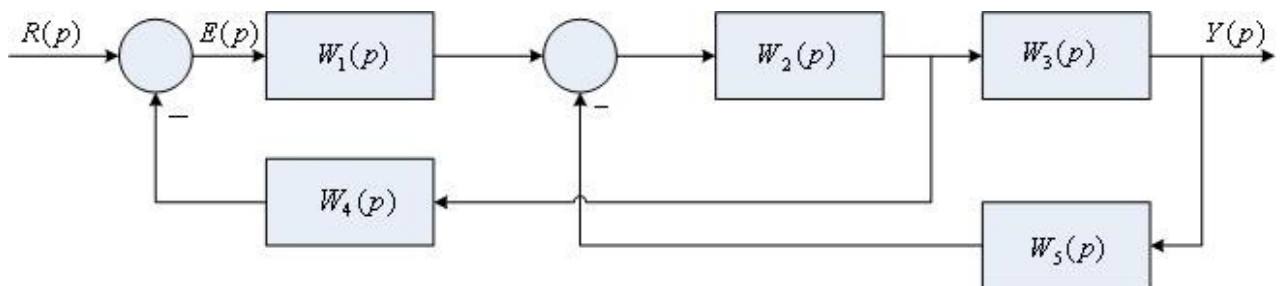
Таблица 7

Исходные данные для расчета параметров регулятора систем с аperiodической реакцией

№№ вариантов	Параметры динамических звеньев		
	k_o	T_o, c	
1	5	0,9	
2	4	0,7	
3	6	0,8	
4	2	1,2	
5	4	1,1	
6	3	1,3	
7	2,5	1,4	
8	5,5	0.6	

Вариант №6

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

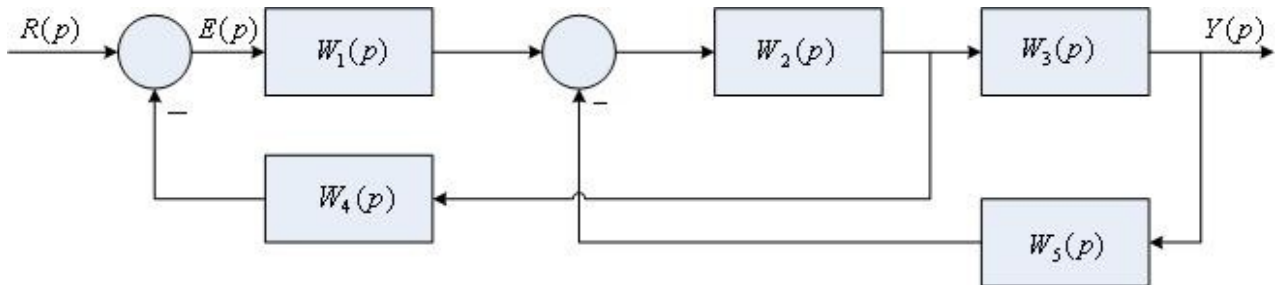
$$W(p) = \frac{10(2p+1)}{p(0,5p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 6-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по временному модифицированному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для второго варианта – в табл. 2.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 6 таблицы 3.

Вариант №7

1. Определите передаточную функцию по расогласованию

$W_{se}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{30(3p+1)}{p^2(p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 7-го варианта – в табл. 1.

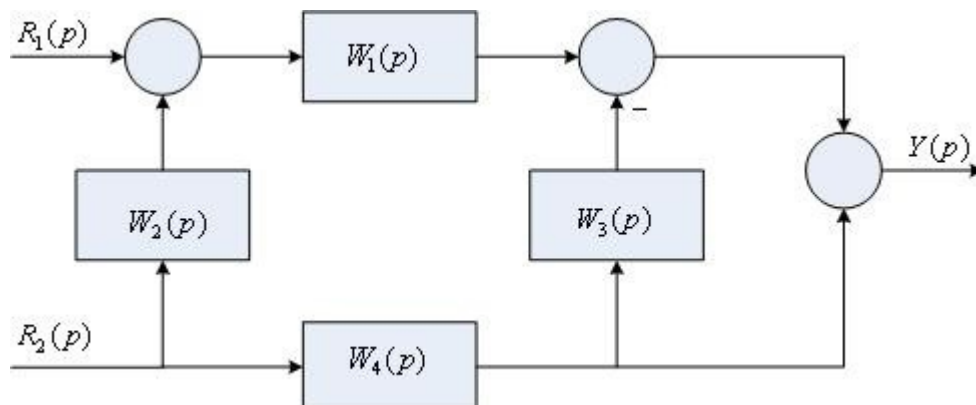
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для второго варианта – в табл. 4.

5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 7 таблицы 3.

Вариант №8

1. Определите передаточную функцию по каналам управления

$W_{sr1}(p)$ и $W_{sr2}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



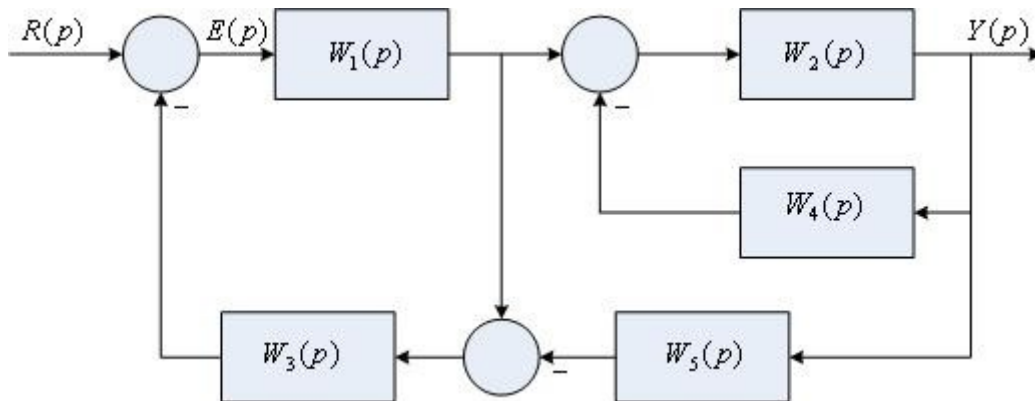
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{17}{(0,9p+1)(0,1p+1)}.$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 8-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по методу CHR системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 3, исходные данные для второго варианта – в табл. 5.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 8 таблицы 3.

Вариант №9

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

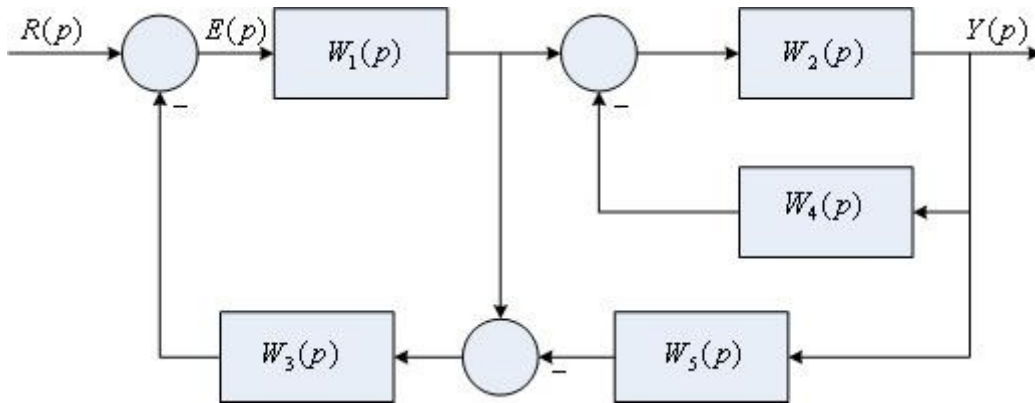
$$W(p) = \frac{19}{(p+1)(0,3p+1)}.$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 9-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора по критерию модульного (технического) оптимума системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 4, исходные данные для второго варианта – в табл. 6.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного

программирования по варианту 9 таблицы 3.

Вариант №10

1. Определите передаточную функцию по рассогласованию $W_{se}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



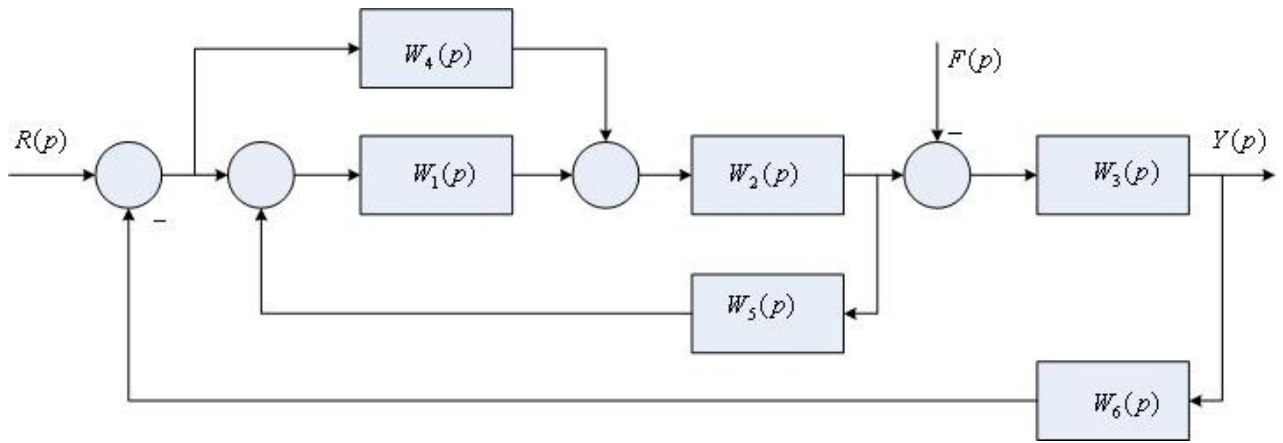
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{40(4p+1)}{p(8p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 10-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора системы с аperiodической реакцией, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 5, исходные данные для второго варианта – в табл. 7.
5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 10 таблицы 3.

Вариант №11

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

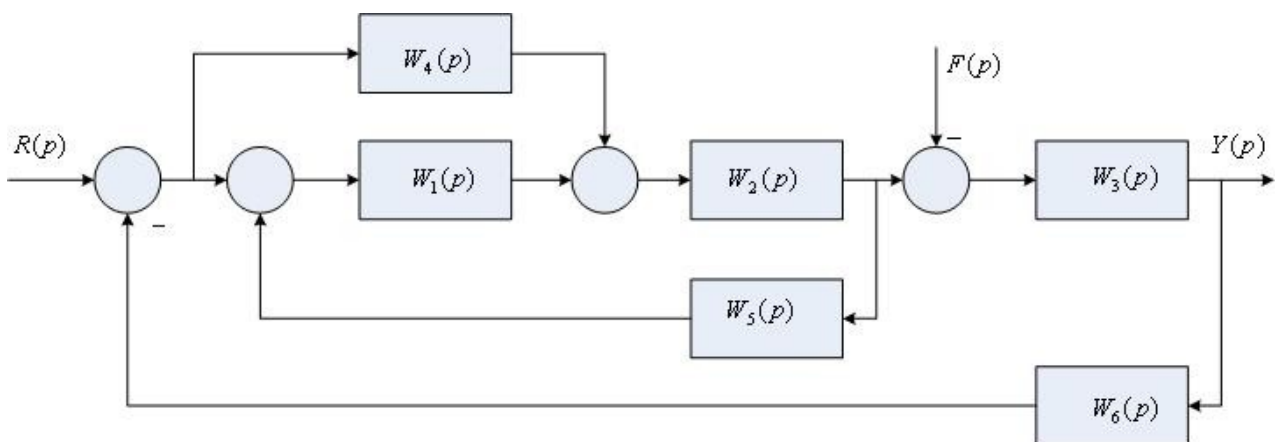
$$W(p) = \frac{20(5p+1)}{p(10p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 11-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по временному модифицированному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для третьего варианта – в табл. 2.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 11 таблицы 3.

Вариант №12

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения

$W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



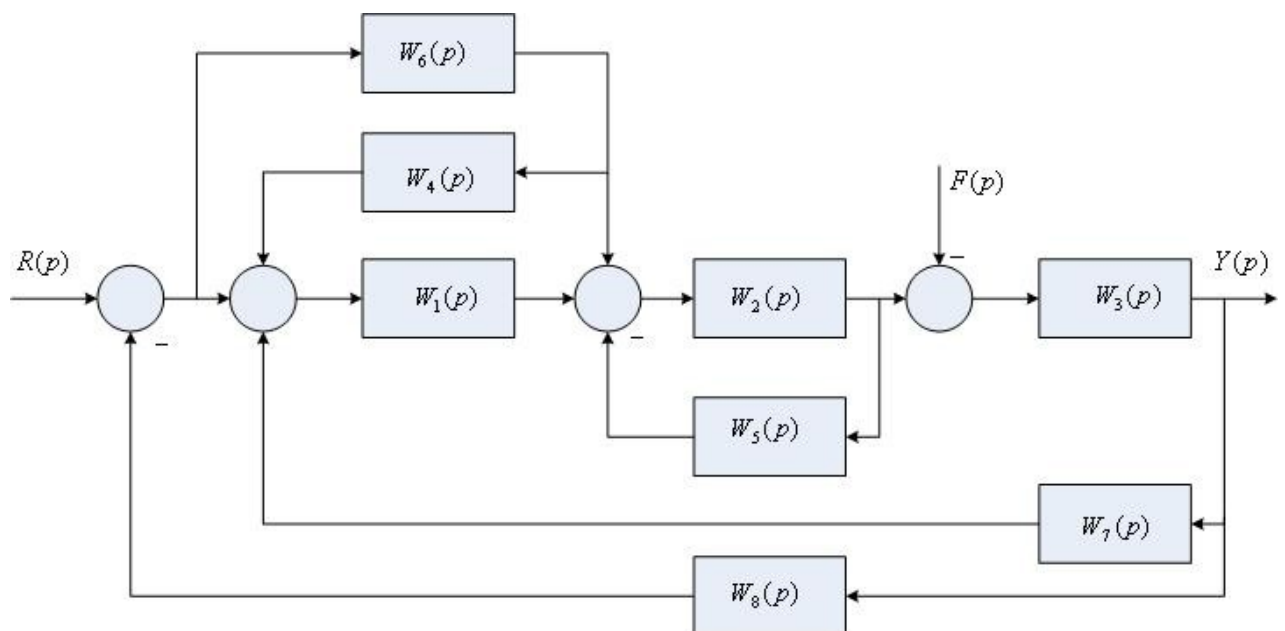
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{5(p+1)}{p^2}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 12-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для третьего варианта – в табл. 4.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 12 таблицы 3.

Вариант №13

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{27}{p(10p+1)(p+1)}$$

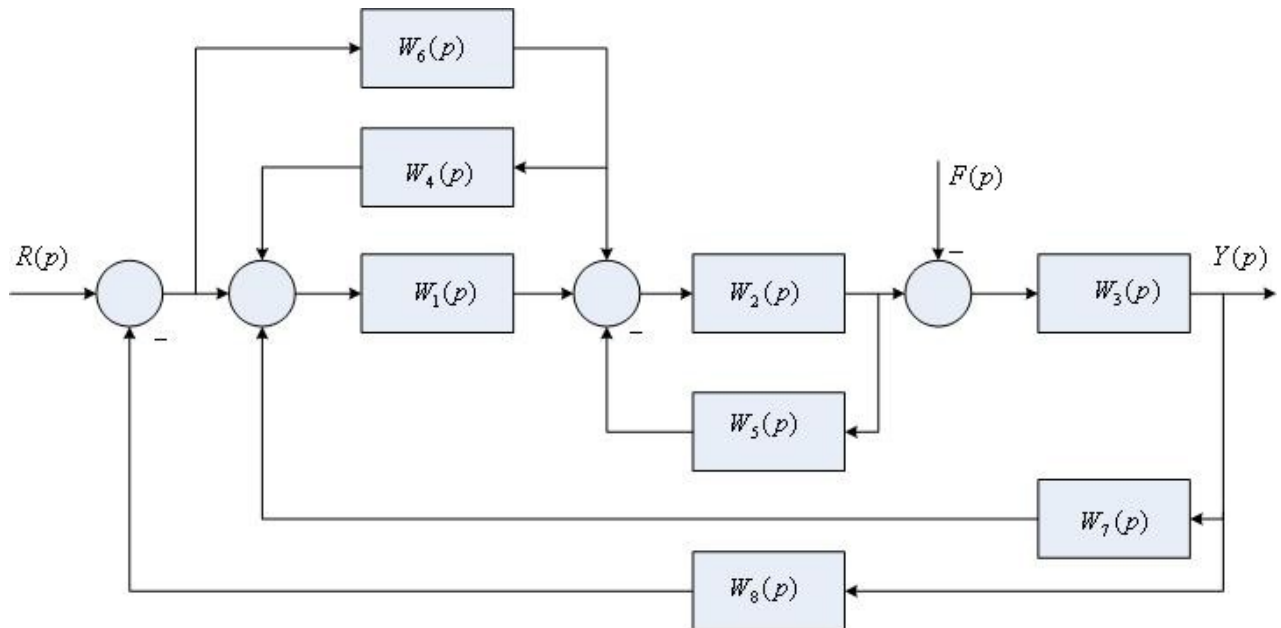
3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 13-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по методу CHR системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 3, исходные данные для третьего

варианта – в табл. 5.

5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 13 таблицы 3.

Вариант №14

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения $W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



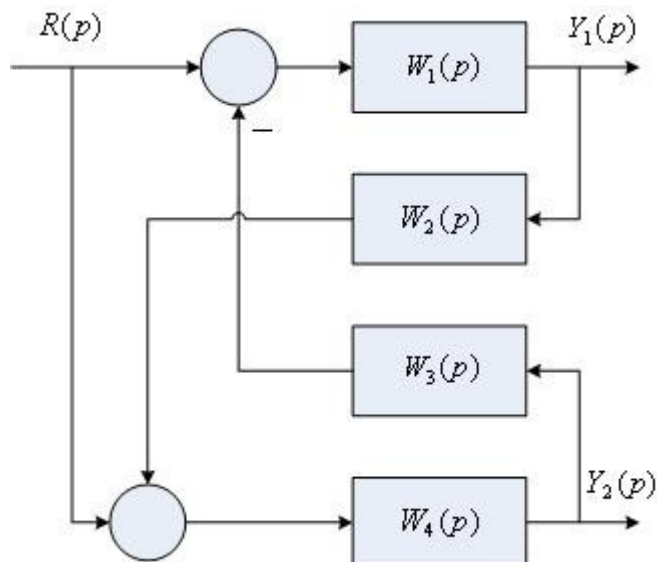
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14p}{(2p+1)(0,1p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 14-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора по критерию модульного (технического) оптимума системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 4, исходные данные для третьего варианта – в табл. 6.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 14 таблицы 3.

Вариант №15

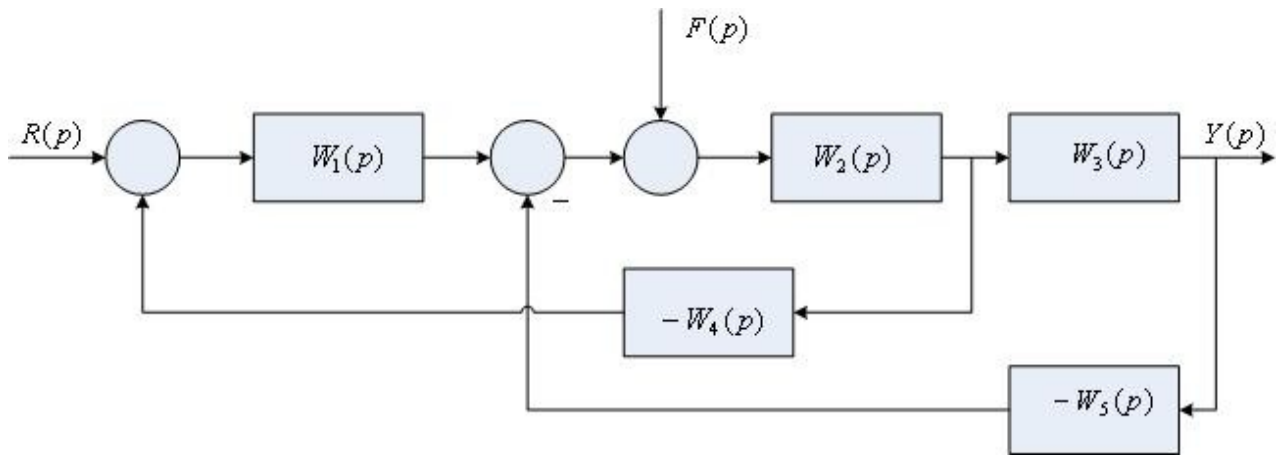
1. Определите передаточные функции по каналу управления для двух выходов системы $W_{sy1}(p)$ и $W_{sy2}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид
$$W(p) = \frac{100(0,05p+1)}{(0,1p+1)^2}$$
3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 15-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора системы с аperiodической реакцией, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 5, исходные данные для третьего варианта – в табл. 7.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 15 таблицы 3.

Вариант №16

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

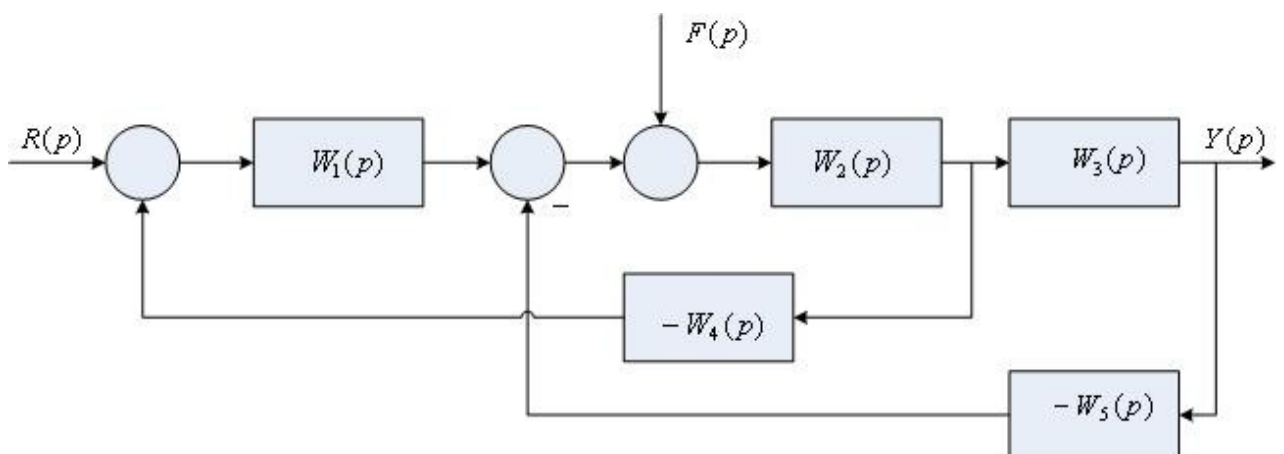
$$W(p) = \frac{200}{(0,2p+1)(0,05p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 16-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по временному модифицированному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для четвертого варианта – в табл. 2.
5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 16 таблицы 3.

Вариант №17

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения

$W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



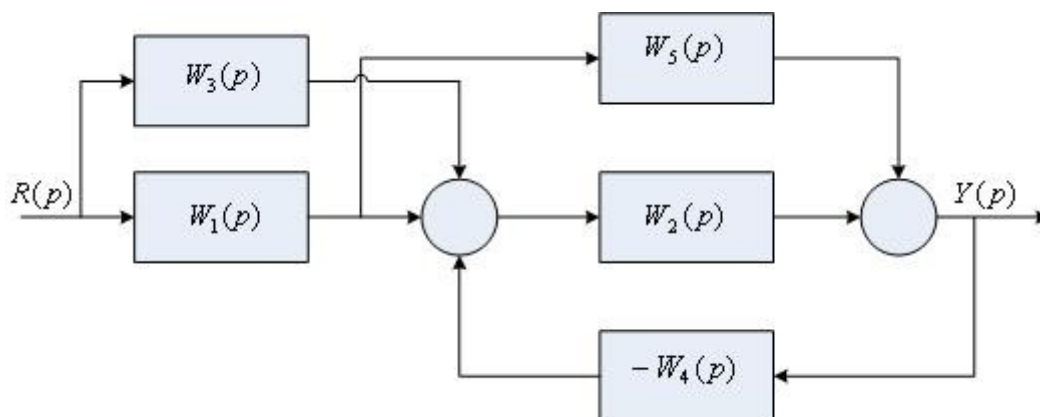
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{150(0,1 p+1)}{p(0,5 p+1)(0,01 p+1)}.$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 17-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для четвертого варианта – в табл. 4.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 17 таблицы 3.

Вариант №18

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

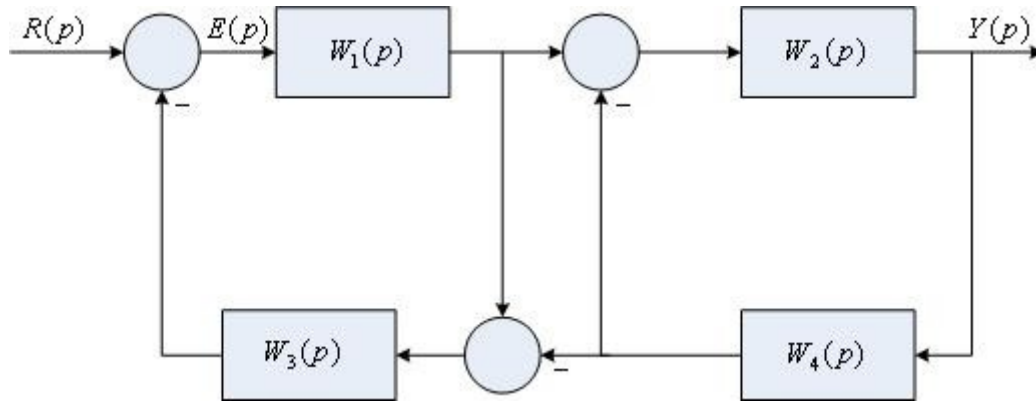
$$W(p) = \frac{70}{(0,4 p+1)(0,1 p+1)(0,05 p+1)}.$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 18-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по методу CHR системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 3, исходные данные для четвертого варианта – в табл. 5.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного

программирования по варианту 18 таблицы 3.

Вариант №19

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



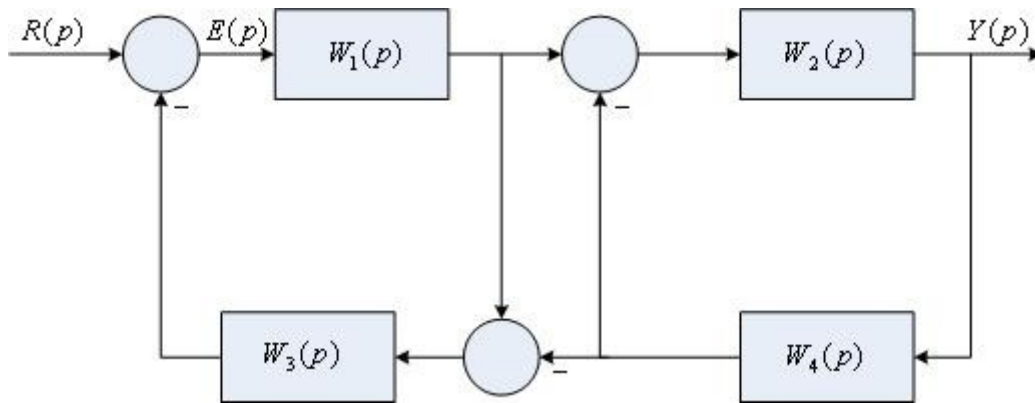
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{60(0,1p+1)}{(0,4p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 19-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора по критерию модульного (технического) оптимума системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 4, исходные данные для четвертого варианта – в табл. 6.
5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 19 таблицы 3.

Вариант №20

1. Определите передаточную функцию по рассогласованию $W_{se}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

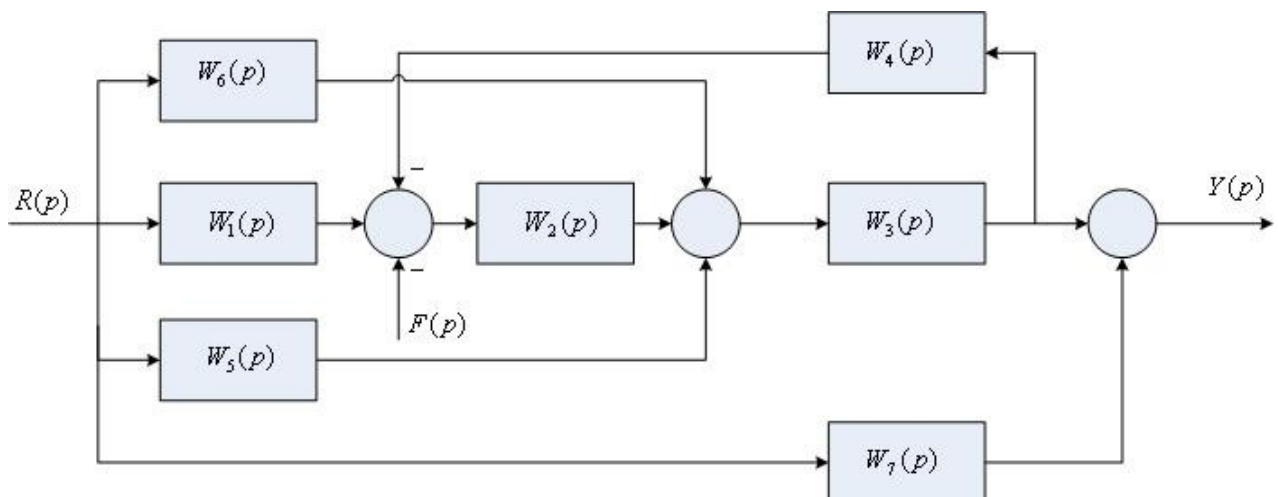
$$W(p) = \frac{40 p(0,01 p+1)}{(0,5 p+1)(0,1 p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 20-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора системы с аperiodической реакцией, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 5, исходные данные для четвертого варианта – в табл. 7.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 20 таблицы 3.

Вариант №21

1. Определите передаточную функцию по каналу управления

$W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

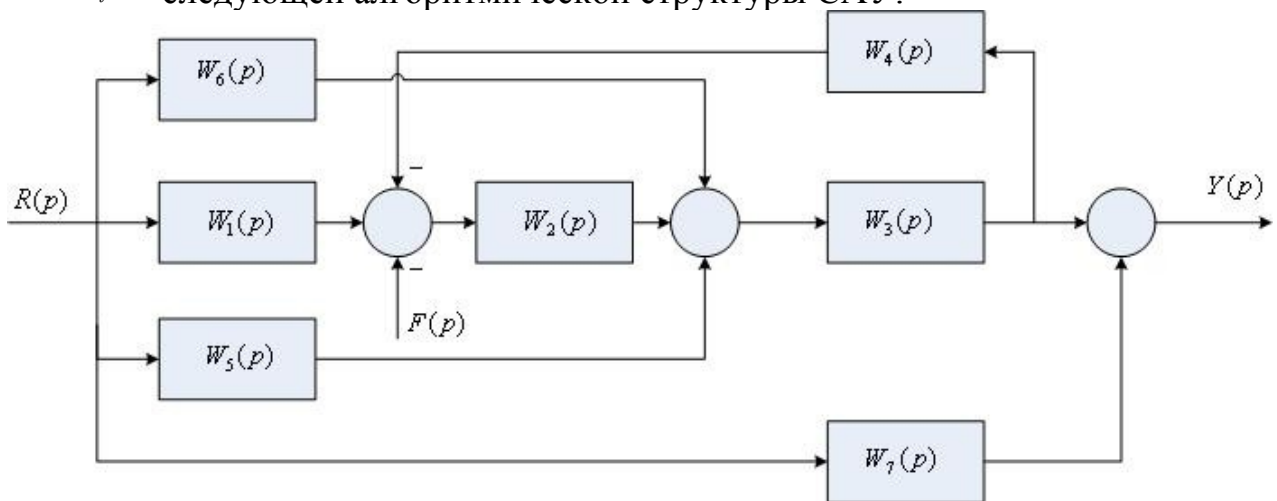
$$W(p) = \frac{30(0,01p+1)}{(0,1p+1)^2}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 1-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по временному модифицированному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для пятого варианта – в табл. 2.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 21 таблицы 3.

Вариант №22

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения

$W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{20(0,05p+1)}{p(0,2p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 2-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные

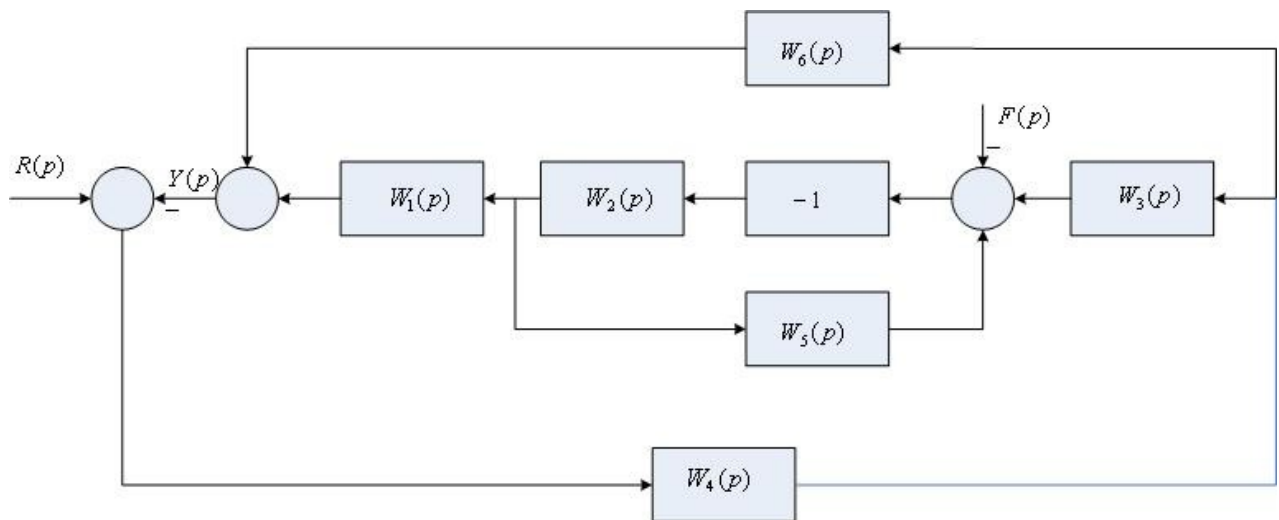
данные для пятого варианта – в табл. 4.

5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 22 таблицы 3.

Вариант №23

1. Определите передаточную функцию по каналу управления

$W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

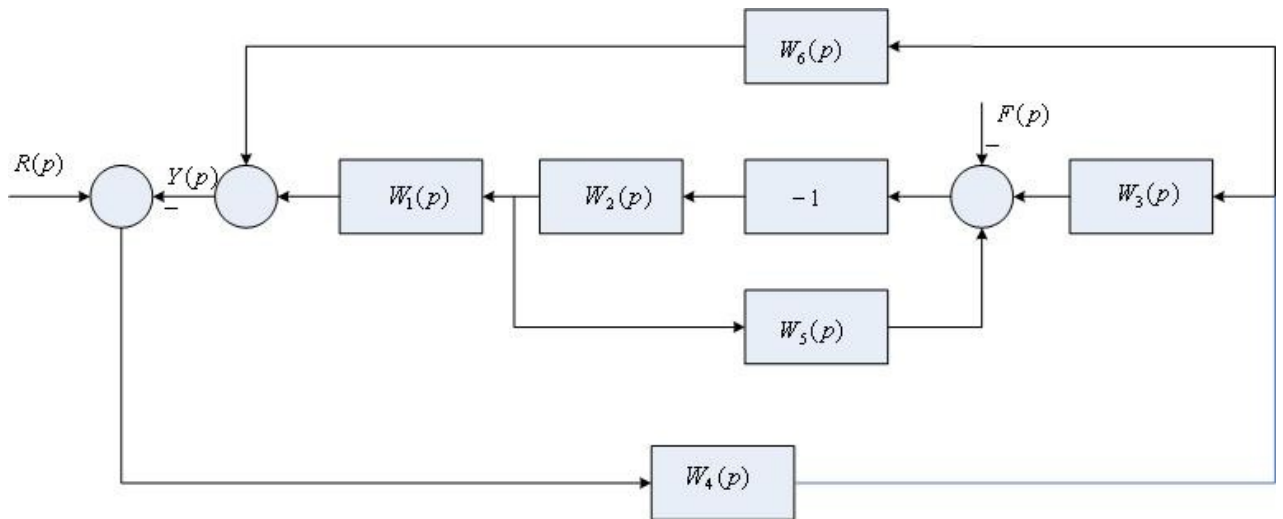
$$W(p) = \frac{80(0,4p+1)}{p^2(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 3-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по методу СНР системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 3, исходные данные для пятого варианта – в табл. 5.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 23 таблицы 3.

Вариант №24

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения

$W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



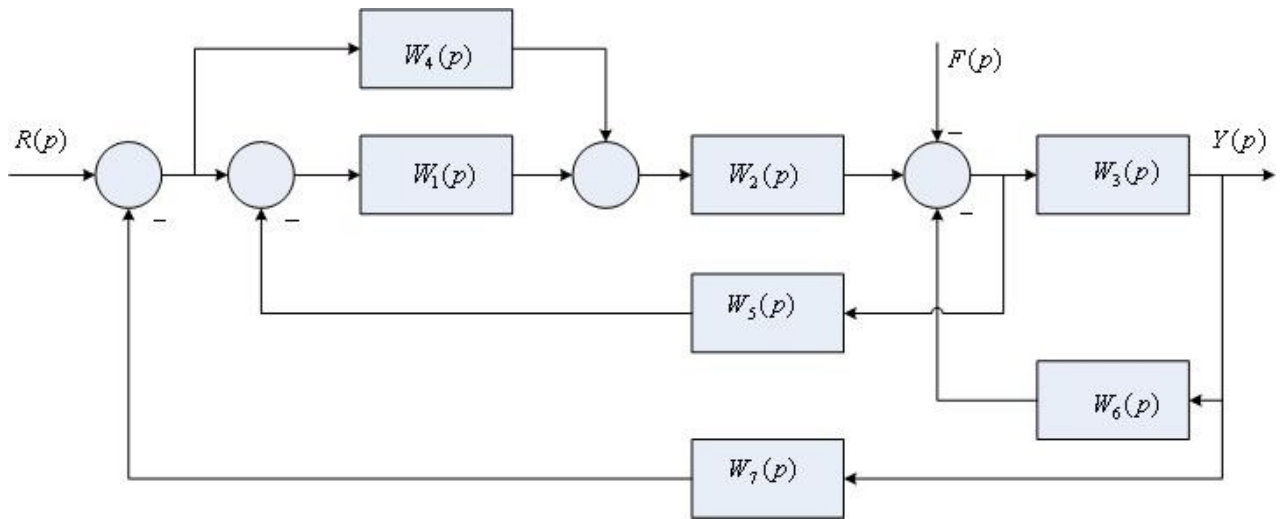
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{200}{(0,5p+1)(0,01p+1)}.$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 4-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора по критерию модульного (технического) оптимума системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 4, исходные данные для пятого варианта – в табл. 6.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 24 таблицы 3.

Вариант №25

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

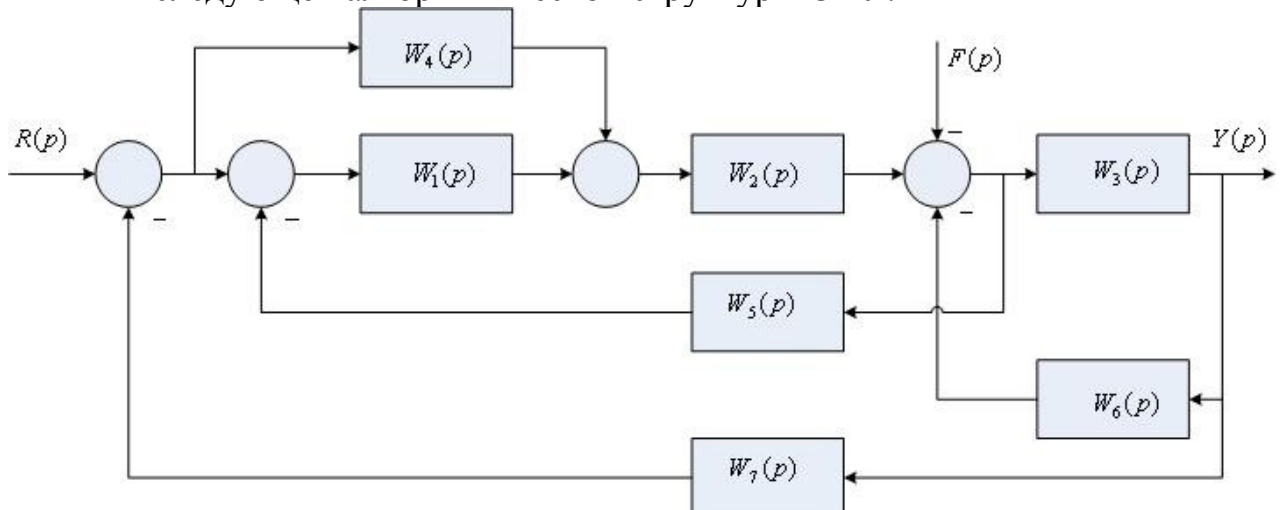
$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора системы с аperiodической реакцией, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 5, исходные данные для пятого варианта – в табл. 7.
5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 25 таблицы 3.

Вариант №26

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения

$W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



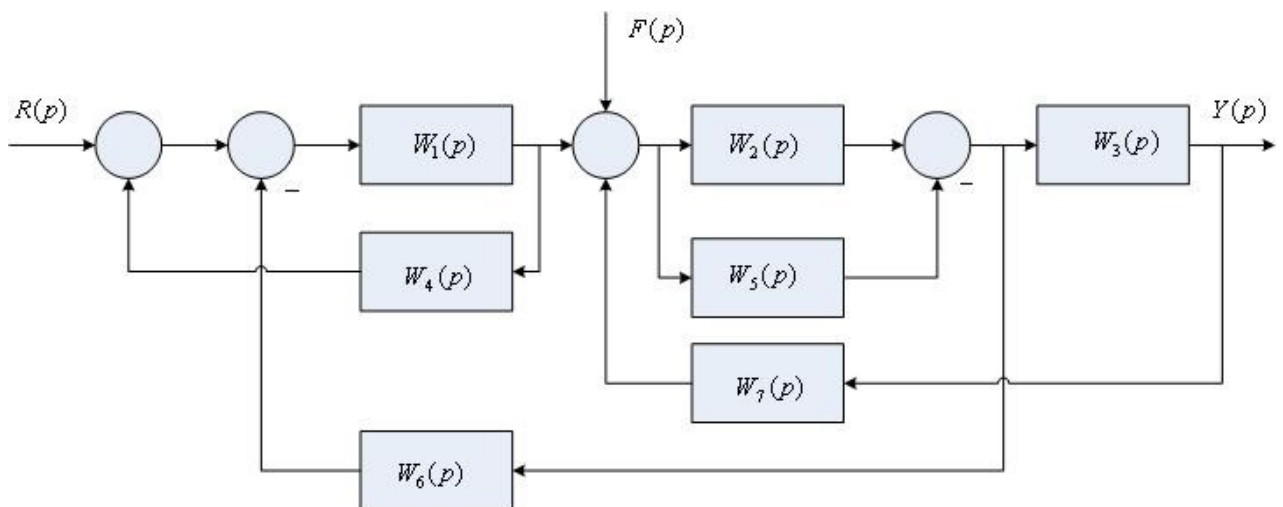
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}.$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по временному модифицированному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для шестого варианта – в табл. 2.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 26 таблицы 3.

Вариант №27

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}.$$

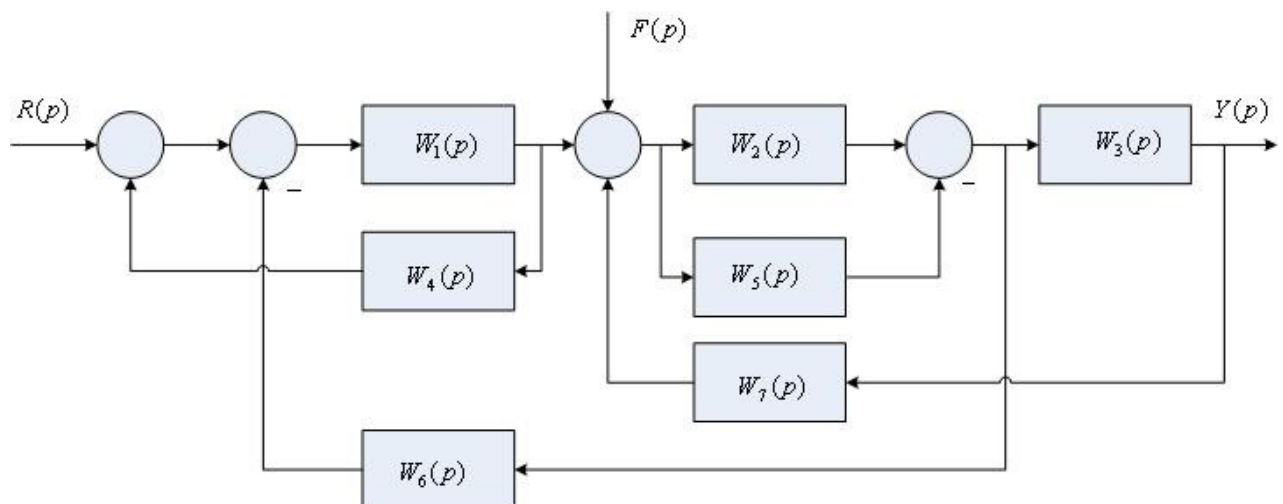
3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные

данные для шестого варианта – в табл. 4.

5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 27 таблицы 3.

Вариант №28

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения $W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



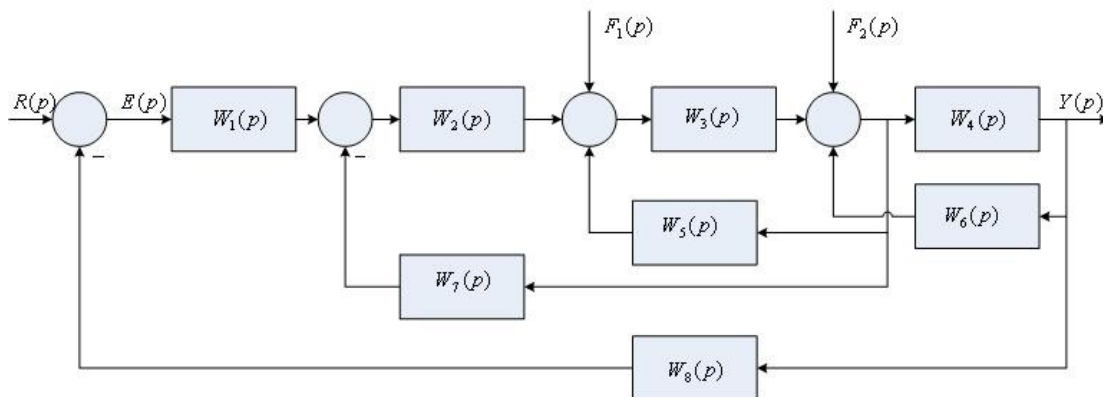
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по методу CHR системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 3, исходные данные для шестого варианта – в табл. 5.
5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 28 таблицы 3.

Вариант №29

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.

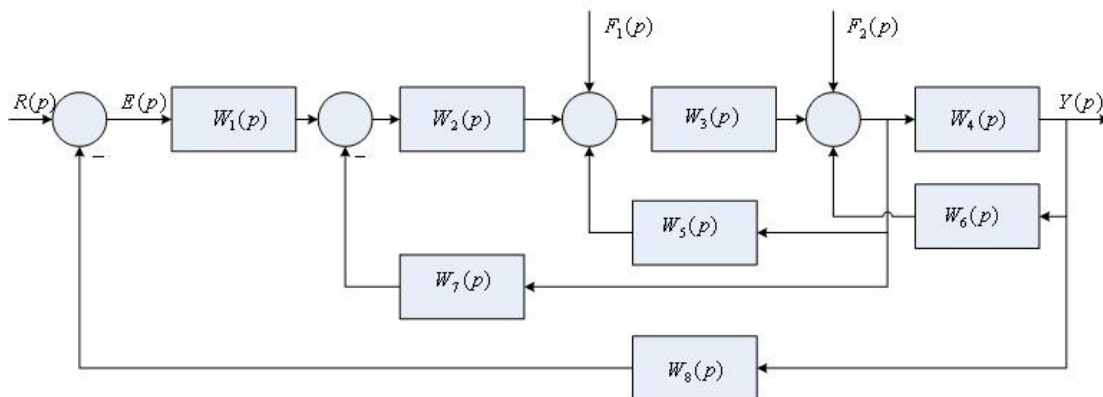
4. Настройте параметры регулятора по критерию модульного (технического) оптимума системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 4, исходные данные для шестого варианта – в табл. 6.

5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 29 таблицы 3.

Вариант №30

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения

$W_{sf1}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



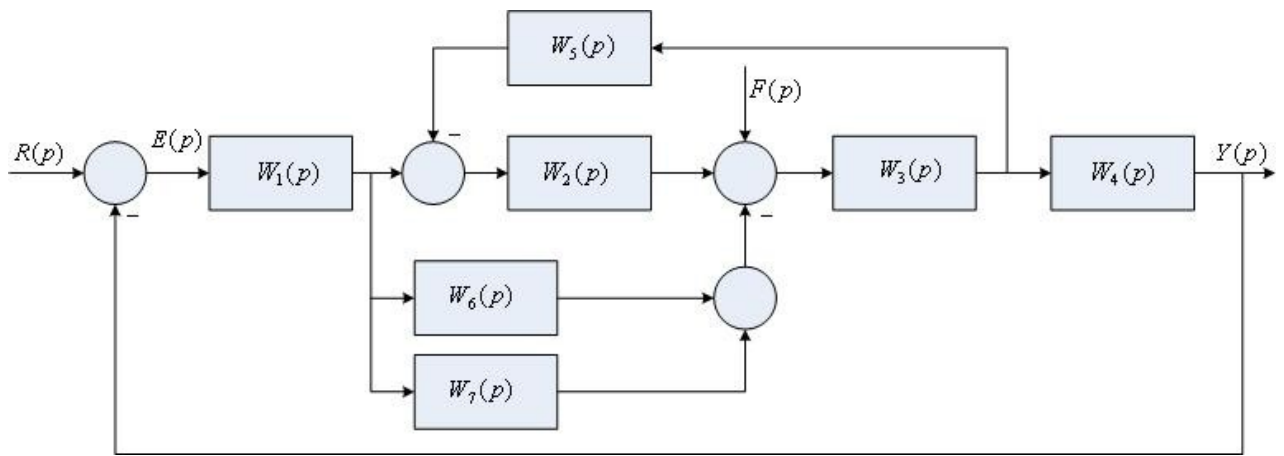
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора системы с апериодической реакцией, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 5, исходные данные для шестого варианта – в табл. 7.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 30 таблицы 3.

Вариант №31

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения $W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.

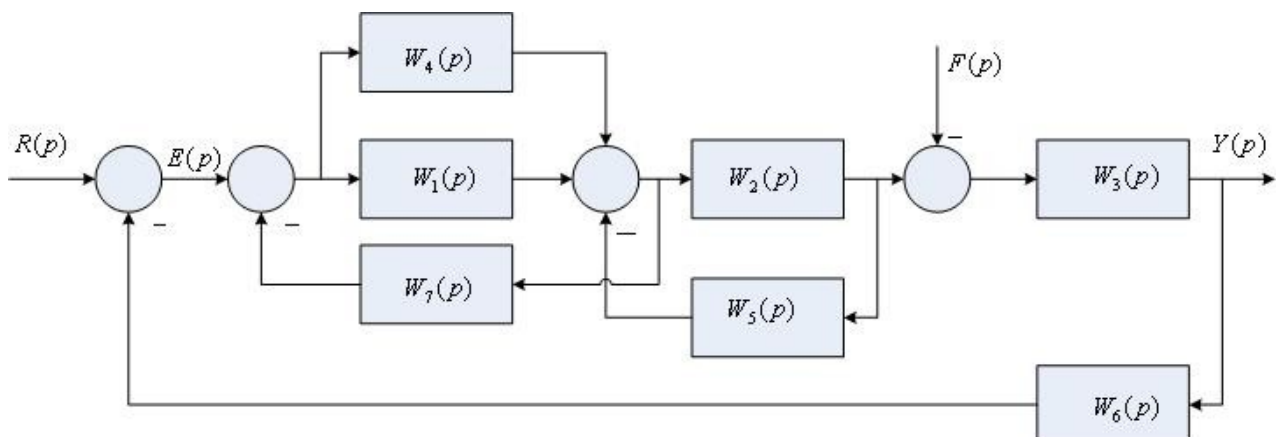
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по временному модифицированному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для седьмого варианта – в табл. 2.

5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 31 таблицы 3.

Вариант №32

1. Определите передаточную функцию по каналу управления

$W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

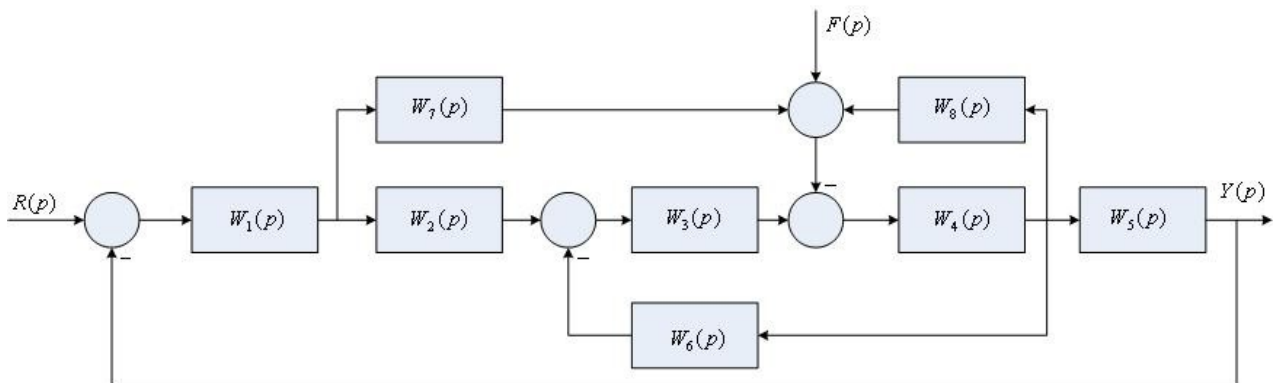
$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для седьмого варианта – в табл. 4.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 32 таблицы 3.

Вариант №33

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения

$W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

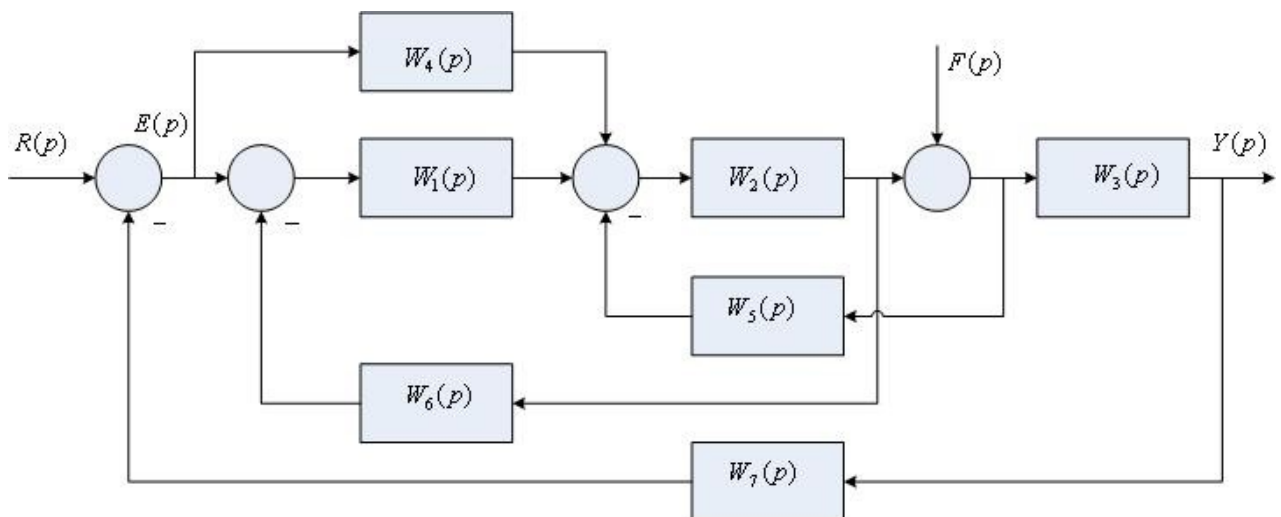
$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.

4. Настройте параметры ПИД – регулятора по методу CHR системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 3, исходные данные для седьмого варианта – в табл. 5.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 33 таблицы 3.

Вариант №34

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:

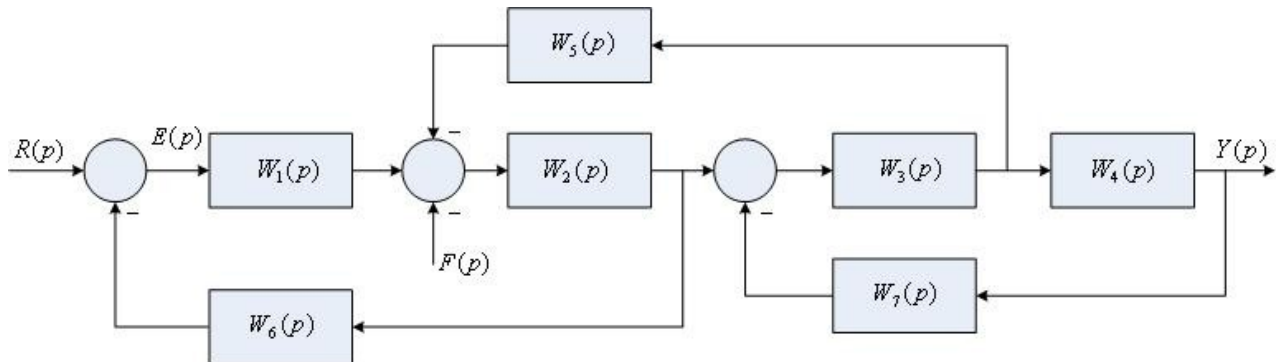


2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$
3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора по критерию модульного (технического) оптимума системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 4, исходные данные для седьмого варианта – в табл. 6.
5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 34 таблицы 3.

Вариант №35

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения $W_{sf}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



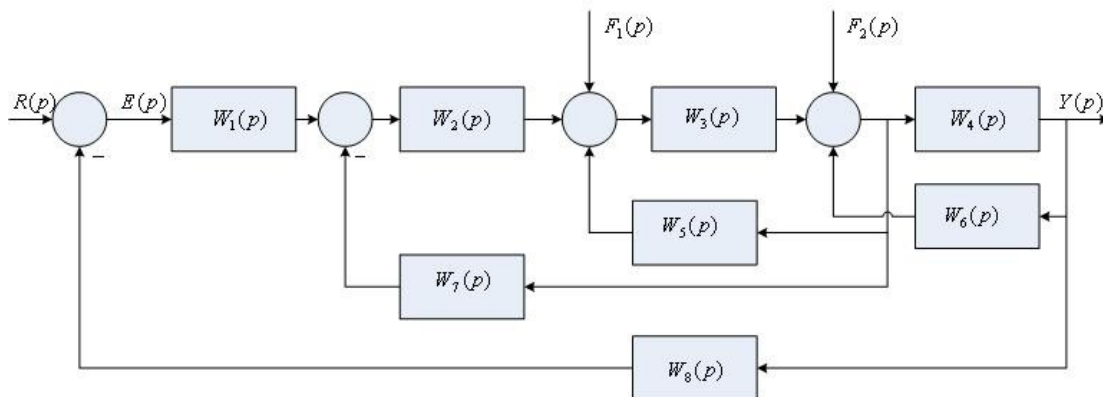
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора системы с аperiodической реакцией, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 5, исходные данные для седьмого варианта – в табл. 7.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 35 таблицы 3.

Вариант №36

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения $W_{sf1}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

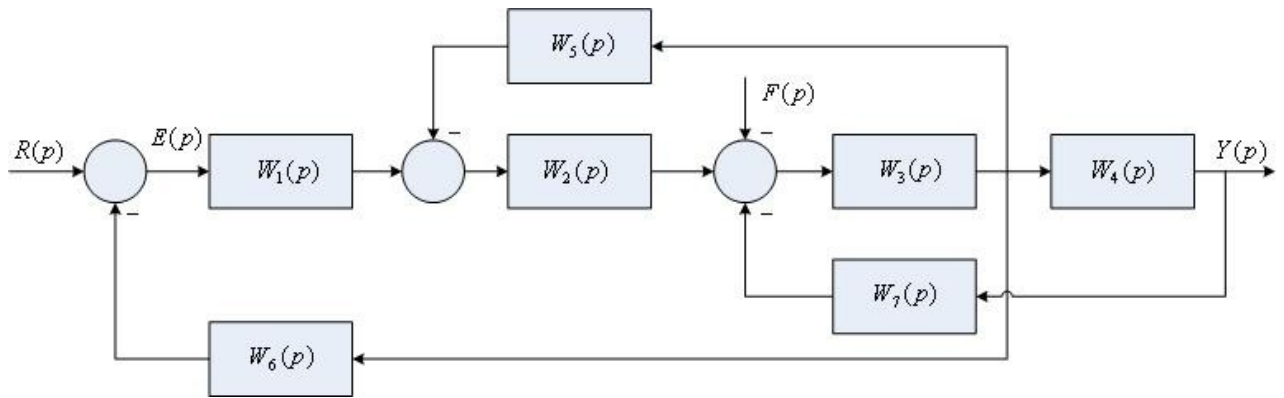
$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по временному модифицированному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для восьмого варианта – в табл. 2.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 36 таблицы 3.

Вариант №37

1. Определите передаточную функцию по каналу управления

$W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

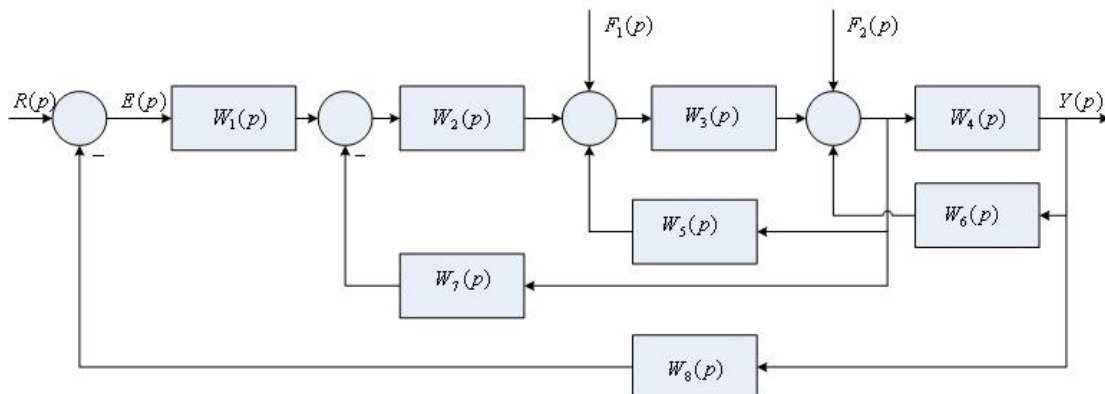
3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.

4. Настройте параметры ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 2, исходные данные для восьмого варианта – в табл. 4.

5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 37 таблицы 3.

Вариант №38

1. Определите передаточную функцию по каналу возмущения $W_{sf2}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

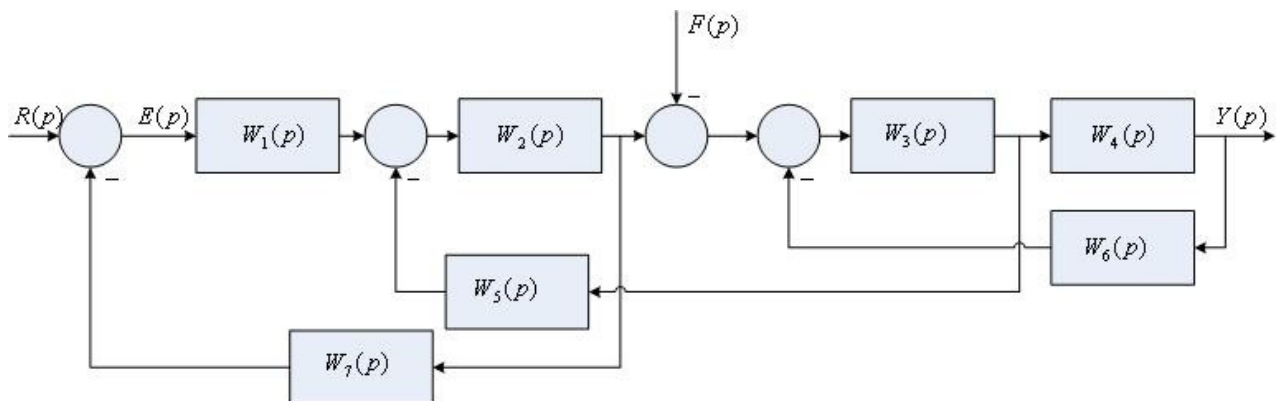
$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры ПИД – регулятора по методу CHR системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 3, исходные данные для восьмого варианта – в табл. 5.
5. Реализация цифровых регуляторов методом последовательного программирования по варианту 38 таблицы 3.

Вариант №39

1. Определите передаточную функцию по рассогласованию

$W_{se}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



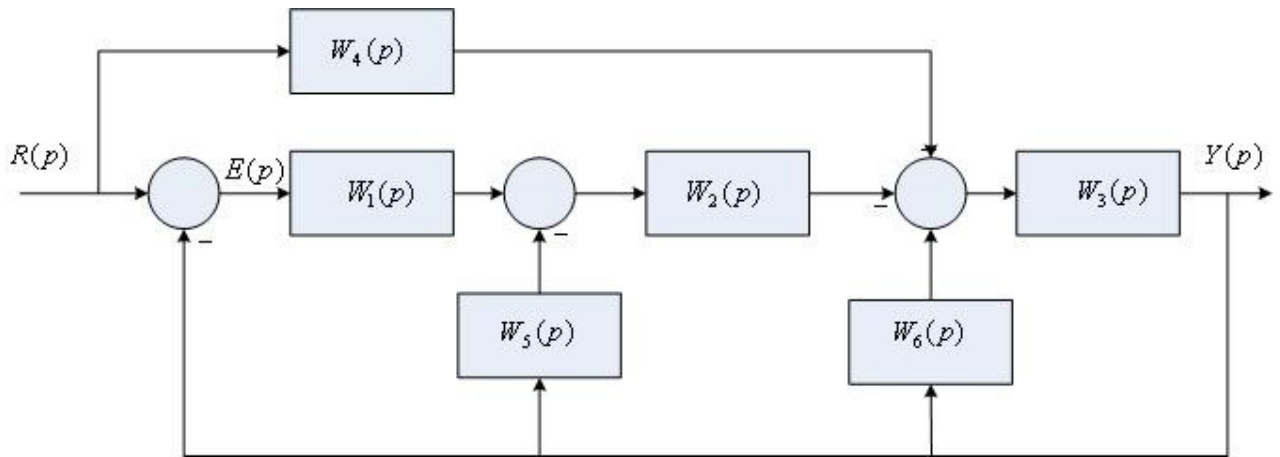
2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора по критерию модульного (технического) оптимума системы, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 4, исходные данные для восьмого варианта – в табл. 6.
5. Реализация цифровых регуляторов методом параллельного программирования по варианту 39 таблицы 3.

Вариант №40

1. Определите передаточную функцию по каналу управления $W_{sr}(p)$ следующей алгоритмической структуры САУ:



2. Постройте ЛЧХ звена, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{14(0,05p+1)}{p(0,1p+1)(0,01p+1)}$$

3. Проведите анализ устойчивости по критерию Гурвица системы, состоящей из функционально необходимых элементов, структурная схема которой приведена на рис. 1, а исходные данные для 5-го варианта – в табл. 1.
4. Настройте параметры регулятора системы с апериодической реакцией, состоящей из функционально необходимых элементов. Структурная схема системы приведена на рис. 5, исходные данные для восьмого варианта – в табл. 7.
5. Реализация цифровых регуляторов методом прямого программирования по варианту 40 таблицы 3.

Приложение 1

Способы определения передаточных функций замкнутых САУ

1. *Преобразование сложной структурной схемы в эквивалентную простую одноконтурную на основании правил преобразования и определение передаточной функции по известным формулам.*

2. *Аналитический вывод передаточных функций замкнутых САУ.*

Составлять уравнение, связывающее изображение регулируемой функции с изображениями внешних воздействий, следует последовательно путём последовательного анализа схемы, начиная с регулируемой функции и двигаясь против направления передачи сигналов. От каждого сумматора схему необходимо осматривать в нескольких направлениях : до какого-либо из внешних воздействий или до регулируемой функции. При этом изображение выходной функции каждого звена выражается через его передаточную функцию и изображение входного воздействия, а изображение суммы нескольких слагаемых выражается через сумму их изображений. Постепенно исключаются изображения промежуточных переменных и получается искомое уравнение.

3. *Применение теории графов.*

Передаточные функции сложной многоконтурной САУ можно определить по структурной схеме без приведения её к одноконтурной, если использовать метод теории графов. Структурную схему САУ можно рассматривать как один из видов графа, и для определения передаточных функций пользоваться формулой Мейсона, предложенной в 1953 году:

$$W_{yr}(p) = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \Phi_i}{\Phi}, \quad (1)$$

где $W_{yr}(p)$ – отношение изображений $Y(p)$ переменной y к изображению $R(p)$ переменной r ;

$$\Phi = 1 - \sum_{i=1}^{n_1} H_{1i} + \sum_{i=1}^{n_2} H_{2i} - \sum_{i=1}^{n_3} H_{3i} + \dots ;$$

H_{1i} – передаточная функция разомкнутой цепи i -го замкнутого контура структурной схемы;

n_1 - число замкнутых контуров в схеме;
 H_{2i}^- - произведение передаточных функций разомкнутых цепей i -й пары не соприкасающихся замкнутых контуров;
 n_2^- - число пар не соприкасающихся контуров;
 H_{3i}^- - произведение передаточных функций разомкнутых цепей i -й тройки не соприкасающихся контуров;
 n_3^- - число троек не соприкасающихся контуров;
 H_i^- - передаточная функция i -й прямой цепи от переменной r к переменной y ;
 n - число прямых цепей от r к y ;
 Φ_i - функция Φ для той части структурной схемы, которая не соприкасается с i -й прямой цепью от r к y .

Формула (1) позволяет без преобразования структурной схемы САУ определить любую её передаточную функцию, т.е. отношение изображения одной из переменных (обобщённых координат) к изображению внешнего воздействия или другой переменной.

Используя формулу Мейсона, нужно иметь в виду следующее:

1. Прямые цепи от r к y могут частично совпадать одна с другой;
2. При определении передаточной функции разомкнутой цепи каждого из контуров нужно учитывать знак обратной связи, образующей этот контур;
3. Контур не соприкасается один с другим, когда у них нет ни общей координаты (стрелки на структурной схеме), ни общего звена (прямоугольника на структурной схеме);
4. Если в структурной схеме есть более трёх не соприкасающихся контуров, то при вычислении функции Φ нужно добавить соответствующие суммы;
5. Каждая из функций Φ_i вычисляется так же, как и функция Φ , но рассматривается лишь та часть структурной схемы, которая не соприкасается с i -й прямой цепью от r к y ;
6. Если с i -й прямой цепью соприкасаются все замкнутые контуры, то $\Phi_i = 1$.

Пример

По структурной схеме САУ (рис.1) нужно определить её передаточную функцию относительно задающего воздействия r .

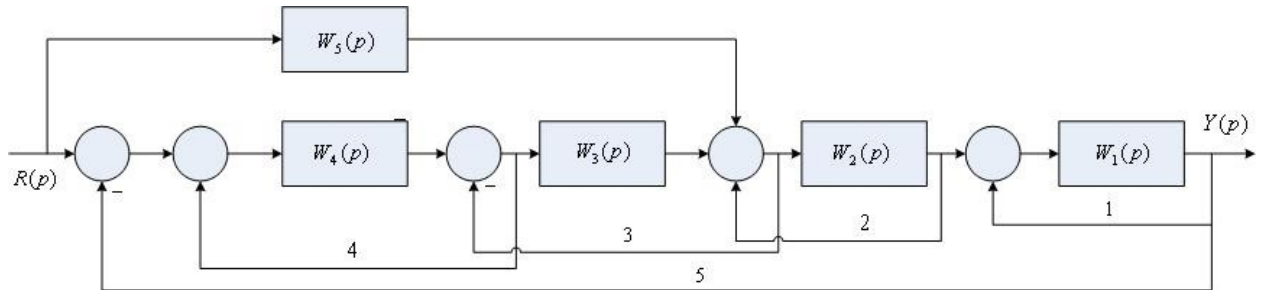


Рис. 1. Структурная схема многоконтурной САУ с дополнительной связью по задающему воздействию

Воспользуемся формулой (1) и начнём с вычисления функции Φ . В рассматриваемой схеме пять замкнутых контуров; передаточные функции их разомкнутых цепей $W_1, W_2, -W_3, -W_4, -W_1W_2W_3W_4$.

Следовательно:

$$\sum_{i=1}^5 H_{1i} = W_1 + W_2 - W_3 - W_4 - W_1W_2W_3W_4$$

Очевидно, что схема содержит пары из 1-го и 2-го, 1-го и 3-го, 1-го и 4-го, 2-го и 4-го непересекающихся контуров, поэтому

$$\sum_{i=1}^4 H_{2i} = W_1W_2 - W_1W_3 - W_1W_4 - W_2W_4$$

Имеется только одна тройка из непересекающихся контуров, и она состоит из 1-го, 2-го и 4-го контуров:

$$H_{31} = -W_1W_2W_4$$

Четырёх непересекающихся контуров в схеме нет, следовательно, теперь можно определить функцию

$$\Phi = 1 - \sum_{i=1}^5 H_{1i} + \sum_{i=1}^4 H_{2i} - H_{31} = (1 - W_1)[(1 - W_2)(1 + W_4) + W_3] + W_1W_2W_3W_4$$

От задающего воздействия r к регулируемой координате y идут две прямые цепи передачи сигнала. Их передаточные функции

$$H_1 = W_4W_3W_2W_1 \quad \text{и} \quad H_2 = W_5W_2W_1$$

С первой прямой цепью соприкасаются все замкнутые контуры, со второй прямой цепью не соприкасается только 4-й контур, следовательно,

$$\Phi_1 = 1 \quad \text{и} \quad \Phi_2 = 1 + W_4;$$

$$\sum_{i=1}^2 H_i \Phi_i = W_1 W_2 [W_3 W_4 + (1 + W_4) W_5]$$

Теперь можно определить искомую передаточную функцию

$$W_{yr} = \frac{\sum_{i=1}^2 H_i \Phi_i}{\Phi} = \frac{W_1 W_2 [W_3 W_4 + (1 + W_4) W_5]}{(1 - W_1) [(1 - W_2)(1 + W_4) + W_3] + W_1 W_2 W_3 W_4}$$

Легко убедиться, что преобразование рассмотренной структурной схемы в эквивалентную одноконтурную имеет более сложный расчёт. Использование формулы (1) обычно уменьшает трудоёмкость определения передаточных функций САУ, структурная схема которой имеет несколько взаимосвязанных контуров.

4. Применение таблиц эквивалентного преобразования структурных схем, приводимых в учебных пособиях.

Приложение 2

Методика построения логарифмических частотных характеристик САУ

Пусть передаточная функция разомкнутой статической САУ, состоящей из минимально-фазовых звеньев 1-го порядка, имеет вид

$$W(p) = k \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) \dots (T_n p + 1)}{(T_{n+1} p + 1)(T_{n+2} p + 1) \dots (T_m p + 1)} e^{-p\tau},$$

в реальных системах $n \leq (m-n)$.

Отобразим $W(p)$ в область преобразований Фурье; преобразуем математическое описание каждого элементарного звена к форме $A(\omega)e^{j\theta(\omega)}$ и расположим в порядке убывания величины T_i :

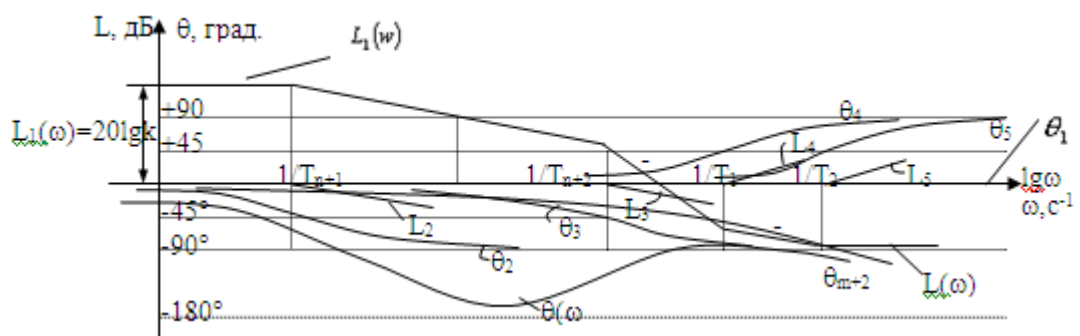
$$W(j\omega) = k \frac{(1+jT_1\omega)(1+jT_2\omega)\dots(1+jT_n\omega)}{(1+jT_{n+1}\omega)(1+jT_{n+2}\omega)\dots(1+jT_m\omega)} e^{-j\omega\tau} = k \frac{1}{\sqrt{1+T_{n+1}^2\omega^2}} e^{-j\text{arctg } \omega T_{n+1}} \times \dots \times \frac{1}{\sqrt{1+T_{n+2}^2\omega^2}} e^{-j\text{arctg } \omega T_{n+2}} \times \sqrt{1+T_1^2\omega^2} e^{j\text{arctg } \omega T_1} \times \sqrt{1+T_2^2\omega^2} e^{j\text{arctg } \omega T_2} \times \dots \times e^{-j\omega\tau} =$$

$$= k \frac{1}{\sqrt{1+T_{n+1}^2\omega^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1+T_{n+2}^2\omega^2}} \times \sqrt{1+T_1^2\omega^2} \times \sqrt{1+T_2^2\omega^2} \times \dots \times e^{j(-\text{arctg } \omega T_{n+1} - \text{arctg } \omega T_{n+2} + \text{arctg } \omega T_1 + \text{arctg } \omega T_2 + \dots - \omega\tau)}.$$

Тогда

$$L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{1+T_{n+1}^2\omega^2} - 20 \lg \sqrt{1+T_{n+2}^2\omega^2} + 20 \lg \sqrt{1+T_1^2\omega^2} + 20 \lg \sqrt{1+T_2^2\omega^2} + \dots;$$

$$\theta(\omega) = -\text{arctg } \omega T_{n+1} - \text{arctg } \omega T_{n+2} + \text{arctg } \omega T_1 + \text{arctg } \omega T_2 + \dots - \omega\tau.$$



Алгоритм построения ЛАЧХ:

1. На оси ω нанесите точки $\omega_i=1/T_i$. Проведите через эти точки вертикальные штриховые линии.

2. Проведите контурную линию с ординатой $20\lg k$ слева до первой вертикальной линии при отсутствии нулевых полюсов и нулей в передаточной функции или линию с наклоном -20дБ/дек через точку $\omega=k$ при одном нулевом полюсе, или линию с наклоном -40 дБ/дек через точку $\omega=\sqrt{k}$ при двух нулевых полюсах, или линию с наклоном $+20\text{ дБ/дек}$ через точку $\omega=1/k$ при одном корне числителя, равном нулю, или линию с наклоном $+40\text{ дБ/дек}$ через точку $\omega=1/\sqrt{k}$ при двух нулях, равных нулю, и т.д.

3. До следующей вертикальной линии проведите контурную линию с наклоном $-20*v\text{ дБ/дек}$ (v – количество элементарных звеньев с одинаковыми T_i), если звенья апериодические, или $+20*v\text{ дБ/дек}$ для дифференцирующих звеньев первого порядка.

4. Уменьшите (увеличьте) наклон на $-20*v\text{ дБ/дек}$ ($+20*v\text{ дБ/дек}$) на следующей вертикальной линии до полного построения $L(\omega)$.

Высокочастотные асимптоты ЛАЧХ (справа от наибольшей сопрягающей частоты) проводят в требуемом диапазоне частот.

Примечания:

1. Для построения ЛАЧХ звена второго порядка используются приведенные характеристики в технической литературе или строятся по точкам вблизи $\omega_i=1/T_i$, вдали с асимптотами: левой 0 дБ/дек , правой -40 дБ/дек для колебательного звена и $+40\text{ дБ/дек}$ для звена дифференцирующего второго порядка.

2. Правило построения ЛЧХ систем с неминимально-фазовыми звеньями остаётся тем же.

3. ЛФЧХ строятся по точкам, рассчитанным аналитически.

Пример

Пусть задана передаточная функция объекта

$$W(p) = \frac{(15p+5)(30p-30)}{(30p+3)(0,45p^2+2,4p+5)}$$

Требуется построить асимптотическую ЛАЧХ объекта.

1. Выделение элементарных звеньев.

Вынесем множитель из каждой скобки так, чтобы свободный член в этой скобке был равен 1:

$$W(p) = \frac{5 \cdot (3p+1) \cdot 30 \cdot (p-1)}{3 \cdot (10p+1) \cdot 5 \cdot (0,09p^2 + 0,48p+1)} = \frac{10 \cdot (3p+1)(p-1)}{(10p+1)(0,09p^2 + 0,48p+1)}$$

Корни квадратного трёхчлена в знаменателе комплексно-сопряжённые, поэтому можно представить заданную передаточную функцию в виде произведения передаточного коэффициента и четырёх передаточных функций элементарных звеньев:

$$W(p) = k \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p),$$

$$W(p) = \frac{k \cdot (T_1 p + 1)(T_2 p - 1)}{(T_3 p + 1)(T_4^2 p^2 + 2\zeta T_4 p + 1)} = k \cdot (T_1 p + 1) \cdot (T_2 p - 1) \cdot \frac{1}{T_3 p + 1} \cdot \frac{1}{T_4^2 p^2 + 2\zeta T_4 p + 1},$$

где $k=10$, $T_1=3c$, $T_2=1c$, $T_3=10c$, $T_4=\sqrt{0,09}=0,3c$, $\zeta=\frac{0,48}{2 \cdot 0,3}=0,8$

Звенья с передаточными функциями $W_1(p)=T_1 p + 1$ и $W_2(p)=T_2 p - 1$ - идеальные звенья с введением производной, второе из них - неминимально -

фазовое. Звено с передаточной функцией $W_3(p)=\frac{1}{T_3 p + 1}$ - аperiodическое

звено, а звено с $W_4(p)=\frac{1}{T_4^2 p^2 + 2\zeta T_4 p + 1}$ - колебательное, поскольку $\zeta=0,8 < 1$.

2. Определение сопрягающих частот.

Сопрягающие частоты – это точки излома ЛАЧХ. Они определяются

как $\omega_i = \frac{1}{T_i}$. Таким образом,

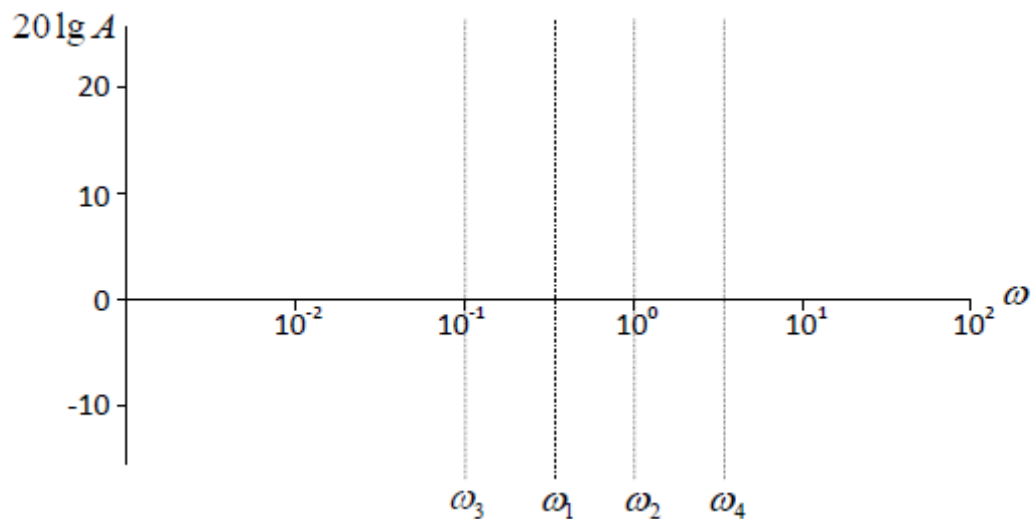
$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{3} \approx 0,33 \text{ рад/с}, & \omega_2 &= \frac{1}{1} = 1 \text{ рад/с}, \\ \omega_3 &= \frac{1}{10} = 0,1 \text{ рад/с}, & \omega_4 &= \frac{1}{0,3} \approx 3,33 \text{ рад/с}. \end{aligned}$$

Поскольку при построении ЛАЧХ на оси абсцисс откладывается $\lg \omega$, вычислим десятичные логарифмы этих частот:

$$\begin{aligned} \lg \omega_1 &\approx \lg 0,33 \approx -0,48 & \lg \omega_2 &= \lg 1 = 0 \\ \lg \omega_3 &= \lg 0,1 = -1 & \lg \omega_4 &\approx \lg 3,33 \approx 0,52 \end{aligned}$$

3. Построение ЛАЧХ.

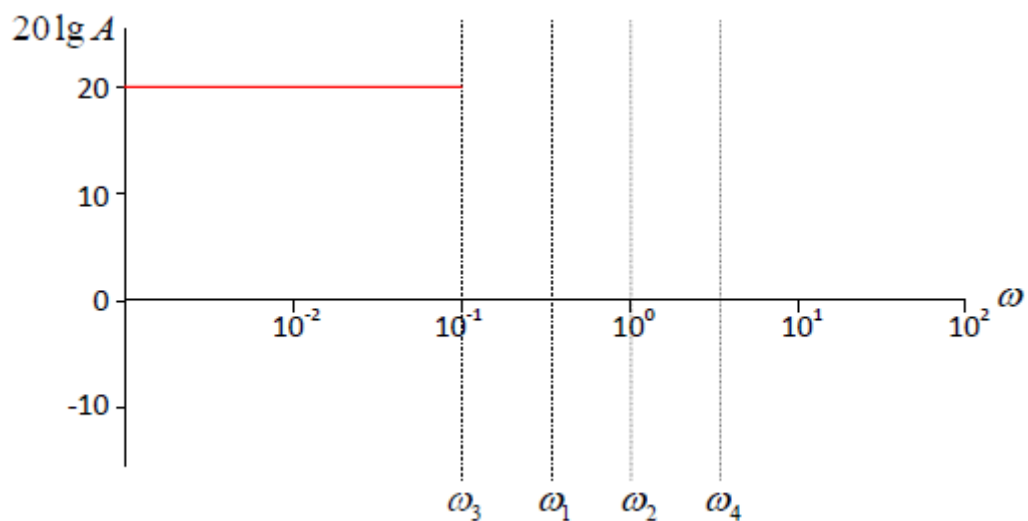
Отметим найденные точки излома ЛАЧХ на оси абсцисс:



Поскольку интегрирующие и дифференцирующие звенья в системе отсутствуют, на низких частотах (примерно до первой сопрягающей частоты ω_3) система имеет постоянное усиление, равное $k=10$. Учитывая, что амплитудная характеристика откладывается в логарифмическом масштабе (в децибеллах) получаем

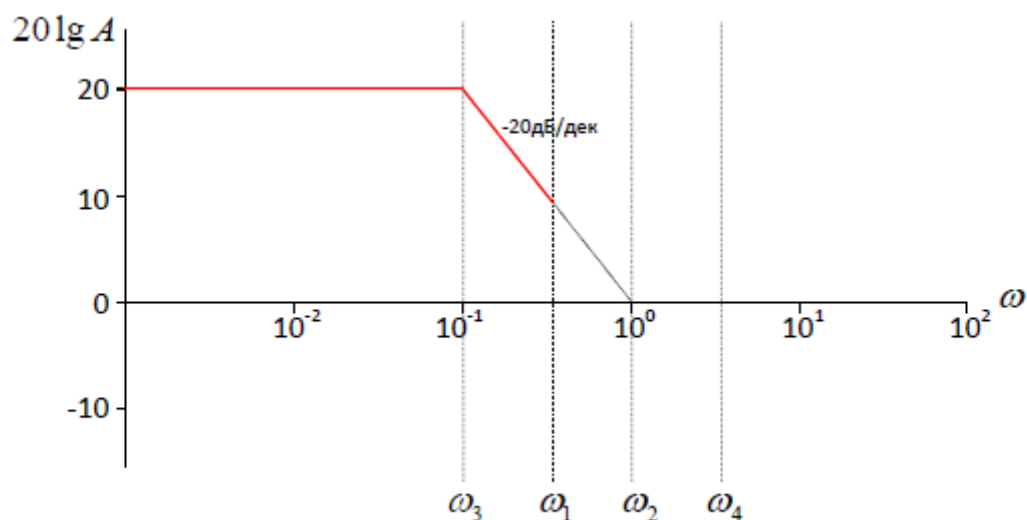
$$20 \lg k = 20 \lg 10 = 20$$

и можно сразу нарисовать начальный участок ЛАЧХ:

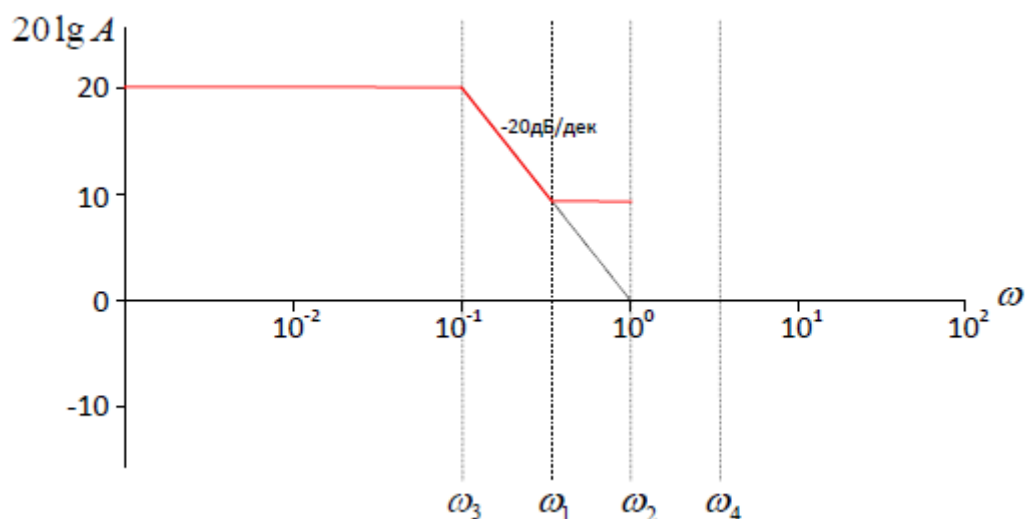


На частоте ω_3 вступает в действие апериодическое звено, которое даёт наклон -20 дБ/дек, в интервале от ω_3 до ω_1 график спускается вниз на

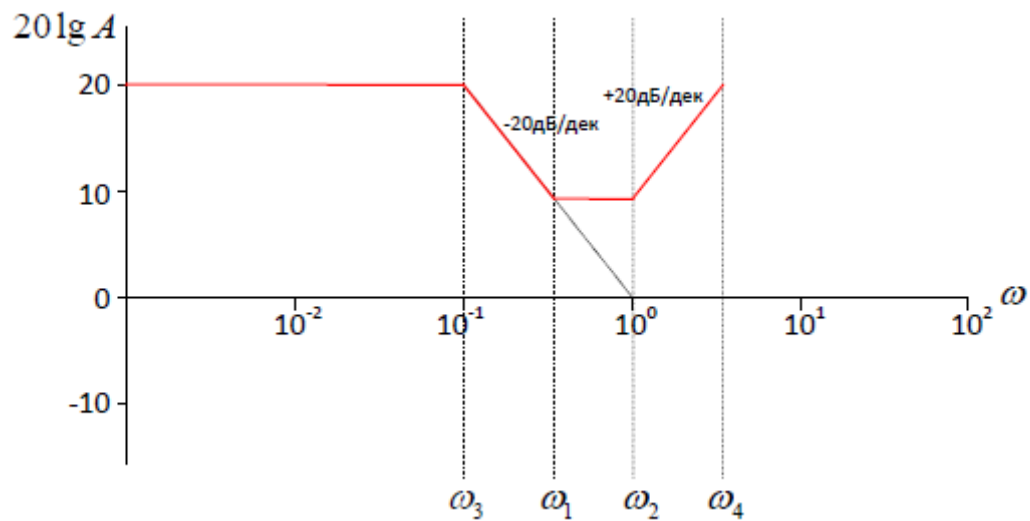
$20(\lg \omega_1 - \lg \omega_3) \approx 10,4$ дБ, поэтому ордината для частоты ω_1 равна $20 - 10,4 \approx 9,6$ дБ:



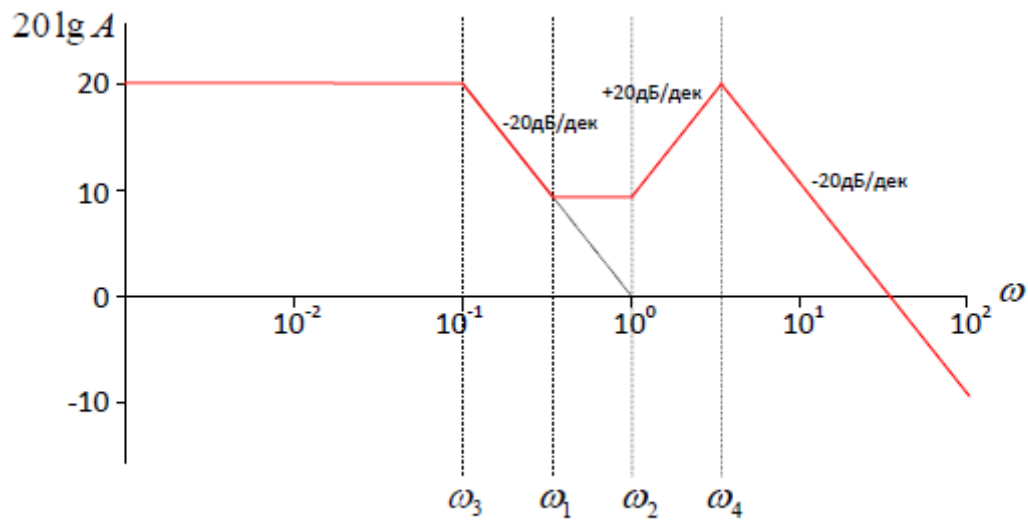
На частоте ω_1 идеальное звено с введением производной добавляет наклон +20 дБ/дек, таким образом, общий наклон становится равен нулю:



На частоте ω_2 неминимально – фазовое идеальное звено с введением производной ещё добавляет наклон +20 дБ/дек, таким образом, общий наклон становится равен +20 дБ/дек. В интервале от ω_2 до ω_4 график поднимается на $20(\lg \omega_4 - \lg \omega_2) \approx 10,4$ дБ, поэтому ордината для частоты ω_4 равна $9,6 + 10,4 = 20$ дБ:



Наконец, на частоте ω_4 колебательное звено добавляет наклон -40 dB/dec , таким образом, общий наклон становится равен -20 dB/dec :



Приложение 3

Пример рекомендуемой последовательности действий при анализе устойчивости системы

Пусть задана структурная схема (рис. 5) и параметры исследуемой системы.

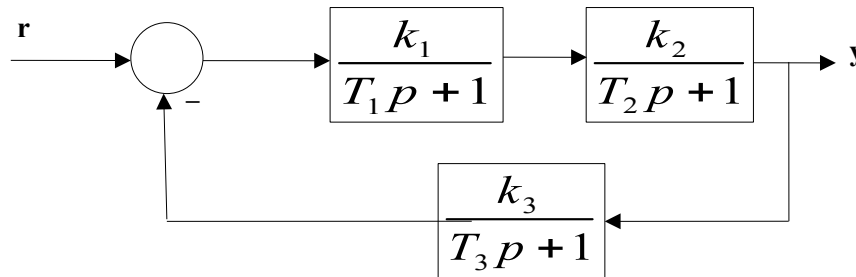


Рис. 5. Структурная схема исследуемой системы

Алгоритм исследования устойчивости замкнутой САУ:

- определяем передаточную функцию замкнутой системы

$$W_{зр}(p) = \frac{W_{нк}(p)}{1 + W_{нк}(p) \cdot W_{oc}(p)} = \frac{\frac{k_1 k_2}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}}{1 + \frac{k_1 k_2 k_3}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}} = \frac{k_1 k_2 (T_3 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) + k_1 k_2 k_3},$$

где $W_{нк}(p)$ – передаточная функция прямого канала системы; $W_{oc}(p)$ – передаточная функция обратной связи;

- записываем характеристическое уравнение замкнутой системы:

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) + k_1 k_2 k_3 = 0;$$

после преобразования этого выражения получим:

$$T_1 T_2 T_3 p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3) p + (1 + k_1 k_2 k_3) = 0;$$

обозначим:

$$a_0 = T_1 T_2 T_3;$$

$$a_1 = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3;$$

$$a_2 = T_1 + T_2 + T_3;$$

$$a_3 = 1 + k_1 k_2 k_3;$$

тогда выражение примет стандартную форму:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0;$$

- условия устойчивости замкнутой системы 3-го порядка:

1) $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0$ (условие Рауса);

2) $a_1 a_2 > a_0 a_3$ (условие Гурвица);

если условия устойчивости имеют место, то система устойчива;

- система на границе устойчивости, если выполняется равенство в условии Гурвица, откуда определяется критическая величина передаточного коэффициента разомкнутой системы:

$$k_{pскр} = \frac{a_1 a_2}{a_0} - 1 ;$$

- заключение об устойчивости системы.

Приложение 4

Методы настройки параметров ПИД – регулятора

ПИД – регулятор был изобретён в 1910 году. Долгое время настройка параметров регулятора осуществлялась эвристическим ручным методом, основанным на интуиции и изобретательстве инженеров.

В 1942 году американские учёные J.G. Ziegler и N.B. Nichols (США, г. Рочестер, штат Нью-Йорк) при исследовании систем с ПИД – регуляторами обнаружили две закономерности:

- Оптимальная зона пропорциональности П – регулятора в два раза меньше величины зоны пропорциональности, при которой в САУ начинается автоколебательный процесс;
- Время изодома T_i и время предварения T_d зависят от периода возникающих автоколебаний.

В качестве критерия оптимальности принята величина декремента затухания $D = 0,2-0,3$. Декремент затухания D выражается через отношение двух амплитуд, отстоящих друг от друга на половину периода,

$$D = \frac{\lg \frac{y_n}{y_{n+1/2}}}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln \frac{y_n}{y_{n+1/2}}\right)^2}}$$

Зиглер и Никольс предложили два метода настройки ПИД – регулятора: первый основан на параметрах переходной характеристики, второй на частотных характеристиках объекта управления. Точность настройки параметров регулятора и недостатки обоих методов Зиглера – Никольса одинаковы.

1. Настройка параметров ПИД – регулятора по временному модифицированному методу Зиглера – Никольса.

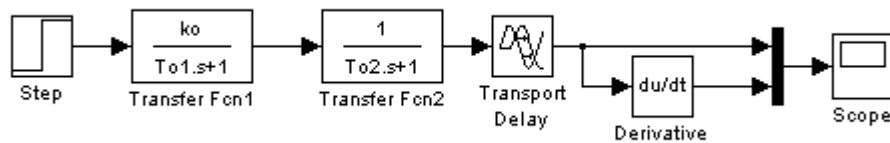
Пусть известно математическое описание объекта второго порядка в форме передаточной функции

$$W_o(p) = \frac{k_o}{(T_{o1}p+1)(T_{o2}p+1)} e^{-\tau_o p}$$

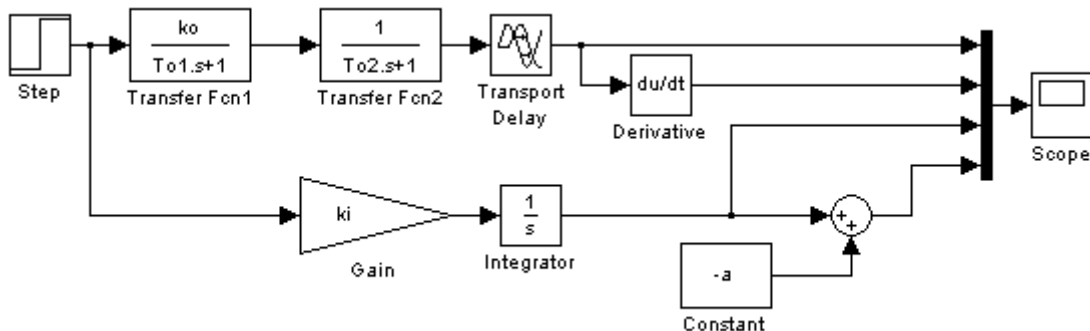
Требуется найти параметры ПИД - регулятора по параметрам переходной характеристики объекта.

Алгоритм расчёта:

1. Определяем переходную характеристику объекта и её производную, используя модель объекта в Simulink:



2. По максимальному значению производной находим точку перегиба переходной характеристики и проводим через неё касательную к переходной характеристике путём смещения характеристики интегрирующего звена ki/p изменением параметра a с помощью модели в Simulink (рис. 2), где $ki = \max[dh(t)/dt]$.



3. Определяем численные значения параметров a и L по графику переходной характеристики и касательной к ней в точке перегиба.

4. Определяем параметры ПИД – регулятора по формулам таблицы 1 [].

Таблица 1. Формулы для расчёта параметров ПИД – регулятора по временному методу Зиглера - Никольса

Регулятор	Расчёт отклику на скачок		
	по k	Tu	$T\theta$
П	$1/a$		
ПИ	$0,9/a$	$3L/k$	
ПИД	$1,2a$	$2L/k$	$0,5Lk$

Примечание: система обозначений параметров регулятора соответствует уравнению

$$u(t) = ke(t) + \frac{1}{T_u} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

5. Строим модель системы с ПИД – регулятором в Simulink и проводим исследование САУ.

Пример 1

Передаточная функция объекта имеет вид

$$W_0(p) = \frac{1}{(0,1p+1)^2} e^{-0,01p}$$

Определить настройки параметров ПИД-регулятора по параметрам отклика объекта на единичный скачок.

1. Составляем модель исследования разомкнутой исходной системы в Simulink (рис. 1).

В состав алгоритмической структуры входит модель объекта, модуль формирования производной переходной характеристики, интегратор с передаточным коэффициентом, равным величине экстремума импульсной переходной характеристики и модуль сдвига переходной характеристики идеального интегрирующего звена так, чтобы она проходила через точку перегиба переходной характеристики объекта.

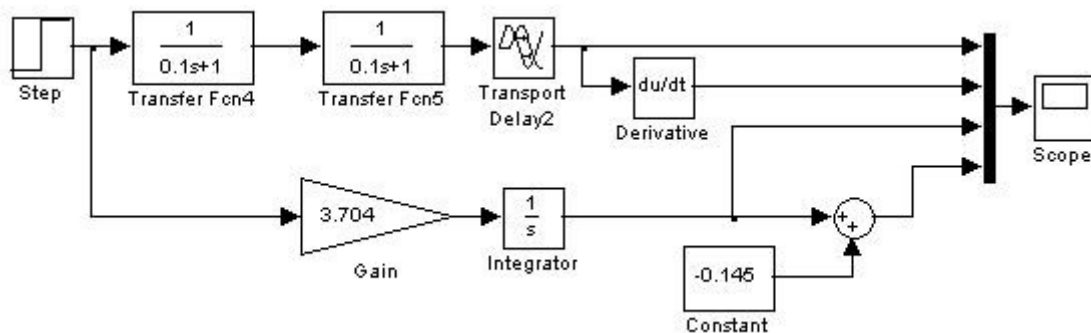


Рис. 1. Алгоритмическая структура для исследования разомкнутой исходной системы в Simulink

2. По отклику модели определяем базовые расчётные параметры: $a = 0,145$ - величина смещения переходной характеристики интегрирующего звена в точку перегиба переходной характеристики объекта (точку перегиба переходная характеристика объекта и максимум производная этой характеристики $h'_{\max} = 3,704$ проходят в один и тот же момент $t_{\text{экстр.}} = 0,1205$), $L = 0,04$ - величина отрезка на оси времени, отсекаемого касательной к переходной характеристике в точке перегиба. Графики исследуемой модели приведены на рис.2.

3. Составляем скрипт в Matlab для расчёта параметров ПИД – регулятора:

```
a=0.145;
L=0.04;
k=1.2/a
Ti=2*L/k
Td=0.5*L*k
ki=1/Ti
kd=Td
```

и определяем настройки регулятора:

$$k = 8.2759, \quad T_i = 0.0097c, \quad T_d = 0.1655c, \quad k_i = 103.4483c^{-1}, \quad k_d = 0.1655c.$$

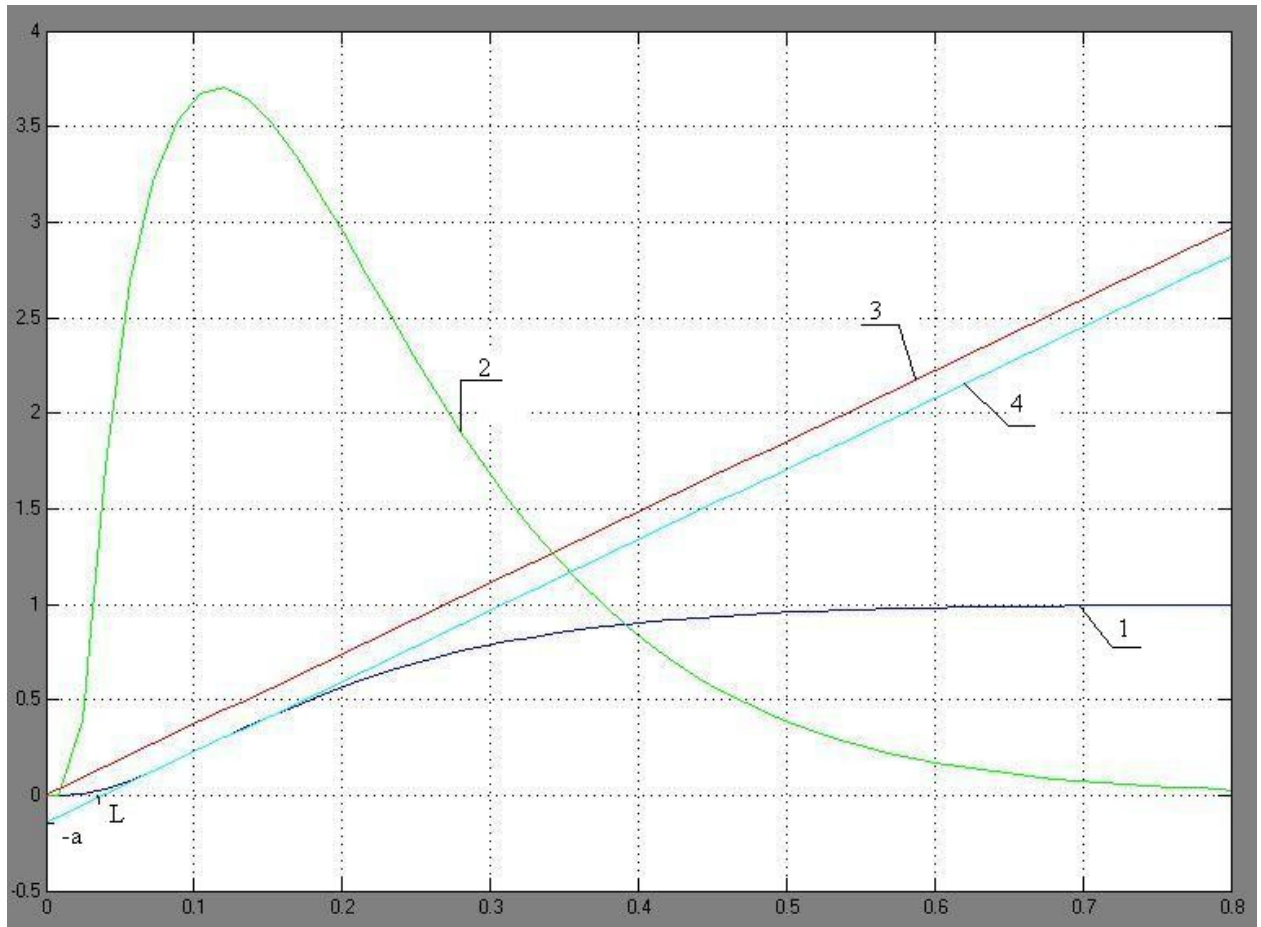


Рис. 2. Графики исследуемой модели разомкнутой исходной системы: 1 - переходная характеристика объекта, 2 – производная переходной характеристики объекта, 3 - переходная характеристика интегрирующего звена, передаточный коэффициент которого равен максимуму производной переходной характеристики объекта ($k_n = 3,704$), 4 - смещённая в точку перегиба переходной характеристики объекта переходная характеристика интегрирующего звена

4. Строим модель для исследования системы в Simulink (рис. 3).

На рис. 3 изображены (сверху – вниз) модели исследуемой системы с настройками регулятора по методу Зиглера – Никольса, системы с ручной настройкой параметров регулятора, объекта и модель формирования касательной в точке перегиба переходной характеристики объекта.

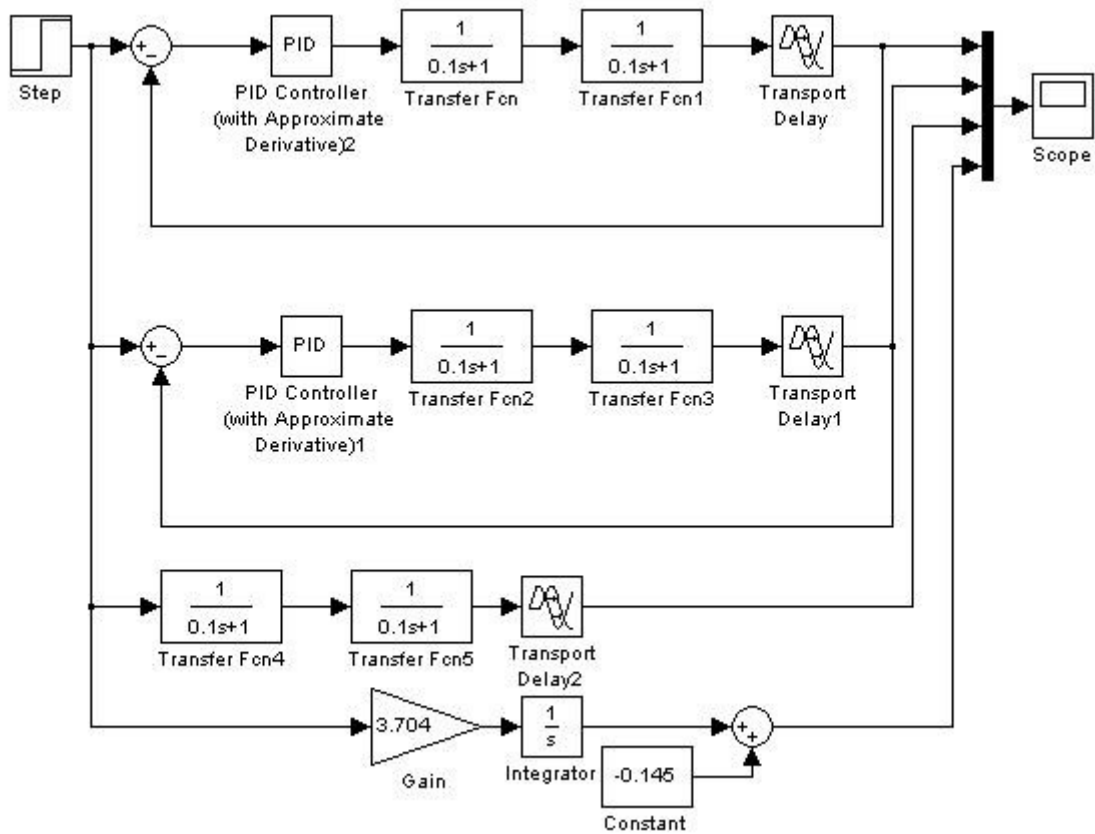


Рис. 3. Алгоритмическая структура для исследования скорректированной системы в Simulink

5. Снимаем переходные характеристики модели, изображенной на рис. 3, где обозначены:
 - 1 – переходная характеристика объекта, 2 – касательная к переходной характеристике объекта в точке перегиба, 3 – переходная характеристика системы при настройке регулятора по методу Зиглера – Никольса, 4 - переходная характеристика системы при ручной настройке регулятора ($k = 15$, $T_i = 0,013c$, $T_d = 0,525c$)

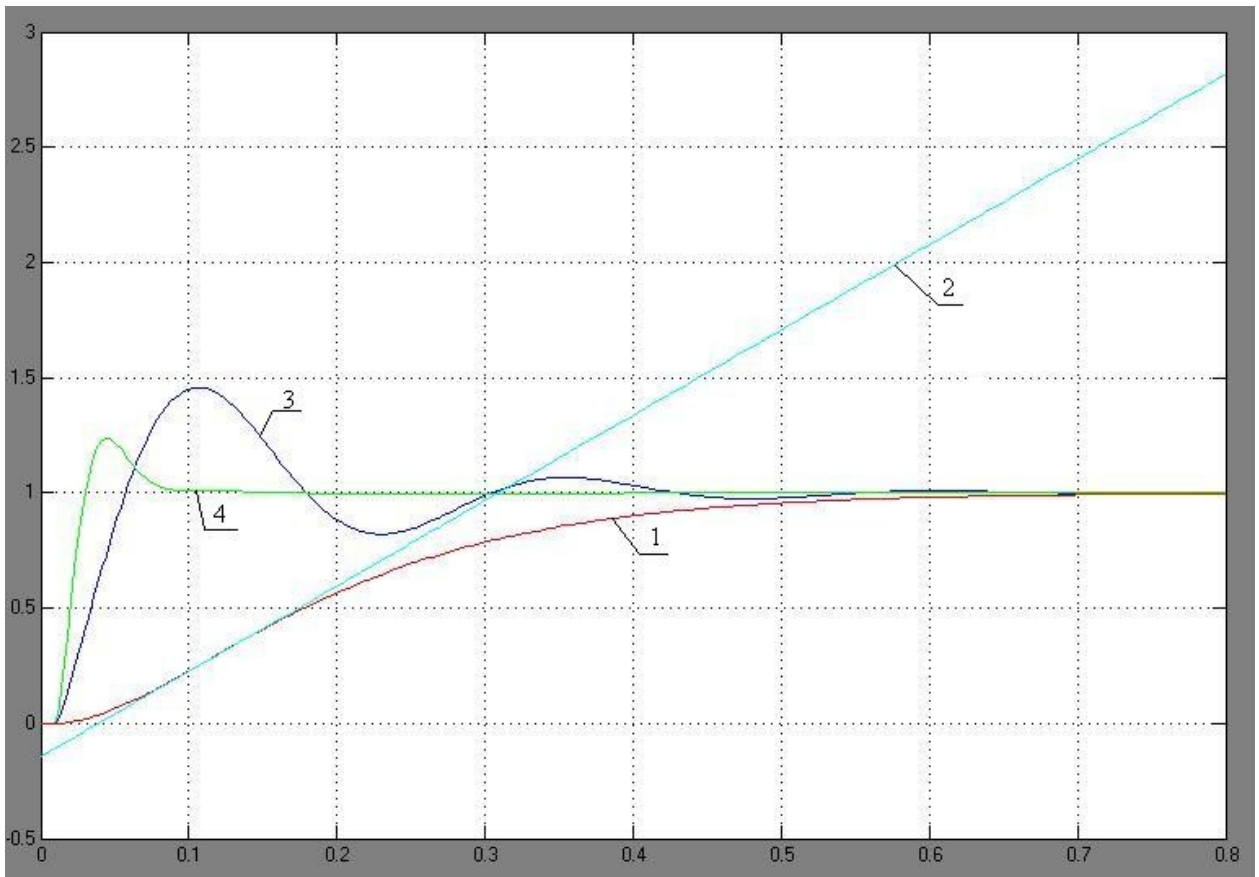


Рис. 4. Графики переходных характеристик модели, изображенной на рис. 3

2. Настройка параметров ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса.

Пусть известно математическое описание объекта управления в форме передаточной функции

$$W_o(p) = \frac{k_o}{T_o p + 1} e^{-\tau_o p} \quad \text{или} \quad W_o(p) = \frac{k_o}{(T_{o1} p + 1)(T_{o2} p + 1)} e^{-\tau_o p}$$

Требуется найти параметры ПИД - регулятора по частотному методу Зиглера – Никольса.

Алгоритм расчёта:

1. Определяем по АФХ и ЛЧХ объекта частоту ω_{180} , при которой фазовый сдвиг объекта равен -180° .
2. Определяем передаточный коэффициент объекта k_{180} на частоте ω_{180} .

3. Определяем период колебаний $T_{180} = \frac{2\pi}{\omega_{180}}$.

4. По табл. 2 Зиглера – Никольса определяем параметры ПИД – регулятора, используя полученные данные k_{180} и T_{180} .

Таблица 2. Формулы для расчёта параметров ПИД – регулятора по частотному методу Зиглера - Никольса

Регулятор	Расчёт частотным параметрам		
	по k	T_u	T_θ
П	$0,5/k_{180}$		
ПИ	$0,4/k_{180}$	$0,8T_{180}/k$	
ПИД	$1,6/k_{180}$	$0,5T_{180}/k$	$0,125T_{180}k$

Примечание: система обозначений параметров регулятора соответствует уравнению

$$u(t) = ke(t) + \frac{1}{T_u} \int_0^t e(t) dt + T_\theta \frac{de(t)}{dt}$$

5. Составляем в Matlab модели замкнутых исходной и с ПИД – регулятором систем для построения переходных характеристик, по которым оцениваем устойчивость и показатели качества.

Пример 2

Передаточная функция объекта имеет вид

$$W_0(p) = \frac{1}{(p+1)(10p+1)} e^{-0,3p}$$

Определить настройки параметров ПИД-регулятора по частотным параметрам объекта управления.

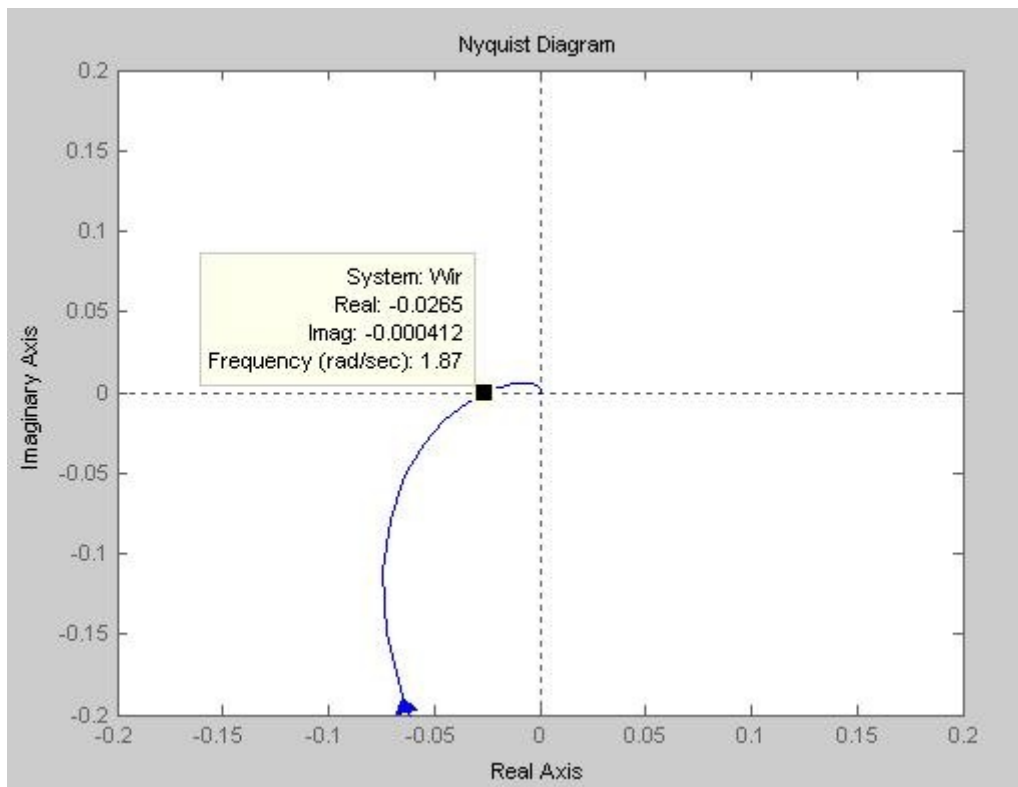
1. Составляем модель в форме скрипта Matlab для определения АФХ и ЛЧХ объекта по его передаточной функции.

```

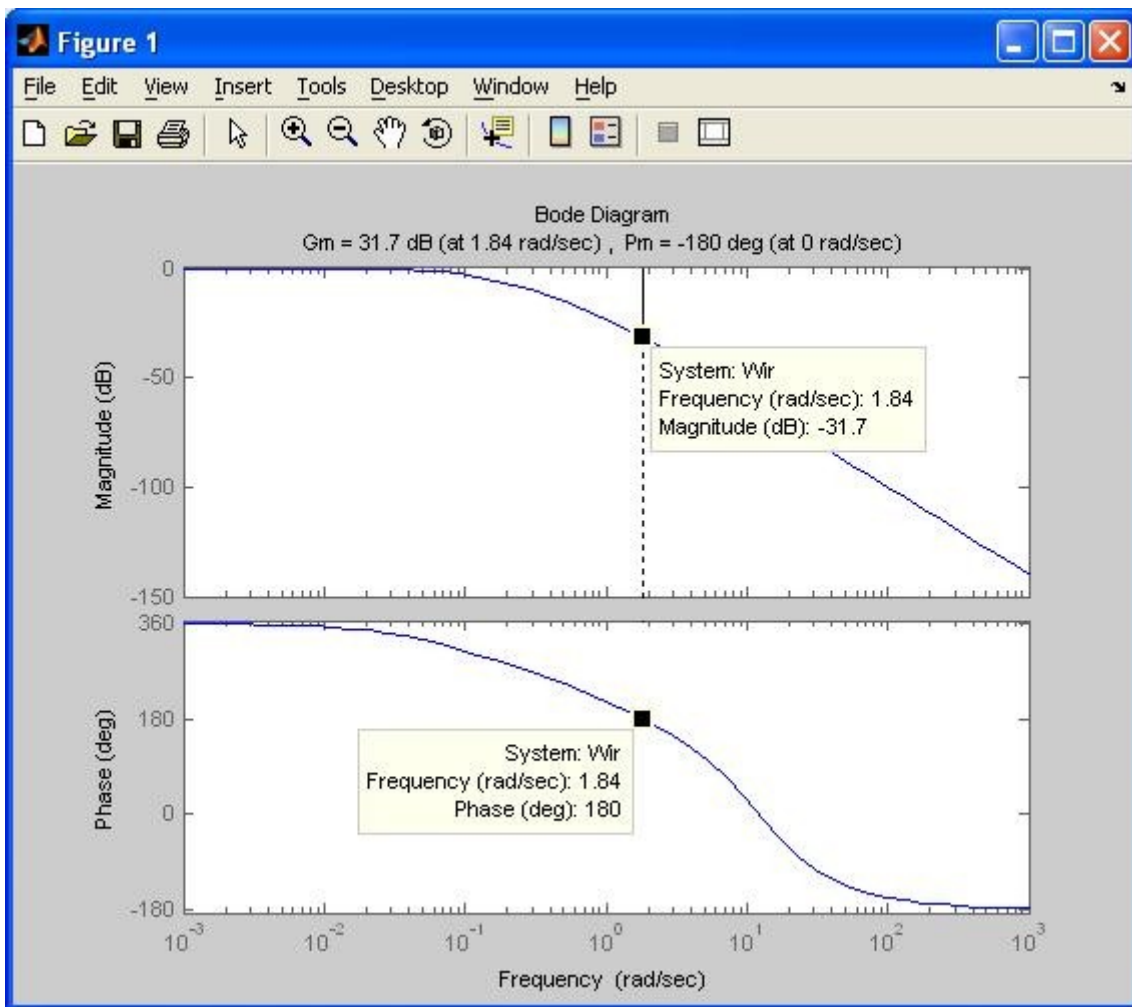
numo=[1];
deno=[10 11 1];
Wo=tf(numo,deno)
[nums,dens]=pade(0.3,2)
Ws=tf(nums,dens)
Wir=Wo*Ws
nyquist(Wir)
%margin(Wir)

```

2. Определяем АФХ объекта и находим параметры $\omega_{180}=1,87\text{с}^{-1}$ и $k_{180}=|\text{Real}|=0,0265$.



3. Определяем ЛЧХ объекта и находим параметры $\omega_{180}=1,84\text{c}^{-1}$ и $k_{180}=10^{-31,7/20}=0,026$.
 Параметры объекта, найденные по ЛЧХ, точнее параметров АФХ, поэтому принимаем их за основу.



4. Составляем скрипт для определения параметров ПИД – регулятора по полученным параметрам ЛЧХ: $\omega_{180}=1,84\text{c}^{-1}$ и $k_{180}=10^{-31,7/20}=0,026$. Расчётные формулы параметров ПИД – регулятора приведены в таблице 2 алгоритма расчёта.

```

k180=0.026;
w180=1.84;
T180=2*pi/w180
kn=0.6/k180
Tu=0.5*T180/kn
ku=1/Tu
Td=0.125*T180*kn
kd=Td

```

Расчётные параметры ПИД – регулятора: $k_n = 23.0769$, $k_u = 13.5159$, $k_d = 9.8503$.

5. Составляем скрипт для определения переходных характеристик исходной и скорректированной замкнутых систем.

```

kp=23.0769;
ki=13.5159;
kd=9.8503;
numo=[1];
deno=[10 11 1];
Wo=tf(numo,deno)

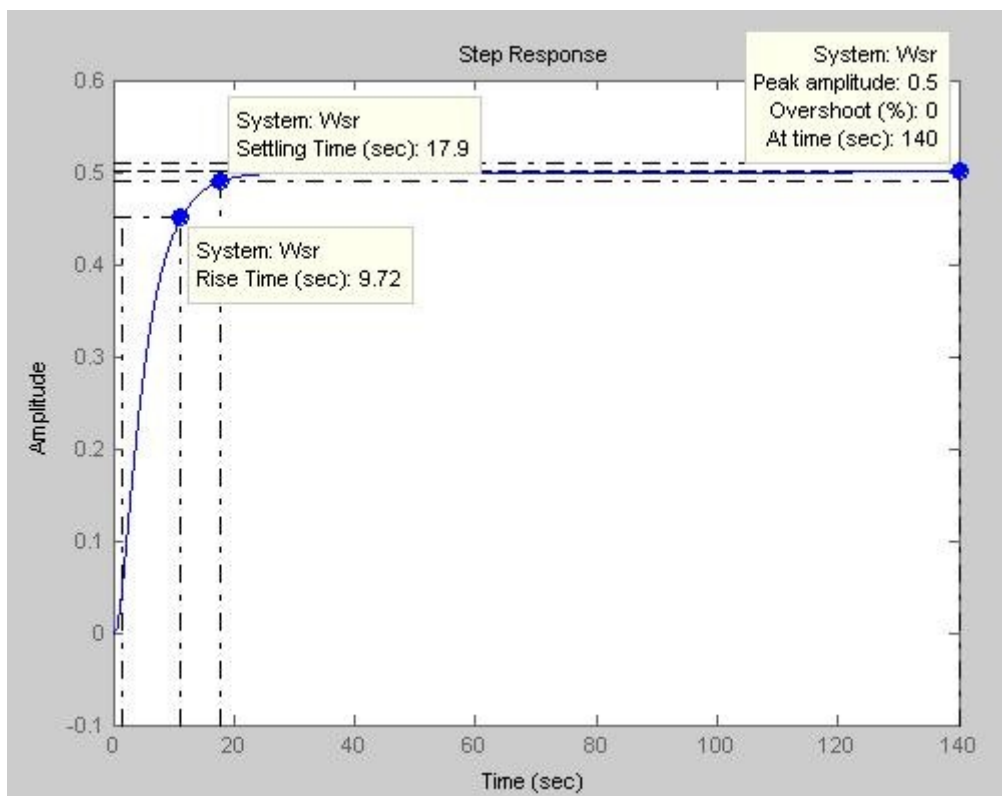
```

```

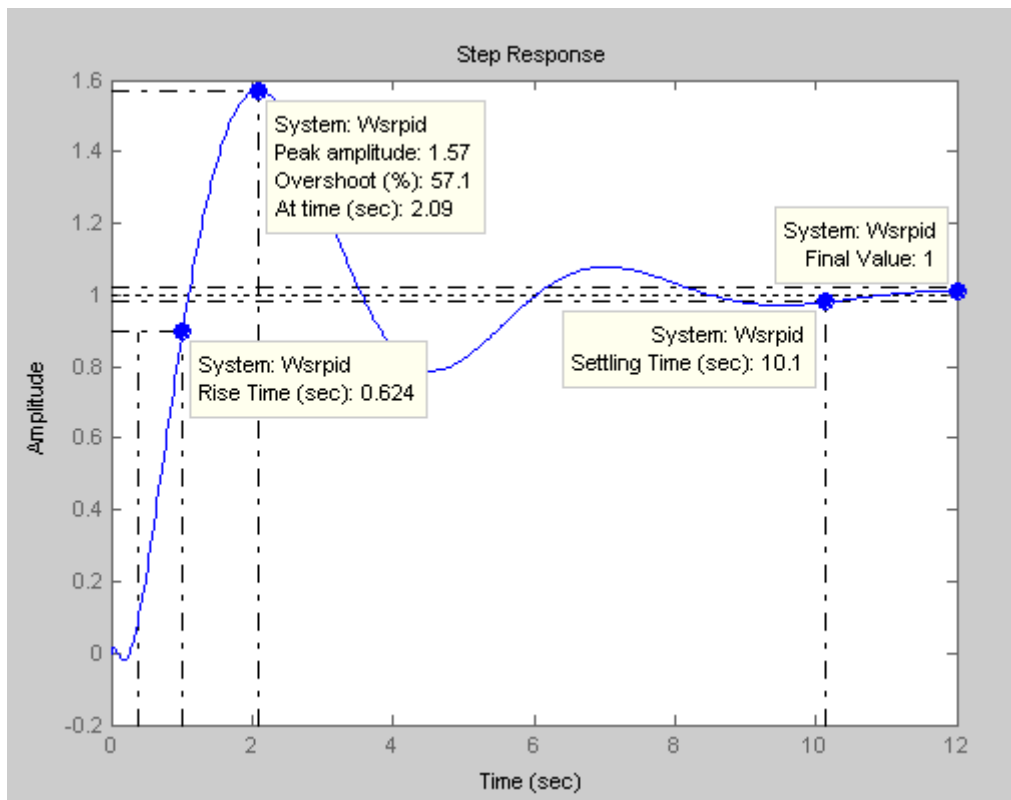
[nums, dens]=pade(0.3,2)
Ws=tf(nums, dens)
numi=[ki];
deni=[1 0];
Wi=tf(numi, deni)
numd=[kd 0];
dend=[1];
Wd=tf(numd, dend)
Wsr=minreal(Wo*Ws/(1+Wo*Ws))
step(Wsr)
%Wsrpid=minreal((kp+Wi+Wd)*Wo*Ws/(1+(kp+Wi+Wd)*Wo*Ws))
%step(Wsrpid)

```

6. Определяем переходную характеристику исходной (нескорректированной) системы, произведя «Пуск» скрипта п.5 в Matlab.



7. Определяем переходную характеристику скорректированной системы, сняв знак % в последних двух строках скрипта и установив % в двух предыдущих строках.



Показатели качества систем приведены на графиках.

3. Настройка параметров ПИД – регулятора по методу CHR (Chien – Hrones – Reswick).

Авторы этого метода использовали критерий максимальной скорости нарастания при отсутствии перерегулирования или при наличии не более чем 20% - ного перерегулирования. Такой критерий позволяет получить больший запас устойчивости, чем в методе Зиглера – Никольса.

Метод CHR даёт две разные системы параметров регулятора. Одна из них получена при наблюдении отклика на изменение уставки, решая задачу качества регулирования, вторая – при наблюдении отклика на внешние возмущения, решая задачу ослабления внешних возмущений.

Если важно и то и другое, то необходимо использовать регуляторы с двумя степенями свободы.

В этом методе объект аппроксимирован моделью первого порядка с задержкой:

$$W_o(p) = \frac{k_o}{T_o p + 1} e^{-\tau_o p}$$

Для расчёта параметров регулятора используются параметры переходной характеристики объекта: a и τ_o .

Параметр a определяется из выражения:

$$\left. \frac{dh(t)}{dt} \right|_{\max} = \frac{k_o}{T_o} e^{-\frac{t}{T_o}} \Big|_{t=0} = \text{tg } \alpha_{\max} = \frac{a}{\tau_o}, \quad \text{отсюда} \quad a = \frac{k_o \tau_o}{T_o},$$

или из графика переходной характеристики объекта.

Формулы для расчёта параметров регулятора приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Формулы для расчёта коэффициентов регулятора по отклику на изменение уставки метода CHR

Регулятор	Без перерегулирования			С 20% - ным перерегулированием		
	k	T _и	T _д	k	T _и	T _д
П	0,3/a			0,7/a		
ПИ	0,35/a	1,2τ _о /k		0,6/a	1,0τ _о /k	
ПИД	0,6/a	10τ _о /k	0,5τ _о k	0,95/a	1,4τ _о /k	0,47τ _о k

Таблица 4

Формулы для расчёта коэффициентов регулятора по отклику на внешние воздействия метода CHR

Регулятор	Без перерегулирования			С 20% - ным перерегулированием		
	k	T _и	T _д	k	T _и	T _д
П	0,3/a			0,7/a		
ПИ	0,6/a	4τ _о /k		0,7/a	2,3τ _о /k	
ПИД	0,95/a	2,4τ _о /k	0,42τ _о k	1,2/a	2,0τ _о /k	0,42τ _о k

Пример 3

Передаточная функция объекта имеет вид

$$W_o(p) = \frac{1}{2,8p+1} e^{-0,4p}.$$

Определить настройки параметров ПИД-регулятора по отклику на изменение уставки метода CHR.

1. Определяем параметр a из выражения:

$$a = \frac{k_o \tau_o}{T_o} = \frac{1 * 0,4}{2,8} = 0,143.$$

2. Определяем параметры ПИД – регулятора по формулам таблицы 3 (без перерегулирования):

$$k_p = 0,6/a = 4,196;$$

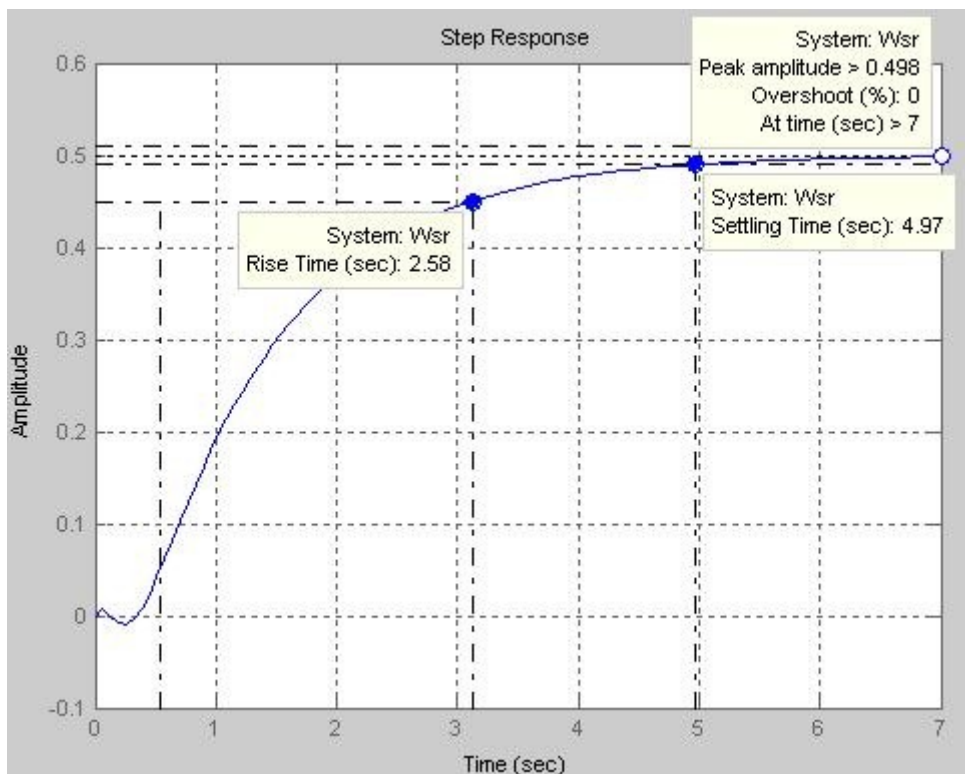
$$T_{и} = 10\tau_o/k_p = 10 * 0,4 / 4,196 = 0,95c; \quad k_u = 1/T_{и} = 1,0526c^{-1};$$

$$T_d = 0,5^T o k_p = 0,5 * 0,4 * 4,196 = 0,839c; \quad k_d = T_d = 0,839c.$$

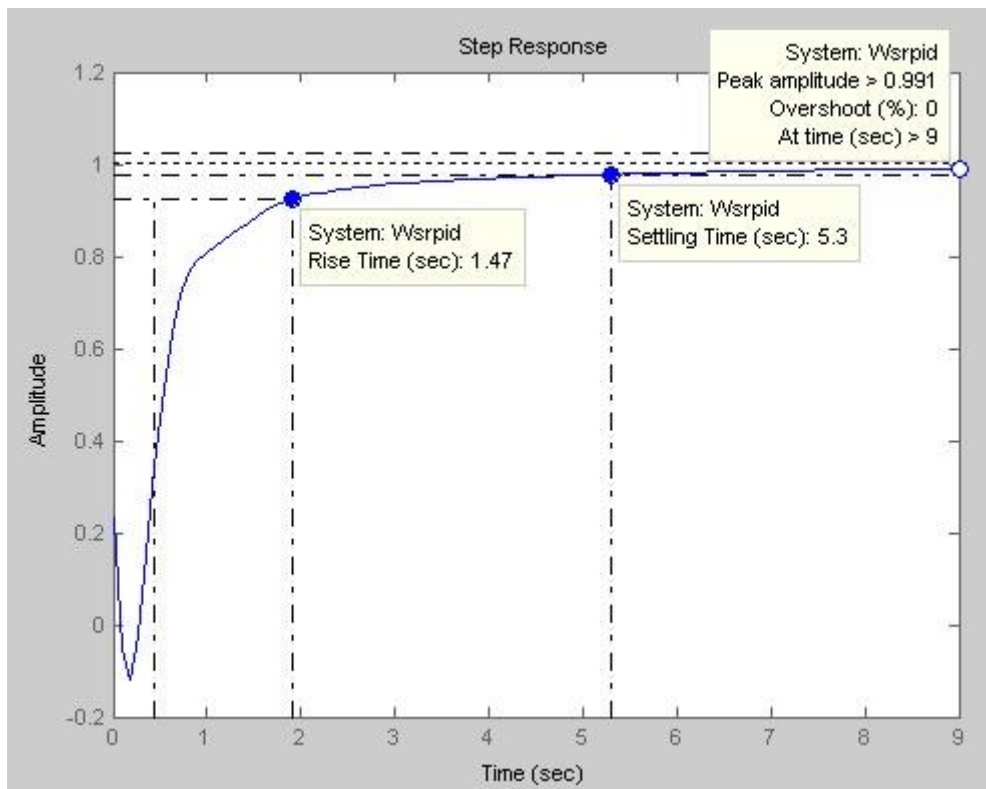
3. Составляем скрипт для определения переходных характеристик исходной и скорректированной замкнутых систем.

```
kp=4.196;
ki=1.0526;
kd=0.839;
numo=[1];
deno=[2.8 1];
Wo=tf(numo,deno)
[nums,dens]=pade(0.4,2)
Ws=tf(nums,dens)
numi=[ki];
deni=[1 0];
Wi=tf(numi,deni)
numd=[kd 0];
dend=[1];
Wd=tf(numd,dend)
Wsr=minreal(Wo*Ws/(1+Wo*Ws))
step(Wsr)
%Wsrpid=minreal((kp+Wi+Wd)*Wo*Ws/(1+(kp+Wi+Wd)*Wo*Ws))
%step(Wsrpid)
```

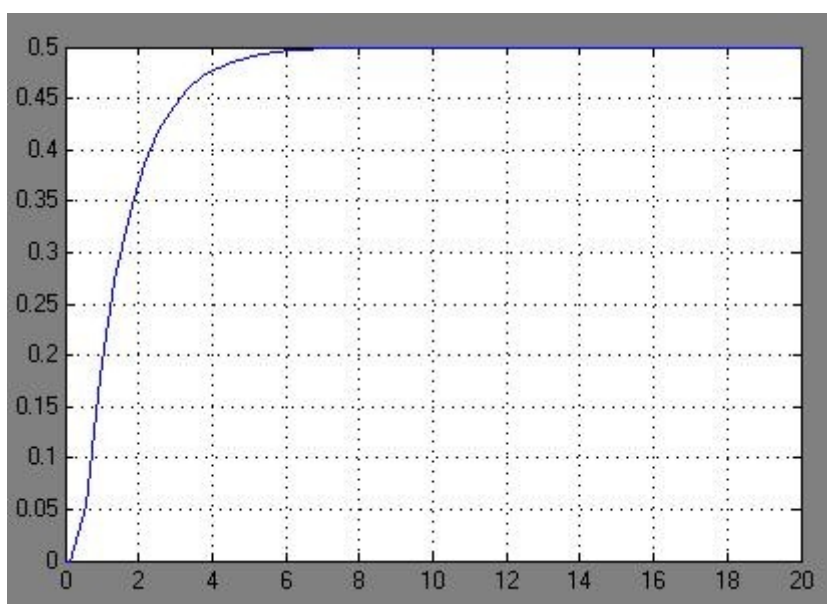
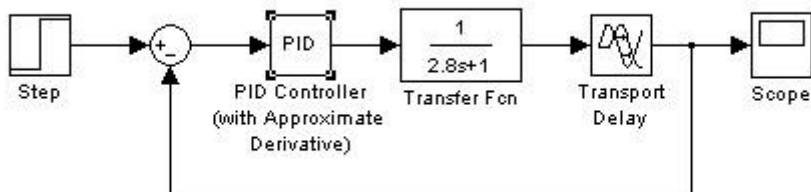
4. Определяем переходную характеристику исходной (нескорректированной) системы, произведя «Пуск» скрипта п.3 в Matlab.

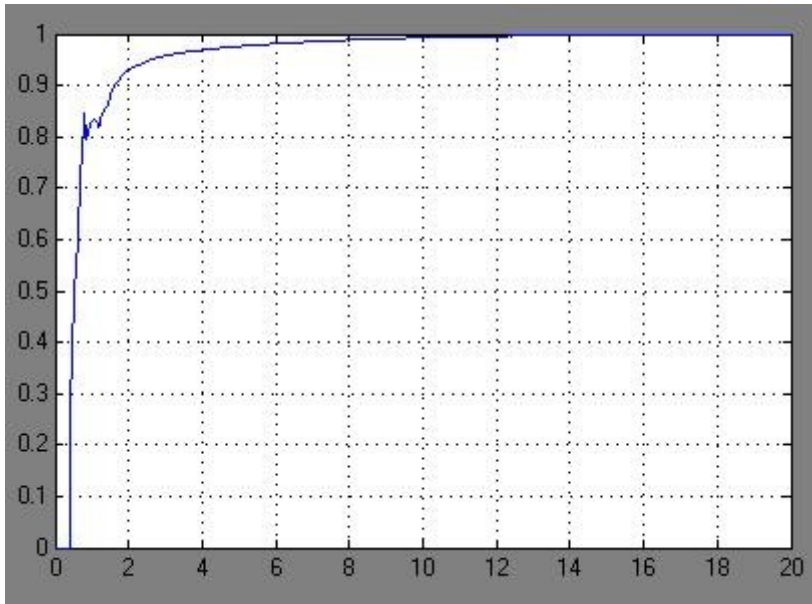


5. Определяем переходную характеристику скорректированной системы, сняв знак % в последних двух строках скрипта и установив % в двух предыдущих строках.



6. Модель скорректированной системы в Simulink и графики переходных характеристик исходной и скорректированной систем приведены на рисунках.





4. Настройка параметров регуляторов по критерию модульного (технического) оптимума.

При проектировании и наладке систем управления объектами, не содержащими чистого запаздывания, наибольшее применение получили два критерия – модульный оптимум (МО) и симметричный оптимум (СО) (рис. 1).

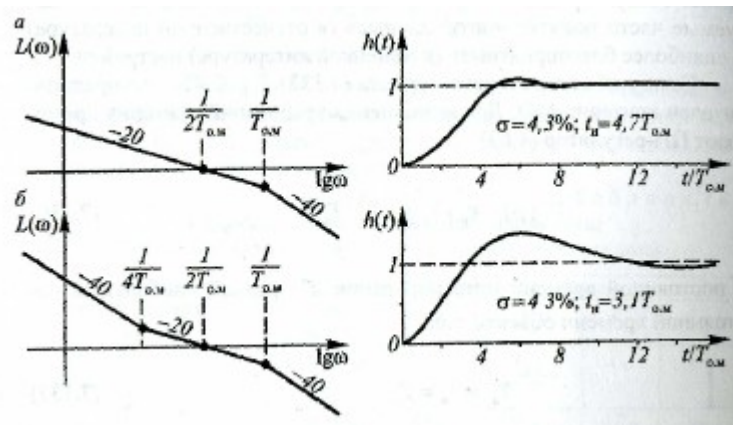


Рис.1. Частотные и переходные характеристики одноконтурной САУ, настроенной по критериям модульного (а) и симметричного (б) оптимумов

Критерий *модульного оптимума*, называемый также критерием амплитудного, или технического, оптимума, заключается в выполнении следующих требований к форме амплитудной характеристики замкнутой системы по каналу управления $|W_{зр}(j\omega)|$ (рис.2): характеристика в как можно более широком диапазоне частот должна быть горизонтальной и равна единице, наклонный участок характеристики должен быть как можно более крутопадающим, т. е. критерий модульного оптимума требует, чтобы настраиваемая система приближалась по своим частотным передаточным свойствам к

идеальному фильтру низкой частоты, имеющему прямоугольную частотную характеристику.

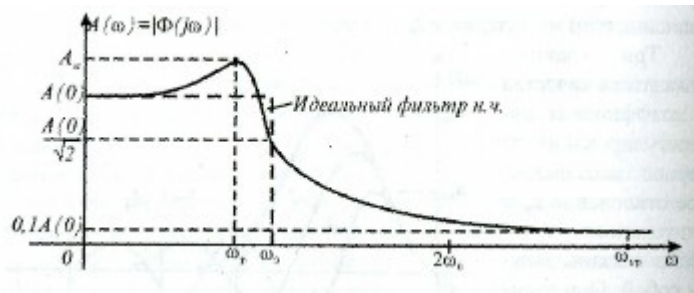


Рис. 2. Амплитудная частотная характеристика замкнутой системы по каналу управления $|W_{зр}(j\omega)|$

Тогда, при отсутствии помехи на входе, система (рис. 3) будет наилучшим образом воспроизводить задающее воздействие $R(p)$ и подавлять возмущение $F(p)$. При наличии на входе высокочастотной помехи частоту пропускания ω_0 системы выбирают тоже достаточно большой, но по компромиссному условию совместной фильтрации всех действующих сигналов.

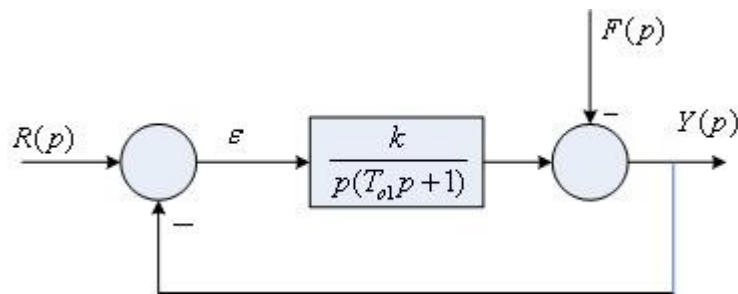


Рис. 3. Алгоритмическая структура исходной САУ

Настройка системы по критерию МО обеспечивает малое перерегулирование и достаточно быстрое протекание переходного процесса:

$$\sigma < 9\%, \quad t_n < \frac{5}{\omega_0}, \quad t_m < \frac{2\pi}{\omega_0}, \quad t_n < \frac{3\pi}{\omega_0} \quad (1)$$

Эти верхние пределы показателей качества соответствуют идеальному фильтру низкой частоты, который практически нереализуем.

Амплитудную характеристику, близкую по форме к прямоугольной характеристике идеального фильтра, имеет фильтр Баттерворта, у которого АЧХ

$$A_B = |W_B(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (T\omega)^{2n}}} \quad (2)$$

На практике обычно используют фильтры с порядком $n = 2 \dots 8$.
Колебательная модель

$$W_m(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} \quad (3)$$

замкнутой системы при коэффициенте демпфирования $\xi = 0,7$ имеет амплитудную характеристику

$$A_c(\omega) = |W_c(j\omega)| \approx A_m(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + 4\xi^2 T^2 \omega^2}}, \quad (4)$$

$$A_c(\omega) \approx \frac{1}{\sqrt{1 + T^4 \omega^4}}, \quad (5)$$

отсюда
соответствующую частному случаю фильтра (2) с $n=2$.

Таким образом, в рамках приближённой модели (3) критерию МО соответствует значение коэффициента демпфирования

$$\xi = 0,7, \quad (6)$$

при этом главные показатели качества

$$\sigma \approx 5\%, \quad t_n \approx 3,2T = \frac{3,2}{\omega_0} \approx 4,5 T_{o1}, \quad (7)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{T}$ - частота собственных незатухающих колебаний замкнутой системы (при $\xi = 0$), характеризующая полосу пропускания фильтра; T_{o1} - постоянная времени разомкнутого контура системы.

Для колебательной модели (3) нестрогий критерий МО обеспечивает одновременно минимум квадратичной интегральной оценки

$$Q_{кв} = \int_0^{\infty} \varepsilon_n^2(t) dt \quad (8)$$

и улучшенной интегральной оценки

$$Q_{кв\gamma} = \int_0^{\infty} \left[\varepsilon_n^2(t) + T_{\varepsilon}^2 \left(\frac{d\varepsilon_n(t)}{dt} \right)^2 \right] dt \quad (9)$$

с весовым коэффициентом $T_{\varepsilon} = 1$.

При настройке систем более высокого порядка ($n > 2$) по критерию МО можно обходиться и без приближённой модели (3). Для этого передаточную функцию замкнутой системы по каналу управления

$$W_{зr}(p) = \frac{b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} \quad (10)$$

приводят к нормированному виду

$$W_{зr}(\bar{p}) = \frac{B_0}{\bar{p}^n + A_{n-1} \bar{p}^{n-1} + \dots + A_1 \bar{p} + 1}, \quad (11)$$

где $\bar{p} = pT_m = \frac{p}{\omega_0}$ - оператор Лапласа, соответствующий безразмерному (относительному)

времени $\bar{t} = \frac{t}{T_m}$; T_m - масштабный множитель

$$T_m = \frac{1}{\omega_0} = \sqrt[n]{\frac{a_n}{a_0}}; \quad (12)$$

безразмерные коэффициенты

$$A_1 = \frac{a_1}{a_0 T_m}; \quad A_2 = \frac{a_2}{a_0 T_m^2}; \quad \dots; \quad A_{n-1} = \frac{a_{n-1}}{a_0 T_m^{n-1}}; \quad A_n = 1; \quad B_0 = \frac{b_0}{a_0}. \quad (13)$$

Чтобы обеспечить желаемую форму амплитудной характеристики, близкую к прямоугольной, коэффициенты нормированной функции (11) выбирают в соответствии со стандартными полиномами Баттерворта (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты фильтров Баттерворта							
n	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
2	1,4	1	—	—	—	—	—
3	2,0	2,0	1	—	—	—	—
4	2,61	3,41	2,61	1	—	—	—
5	3,24	5,24	5,24	3,24	1	—	—
6	3,86	7,46	9,13	7,46	3,86	1	—
7	4,5	10,1	14,6	14,6	10,1	4,5	1
8	5,12	13,1	21,8	25,7	21,8	13,1	5,12

При таких сочетаниях коэффициентов A_i амплитудная характеристика фильтра принимает вид (2), причём $T = T_m$, а относительная частота $\Omega_0 = \omega_0 T = 1$ соответствует значению амплитудной функции, равному 0,7 (при $B_0 = 1$).

Масштабный множитель T_m не влияет на форму переходного процесса и служит обобщённой мерой быстродействия системы. Его значение можно выбрать, исходя из требуемых показателей быстродействия t_n и t_n , по следующим приближённым формулам:

$$t_n \approx nT_m, \quad t_n \approx 2nT_m, \quad (14)$$

где n – порядок полинома Баттерворта.

Найденное по этим формулам значение T_m обеспечивают за счёт выбора по формуле (12) соответствующего общего передаточного коэффициента разомкнутого контура k , который, как известно, входит в свободный член a_0 : $a_0 = 1 + k$ - для статических систем, $a_0 = k$ - для астатических систем.

Применительно к колебательной модели (3) параметры фильтра Баттерворта

$$A_1 = 2\zeta = \frac{1}{\sqrt{kT_{o1}}}, \quad T_m = T = \sqrt{\frac{T_{o1}}{k}}. \quad (15)$$

В системах, параметры которых выбраны в соответствии со стандартными полиномами Баттерворта, перерегулирование

$$\sigma \approx 10 \dots 15\%. \quad (16)$$

Указанные выше значения длительности переходного процесса t_n и перерегулирования σ строго выдерживаются только в тех случаях, когда числитель передаточной функции (10) не содержит слагаемых с оператором p . Тем не менее и для систем с более сложным полиномом числителя можно пользоваться рекомендуемыми значениями коэффициентов Баттерворта. При этом также обеспечивается достаточно хорошее качество переходного процесса. Кроме того, настройки, соответствующие полиномам Баттерворта, могут использоваться как исходные, отправные для отыскания оптимальных настроек систем, передаточные функции которых имеют числитель в виде полинома от p .

Пример 4

Пусть исходная часть системы, состоящая из функционально необходимых элементов, описывается передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (17)$$

где $T_1 = 1$ с, $T_2 = 2$ с.

Требуется определить настроечные параметры T_3 и T_4 последовательно включаемого корректирующего устройства

$$W_k(p) = (T_3 p + 1)(T_4 p + 1) \quad (18)$$

и общий передаточный коэффициент k , обеспечивающие критерий МО и желаемую длительность переходного процесса $t_n = 6$ с.

Передаточная функция замкнутой системы по каналу управления

$$W_{зр}(p) = \frac{k(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}{T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2 + k T_3 T_4) p^2 + (1 + k T_3 + k T_4) p + k}. \quad (19)$$

Не обращая внимания на наличие полинома в числителе этой передаточной функции, будем подбирать настроечные параметры так, чтобы безразмерные коэффициенты A_1 и A_2 полинома знаменателя соответствовали фильтру Баттерворта.

Определим вначале масштабный множитель T_m , ориентируясь на приближённое соотношение (14):

$$T_m = \frac{t_n}{2n} = \frac{6}{2 \cdot 3} = 1 \text{ с}. \quad (20)$$

Теперь в соответствии с формулой (12) можно найти необходимое (для заданного быстродействия) значение общего передаточного коэффициента:

$$k = a_0 = \frac{a_3}{T_m^3} = \frac{T_1 T_2}{T_m^3} = \frac{1 \cdot 2}{1^3} = 2 \text{ с}^{-1}. \quad (21)$$

Для $n = 3$ оба безразмерных коэффициента Баттерворта, согласно табл. 1, должны быть равны 2:

$$A_2 = \frac{a_2}{a_0 T_m^2} = \frac{T_1 + T_2 + k T_3 T_4}{T_1 T_2 T_m^2} = \frac{3 + 2 T_3 T_4}{2} = 2, \quad (22)$$

$$A_1 = \frac{a_1}{a_0 T_m} = \frac{1 + k T_3 + k T_4}{T_1 T_2 T_m} = \frac{1 + 2 T_3 + 2 T_4}{2} = 2. \quad (23)$$

Решая совместно эти два уравнения, получим $T_3 = 0,5$ с и $T_4 = 1$ с.

Применим изложенный метод оптимизации амплитудной характеристики для расчёта настроечных параметров типовых регуляторов:

$$\text{П – регулятор } W_p(p) = k_n = k_p; \quad (24)$$

$$\text{И – регулятор } W_p(p) = \frac{k_u}{p} = \frac{k_p}{T_u p}; \quad (25)$$

$$\text{ПИ – регулятор } W_p(p) = k_n + \frac{k_u}{p} = k_p + \frac{k_p}{T_u p} = \frac{k_p(T_u p + 1)}{T_u p}; \quad (26)$$

$$\text{ПД – регулятор } W_p(p) = k_n + k_d p = k_p(T_d p + 1); \quad (27)$$

$$\text{ПИД – регулятор или } W_p(p) = k_n + \frac{k_u}{p} + k_d p = k_p \frac{T_u p + 1 + T_u T_d p^2}{T_u p} \quad (28)$$

$$W_p(p) = k'_p \frac{(T'_u p + 1)(T'_d p + 1)}{T'_u p} = k'_p \frac{T'_u + T'_d}{T'_u} + \frac{k'_p}{T'_u p} + k'_p T'_d p, \quad (29)$$

используемых для управления следующими инерционными объектами второго – третьего порядков без запаздывания:

$$W_o(p) = \frac{k_o}{p(T_{o1} p + 1)}; \quad (30)$$

$$W_o(p) = \frac{k_o}{(T_{o1} p + 1)(T_{o2} p + 1)}; \quad (31)$$

$$W_o(p) = \frac{k_o}{p(T_{o1} p + 1)(T_{o2} p + 1)}; \quad (32)$$

$$W_o(p) = \frac{k_o}{(T_{o1} p + 1)(T_{o2} p + 1)(T_{o3} p + 1)}. \quad (33)$$

Типовые регуляторы обычно используются для управления инерционными объектами второго – третьего порядков без запаздывания, в которых $T_{o1} < T_{o2} < T_{o3}$, причём в общем случае сомножитель с наименьшей постоянной времени T_{o1} приближённо заменяет собой несколько инерционных звеньев с ещё более малыми постоянными времени T_{oi} , т.е.

$$\prod_i (T_{oi} p + 1) \approx T_{om} p + 1 \quad \text{и} \quad T_{o1} = T_{om} = \sum_i T_{oi}. \quad (34)$$

Приведенные в табл. 2 модели обычно используются для приближенного описания объектов, входящих в типовые контуры регулирования систем управления электроприводами (контуры регулирования напряжения, тока и частоты вращения).

Таблица 2

**Гарантирующие настроечные параметры
типовых регуляторов для объектов без запаздывания**

Передачная функция объекта $W_o(p)$	Условия применения	Критерий	Параметры регулятора		
			k'_p	T'_n	T'_d
$\frac{k_o}{(T_{o1}p+1)(T_{o2}p+1)}$ $(T_{o1} < T_{o2})$	$T_{o2} \leq 4T_{o1}$	МО	$\frac{T_{o2}}{2k_o T_{o1}}$	T_{o2}	---
	$T_{o2} \geq 4T_{o1}$	СО	$\frac{T_{o2}}{2k_o T_{o1}}$	$4T_{o1}$	---
$\frac{k_o}{p(T_{o1}p+1)(T_{o2}p+1)}$	$T_{o2} \ll T_{o1}$	СО	$\frac{1}{2k_o T_{o1}}$	$4T_{o1}$	---
	$T_{o1} < T_{o2}$	СО	$\frac{1}{2k_o T_{o1}}$	$4T_{o1}$	T_{o2}
$\frac{k_o}{(T_{o1}p+1)(T_{o2}p+1)(T_{o3}p+1)}$ $(T_{o1} < T_{o2} < T_{o3})$	$T_{o3} \leq 4T_{o1}$	МО	$\frac{T_{o3}}{2k_o T_{o1}}$	T_{o3}	T_{o2}
	$T_{o3} \geq 4T_{o1}$	СО	$\frac{T_{o3}}{2k_o T_{o1}}$	$4T_{o1}$	T_{o2}
	$T_{o2} \geq 4T_{o1}$	СО	$\frac{T_{o2}T_{o3}}{8k_o T_{o1}^2}$	T_{o2}	$4T_{o1}$

Для снижения и устранения больших перерегулирований, которые возникают в системе, настроенной по критерию СО, применяют сглаживание ступенчатого задающего воздействия путём включения на входе системы специального фильтра – инерционного звена первого порядка

$$W_\phi(p) = \frac{1}{T_\phi p + 1}, \quad (35)$$

где $T_\phi = 4T_{o1}$ для астатических объектов (30) и (32) и для статических объектов (31) и (33) с $\frac{T_{o2}}{T_{o1}} \geq 20$. При меньших отношениях постоянную времени T_ϕ можно уменьшить. Естественно, что быстродействие системы при включении сглаживающего фильтра снижается.

Используем общие принципы для выбора настроечных параметров типовых ПИ - и ПИД – регуляторов, которые обычно используются для регулирования следующих инерционных объектов первого и второго порядков с запаздыванием:

$$W_o(p) = k_o e^{-p\tau_o} / (T_o p + 1), \quad (36)$$

$$W_o(p) = k_o e^{-p\tau_o} / [(T_{o1}p + 1)(T_{o2}p + 1)], \quad (37)$$

$$W_o(p) = k_o e^{-p\tau_o} / (T_{oi}p + 1)^2, \quad (38)$$

где $\tau_o' = \tau_o - 0,11T_o$, $T_o' = 0,64T_o$, $T_{oi} = 0,37T_o$, а параметры T_o и τ_o определяются экспериментально – проведением касательной к переходной характеристике объекта (рис. 4, табл. 3).

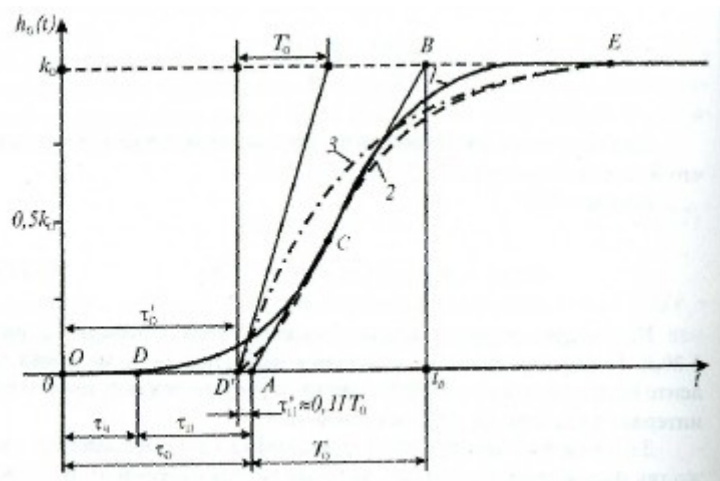


Рис. 4. Переходные характеристики реального объекта управления (1) и его приближённых моделей второго порядка (2) и первого порядка с запаздыванием (3)

Таблица 3

Связь между параметрами s -образной переходной характеристики (рис. 4) и параметрами аппроксимирующей модели $W_o(p) = k_o e^{-p\tau_o} / (T_{oi} p + 1)^n$

n	$\frac{T_{oi}}{T_o}$	$\frac{T_o}{T_{oi}}$	$\frac{\tau_{0i}}{T_{oi}}$	n	$\frac{\tau_{0i}}{T_o}$	$\frac{T_o}{T_{oi}}$	$\frac{\tau_{0i}}{T_{oi}}$
1	0,000	1,00	0,00	13	1,005	8,74	8,77
2	0,107	2,72	0,29	14	1,053	9,12	9,62
3	0,222	3,69	0,82	15	1,115	9,41	10,50
4	0,323	4,46	1,44	16	1,180	9,69	11,42
5	0,420	5,12	2,15	17	1,220	10,09	12,27
6	0,518	5,69	2,95	18	1,265	10,40	13,16
7	0,595	6,22	3,70	19	1,295	10,70	13,90
8	0,673	6,71	4,52	20	1,320	11,10	14,90
9	0,745	7,16	5,34	25	1,500	12,00	19,50
10	0,816	7,59	6,20	30	1,660	12,60	24,30
11	0,871	7,99	7,04	35	1,800	13,30	29,20
12	0,942	8,38	7,90	40	1,950	13,60	34,20

Рекомендации по выбору настроечных параметров являются базовыми, отправными, которые подлежат уточнению в зависимости от точки приложения возмущения и от требований, предъявляемых к переходному процессу в системе регулирования.

В табл. 4 приведены эмпирические формулы, в которых обобщены результаты экспериментальных исследований по определению настроечных параметров типовых регуляторов для объектов с запаздыванием. Параметры определены путём моделирования

систем при ступенчатых изменениях задающего $R(p)$ и возмущающего $F(p)$ воздействий. Обеспечиваемым показателем качества системы является перерегулирование σ (0 или 20%) на выходе объекта.

Формулы для канала управления получены без учёта ограничения на величину управляющего воздействия, необходимого для обеспечения заданного показателя σ . Если такое ограничение наложено, то приходится уменьшать коэффициент регулятора (без изменения параметра T_u), например, при максимально допустимом значении управляющего воздействия $y_{\max} = 1,5y(\infty)$. Передаточный коэффициент ПИ – регулятора следует выбирать по формуле

$$k_p k_o \approx \frac{1,7T_o/\tau_o}{1+T_o/\tau_o} \quad (39)$$

Таблица 4

Формулы для расчета настроечных параметров типовых регуляторов статических инерционных объектов с λ -образной переходной характеристикой (при $\tau_o/T_o = 0 \dots 1$)

Закон	Обобщенный параметр контура	По каналу x_2-x		По каналу y_2-x	
		$\sigma = 0$	$\sigma = 20\%$	$\sigma = 0$	$\sigma = 20\%$
П	$k_p k_o \tau_o / T_o =$	0,30	0,70	0,30	0,85
ПИ	$k_p k_o \tau_o / T_o =$	0,35	0,60	0,60	0,75
	$T_d / T_o =$	1,20	1,00	4,00	2,65
ПИД	$k_p k_o \tau_o / T_o =$	0,60	0,95	0,95	1,20
	$k_p k_o \tau_o / T_o =$	1,00	1,35	2,40	2,00
	$T_d / T_o =$	0,50	0,47	0,42	0,42

Моделирование на ЭВМ и анализ переходных процессов, происходящих в замкнутой системе по каналам управления и возмущения при различных настройках, позволяют сделать следующие выводы о влиянии критериев настройки и параметров регулятора на показатели качества переходного процесса и о достоинствах и недостатках самих критериев:

1. Увеличение передаточного коэффициента k_p приводит к уменьшению времени нарастания t_n и повышению перерегулирования σ .
2. Увеличение постоянной интегрирования T_u даёт повышение длительности t_n и снижение перерегулирования σ .
3. Критерий МО предпочтителен при оптимизации систем, обрабатывающих в основном изменения задающего воздействия $R(p)$, т.е. следящих и программных систем.
4. Критерий СО целесообразно применять при настройке систем, которым чаще приходится реагировать на возмущающие воздействия $F(p)$, т.е. стабилизирующих систем.
5. Оба критерия обеспечивают по каналу возмущения приблизительно одинаковые значения первого максимального отклонения y_m :

$$\frac{y_m}{f_0} \approx (0,85 \dots 1,45) k_o / (T_{o2} / T_{o1}) \quad (40)$$

где коэффициент 0,85 соответствует отношению $T_{o2} / T_{o1} = 2$, а 1,45 – отношению $T_{o2} / T_{o1} = 8$.

6. При настройке по критерию МО относительная длительность переходного процесса по каналу возмущения увеличивается с ростом отношения T_{o2}/T_{o1} :

$$\frac{t_n}{T_{o1}} \approx 5 + 1,5 \frac{T_{o2}}{T_{o1}}, \quad (41)$$

а по критерию СО – уменьшается:

$$\frac{t_n}{T_{o1}} = (35 \dots 65) / (T_{o2}/T_{o1}), \quad (42)$$

где t_n соответствует моменту достижения регулируемой величины значения $x = 0,05 k_o$ (при $f_\epsilon = 1$).

7. При $T_{o2}/T_{o1} = 4$ длительности переходного процесса по каналу возмущения для обоих критериев одинаковы. При $T_{o2}/T_{o1} < 4$ лучшее быстродействие даёт МО, а при $T_{o2}/T_{o1} > 4$ критерий СО.

5. Настройка параметров регуляторов систем с апериодической реакцией.

Довольно часто от системы управления требуется, чтобы её переходная характеристика как можно быстрее стремилась к установившемуся значению с минимальным перерегулированием. Системы такого типа принято называть *системами с апериодической реакцией*. В качестве меры близости переходной характеристики к установившемуся значению принимают зону, равную 2% от этого значения. Тогда временем установления считают время T_s , за которое переходная характеристика входит в указанную зону, как показано на рис. 1. Апериодическая реакция характеризуется следующими показателями:

1. Установившаяся ошибка = 0.
2. Быстродействие \Rightarrow минимальное время нарастания и время установления.
3. 0,1% $\hat{\sigma}$ относительное перерегулирование < 2%.
4. Относительный выброс ниже установившегося значения < 2%.

Показатели (3) и (4) требуют, чтобы после того как в момент T_s переходная характеристика войдёт в зону 2% от установившегося значения, она всё время оставалась в пределах этой зоны.

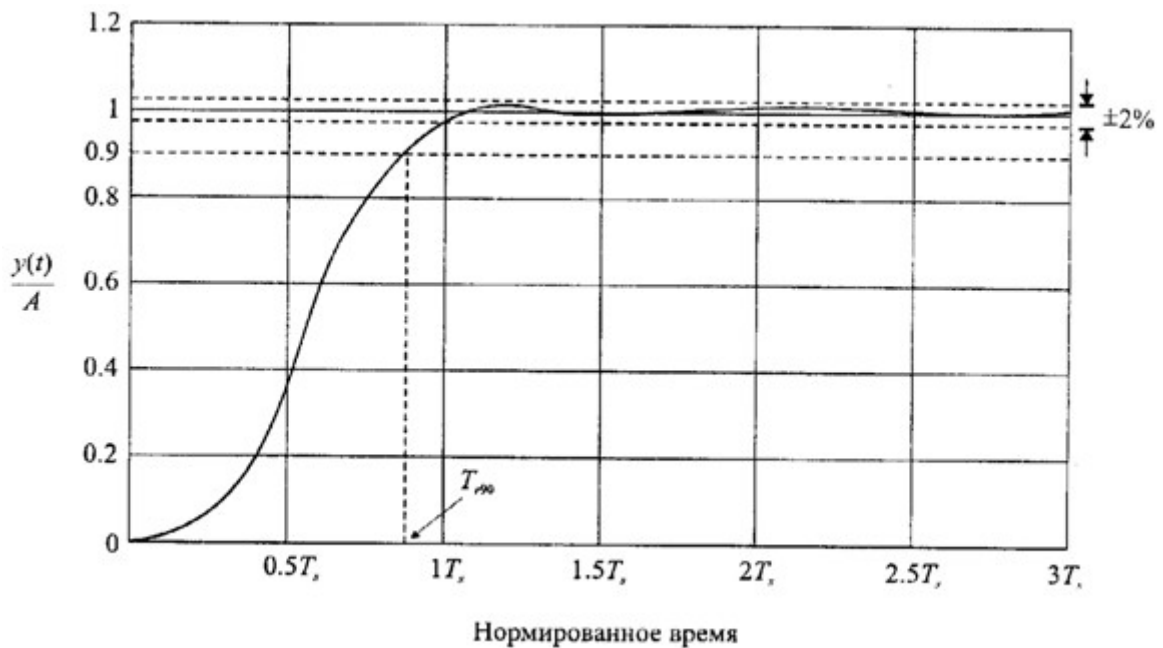


Рис. 1. Аperiodическая реакция системы (A – амплитуда входного ступенчатого воздействия)

Чтобы определить коэффициенты передаточной функции замкнутой системы $W_{зр}(p)$, при которых реакция будет иметь аperiodический характер, приведём сначала эту передаточную функцию к нормированному виду. Покажем это на примере системы третьего порядка:

$$W_{зр}(p) = \frac{\omega_n^3}{p^3 + \alpha\omega_n p^2 + \beta\omega_n^2 p + \omega_n^3} \quad (1)$$

Разделим числитель и знаменатель на ω_n^3 :

$$W_{зр}(p) = \frac{1}{\frac{p^3}{\omega_n^3} + \alpha \frac{p^2}{\omega_n^2} + \beta \frac{p}{\omega_n} + 1} \quad (2)$$

Введя обозначение $\bar{p} = \frac{p}{\omega_n}$, получим:

$$W_{зр}(\bar{p}) = \frac{1}{\bar{p}^3 + \alpha \bar{p}^2 + \beta \bar{p} + 1} \quad (3)$$

Выражение (3) – это нормированная передаточная функция замкнутой системы третьего порядка. Тем же самым способом определяются и нормированные передаточные функции систем более высокого порядка. Коэффициентам α, β, γ и т.д. придаются значения, при которых система будет иметь аperiodическую реакцию. Коэффициенты, приведенные в табл. 1, выбраны таким образом, чтобы получить аperiodическую реакцию и минимизировать время установления и время нарастания до 100% от заданного значения. В выражении (3) фигурирует нормированная

переменная $\bar{p} = \frac{p}{\omega_n}$. Поэтому частота ω_n определяется по заданному времени установления или времени нарастания. Так, если в системе третьего порядка

необходимо иметь время установления, равное 1,2 с, то согласно табл. 1 мы имеем нормированное время установления

$$\omega_n T_s = 4,04$$

Отсюда находим частоту ω_n :

$$\omega_n = \frac{4,04}{T_s} = \frac{4,04}{1,2} = 3,37$$

Таблица 1

Коэффициенты и параметры переходной характеристики системы с апериодической реакцией

Порядок системы	Коэффициенты					Относительное перегуливание	Относительное недерегуливание	Время нарастания (10%-90%), T_{90}	Время нарастания до 100 %, T_r	Время установления, T_s
	α	β	γ	δ	ϵ					
2-й	1,82					0,10%	0,00%	3,47	6,58	4,82
3-й	1,90	2,20				1,65%	1,36%	3,48	4,32	4,04
4-й	2,20	3,50	2,80			0,89%	0,95%	4,16	5,29	4,81
5-й	2,70	4,90	5,40	3,40		1,29%	0,37%	4,84	5,73	5,43
6-й	3,15	6,50	8,70	7,55	4,05	1,63%	0,94%	5,49	6,31	6,04

Примечание: все времена нормированные

После этого можно записать передаточную функцию замкнутой системы в виде (1). При синтезе системы с апериодической реакцией выбирается тип корректирующего устройства и записывается выражение для передаточной функции замкнутой системы. Эта передаточная функция приводится к виду (1), после чего нетрудно определить параметры корректирующего устройства.

Пример 5

Рассмотрим систему с единичной обратной связью, корректирующим устройством $W_k(p)$ и предшествующим фильтром.

Объект имеет передаточную функцию

$$W_o(p) = \frac{k}{p(p+1)},$$

а корректирующее устройство – передаточную функцию

$$W_k(p) = \frac{p+z}{p+s}$$

Предшествующий фильтр должен иметь передаточную функцию

$$W_\phi(p) = \frac{z}{p+z}$$

В этом случае передаточная функция замкнутой системы с предшествующим фильтром равна

$$W_{\text{зф}}(p) = \frac{kz}{p^3 + (1+s)p^2 + (k+s)p + kz}$$

С помощью табл.1 находим требуемые значения коэффициентов: $\alpha = 1,9$ и $\beta = 2,2$.

Если время установления (по критерию 2%) должно быть равно 2 с, то $\omega_n T_s = 4,04$ и, следовательно, $\omega_n = 2,02$. Тогда желаемый характеристический полином замкнутой системы будет иметь вид:

$$q(p) = p^3 + \alpha\omega_n p^2 + \beta\omega_n^2 p + \omega_n^3 = p^3 + 3,84 p^2 + 8,98 p + 8,24$$

Отсюда находим, что $s = 2,84$, $z = 1,34$ и $k = 6,14$. Переходная характеристика системы имеет значения $T_s = 2$ с, $T_r = 2,14$ с и $T_{r90} = 1,72$ с.

Приложение 5

Реализация цифровых регуляторов

Цифровые регуляторы могут быть реализованы в виде импульсных фильтров (на базе четырехполюсников в сочетании с квантователями и экстраполяторами), на основе микроЭВМ и цифровых устройств.

Передаточная функция цифрового регулятора в соответствии с рис.7.4б будет

$$W_p(z) = \frac{b_m + b_{m-1}z + \dots + b_0 z^m}{a_n + a_{n-1}z + \dots + a_0 z^n} = \frac{U(z)}{E(z)}, \quad (7.13)$$

причем всегда должно быть $n \geq m$.

Разделим числитель на знаменатель на z^n . Тогда для предельного случая $n=m$

$$W_p(z) = \frac{b_m z^{-n} + b_{m-1} z^{-n+1} + \dots + b_2 z^{-2} + b_1 z^{-1} + b_0}{a_n z^{-n} + a_{n-1} z^{-n+1} + \dots + a_2 z^{-2} + a_1 z^{-1} + a_0}. \quad (7.14)$$

Если $a_0=1$, то из (7.14) можно получить линейный алгоритм работы цифрового управляющего устройства:

$$u[k] = b_0 e[k] + b_1 e[k-1] + \dots + b_m e[k-n] - (a_1 u[k-1] + a_2 u[k-2] + \dots + a_n u[k-n]). \quad (7.15)$$

Из полученных соотношений можно установить, что цифровой регулятор оказывается физически реализуемым, если в (7.14) нет слагаемых с положительной степенью z . Наличие хотя бы одного члена в (7.14) с положительной степенью z означает «упреждение», т.е. показывает, что выходной сигнал опережает входной. В равной степени это относится и к слагаемым уравнения (7.15), т.е. значение $u[k]$ будет определяться значениями опережающих его слагаемых $u[k+1]$ и $e[k+1]$.

Условием физической реализуемости цифрового регулятора, таким образом, является выполнение условия $n \geq m$. Кроме того, при $n=m$ знаменатель (7.14) не должен иметь множителя z^{-1} при $b_0 \neq 0$, т.е. должно быть также $a_0 \neq 0$.

К цифровым регуляторам предъявляются требования к точности реализации параметров при их вычислении с ограниченной разрядностью процессоров.

Для обеспечения устойчивости регуляторов должно выполняться условие расположения полюсов их передаточной функции внутри единичной окружности на комплексной плоскости.

Передаточная функция цифрового регулятора обычно реализуется в виде программы ЭВМ, реализуемых методами *прямого, последовательного и параллельного* программирования.

При *прямом программировании* из передаточной функции (7.14) запишем уравнение в форме обратного преобразования:

$$a_0 u^*(t) + \sum_{k=1}^n a_k u^*(t - kT) = \sum_{k=0}^m b_k e^*(t - kT), \quad (7.16)$$

решением которого будет:

$$u^*(t) = \frac{1}{a_0} \sum_{k=0}^m b_k e^*(t - kT) - \frac{1}{a_0} \sum_{k=1}^n a_k u^*(t - kT). \quad (7.17)$$

В общем виде уравнение (7.17) может быть представлено, как разность двух групп слагаемых входного и выходного сигналов:

$$u^*(t) = x^*(t) - y^*(t). \quad (7.18)$$

Для *последовательного программирования* передаточную функцию регулятора представляют в виде произведения простейших передаточных функций, каждая из которых реализуется простейшими программами:

$$W_p(z) = \prod_{k=1}^p W_{pk}(z), \quad (7.19)$$

где p – наибольшее из чисел n и m . Для каждой простейшей программы используется метод прямого программирования.

При *параллельном программировании* передаточная функция (7.14) представляется в виде $W_p(z) = \sum_{k=1}^p W_{pk}(z)$, (7.20)

где p – наибольшее из чисел n и m . Здесь также каждая из передаточных функций может быть реализована методом прямого программирования.

Пример 1

Пусть передаточная функция цифрового регулятора имеет вид:

$$W_p(z) = \frac{5(1+0.25z^{-1})}{(1-0.5z^{-1})(1-0.1z^{-1})} = \frac{U(z)}{E(z)}$$

Регулятор является физически реализуемым ($n=2, m=1$ при $b_0 \neq 0, a_0 \neq 0$) и устойчивым (полюсы $z_1=0.5, z_2=0.1$).

1. Прямое программирование.

Из передаточной функции запишем линейное уравнение регулятора:
 $(1 - 0.6z^{-1} + 0.05z^{-2})U(z) = 5(1 + 0.25z^{-1})E(z)$.

Выразим обратное z - преобразование к обеим частям уравнения:
 $u^*(t) = 5e^*(t) + 1.25e^*(t - T) + 0.6u^*(t - T) - 0.05u^*(t - 2T)$.

Применяя метод прямой (непосредственной) декомпозиции к предыдущему уравнению

$$U(z) = 5(1 + 0.25z^{-1}) \frac{E(z)}{1 - 0.6z^{-1} + 0.05z^{-2}} = (5 + 1.25z^{-1})X(z)$$

где $X(z) = \frac{E(z)}{1 - 0.6z^{-1} + 0.05z^{-2}}$ или $X(z) = E(z) + 0.6z^{-1}X(z) - 0.05z^{-2}X(z)$,

получим систему:

$$U(z) = (5 + 1.25z^{-1})X(z)$$

$$X(z) = E(z) + 0.6z^{-1}X(z) - 0.05z^{-2}X(z)$$

Структура решения данной системы уравнений приведена на рис.1.

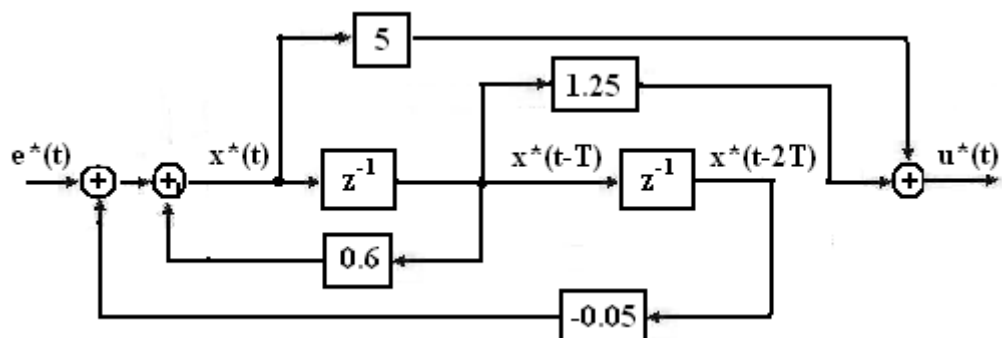


Рис.1. Прямое программирование передаточной функции

2. Последовательное программирование.

Передаточную функцию регулятора запишем в виде произведения двух функций, например, вида:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{1+0.25z^{-1}}{1-0.5z^{-1}} \frac{5}{1-0.1z^{-1}} = \frac{X(z)}{E(z)} \frac{U(z)}{X(z)}$$

Программирование выполним, представив произведение передаточных функций системой уравнений:

$$X(z) = (1+0.25z^{-1})E(z) + 0.5z^{-1}X(z)$$

$$U(z) = 5X(z) + 0.1z^{-1}U(z).$$

Структурная схема решения системы приведена на рис.7.9.

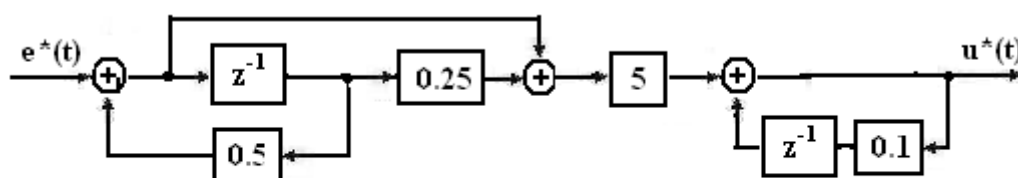


Рис.7.9 Последовательное программирование передаточной функции

3. Параллельное программирование.

Разложим передаточную функцию регулятора на сумму

простейших:
$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{9.375}{1-0.5z^{-1}} - \frac{4.375}{1-0.1z^{-1}} = \frac{U_1(z)}{E(z)} - \frac{U_2(z)}{E(z)}$$

Составим систему уравнений, $U(z) = U_1(z) - U_2(z)$

$$U_1(z) = 9.375E(z) + 0.5z^{-1}U_1(z)$$

$$U_2(z) = 4.375E(z) + 0.1z^{-1}U_2(z),$$

структурная схема решения системы приведена на рис.7.10.

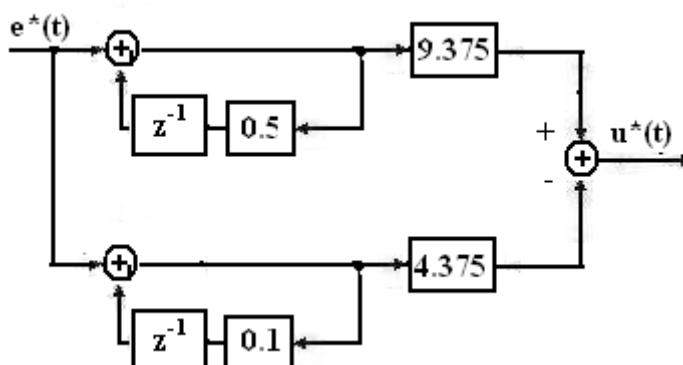


Рис.2. Параллельное программирование передаточной функции

Для преобразования сложной дискретной передаточной функции к алгебраической сумме элементарных используйте две леммы высшей алгебры:

Лемма 1. Пусть $\frac{P(s)}{Q(s)}$ - правильная рациональная дробь с действительными коэффициентами и пусть S_1 есть вещественный корень полинома $Q(s)$ кратности r , тогда существует такое число A и такой полином $P_1(s)$, что справедливо равенство

$$\frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{A}{(s-S_1)^r} + \frac{P_1(s)}{Q_1(s)},$$

где $Q_1(s) = \frac{Q(s)}{s-S_1}$; при этом $\frac{P_1(s)}{Q_1(s)}$ - правильная рациональная дробь.

Лемма 2. Пусть $\frac{P(s)}{Q(s)}$ - правильная рациональная дробь с действительными коэффициентами и $Q(s) = (s^2+ps+q)^m \cdot V(s)$, где $\frac{p^2}{4} - q < 0$, корни полинома не являются корнями полинома $V(s)$, $V(s)$ не делится нацело на (s^2+ps+q) . Тогда найдутся такие вещественные числа M и N и такой полином $P_1(s)$, что

$$\frac{P(s)}{(s^2+ps+q)^m V(s)} = \frac{Ms+N}{(s^2+ps+q)^m} + \frac{P_1(s)}{(s^2+ps+q)^{m-1} V(s)},$$

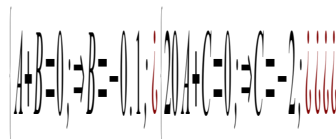
где второе слагаемое будет также правильная рациональная дробь.

Пример:

$$W(s) = \frac{20}{s(s^2+20s+200)} = \frac{A}{s} + \frac{Bs+C}{s^2+20s+200} = \frac{As^2+20As+200A+Bs^2+Cs}{s(s^2+20s+200)} =$$

$$\frac{(A+B)s^2+(20A+C)s+200A}{s(s^2+20s+200)} = \frac{0.1}{s} + \frac{0.1s+2}{s^2+20s+200}.$$

Здесь использован метод неопределённых коэффициентов:



Примечание:

$$1. \quad W_p(z) = k_p + \frac{k_i T(z+1)}{2(z-1)} + \frac{k_d(z-1)}{Tz} = \frac{(k_i T^2 + 2k_d + 2k_p T)z^2 + (k_i T^2 - 2k_p T - 4k_d)z + 2k_d}{2Tz(z-1)}$$

2. Теорема о разложении многочлена на множители:

«Каждый (действительный или комплексный) многочлен $f(x)$ степени n относительно x может быть единственным способом представлен в виде произведения постоянной и n линейных множителей $(x - x_k)$, именно

$$f(x) \equiv a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{n-1} x + a_n \equiv a_0 \prod_{k=1}^n (x - x_k),$$

где x_k - корни многочлена $f(x)$; корню x_k кратности m_k соответствует m_k множителей $(x - x_k)$. Каждая пара множителей $[x - (\alpha_k + i\omega_k)]$ и $[x - (\alpha_k - i\omega_k)]$, соответствующая паре комплексных сопряжённых корней $x = \alpha_k + i\omega_k$ и $x = \alpha_k - i\omega_k$, может быть объединена в действительный квадратный множитель $[(x - \alpha_k)^2 + \omega_k^2]$.

Пример 2

Передаточная функция аналогового корректирующего устройства имеет вид

$$W_\kappa(p) = \frac{0,5(1,1p+1)(0,5p+1)}{(2,5p+1)(0,25p+1)}$$

Определите дискретную передаточную функцию цифрового алгоритма управления объектом путём преобразования аналогового регулятора в цифровой при периоде квантования сигналов $T=0,02$ с. Проверьте адекватность преобразования по амплитудно-фазовым частотным характеристикам непрерывного и цифрового корректирующих звеньев. Составьте программу работы ЦВМ на основании полученной дискретной передаточной функции и постройте структурную схему реализации алгоритма дискретного корректора.

Решение

Для получения дискретного аналога корректирующего алгоритма в форме обратных разностей используем аппроксимационную формулу Тастина

$$p = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1},$$

приведём первый коэффициент знаменателя к 1 и разделим числитель и знаменатель дискретной передаточной функции на z^2 :

$$\begin{aligned} W_\kappa(z) &= \frac{0,5(1,1\frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}+1)(0,5\frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}+1)}{(2,5\frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}+1)(0,25\frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}+1)} = \frac{0,5(111z-109)(51z-49)}{(251z-249)(26z-24)} = \\ &= \frac{0,4337(1-1,94z^{-1}+0,94z^{-2})}{1-1,913z^{-1}+0,91z^{-2}} = \frac{Y(z)}{U(z)}. \end{aligned}$$

Из последнего выражения

$$\begin{aligned} (1-1,913z^{-1}+0,91z^{-2})Y(z) &= 0,4337(1-1,94z^{-1}+0,94z^{-2})U(z), \\ Y(z) &= 0,4337(1-1,94z^{-1}+0,94z^{-2})U(z) + 1,913z^{-1}Y(z) - 0,91z^{-2}Y(z). \end{aligned}$$

Обратное Z-преобразование этого выражения – рекуррентная форма дискретного управляющего алгоритма:

$$y(n) = 0,4337[u(n) - 1,94u(n-1) + 0,94u(n-2)] + 1,913y(n-1) - 0,91y(n-2).$$

Структурная схема реализации полученного алгоритма в микроЭВМ представлена на рис.1.

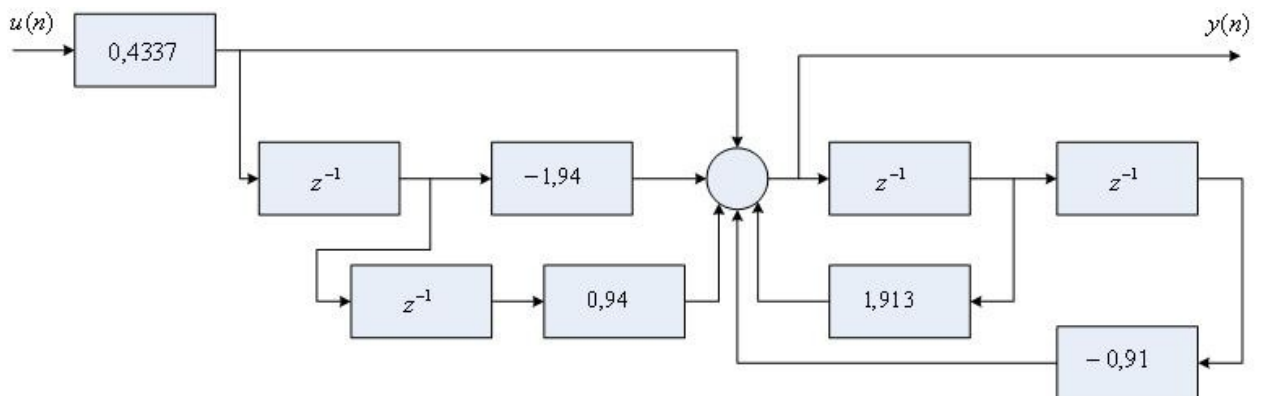


Рис.1. Структурная схема дискретного управляющего алгоритма

Греческий алфавит

Название	Прописна	Строчная	Название	Прописна	Строчная
буквы	я		буквы	я	
Альфа	Α	<i>α</i>	Ню	Ν	<i>ν</i>
Бета	Β	<i>β</i>	Кси	Ξ	<i>ξ</i>
Гамма	Γ	<i>γ</i>	Омикрон	Ο	<i>ο</i>
Дельта	Δ	<i>δ</i>	Пи	Π	<i>π</i>
Эпсилон	Ε	<i>ε</i>	Ро	Ρ	<i>ρ</i>
Дзета	Ζ	<i>ζ</i>	Сигма	Σ	<i>σ</i>
Эта	Η	<i>η</i>	Тау	Τ	<i>τ</i>
Тета	Θ	<i>θ</i>	Ипсилон	Υ	<i>υ</i>
Йота	Ι	<i>ι</i>	Фи	Φ	<i>φ</i>
Каппа	Κ	<i>κ</i>	Хи	Χ	<i>χ</i>
Лямбда	Λ	<i>λ</i>	Пси	Ψ	<i>ψ</i>
Мю	Μ	<i>μ</i>	Омега	Ω	<i>ω</i>

Список рекомендуемой литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления: Учебник – СПб: Изд-во «Профессия», 2003-2007.-752 с.
2. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы.- М.:Наука,1976.- 576с.
3. Васильев Е.М., Коломыцев В.Г. Теория автоматического управления. Нелинейные системы: Учебное пособие – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011.-115с.
4. Васильев Е.М., Коломыцев В.Г. Теория автоматического управления. Дискретные системы: Учебное пособие – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012.-152с.
5. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. — М.: Горячая линия-Телеком, 2009.-608с.
6. Диркс Г.Г., Коломыцев В.Г. Проектирование микропроцессорных систем автоматического управления. Ч.1. Синтез систем автоматического управления: Учебное пособие - Пермь: Изд-во ПГТУ, 1997.-175с.
7. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления: Учебник-М.:Изд-во «Лаборатория Базовых Знаний», 2002-2004.- 832 с.
8. Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х. и др. Под ред. В.Б.Яковлева. Теория автоматического управления: Учебник - М.: Изд-во «Высшая школа», 2005.- 567 с.
9. Иванов В.А. и др. Математические основы теории автоматического управления. В 3-х т. Под ред. Б.К. Чемоданова. М.: Изд. МГТУ, Т1-2006, Т2-2008, Т3-2009.
10. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ.- М: Машиностроение, 1986. – 448 с.
11. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью: Учебник - М.: Изд-во «Лаборатория Базовых Знаний», 2001. – 616 с

Основы работы в MATLAB

1. Введение

MATLAB — это интерактивная среда для научных и инженерных вычислений. В состав MATLAB входят основная программа (ядро) и специализированные пакеты прикладных программ (toolboxes), состоящие из так называемых *M-файлов*, расширяющих функциональные возможности основной программы. Один из этих пакетов, *Control System Toolbox*, в сочетании с основной программой дает возможность использовать MATLAB для анализа и синтеза систем управления.

При работе в среде MATLAB пользователь взаимодействует с компьютером с помощью четырех основных объектов:

- ✓ инструкции и переменные;
- ✓ матрицы;
- ✓ графические изображения;
- ✓ скрипты.

MATLAB интерпретирует и обрабатывает входные данные в виде одного или нескольких этих объектов.

Мы опишем только основные функции программы MATLAB, наиболее полный перечень можно посмотреть в приложении.

Для более качественного изучения программы мы рекомендуем проделать все приведенные примеры и описания самостоятельно.

2. Инструкции и переменные

Инструкции имеют следующий общий вид: `>>переменная = выражение.`

В MATLAB используется операция присваивания, так что знак равенства «=» означает, что некоторой переменной присваивается выражение справа от этого знака. Командная строка обозначается двумя направленными вправо стрелками «>>».

Приведем пример инструкции для ввода матрицы размерности 2 x 2 и присвоения ей имени переменной A: `>>A=[1 2; 4 6] <ret>` .

Инструкция выполняется после возврата каретки (нажатия клавиши <Enter>).

После ввода инструкции, завершающегося нажатием клавиши <Enter>, матрица A автоматически отображается на экране. Если после инструкции следует точка с запятой (;), то вывод матрицы A на экран подавляется. Тем не менее, присвоение матрице имени A сохраняется, хотя ее вывод на экран подавлен точкой с запятой.

В выражениях могут быть использованы обычные символы математических операций, приведенные в таблице 5.1. Порядок выполнения арифметических действий можно изменить с помощью скобок.

Таблица 5.1

Символы математических операций	
+	Сложение
-	Вычитание
*	Умножение
/	Деление
^	Возведение в степень

MATLAB различает верхний и нижний регистры, поэтому переменные *Num* и *num* будут иметь разный смысл.

В MATLAB имеется несколько переменных с заранее закрепленными за ними именами:

- ✓ *NaN* (сокращение от *Not-a-Number*) используется для обозначения неопределенного (нечислового) результата операции;
- ✓ *Inf* соответствует $+\infty$;
- ✓ *pi* соответствует числу π ;
- ✓ *i* и *j* обозначают мнимую единицу и используются при арифметических операциях с комплексными числами.

Рассмотрим основные функции для работы с переменными:

`who` выводит на экран список всех переменных, хранящихся в рабочей области;

`whos` выводит на экран список переменных в рабочей области вместе с дополнительной информацией об их типе, размерности и занимаемой памяти;

`clear` удаляет из рабочей области все данные (переменные и функции);

`clear variables` удаляет все переменные; `clear name1 name2...` удаляет переменные *name1* *name2* и т. д.;

`format` меняет формат вывода. Если задан какой-то определенный формат, то он сохраняет силу до тех пор, пока не будет изменен.

Приведем основные форматы вывода:

`format long` - 15-разрядное число с фиксированной точкой;

`format long e` - 15-разрядное число с плавающей точкой;

`format long g` - наилучший формат — 15 разрядов с фиксированной или плавающей точкой;

`format short e` - 5-разрядное число с плавающей точкой;

`format short g` - 5 разрядов с фиксированной или плавающей точкой;

`format hex` - шестнадцатиричный формат;

`format bank` - фиксированный формат для долларов и центов;

`format` - то же, что и `format short`.

3. Матрицы

Основной вычислительной единицей является матрица. Векторы и скаляры можно рассматривать как частные случаи матрицы. Матрица обычно заключается в квадратные скобки, [\bullet]. Элементы столбца отделяются пробелами или запятыми, а строки разделяются точками с запятой или возвратом каретки.

Способ записи матриц был рассмотрен в пункте 2. Матрицы можно вводить посредством записи нескольких строк, завершая их точкой с запятой и возвратом каретки или просто возвратом каретки. Это очень удобно при вводе больших матриц.

Элементы матриц могут быть комплексными числами либо содержать тригонометрические и элементарные математические функции.

К основным матричным операциям относятся сложение, вычитание, транспонирование, возведение в степень и так называемые операции над массивами. Символы математических операций над матрицами остаются такими же, как были рассмотрены ранее.

В MATLAB имеется возможность левостороннего и правостороннего деления матриц.

При сложении и вычитании матриц они должны иметь одинаковую размерность. Если матрица *A* имеет размерность $n \times m$, а матрица *B* — размерность $p \times r$, то $A \pm B$ имеет смысл только тогда, когда $n = p$, а $m = r$. Умножение матриц $A * B$ возможно только в случае $m = p$. Особым случаем является умножение матрицы на вектор. Предположим, что *b* есть вектор (столбец) из p элементов. Умножение матрицы *A* размерности $n \times m$ на вектор *b*

возможно только в случае $m = p$. В результате будет получен вектор $y = A * b$ размерности $n \times 1$.

Транспонирование матрицы обозначается символом апострофа ($'$). С помощью операций транспонирования и умножения можно получить так называемое внутреннее произведение векторов. Поясним это на примере. Предположим, что w и v есть векторы размерности $m \times 1$. Тогда их внутреннее произведение (известное также как произведение с точкой) находится как $w' * v$. Внутреннее произведение двух векторов дает скалярную величину. Аналогично можно вычислить внешнее произведение двух векторов как $w * v'$. Внешнее произведение двух векторов размерности $m \times 1$ дает матрицу размерности $m \times m$, ранг которой равен 1.

Основные матричные операции можно заменить поэлементными действиями с использованием периодически действующего предшествующего оператора. Такие процедуры известны как операции над массивами. Самые простые операции над массивами приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2
Математические операторы, применяемые к массивам

+	Сложение
-	Вычитание
.*	Умножение
./	Деление
.^	Возведение в степень

Необходимо остановиться на представлении данных с использованием двоеточия: $x=[x_i:dx:x_f]$. Такое представление позволяет сформировать вектор, компонентами которого являются числа, начинающиеся со значения x_i и заканчивающиеся значением x_f , следующие друг за другом с заданным шагом dx .

4. Графика

Графика является мощным интерактивным средством анализа и синтеза систем управления.

Для представления графических изображений MATLAB использует графический дисплей, автоматически активизируемый при задании любой функции, результатом которой должен являться некоторый график (например, функции *plot*). Функция *plot* открывает графический дисплей, который носит название окна FIGURE. Вы можете создать другое такое окно с помощью функции *figure*. В одном сеансе работы с MATLAB может быть создано несколько графических окон. Для этого используется функция *figure (n)*, которая создает n-е текущее окно. Графическое изображение можно удалить из окна с помощью функции *clf* в командной строке. Функция *shg* выводит на первый план текущее графическое окно.

Способы задания и оформления графиков приведены в таблицах 5.3, 5.4 и 5.5.

Таблица 5.3

Форматы графиков

plot (x,y)	График зависимости между векторами x и y в обычном масштабе
semilogx (x,y)	График зависимости между векторами x и y . Масштаб по оси x логарифмический (десятичные логарифмы), масштаб по оси y линейный
semilogy (x,y)	График зависимости между векторами x и y . Масштаб по оси x линейный, масштаб по оси y логарифмический (десятичные логарифмы)

loglog (x,y)	График зависимости между векторами x и y. Масштаб по обеим осям логарифмический
--------------	---

Таблица 5.4

Функции для оформления графиков

title ('text')	Помещает над графиком заголовок 'text'
legend (string1, string2,...)	Помещает на текущем графике пояснения в виде заданных текстовых строк
xlabel ('text')	Обозначает ось x надписью 'text'
ylabel ('text')	Обозначает ось y надписью 'text'
text (p1, p2, 'text')	Добавляет к текущему графику надпись 'text', начиная с позиции (p1, p2), где (p1, p2) - координаты точки по осям x и y
subplot	Разбивает графическое окно на несколько подокон
grid on	Наносит линии сетки на текущий график
grid off	Удаляет линии сетки с текущего графика
grid	Управляет выводом сетки

Таблица 5.5

Типы линий для оформления графиков

- Сплошная линия.
- Штриховая линия
- : Пунктирная линия
- . Штрих-пунктирная линия

Типы линий для оформления графиков задаются следующим образом:

>>plot(x,y1,'- -',x,y2,'-.').

Графический дисплей можно разделить на несколько подокон меньшего размера. Функция subplot (m, n, p) делит графический дисплей на *m* x *n* подокон (*m* — число «строк», *n* — число «столбцов»), а целый параметр *p* определяет номер подокна. Нумерация идет слева направо и сверху вниз.

5. Скрипты

Действительная мощь MATLAB применительно к анализу и синтезу систем управления состоит в возможности выполнения длинной последовательности команд, записанных в виде файла. Такие файлы называются М-файлами, т. к. их имена имеют вид *filename.m*. Одним из видов М-файла является скрипт. *Control System Toolbox* представляет собой собрание М-файлов, разработанных специально для приложения к задачам управления. В дополнение к М-файлам, поставляемым вместе с MATLAB и пакетами прикладных программ, вы можете разработать собственные скрипты для решения конкретных задач. Скрипты — это обычные текстовые файлы в формате ASCII, которые создаются с помощью текстового редактора.

Скрипт представляет собой последовательность обыкновенных инструкций и функций, используемых на уровне командной строки. Скрипт вызывается также на уровне командной строки путем ввода имени файла или с помощью ниспадающего меню. Каждый скрипт может вызывать также другие скрипты. В случае вызова скрипта MATLAB сразу начинает выполнение инструкций и вычисление функций, входящих в файл, не ожидая ввода командной строки. Скрипт работает с переменными, находящимися в рабочей области.

Предположим, что вы захотели построить график функции $y(t)=\sin at$, где a — варьируемый параметр. Тогда с помощью текстового редактора вы записываете скрипт и присваиваете ему, скажем, имя *plotdata.m*, затем вводите в командной строке значение a ,

которое автоматически помещается в рабочую область. После этого вы печатаете в командной строке имя *plotdata*, что незамедлительно приводит к выполнению скрипта. При этом скрипт использует самое последнее значение α из рабочей области. После получения результата вы можете ввести другое значение α в командной строке и выполнить скрипт еще раз.

Скрипт должен быть хорошо снабжен комментариями, начинающимися с символа `%`. Снабдите скрипт заставкой, содержащей некоторые сведения относительно его назначения и затем используйте функцию `help`, чтобы вывести заставку на экран.

Используя скрипт *plotdata.m*, вы можете в интерактивном режиме исследовать влияние параметра α . В командной строке введите значение $\alpha = 10$, за которым должно быть указано имя скрипта (в данном случае *plotdata*). MATLAB автоматически построит график функции $y = \sin \alpha t$. Вы можете вернуться к командной строке, ввести значение $\alpha = 50$ и выполнить скрипт еще раз, чтобы получить новый график.

Вы можете изменить начертание символов с помощью следующих модификаторов:

`\bf` - полужирный шрифт ;

`\it` – курсив ;

`\rm` - обычный шрифт ;

`\fontname` - определяет название семейства используемых шрифтов ;

`\fontsize` - определяет размер шрифта .

Для обозначения нижних и верхних индексов используются соответственно символы «`_`» и «`^`».

6. Приложение

Таблица 5.6

Распространенные математические функции

<code>sin(x)</code>	Синус	<code>log10(x)</code>	Десятичный логарифм
<code>sinh(x)</code>	Гиперболический синус	<code>log2(x)</code>	Логарифм по основанию 2
<code>asin(x)</code>	Арксинус	<code>pow2(x)</code>	Степень числа 2
<code>asinh(x)</code>	Гиперболический арксинус	<code>sqrt(x)</code>	Квадратный корень
<code>cos(x)</code>	Косинус	<code>nextpow2(x)</code>	Ближайшая степень числа 2
<code>cosh(x)</code>	Гиперболический косинус	<code>abs(x)</code>	Абсолютное значение комплексного числа
<code>acos(x)</code>	Арккосинус	<code>angle(x)</code>	Аргумент комплексного числа
<code>acosh(x)</code>	Гиперболический арккосинус	<code>complex(x)</code>	Образование комплексного числа по действительной и мнимой частям
<code>tan(x)</code>	Тангенс	<code>conj(x)</code>	Комплексно-сопряженное число
<code>tanh(x)</code>	Гиперболический тангенс	<code>imag(x)</code>	Мнимая часть комплексного числа
<code>atan(x)</code>	Арктангенс	<code>real(x)</code>	Действительная часть комплексного числа
<code>atan2(y,x)</code>	Четырехквadrантный арктангенс	<code>unwrap(x)</code>	Непрерывная функция фазового угла
<code>atanh(x)</code>	Гиперболический арктангенс	<code>isreal(x)</code>	Истинно, если это массив действительных чисел
<code>sec(x)</code>	Секанс	<code>sort(x)</code>	Сортировка комплексно-сопряженных пар чисел
<code>sech(x)</code>	Гиперболический секанс	<code>fix(x)</code>	Усечение дробной части числа
<code>asec(x)</code>	Арксеканс	<code>floor(x)</code>	Округление до меньшего целого
<code>asech(x)</code>	Гиперболический арксеканс	<code>ceil(x)</code>	Округление до большего целого
<code>csc(x)</code>	Косеканс	<code>round(x)</code>	Округление до ближайшего целого
<code>csch(x)</code>	Гиперболический косеканс	<code>mod(x,y)</code>	Остаток в смысле модульной арифметики
<code>acsc(x)</code>	Арккосеканс	<code>rem(x,y)</code>	Остаток от деления
<code>acsch(x)</code>	Гиперболический арккосеканс		
<code>cot(x)</code>	Котангенс		
<code>coth(x)</code>	Гиперболический котангенс		
<code>acot(x)</code>	Арккотангенс		
<code>acoth(x)</code>	Гиперболический арккотангенс		
<code>exp(x)</code>	Экспоненциальная функция		
<code>log(x)</code>	Натуральный логарифм		

Таблица 5.7

Функции MATLAB

Функция	Описание функции
abs	Вычисляет абсолютное значение числа
acos	Вычисляет арккосинус
ans	Выводит результат последней операции
asin	Вычисляет арксинус
atan	Вычисляет арктангенс (в 2 квадрантах)
atan2	Вычисляет арктангенс (в 4 квадрантах)
axis	Задаёт ручное масштабирование осей координат при выводе графиков
bode	Строит частотные характеристики в виде диаграммы Боде
c2d	Реализует построение дискретной модели непрерывной системы
clear	Удаляет переменные и функции из рабочей области
clf	Очищает графическое окно
conj	Вычисляет комплексно-сопряжённое число
conv	Производит умножение двух полиномов
cos	Вычисляет косинус
ctrb	Вычисляет матрицу управляемости
diary	Сохраняет сеанс работы в файле на диске
d2c	Реализует построение непрерывной модели дискретной системы
eig	Вычисляет собственные значения и собственные векторы
end	Завершает построение структуры системы управления
exp	Вычисляет экспоненту с основанием e
expm	Вычисляет матричную экспоненту с основанием e
eye	Формирует единичную матрицу
feedback	Вычисляет передаточную функцию для соединения двух систем в контур с обратной связью
for	Образует цикл вычислений
format	Задаёт формат вывода чисел на дисплей
grid on	Добавляет сетку к текущему графику
help	Печатает список тем, по которым предлагает услуги Помощник
hold on	Сохраняет текущий график на экране
i	Мнимая единица, корень числа -1
imag	Выделяет мнимую часть комплексного числа
impz	Вычисляет реакцию системы на единичную импульсную функцию
inf	Бесконечное значение
j	Мнимая единица, корень числа -1
legend	Помещает пояснение на текущем графике
linspace	Формирует линейно упорядоченные векторы
load	Загружает в файл сохранённые переменные
log	Вычисляет натуральный логарифм
log10	Вычисляет десятичный логарифм
loglog	Строит график в логарифмическом масштабе по обеим осям

logspace	Формирует логарифмически упорядоченные векторы
lsim	Вычисляет реакцию системы на произвольный входной сигнал и ненулевые начальные условия
margin	Вычисляет по частотным характеристикам системы запас по модулю, запас по фазе и соответствующие им частоты
max	Определяет максимальное значение числа из массива
mesh	Создает трехмерную сетчатую поверхность
meshgrid	Создает массивы для использования их совместно с функцией mesh
min	Определяет минимальное значение числа из массива
minreal	Определяет передаточную функцию минимальной реализации после сокращения полюсов и нулей
NaN	Указывает на нечисловое значение, получаемое в результате операции
ngrid	Изображает линии сетки диаграммы Никольса
nichols	Строит годограф Никольса по частотным характеристикам системы
num2str	Преобразует массив чисел в строки
nyquist	Строит частотный годограф (диаграмму) Найквиста
obsv	Вычисляет матрицу наблюдаемости
ones	Формирует матрицу, все элементы которой есть целые числа и равны 1
pade	Вычисляет аппроксимацию Паде n-го порядка для запаздывания по времени
parallel	Определяет передаточную функцию для параллельного соединения двух систем
plot	Строит график в линейном масштабе по обеим осям
pole	Вычисляет полюсы системы
poly	Формирует полином по его корням
polyval	Вычисляет значение полинома
printsys	Выводит на печать информацию о модели линейной системы в переменных состояния и в виде передаточной функции
pzmap	Изображает диаграмму расположения полюсов и нулей линейной системы
rank	Вычисляет ранг матрицы
real	Выделяет действительную часть комплексного числа
residue	Производит разложение рациональной функции на простые дроби
rlocfind	Определяет коэффициент усиления, соответствующий заданному положению корней на корневом годографе
rlocus	Строит корневой годограф системы
roots	Вычисляет корни полинома
semilogx	Строит график с использованием логарифмического масштаба по оси x и линейного масштаба по оси y

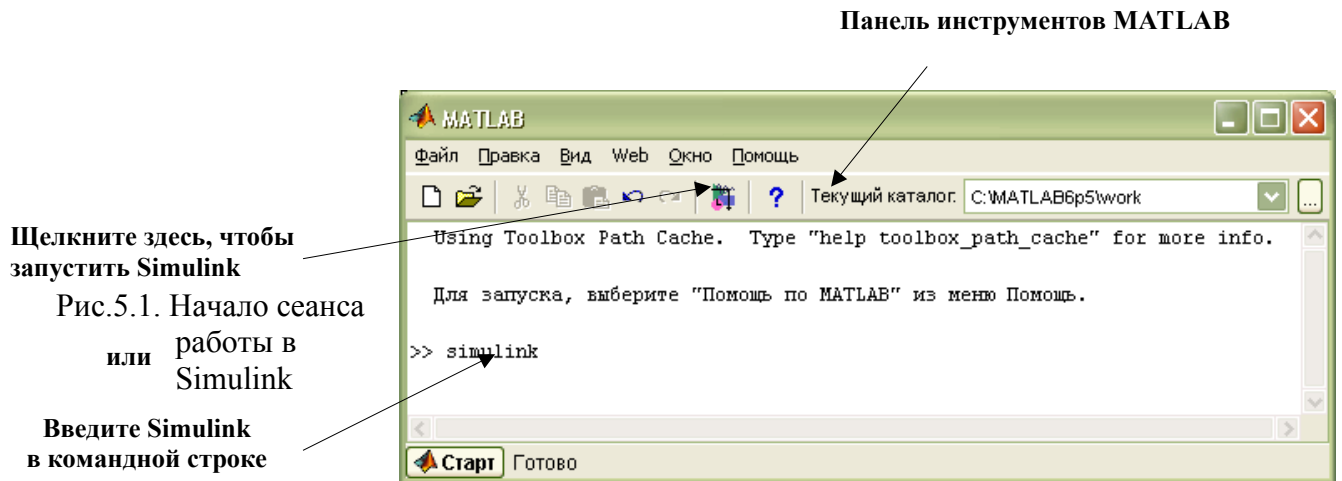
semilogy	Строит график с использованием логарифмического масштаба по оси y и линейного масштаба по оси x
series	Определяет передаточную функцию для последовательного соединения двух систем
shg	Отображает графическое окно
sin	Вычисляет синус
sqrt	Вычисляет квадратный корень
ss	Формирует модель объекта в переменных состояниях
step	Вычисляет переходную характеристику системы
subplot	Разделяет графическое окно на подокна
tan	Вычисляет тангенс
text	Добавляет текст к текущему графику
title	Добавляет заголовок к текущему графику
tf	Создает модель объекта в виде передаточной функции
who	Выводит список переменных, находящихся в рабочей области
whos	Выводит список текущих переменных с подробностями
xlabel	Добавляет к текущему графику обозначение оси x
ylabel	Добавляет к текущему графику обозначение оси y
zero	Вычисляет нули системы
zeros	Создает матрицу, все элементы которой нулевые

Simulink предоставляет пользователям MATLAB мощное средство моделирования и исследования систем управления с обратной связью. Simulink является интерактивным инструментом, эффективно использующим графический интерфейс.

Начать работу с Simulink можно двумя способами:

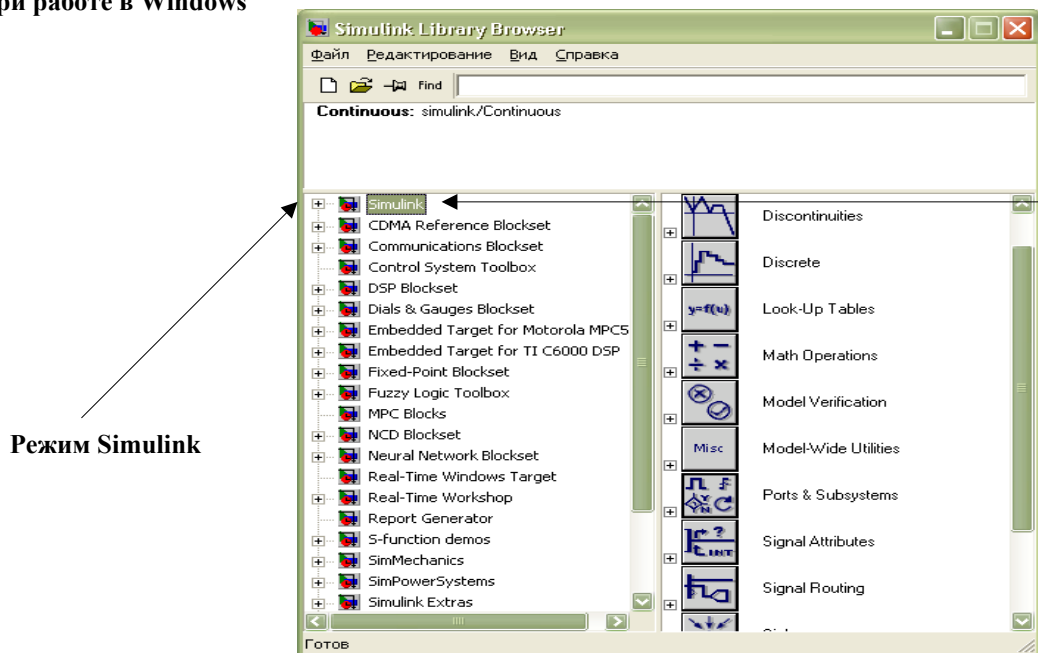
- Щелкнуть мышью на значке Simulink в панели инструментов MATLAB.
- Ввести Simulink в командной строке на экране.

Оба эти способа проиллюстрированы на рис. 5.1.



После запуска Simulink на рабочем столе должно появиться окно наподобие рис. 5.2. На рис. 5.2 изображен браузер главной библиотеки Simulink. Он показывает, какие библиотеки, структурированные в виде деревьев, установлены на компьютере.

Рис. 5.2
Первое окно, появляющееся после запуска Simulink при работе в Windows



В качестве упражнения, помогающего освоить Simulink, вы можете выполнить обсуждаемые далее этапы и в результате создать простую систему и приступить к ее моделированию. Сеанс работы в Simulink вы можете начать, открыв уже существующую модель или же создав новую модель. Последнее можно сделать двумя способами:

- Щелкнув на кнопке New в панели инструментов браузера главной библиотеки;
- Выбрав сначала New в раскрывающемся меню опции File в окне библиотеки, а затем выбрав Model.

Эти два способа создания новой модели проиллюстрированы на рис. 5.3. Окно новой системы, изображенное на рис. 5.4, появляется на рабочем столе, по умолчанию занимая всю его площадь. При необходимости вы можете изменить его размеры и переместить в нужное положение. Сразу же после создания окну новой системы присваивается имя Untitled, но вы можете изменить его с помощью команды Save as из меню File. В этом окне производится создание модели, ее редактирование и исследование. Сохранение модели автоматически создает файл (с расширением .mdl), содержащий всю информацию, необходимую для открытия модели в следующих сеансах работы в Simulink. В конце каждого сеанса работы обязательно выбирайте команду SAVE из меню File с тем, чтобы все изменения модели были сохранены для последующей работы.

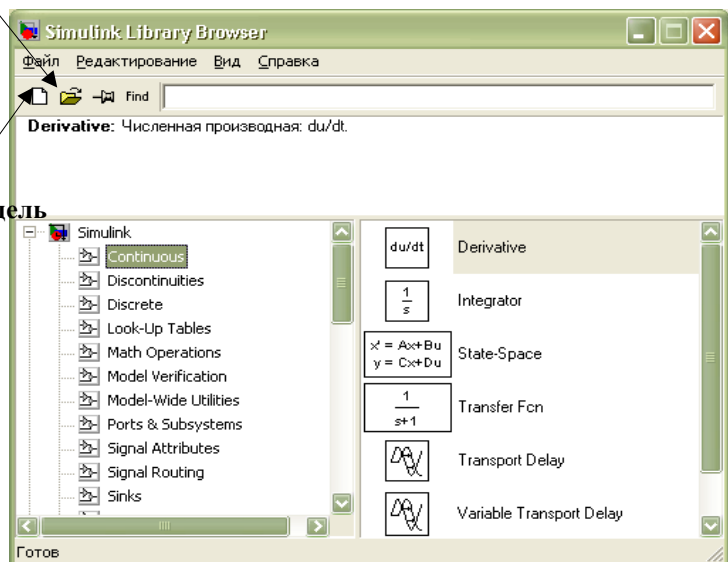
Откройте существующую модель

Рис. 5.3

Создание новой модели:(а) из браузера главной библиотеки (в Windows),(б) из окна библиотеки

Щелкните здесь, чтобы создать новую модель

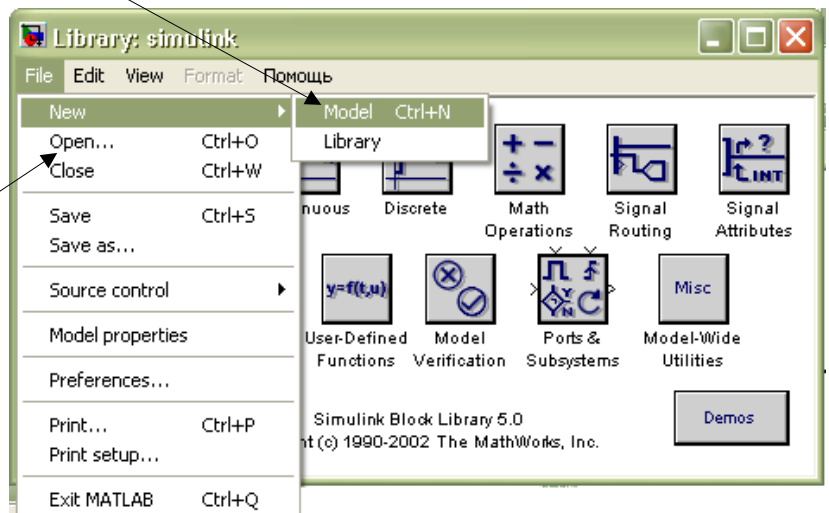
а)



Выберите модель

б)

Откройте существующую модель



Simulink содержит стандартную библиотеку блоков, изображенную на рис. 5.2. Она составлена из подблоков в соответствии с их функциональным назначением. Эти подблоки таковы:

- Источники сигналов (Sources);
- Средства регистрации (Sinks);
- Элементы дискретных систем (Discrete);
- Элементы непрерывных систем (Continuous);
- Математические операции (Math);
- Функции и таблицы (Functions & Tables);
- Нелинейности (Nonlinear);
- Сигналы и системы (Signals & Systems).

Чтобы создать модель, вы должны взять и перенести нужные блоки из библиотеки на рабочий стол. В простом примере, который приводится ниже, вам надо скопировать блок, генерирующий синусоидальный сигнал (блок *Sine Wave* из библиотеки *Sources*), и блок индикации (блок *Scope* из библиотеки *Sinks*).

Вы можете получить доступ к блоку *Sine Wave* либо из браузера главной библиотеки, либо из окна библиотеки *Sources*. Развернув браузер главной библиотеки, как показано на рис. 5.5, (а), вы получите доступ к блоку *Sine Wave*. Для этого сначала войдите в *Simulink*, щелкнув на его имени в браузере, затем щелкните в развернувшемся меню на *Sources*, после этого выберите блок *Sine Wave* и перетащите его в окно новой модели. Копия блока будет установлена в том месте окна новой модели, где вы оставите его изображение. Аналогичным образом, чтобы скопировать блок *Sine Wave* из окна библиотеки *Sources*, откройте это окно (показанное на рис. 5.5, б) двойным щелчком мыши на значке *Sources* в окне библиотеки *Simulink* (рис. 5.2).

Примечание: вы можете открыть окно библиотеки *Simulink* щелчком правой кнопки мыши на этом имени в браузере главной библиотеки, после чего надо щелкнуть на кнопке *Open Library*.

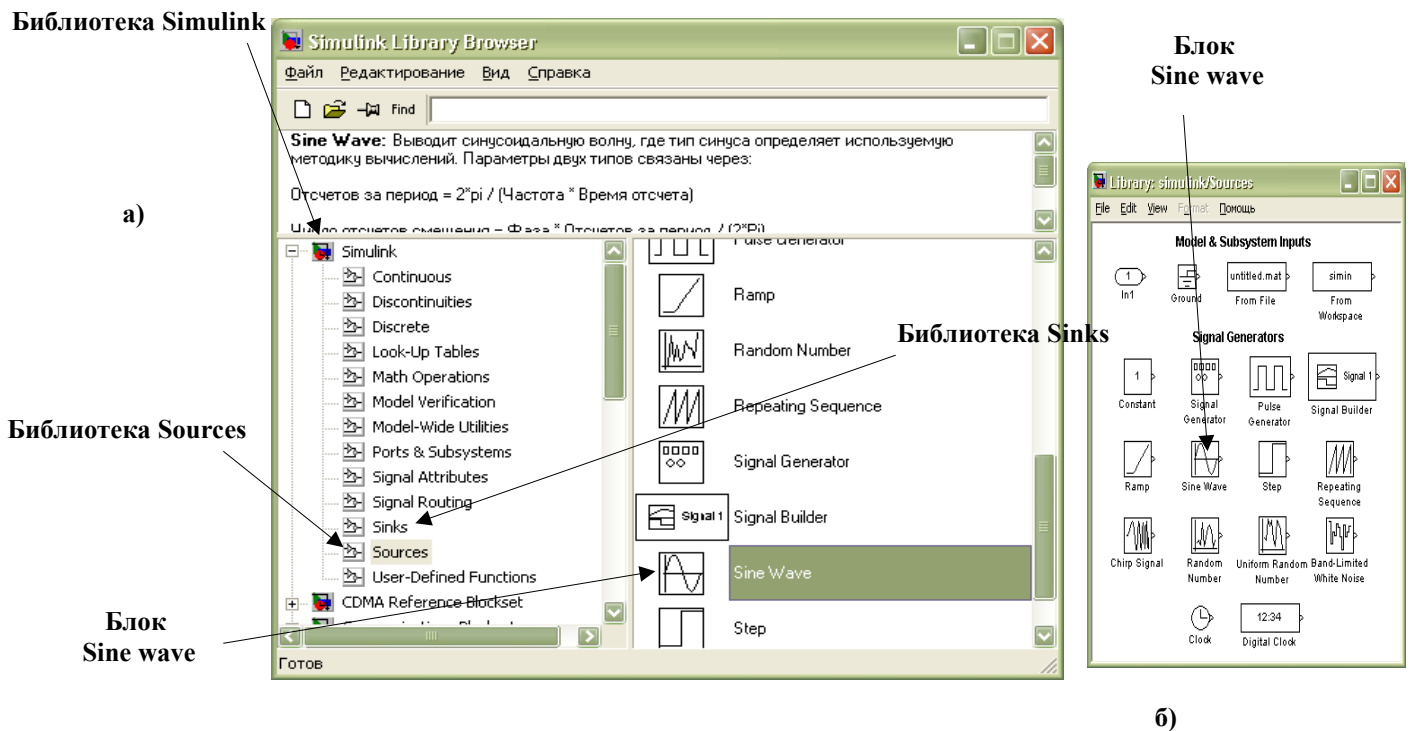


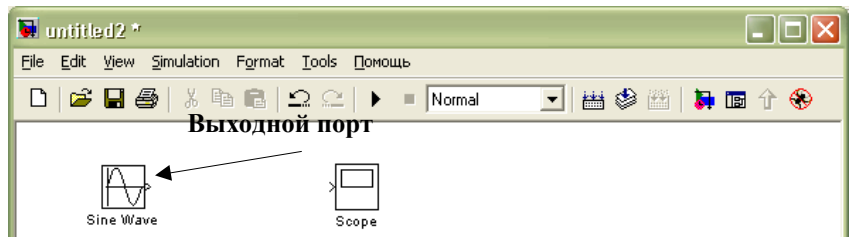
Рис. 5.5. Выбор источников сигнала: (а) в браузере главной библиотеки, (б) в окне блоков Sources

На этом этапе построения модели рабочее окно будет выглядеть так, как показано на рис. 5.6, (а).

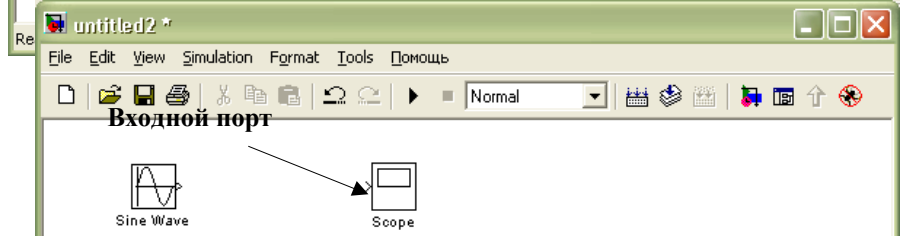
Теперь вам надо будет каким-то образом наблюдать синусоидальный сигнал, генерируемый блоком Sine Wave. Окно библиотеки Sinks содержит набор средств регистрации сигнала, включая Scope, XY Graph, Display, To Workspace и To File, как показано на рис. 5.7. Если вы воспользуетесь инструментами To Workspace или To File, то по окончании сеанса работы данные будут сохранены соответственно в рабочей области или в файле. В нашем примере мы используем для наблюдения сигнала инструмент Scope (индикатор).

Рис. 5.6
**Простая система,
 состоящая из
 источника
 сигнала Sine Wave
 и индикатора**

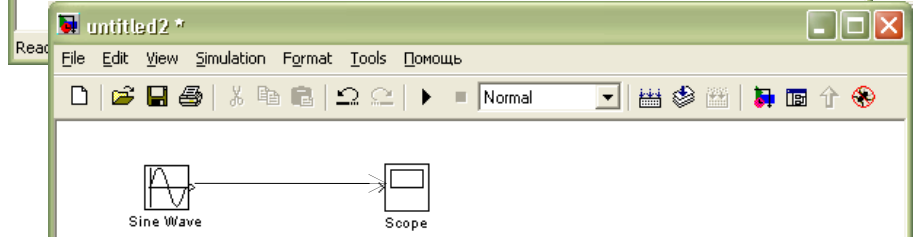
а)



б)



в)



г)

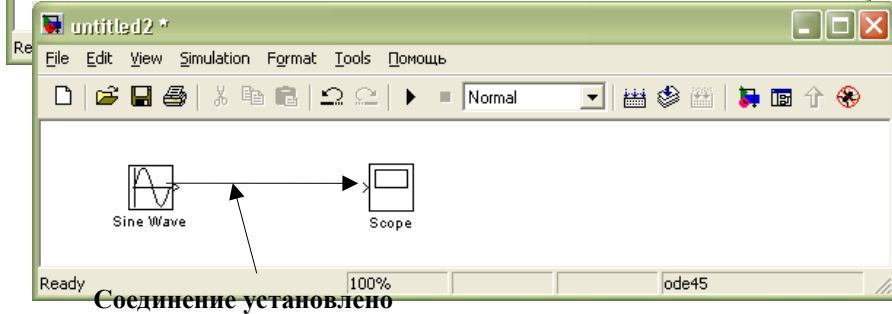
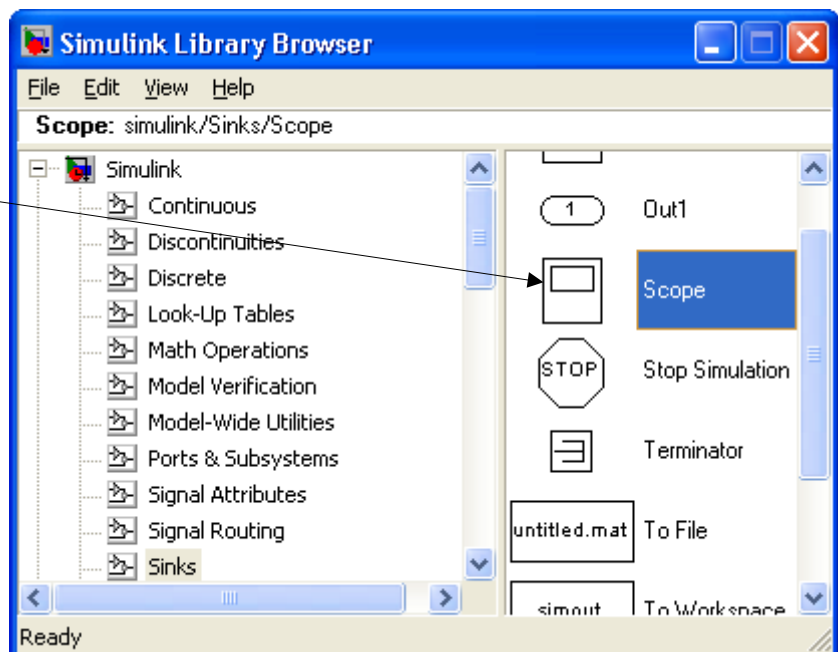


Рис. 5.7
Окно блоков Sinks

Блок Scope



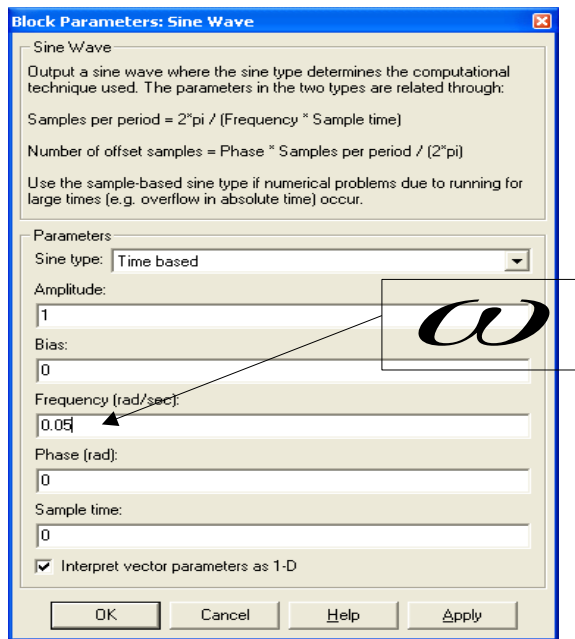
Блок Score вы можете скопировать либо из браузера главной, либо из окна библиотеки Sinks. Как и в случае с библиотекой Sources, развернув браузер главной библиотеки, вы получите доступ к блоку Score. Для этого войдите в Simulink, щелкнув на его имени в браузере, затем щелкните в развернувшемся меню на Sinks, после этого выберите из библиотеки Sinks блок Score и перетащите его в окно новой модели. Другой способ доступа к блоку Score состоит в том, что для этого надо сделать двойной щелчок мышью на значке Sinks в окне библиотеки Simulink (рис. 5.2). После этой операции рабочее окно будет выглядеть так, как показано на рис. 5.6, (б).

Обратите внимание, что на рис. 5.6 окно с моделью переименовано, оно теперь имеет имя test (раньше модель имела имя untitled, как показано на рис. 5.4). Обязательно сохраните модель, чтобы вы могли открыть ее для исследования в следующих сеансах работы в Simulink.

Теперь задача состоит в том, чтобы соединить между собой блоки Sine Wave и Score. Угловая скобка (>), появляющаяся у правого края блока Sine Wave — это выходной порт. Аналогично, угловая скобка (<), появляющаяся у левого края блока Score — это входной порт. Всегда, когда такая скобка направлена к блоку, это соответствует входному порту, а если от блока — то выходному порту. Если блоки соединены, то входной и выходной порты исчезают.

Чтобы соединить выходной порт блока Sine Wave с входным портом блока Score, поместите курсор на выходной порт в правой части блока Sine Wave, при этом обратите внимание, что курсор принял форму крестика. Удерживая нажатой кнопку мыши, перемещайте курсор к входному порту блока Score. Соединительная линия при этом будет штриховой, а когда вы доведете ее до входного порта блока Score, курсор превратится в жирный крестик, как показано на рис. 5.6, (в). После этого отпустите кнопку мыши, и соединение между двумя портами будет установлено. Когда это произойдет, угловые скобки исчезнут и на соединительной линии появится стрелка, указывающая направление передачи информации. Это отражено на рис. 5.6, (г). Теперь почти все готово, чтобы начать моделирование.

Вы можете наблюдать и редактировать параметры моделирования, выбрав из меню Simulation опцию Parameters. При этом экран будет иметь вид, изображенный на рис. 5.8. Установите время окончания моделирования (по умолчанию оно равно 10 с), равное 1000.0, как показано на рис. 5.8. Выполнив эту операцию, закройте окно диалога нажатием кнопки ОК.



Параметры синусоидального сигнала (например, частоту) вы можете задать (а при необходимости и изменить), сделав двойной щелчок мышью на блоке Sine Wave в окне модели. Диалоговое окно примет вид, изображенный на рис. 5.9. На этом рисунке показано, что частота синусоиды установлена равной 0.05 рад/с.

Чтобы начать моделирование, щелкните на Start

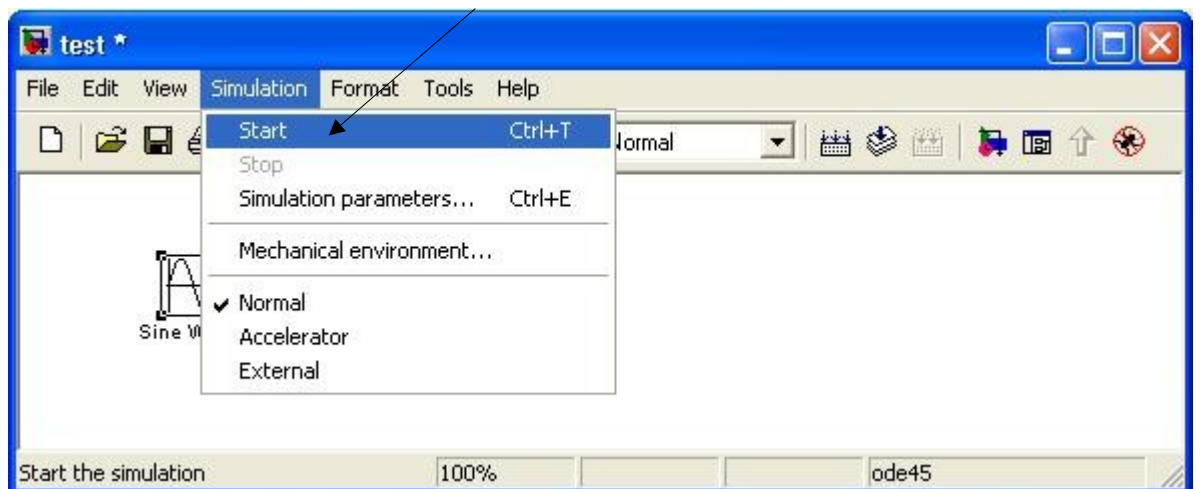


Рис. 5.10. Начало моделирования выбором опции Start из меню Simulation

Перед началом моделирования откройте индикатор двойным щелчком мыши на блоке Scope в окне модели. Далее выберите опцию Start из меню Simulation, как показано на рис. 5.10. Начнется процесс моделирования, и на экране появится изображение, приведенное на рис. 5.11. График динамически изменяется по мере того, как блок Sine Wave генерирует синусоидальный сигнал. По окончании времени моделирования изображение на экране будет выглядеть так, как показано на рис. 5.11.

Теперь вы закончили создание простой модели и провели первый эксперимент. Перед тем, как выйти из Simulink, не забудьте выбрать из меню File опцию Save, чтобы сохранить всю информацию о модели для последующей работы.



Закончить сеанс работы в Simulink вы можете, выбрав из меню File опцию Close. После этого у вас есть возможность продолжить работу в MATLAB, вернувшись в командную строку. Если вам нужно закончить работу только в Simulink, но не в MATLAB, просто закройте все окна Simulink. Если же нужно выйти и из Simulink и из MATLAB, то выберите команду Exit MATLAB. Для анализа и синтеза систем управления Simulink предоставляет пользователю набор блоков с передаточными функциями и моделями в переменных состояниях. Например, популярный ПИД-регулятор можно найти в библиотеке Simulink Extras.

Библиотеки Simulink

Continuous-Блоки непрерывных моделей

- Derivative - Блок вычисления производной
- Integrator - Интегратор
- State-space - Модель в пространстве состояний

- Transfer Fcn - Передаточная функция
- Transport Delay – Блок фиксированной задержки сигнала
- Variable Transport Delay – Блок управляемой задержки сигнала
- Zero/Pole – Передаточная функция «Нули-полюса»

Discontinuities – Нелинейные блоки

- Backlash – Люфт
- Coulomb & Viscous Friction – Блок сухого и вязкого трения
- Dead Zone - Зона нечувствительности
- Hit Crossing - Блок определения момента пересечения порогового значения
- Quantizer - Квантователь
- Rate Limiter – Блок ограничения скорости изменения сигнала
- Relay – Реле
- Saturation – Ограничитель

Discrete – Блоки дискретных модулей

- Discrete Transfer Fcn – Дискретная передаточная функция
- Discrete Zero-Pole – Дискретная передаточная функция «Нули-полюса»
- Discrete Filter – Дискретный фильтр
- Discrete State-Space – Дискретная модель в пространстве состояний
- Discrete-Time Integrator – Дискретный интегратор
- First-Order Hold – Экстраполятор первого порядка
- Memory – Блок задержки на один такт
- Unit Delay – Единичная дискретная задержка
- Zero-Order Hold – Экстраполятор нулевого порядка

Look-Up Tables – Блоки задания таблиц

- Direct Look-Up Table (n-D) – Многомерная таблица с прямым доступом к элементам
- Interpolation (n-D) using PreLook-Up – Блок интерполяции табличных данных
- Look-Up Table – Одномерная таблица
- Look-Up Table (2-D) – Двумерная таблица
- Look-Up Table (n-D) – Многомерная таблица
- PreLook-Up Index Search – Блок обработки индексов

Math Operations – Блоки математических операций

- ABS – Блок вычисления модуля
- Algebraic Constraint – Блок решения нелинейных уравнений
- Assignment – Блок присваивания элементам массива новых значений
- Bitwise Logical Operator – Блок побитовых логических операций
- Combinatorial Logic – Блок комбинаторной логики
- Complex to Magnitude-Angle – Блок вычисления модуля и (или) аргумента комплексного числа
- Complex to Real-Imag – Блок вычисления действительной и (или) мнимой части комплексного числа
- Dot Product – Блок скалярного произведения
- Gain – Усилитель
- Logical Operator – Блок выполнения логических операций
- Magnitude-Angle to Complex – Блок вычисления комплексного числа по его модулю и аргументу
- Math Function – Математические функции
- Matrix Concatenation – Блок объединения сигналов в матрицу
- Matrix Gain – Усилитель
- MinMax – Блок вычисления максимального или минимального значения
- Polynomial – Вычисление полинома
- Product – Блок умножения и деления

- Real-Imag to Complex – Блок вычисления комплексного числа по его действительной и мнимой части
 - Relational Operator – Блок выполнения операций отношения
 - Reshape – Преобразователь размерности сигнала
 - Rounding Function – Блок округления числа
 - Sign – Блок определения знака сигнала
 - Slider Gain – Ползунковый регулятор
 - Sum - Сумматор
 - Trigonometric Function – Тригонометрические и гиперболические функции
- Model Verification – Блоки верификации сигналов
- Assertion – Блок проверки утверждений
 - Check Discrete Gradient – Блок контроля градиента дискретного сигнала
 - Check Dynamic Gap – Блок контроля нахождения сигнала вне изменяющейся зоны
 - Check Dynamic Range – Блок контроля нахождения сигнала внутри изменяющейся зоны
 - Check Static Gap – Блок контроля нахождения сигнала вне зоны
 - Check Static Range – Блок контроля нахождения сигнала внутри зоны
 - Check Dynamic Lower Bound – Блок контроля изменяющегося минимального уровня
 - Check Dynamic Upper Bound – Блок контроля изменяющегося максимального уровня
 - Check Input Resolution – Блок контроля разрешающей способности
 - Check Static Lower Bound – Блок контроля минимального уровня сигнала
 - Check Static Upper Bound – Блок контроля максимального уровня сигнала
- Model-Wide Utilities – Библиотека дополнительных утилит
- DocBlock – Блок документации
 - Model Info – Блок информации о модели
 - Timed-Based Linearization – Блок линеаризации
 - Trigger-Based Linearization – Блок линеаризации, управляемой извне
- Ports & Subsystems – Порты и подсистемы
- Configurable Subsystem – Конфигурируемая подсистема
 - Atomic Subsystem – Создание подсистем
 - Enable – Блок управления Enable
 - Enabled Subsystem – E-подсистема
 - Enabled and Triggered Subsystem – ET-подсистема
 - For Iterator Subsystem – Подсистема, управляемая циклом For
 - Function-Call Generator – Внешний блок управления FC-подсистемой
 - Function-Call Subsystem - FC-подсистема
 - If - Блок условного оператора
 - Action Subsystem – Подсистемы, управляемые блоками If Swith и Case
 - Configurable Subsystem – переконфигурируемая подсистема
 - Subsystem – Создание подсистем
 - Switch Case – Блок переключателя
 - Trigger – Блок управления Trigger
 - Triggered Subsystem –T-подсистема
 - While Iterator Subsystem – Подсистема, управляющая циклом While
- Signal Attributes – Блоки определения свойств
- Data Type Conversion – Преобразователь типа сигнала
 - IC – Блок установки начального значения
 - Probe – Вывод параметров
 - Rate Transition – Блок согласования дискретных сигналов
 - Signal Specification – Блок спецификации сигнала
 - Width – Блок определения размера сигнала

Signal Routing – Блоки маршрутизации сигналов

- Bus Creator – Шинный формирователь
- Bus Selector – Шинный селектор
- Data Store Memory – Блок создания общей области памяти
- Data Store Read – Блок считывания из именованной области памяти
- Data Store Write – Блок записи в именованную область памяти
- Demux – Демультимплексор
- From – Блок приема сигнала
- Goto – Блок передачи сигнала
- Goto Tag Visibility – Блок признака видимости сигнала
- Manual Switch – Ручной переключатель
- Merge – Формирователь векторного сигнала
- Multiport Switch – Многовходовый переключатель
- Mux – Мультиплексор
- Selector – Селектор
- Switch – Переключатель

Sinks – Приемники сигналов

- Display – Цифровой дисплей
- Floating Scope – Изменяющийся осциллограф
- Outport – Выходной порт
- Scope – Осциллограф
- Stop Simulation – Блок остановки моделирования
- Terminator – Концевой приемник
- To File – Блок записи в файл
- To Workspace – Блок записи в рабочую область MATLAB
- XY Graph – Графопостроитель

Sources-Источники сигналов

- Band-Limited White Noise – Генератор белого шума
- Chirp Signal – Генератор сигнала линейно изменяющейся частоты
- Clock – Источник времени
- Constant – Постоянная величина
- Digital Clock – Дискретный источник времени
- From Workspace - Блок считывания данных из рабочей области MATLAB
- From File – Блок считывания данных из файла
- Ground – Формирователь сигнала нулевого уровня
- Inport – Входной порт
- Pulse Generator – Источник импульсного сигнала
- Ramp – Источник линейно изменяющегося сигнала
- Random Number – Источник случайного сигнала с нормальным распределением
- Repeating Sequence – Источник периодического сигнала
- Signal Generator - Генератор сигналов
- Signal Builder – Конструктор сигналов
- Sine Wave – Источник синусоидального сигнала
- Step – Генератор ступенчатого сигнала
- Uniform Random Number – Источник случайного сигнала с равномерным распределением

User-Defined Functions - Определяемые пользователем функции

- Fcn – Блок задания функции
- MATLAB Fcn - Блок задания M-функции
- S-Function – Блок задания S-функции
- S-Function Builder – Конструктор S-функции

Режимы работы в MATLAB

Система предусматривает 3 режима вычислений:

- Режим прямых вычислений (приглашение к работе символом «>>>»);
- Режим работы с m-файлами;
- Режим работы в Simulink.

Описание режимов работы

Режим прямых вычислений:

1. Запускаем программу Matlab.
2. В появившемся окне под названием “Окно команд” вы можете набрать текст скрипта, после каждой строки нажимая клавишу “Enter”.
3. Каждая введенная строка будет дублироваться в окне “Команды”.
4. По завершению ввода Вы получите результат.

Режим работы с m-файлами:

1. Запускаем программу Matlab.
2. В выпадающем меню нажимаем кнопки Файл → Новый → М-Файл.
3. В открывшемся редакторе Вы можете набрать текст скрипта и проверить его работоспособность во вкладке выпадающего меню Отладка → Запуск, либо нажатием клавиши F5.
4. С помощью вкладки Файл вы можете сохранить свой скрипт или открыть уже готовый из файла.

Пример скрипта

```
% Вычисление переходной характеристики привода элерона самолета
% Вычисление от 0 до 1 с шагом 0.01,
% задается начальное значение времени, интервал расчета и конечное значение времени
t=[0:0.01:1];
%
% Формирование полиномов числителя и знаменателя передаточной функции
num=[1]; den=[0.1 1];
%
% Формирование передаточной функции
sys=tf(num,den);
%
% Находим переходную характеристику во времени
[y,t]=step(sys,t);
%
% Построение графика
plot(t,y)
%
% Обозначение осей абсцисс и ординат
xlabel('t'), ylabel('y(t)')
%
```

% Помещаем над графиком заголовков, grid управляет выводом сетки
title('h(t)'), grid

Режим работы в Simulink:

1. Запускаем программу Matlab.
2. Открыть окно библиотек Simulink можно несколькими способами:
 - нажать кнопку Simulink на панели инструментов;
 - последовательностью нажатий кнопок Старт → Simulink → Инструмент Simulink → Обозреватель библиотеки.
3. В появившемся окне нажимаем Файл → Новая модель или комбинацию клавиш Ctrl+N.
4. В редактор переносим из необходимых библиотек элементы и строим нужную модель.
5. Нажимаем в ниспадающем меню Simulation → Start или комбинацию клавиш Ctrl+T.

Все операции вы можете произвести с вышеприведенным примером скрипта.

Пример работы в Simulink

1. Запустите MatLAB.
2. Запустите Simulink из панели инструментов MatLab.
3. В появившемся окне Simulink Library Browser: File→New→ Model появится окно новой панели untitled.
4. Перейдите к окну Simulink Library Browser (активизируйте S.L.B.).
5. Из компонентов Simulink, отображаемых в левом поле, выберите библиотеку ``Sources``.
6. Из компонентов Sources, отображаемых в правом поле, перетащите (удержанием левой клавиши мыши) объект ``Step`` в окно новой модели.
7. Повторите операцию для объекта ``Scope``, находящегося в библиотеке ``Sinks``.
8. Далее рассмотрим моделирование системы, структурная схема которой приведена на рис. 5.13.

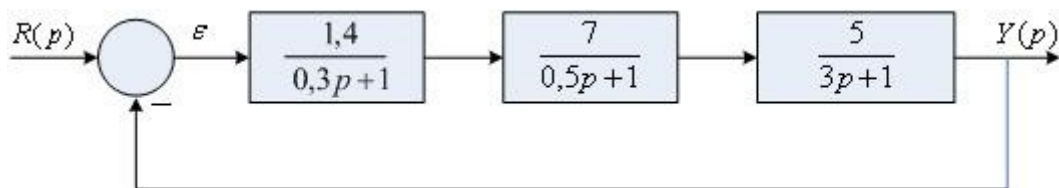


Рис. 5.12. Структурная схема исследуемой системы

- а) сделаем 3 раза операцию вставки объекта Transfer Fcn (динамического звена) из библиотеки Continuous;
- б) вставим объекты Sum из библиотеки Math, Scope из библиотеки Sinks и Step из библиотеки Sources;
- в) переходим в окно модели и расположим объекты в следующем порядке:
 - 1) источник ступенчатого сигнала Step;
 - 2) суммирующий узел Sum;
 - 3) последовательно 3 динамических звена;
 - 4) объект для графического представления выходного сигнала Scope;

г) проведём связи, задав нужный знак в суммирующем узле путём двойного нажатия левой кнопки мыши на объект узла;

д) установим коэффициенты звеньев следующим образом: сместив курсор на звено, дважды нажмите левую клавишу мыши и занесите коэффициенты полиномов через пробел числителя и знаменателя передаточной функции; в модуле Step установите величину Время шага равным 0.

9. Симуляция начинается после нажатия кнопки Start Simulation на панели инструментов.

10. Результат моделирования можно посмотреть, дважды нажав левую клавишу мыши на объекте Score. Для наглядности следует на окне Score нажать правую клавишу мыши и выбрать режим Auto Scale.

Для данного примера результат моделирования приведен на рис. 5.14.

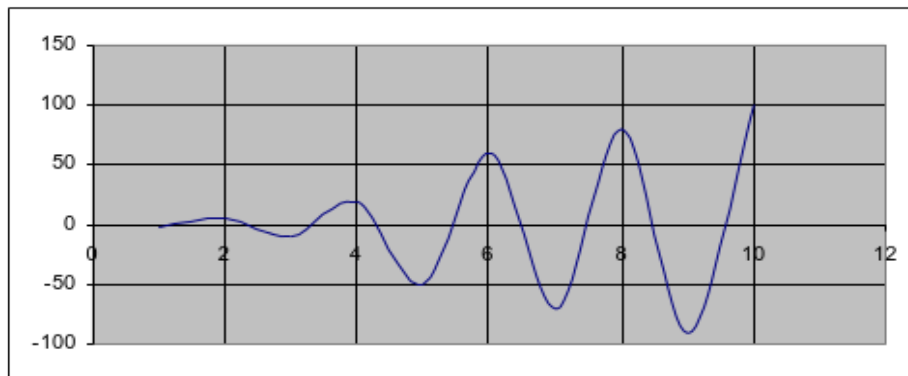


Рис.5.13. Переходная характеристика системы

Работа с графиком:

для изменения интервала видимости необходимо:

- 1) активизировать рабочее окно untitled;
- 2) выбрать Simulation → Simulation Parameters;
- 3) в окне Simulation Parameters выберите закладку Solver;
- 4) в окнах Start time и Stop time укажите время начала и конца симуляции, эти параметры будут являться границами интервала видимости в графическом окне Score.

Библиографический список

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления.-СПб, Изд-во “Профессия”, 2003.
2. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления.-М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002.
3. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5 в математике и моделировании.- М.: СОЛОН-Пресс, 2003.
4. Медведев В.С., Потёмкин В.Г. Control System Toolbox/ MATLAB 5 для студентов.- М.: Изд-во Диалог-МИФИ, 1999.
5. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления. Под ред. В.А. Бесекерского.-М.: Наука, 1978.
6. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью.- М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.
7. Черных И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений. Под общ. ред. В.Г.Потёмкина. – М: ДИАЛОГ – МИФИ, 2003.