

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Лобода Ю.О.

ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания к практическим, лабораторным работам и организации
самостоятельной работы для студентов технических специальностей

Томск
2021

УДК 006.89

ББК 78.373.3

Л 69

Рецензент:

Антипин М.Е., доцент кафедры управления инновациями ТУСУР, кан. физ. мат. наук

Лобода, Юлия Олеговна

Основы автоматического управления: методические указания к практическим, лабораторным работам и организации самостоятельной работы / Ю.О.Лобода – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – 37 с.

Настоящие методические указания для студентов составлены с учетом требований федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО). Методические указания содержат рекомендации к проведению практических занятий, лабораторных работ и самостоятельной работе и предназначены для студентов технических специальностей.

Одобрено на заседании каф. управления инновациями,
протокол № 6 от 24.12.2021

УДК 006.89

ББК 78.373.3

© Лобода Ю.О., 2021

© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2021

Оглавление

Введение.....	4
1 Методические указания к проведению лабораторных работ	5
1.1 Лабораторная работа Исследование характеристик элементарных звеньев.....	5
1.2 Лабораторная работа Исследование переходных процессов	19
1.3. Лабораторная работа Синтез ПИД-регулятора.....	26
2. Методические указания к проведению практических работ	33
3 Методические указания для организации самостоятельной работы	34
Основная и дополнительная литература	37

Введение

Методические указания к практическим, лабораторным работам и организации самостоятельной работы посвящены реализации учебно-методической поддержке дисциплин «Основы автоматического управления», «Системы автоматического управления» и «Основы управления техническими системами». Данное пособие содержит задания для выполнения практических, лабораторных и самостоятельных работ позволяющие сформировать практические и теоретические навыки по построению и работе с системами автоматического управления.

1 Методические указания к проведению лабораторных работ

1.1 Лабораторная работа Исследование характеристик элементарных звеньев

Любая система автоматического управления (САУ) состоит из взаимосвязанных элементов, которые могут иметь различные принципы действия, физическую природу и конструктивное исполнение. Для осуществления анализа и синтеза САУ все эти элементы представляются типовыми звеньями, имеющими определенное математическое описание зависимости выходной величины $y(t)$ от входного воздействия $x(t)$. Типовыми динамическими звеньями называются звенья, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями не выше второго порядка.

Из типовых динамических звеньев составляются алгоритмические структурные схемы систем управления. Знание характеристик типовых звеньев необходимо для анализа и синтеза систем управления.

Классификацию типовых звеньев можно получить из рассмотрения частных случаев дифференциального уравнения второго порядка

Цель работы - изучение математических моделей и характеристик основных типовых динамических звеньев систем автоматического управления (САУ).

1. Краткие теоретические сведения

Элементы, используемые в системах автоматического управления, могут иметь самые различные принципы действия, физическую природу и конструктивное исполнение. Для упрощения анализа и синтеза САУ все эти элементы объединяются в типовые звенья по единству их математического описания. Каждому типовому звену соответствует определенного типа математическое соотношение между входной и выходной величиной. Если это соотношение является простейшим, то звено называется элементарным.

Звенья с математическим описанием обыкновенными дифференциальными уравнениями первого и второго порядка называются типовыми динамическими звеньями.

Из типовых динамических звеньев составляются алгоритмические структурные схемы систем управления. Знание характеристик типовых звеньев значительно облегчает изучение свойств таких систем.

Классификацию типовых звеньев удобно осуществить, рассматривая различные частные случаи общего дифференциального уравнения

(1.1)

Коэффициенты уравнения (1) для каждого звена определенного типа приведены в табл. 1.

Звенья, у которых коэффициенты $a_2 \neq 0$ и $b_1 \neq 0$, обладают статизмом (однозначной связью между входной и выходной переменными в статическом режиме) и поэтому называются еще статическими.

Звенья, у которых $a_2 \neq 0$, $a_1 \neq 0$ и $a_0 \neq 0$ инерционностью. К ним относятся звенья № 2, 3, 4, 6, 8, 11, 12.

У звеньев № 1, 5 и 7 только два коэффициента не равны нулю. Они являются простейшими или элементарными. Все остальные звенья могут быть образованы из элементарных звеньев.

Таблица 1

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	k	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	T	1	0	k	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	T_2^2	T_1	1	0	k	$T_1 > 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	T_2^2	T_1	1	0	k	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	k	
6	Реальное интегрирующее	T	1	0	0	k	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	k	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	T	1	k	0	
9	Изодромное (пропорционально-интегрирующее)	1	1	0	k_1	k	
10	Форсирующее (пропорционально-дифференцирующее)	0	0	1	k_1	k	
11	Интегро-дифференцирующее с преобладанием интегрирующих свойств	0	T	1	k_1	k	$k_1/k < T$
12	Интегро-дифференцирующее с преобладанием дифференцирующих свойств	0	T	1	k_1	k	$k_1/k > T$

Характеристики основных типовых динамических звеньев приведены на рис. 1 – 5.

На рисунках приведены характеристики:

- нули и полюсы передаточной функции;
- амплитудная и фазовая частотные характеристики;
- переходная характеристика;
- логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики;
- импульсная переходная функция;
- амплитудно-фазовая характеристика.

а

б

в

г

д

е

Рис. 1. Характеристики апериодического звена первого порядка

а

б

Рис. 2. Характеристики апериодического звена второго порядка

а

б

в

г

Рис. 3. Характеристики колебательного звена второго порядка

а

б

в

г

д

е

Рис. 4. Характеристики реального интегрирующего звена

а

б

в

г

Рис. 5. Характеристики реального дифференцирующего звена

2. Пояснения к работе

Работа выполняется в среде моделирующей системы CLASSIC-3. Для выполнения программы работы необходимо в окне редактирования установить единственное звено, назначив его входным и выходным одновременно (рис. 6).

Вход Выход

Рис. 6. Исследуемое звено

Таблица 1.2, вариант 1

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	10	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,1	1	0	10	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,1	1	0	10	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,1	0,1	1	0	10	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	10	
6	Реальное интегрирующее	0,1	1	0	0	10	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	10	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	0,1	1	10	0	

Таблица 1.2, вариант 2

№ п.п.	Наименование звена	a ₀	a ₁	a ₂	b ₀	b ₁	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	20	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,2	1	0	20	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,2	1	0	20	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,5	0,2	1	0	20	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	20	
6	Реальное интегрирующее	0,2	1	0	0	20	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	20	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	0,2	1	20	0	

Таблица 1.2, вариант 3

№ п.п.	Наименование звена	a ₀	a ₁	a ₂	b ₀	b ₁	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	30	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,3	1	0	30	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0,3	1	0	30	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,3	0,3	1	0	30	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	30	
6	Реальное интегрирующее	0,3	1	0	0	30	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	30	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	0,3	1	30	0	

Таблица 1.2, вариант 4

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	40	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,4	1	0	40	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$5,8 \cdot 10^{-3}$	0,4	1	0	40	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,4	0,4	1	0	40	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	40	
6	Реальное интегрирующее	0,4	1	0	0	40	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	40	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	0,4	1	40	0	

Таблица 1.2, вариант 5

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	50	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,5	1	0	50	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$6,7 \cdot 10^{-3}$	0,5	1	0	50	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,5	0,5	1	0	50	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	50	
6	Реальное интегрирующее	0,5	1	0	0	50	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	50	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	0,5	1	50	0	

Таблица 1.2, вариант 6

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	60	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,6	1	0	60	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	0,06	0,6	1	0	60	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,6	0,6	1	0	60	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	60	
6	Реальное интегрирующее	0,6	1	0	0	60	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	60	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	0,6	1	60	0	

Таблица 1.2, вариант 7

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	70	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,7	1	0	70	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	0,07	0,7	1	0	70	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,7	0,7	1	0	70	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	70	
6	Реальное интегрирующее	0,7	1	0	0	70	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	70	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	0,7	1	70	0	

Таблица 1.2, вариант 8

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	80	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,8	1	0	80	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	0,08	0,8	1	0	80	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,8	0,8	1	0	80	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	80	
6	Реальное интегрирующее	0,8	1	0	0	80	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	80	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	0,8	1	80	0	

Таблица 1.2, вариант 9

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	90	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,9	1	0	90	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	0,09	0,9	1	0	90	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,9	0,9	1	0	90	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	90	
6	Реальное интегрирующее	0,9	1	0	0	90	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	90	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	0,9	1	90	0	

Таблица 1.2, вариант 10

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	100	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	1	1	0	100	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	0,1	1	1	0	100	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	1	1	1	0	100	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	100	
6	Реальное интегрирующее	1	1	0	0	100	
7	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	100	0	
8	Реальное дифференцирующее	0	1	1	100	0	

Передаточную функцию звена необходимо каждый раз редактировать в соответствии с типом исследуемого звена. Исследованию подлежат звенья 1 – 8 согласно табл. 1.

Передаточная функция звена конкретного типа определяется по выражению (1) и табл. 1. Параметры звеньев приведены в табл. 2., согласно варианту.

Чтобы результаты исследований не терялись из-за возможных зависаний программы, рекомендуется отредактированные модели звеньев сохранять отдельными файлами со своими именами.

Моделирующая система при построении частотных характеристик чаще всего устанавливает начальное значение частоты $\omega = 1$, из-за чего начальные участки логарифмических частотных характеристик и амплитудно-фазовой характеристики не изображаются. Для устранения этого недостатка необходимо в режиме просмотра логарифмических характеристик установить начальное значение частоты $\omega = 0,001$. Это же начальное значение частоты необходимо установить и в режиме просмотра амплитудно-фазовой характеристики.

3. Программа работы

1. Для каждого типового звена 1 – 8 (табл. 1) в соответствии с его параметрами (табл. 2) и вариантом вывести выражения передаточных функций.
2. Для каждого звена по его передаточной функции записать операторное уравнение.
3. Последовательно отредактировать модель каждого звена и провести анализ характеристик во временной и частотной областях. Отметить отличительные особенности каждого звена.
4. Для инерционных звеньев по логарифмическим частотным характеристикам определить частоты сопряжения и среза.

5. Определить значения полюсов и нулей передаточных функций, и оценить их влияние на характер переходного процесса.

6. Оценить влияние параметра k на переходный процесс, увеличив значение параметра в два раза.

4. Содержание отчета

В отчете представить результаты выполнения программы работы, анализ результатов и выводы.

5. Вопросы

1. Что такое передаточная функция элемента?
2. С какой целью и каким образом выделяют типовые динамические звенья САУ?
3. Какие звенья называются апериодическими?
4. Как проходят через инерционное звено первого порядка гармонические сигналы низкой и высокой частоты?
5. Какими примерами можно охарактеризовать безынерционное звено?
6. Какими примерами можно охарактеризовать реальное интегрирующее звено?
7. Какими примерами можно охарактеризовать дифференцирующее звено?

1.2 Лабораторная работа Исследование переходных процессов

1. Цель работы

Экспериментальное построение амплитудной частотной и фазовой частотной характеристик стационарной системы, выяснение физического смысла частотных характеристик.

2. Краткие теоретические сведения

Частотные характеристики представляют собой зависимость амплитуды и фазы выходного сигнала звена или системы в установившемся режиме при гармоническом входном сигнале неизменной амплитуды и изменяемой частоты.

Частотные характеристики имеют важное значение для исследования систем автоматического управления, так как они характеризуют передаточные свойства звеньев и систем

Рассмотрим подробнее разновидности частотных характеристик. Если на вход линейной системы (рис. 7) в момент времени $t=0$ приложено гармоническое воздействие определенной частоты ω

(2.1)

то после окончания переходного процесса в системе установится режим установившихся вынужденных колебаний, а выходная величина $y(t)$ будет изменяться по гармоническому закону с той же частотой ω , но с другой амплитудой u_m и со сдвигом Δt во времени (рис. 1,б):

(2.2)

где $\varphi = (\Delta t / T) \cdot 360$ – фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами в градусах.

Изменяя частоту ω от 0 до ∞ при постоянном значении x_m , можно установить, что амплитуда и фазовый сдвиг выходного сигнала элемента зависят от частоты входного сигнала. Зависимости амплитуды u_m и сдвига φ от значений частоты ω характеризуют динамические свойства элементов. Так как амплитуда выходного сигнала определяется также значением амплитуды входного сигнала, то возникает необходимость рассматривать отношение амплитуд u_m / x_m .

Зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигнала от частоты называют амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) и обозначают $A(\omega)$ (рис. 8,а).

Зависимость фазового сдвига между входным и выходным сигналами от частоты называют фазовой частотной характеристикой (ФЧХ) $\varphi(\omega)$ (рис. 8,а). АЧХ характеризует пропускание элементом сигналов различной частоты. Пропускание оценивается по отношению амплитуд u_m/x_m .

При объединении амплитудной и фазовой частотных характеристик в одну получают амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ или АФХ). Амплитудно-фазовая частотная характеристика $W(j\omega)$ является функцией комплексного переменного $j\omega$. Модуль АФХ равен $A(\omega)$, а аргумент равен $\varphi(\omega)$. Каждому значению частоты ω_i соответствует комплексное число $W(j\omega_i)$, представленное на комплексной плоскости изображающим вектором длиной $A(\omega_i)$ и расположенным к вещественной положительной оси под углом $\varphi(\omega_i)$ (рис. 8,б). Положительные значения $\varphi(\omega)$ принято отсчитывать против часовой стрелки от положительной вещественной оси.

При вариации частоты в пределах $0 < \omega < \infty$ вектор $W(j\omega)$ поворачивается относительно начала координат, изменяясь по величине. Траектория движения конца вектора (годограф) и есть АФХ. Каждая точка характеристики соответствует конкретному значению частоты.

а

б

Рис. 8. Частотные характеристики: а – амплитудная и фазовая; б – амплитудно-фазовая

Зависимости проекций вектора $W(j\omega)$ на действительную и мнимую оси от частоты называют соответственно действительной $P(\omega)$ и мнимой $Q(\omega)$ частотными характеристиками. Действительная частотная характеристика всегда является четной функцией частоты, а мнимая характеристика всегда является нечетной функцией.

Выражение для амплитудно-фазовой характеристики конкретного элемента можно получить из его передаточной функции подстановкой $s=j\omega$:

$$W(j\omega)=W(s), s=j\omega . \quad (2.3)$$

АФХ $W(j\omega)$ может быть представлена в показательной форме

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} , \quad (2.4)$$

алгебраической

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (2.5)$$

или тригонометрической

$$(2.6)$$

3. Пояснения к работе

На рис. 9 представлена функциональная схема исследуемой системы управления скоростью электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения. Двигатель СЛ-367, управляемый преобразователем напряжения УП с пренебрежимо малым выходным сопротивлением, вращает нагрузку.

Функциональной схеме соответствует структурная схема САУ, приведенная к одноконтурной схеме с единичной отрицательной обратной связью (рис. 10). Коэффициент передачи датчика скорости ДС вошел в передаточную функцию регулятора скорости. Будем считать, что на двигатель воздействуют только динамические моменты вращающихся узлов приборного устройства, в составе которого он работает.

A B C

M_n

I_a
 U_a
 ω

$U_{зад}$

Рис. 9. Функциональная схема системы регулирования скорости

вращения двигателя независимого возбуждения: Д – двигатель; УП – управляемый преобразователь напряжения; БУ – блок управления преобразователем; ДС – датчик скорости вращения; ЭС – элемент сравнения

На структурной схеме обозначены: $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора скорости, состоящего из ДС, ЭС, БУ и УП; $W_d(s)$ – передаточная функция двигателя по управлению. В общем виде передаточные функции

(2.7)

(2.8)

где K_p , K_d – коэффициенты передачи регулятора и двигателя соответственно;
 T_0 , T_1 , $T_э$, T_m – постоянные времени.

Расчетные формулы для определения параметров двигателя по паспортным данным (если за выходную величину принять угловую частоту вращения ω) следующие:

где индекс «ном» соответствует номинальным значениям величин, указанным в паспорте; $\gamma = 1,1-1,2$ – коэффициент, учитывающий моменты инерции редуктора и соединительных валов; $J^*_{н}$ – момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя; J_d – момент инерции двигателя; $(L_a + L_i)$ – полная индуктивность цепи якоря; $(R_a + R_i)$ – полное сопротивление цепи якоря.

Рис. 10. Структурная схема САУ

При приведенном к валу двигателя моменте инерции $J^*_{н} = 0,07 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и паспортных данных: $R_{ном} = 32 \text{ Вт}$, $U_{ном} = 110 \text{ В}$, $I_{я ном} = 0,9 \text{ А}$, $J_{д} = 0,069 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $R_{я} = 1,5 \text{ Ом}$, $L_{я} = 0,03 \text{ Гн}$, $n_{ном} = 2500 \text{ об/мин}$ по приведенным выше формулам определим

$$c \cong 0,416; K_{д} \cong 2,4 \text{ рад}/(\text{В} \cdot \text{с}); T_{м} \cong 0,12 \cdot 10^{-2} \text{ с}; T_{э} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}.$$

Так как постоянная времени $T_{м} < T_{э}$, то двигатель эквивалентен колебательному звену с параметрами

(2.9)

4. Программа работы

Применительно к структурной схеме САУ (рис.10) при заданной передаточной функции двигателя $W_{д}(s)$ согласно (9) проделать следующую работу.

1. Построить на основе экспериментальных данных в совмещенных по оси ω системах координат амплитудную частотную $A(\omega)$ и фазовую частотную $\varphi(\omega)$ характеристики замкнутой стационарной САУ.

Вариант с параметрами передаточной функции регулятора задается преподавателем.

2. По экспериментальным характеристикам определить:

- показатель колебательности $M = A(\omega_r)/A(0)$;
- резонансную частоту ω_r ;
- частоту незатухающих колебаний ω_0 ;
- частоту пропускания $\omega_{п}$.

3. Построить экспериментальные частотные характеристики $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ для разомкнутой системы.

4. По частотным характеристикам разомкнутой системы определить запасы устойчивости по модулю ΔA и по фазе $\Delta \varphi$.

5. Из совместного рассмотрения частотных характеристик разомкнутой системы определить частоту среза $\omega_{ср}$.

6. Сравнить все экспериментально построенные частотные характеристики с соответствующими характеристиками, определенными при помощи программы CLASSIC-3.

Варианты значений коэффициента K_p передаточной функции регулятора $W_p(s)$ при $T_1 = 0,002 \text{ с}$ приведены в табл. 1.

Таблица 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
K_p	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8

Порядок выполнения работы

1. Работа выполняется в среде моделирующей системы CLASSIC-3.

2. Для получения входного гармонического сигнала изменяемой частоты в программе CLASSIC-3 необходимо в окне переходного процесса установить входной сигнал синусоидальным.

Измерить временной сдвиг Δt входного и выходного сигналов. Временной сдвиг измерять после окончания переходного процесса. При малых значениях установленной частоты фазовый сдвиг незначителен и будет малозаметен. По мере увеличения частоты фазовый сдвиг будет увеличиваться.

Измерить в установившемся режиме амплитуду $A(\omega)$ выходного сигнала.

Фазу определить в градусах по выражению

$$\varphi = \frac{\Delta t \cdot 360}{T} \quad (2.10)$$

Данные экспериментов и расчетов при изменении частоты входного сигнала занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

ω							
$A(\omega)$							
Δt							
$\varphi(\omega)$							

3. Для каждого нового установленного значения частоты пункты 2,...,5 повторяются. Эксперимент и расчеты проводить до тех пор, пока текущее значение амплитуды не примет значение $A(\omega) \leq 0,1A(0)$.

4. По результатам данных таблицы построить частотные характеристики. При построении характеристики $\varphi(\omega)$ необходимо учитывать, что из-за отставания во времени выходного сигнала его фаза имеет отрицательное значение.

5. Разомкнуть САУ. Для разомкнутой САУ по приведенной выше методике построить характеристики $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$.

6. По частотным характеристикам определить запасы устойчивости по модулю $\Delta A = 1 - A_p(\omega)$ при $\varphi = \pi$ и по фазе $\Delta\varphi = \pi - |\varphi_p(\omega_{ср})|$, где частота среза $\omega_{ср}$ соответствует значению модуля $A_p(\omega) = 1$.

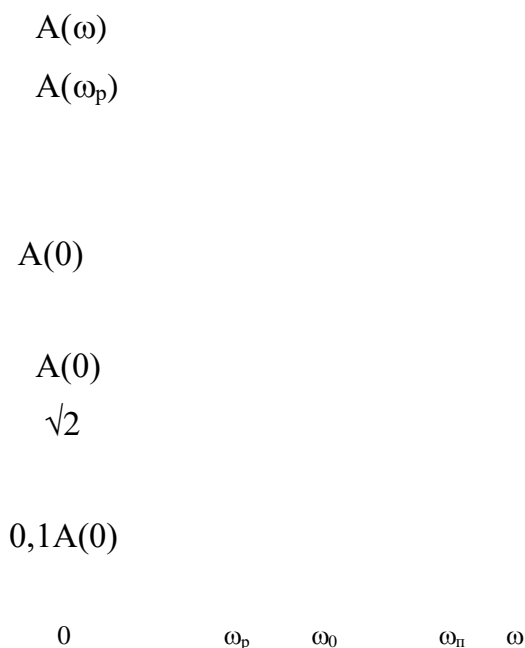


Рис. 11. Параметры амплитудной частотной характеристики

5. Содержание отчета

В отчете необходимо привести задание для выполнения лабораторной работы, структурную схему исследуемой системы, таблицы с экспериментальными и расчетными данными, частотные характеристики и результаты их обработки, сделать выводы и ответить на поставленные вопросы.

6. Вопросы

1. Каков физический смысл частотных характеристик?
2. Чем объяснить отставание по фазе выходного сигнала по отношению к входному сигналу при гармоническом характере входного сигнала?
3. Чем обусловлено увеличение фазового сдвига выходного сигнала статических систем по мере увеличения частоты входного сигнала?
4. К какому пределу стремится модуль амплитудной частотной характеристики при бесконечном увеличении частоты входной величины?

1.3. Лабораторная работа Синтез ПИД-регулятора

1. Цель работы

Изучение влияния настроечных параметров регулятора на динамические свойства САУ и методик настройки САУ на МО и СО.

2. Краткие теоретические сведения

САУ может быть приведена к простейшей одноконтурной алгоритмической схеме (рис. 12).

Рис. 12. Алгоритмическая схема типовой одноконтурной системы

На схеме $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора, $W_o(s)$ – передаточная функция объекта управления.

Простейший типовой алгоритм управления реализуется при помощи безынерционного звена с передаточной функцией

(3.1)

Этот закон регулирования называется пропорциональным (П).

Преимущество П-регулятора – простота и быстродействие, недостаток – ограниченная точность.

Закон регулирования, которому соответствует передаточная функция регулятора

(3.2)

называется интегральным (И). И-регулятор реагирует на длительные отклонения управляемой величины от заданного значения. Кратковременные отклонения сглаживаются таким регулятором.

Преимущества интегрального закона по сравнению с пропорциональным законом – лучшая точность в установившихся режимах, недостатки – худшие свойства в переходных режимах (меньшее быстродействие и большая колебательность).

Наибольшее распространение получил пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования

(3.3)

Наличие интегральной составляющей в ПИ-законе обеспечивает высокую точность в установившихся режимах, а при определенном соотношении коэффициентов k_p и k_i обеспечивает хорошие показатели и в переходных режимах.

Наилучшее быстродействие достигается при пропорционально-дифференциальном (ПД) законе регулирования

(3.4)

ПД-регулятор реагирует не только на величину сигнала ошибки, но и на скорость его изменения. Благодаря этому при управлении достигается эффект упреждения. Недостатком пропорционально-дифференциального закона регулирования является ограниченная точность.

Наиболее универсальным является пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон

(3.5)

который сочетает в себе преимущества более простых ранее рассмотренных законов.

В литературе принято ПИД-закон записывать в форме [2]

(3.6)

где

k_p – передаточный коэффициент регулятора; T_i – постоянная времени интегрирования; T_d – постоянная времени дифференцирования.

Связь между коэффициентами уравнений (5) и (6) очевидна из почленного сравнения этих уравнений.

Если допустить, что САУ имеет ПИД-регулятор, то алгоритмическая схема типовой одноконтурной системы представляется в виде, показанном на рис. 2.

В зависимости от типа и порядка объектов, а также соотношений между их постоянными времени настройка контура регулирования осуществляется либо по критерию модульного оптимума (МО), либо по критерию симметричного оптимума (СО) (рис. 12).

ПИД-регулятор

Рис. 13. Одноконтурная САУ с ПИД-регулятором

Изложим сущность метода оптимизации амплитудной характеристики для расчета настроечных параметров типовых регуляторов, используемых для управления следующими объектами без запаздывания:

$$W_0(s) = k_0 / s(T_{01}s + 1), \quad (3.7)$$

$$W_0(s) = k_0 / (T_{01}s + 1)(T_{02}s + 1), \quad (3.8)$$

$$W_0(s) = k_0 / s(T_{01}s + 1)(T_{02}s + 1), \quad (3.9)$$

$$W_0(s) = k_0 / (T_{01}s + 1)(T_{02}s + 1)(T_{03}s + 1), \quad (3.10)$$

где $T_{01} < T_{02} < T_{03}$, причем в общем случае сомножитель с наименьшей постоянной времени T_{01} приближенно заменяет собой несколько инерционных звеньев с еще более малыми постоянными времени T_{0i} .

Моделями (7) - (10) обычно пользуются для приближенного описания объектов, входящих в типовые контуры регулирования систем управления электроприводами (контуры регулирования напряжения, тока и частоты вращения).

Таблица 3.1

Передаточная функция объекта $W_0(p)$	Условия применения	Критерий	Параметры регулятора		
			k_p	T_u	T_d
$\frac{k_0}{(T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1)}$ $(T_{01} < T_{02})$	$T_{02} \leq 4T_{01}$	МО	$\frac{T_{02}}{2k_0 T_{01}}$	T_{02}	-
	$T_{02} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{02}}{2k_0 T_{01}}$	$4T_{01}$	-

$\frac{k_0}{p(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)}$	$T_{02} \ll T_{01}$	СО	$\frac{1}{2k_0T_{01}}$	$4T_{01}$	-
	$T_{01} < T_{02}$	СО	$\frac{1}{2k_0T_{01}}$	$4T_{01}$	T_{02}
$\frac{k_0}{(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)(T_{03}p+1)}$ $(T_{01} < T_{02} < T_{03})$	$T_{03} \leq 4T_{01}$	МО	$\frac{T_{03}}{2k_0T_{01}}$	T_{03}	T_{02}
	$T_{03} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{03}}{2k_0T_{01}}$	$4T_{01}$	T_{02}
	$T_{02} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{02}T_{03}}{8k_0T_{01}^2}$	T_{02}	$4T_{03}$

В зависимости от типа и порядка (7) - (10), а также соотношений между их постоянными времени, настройка контура регулирования осуществляется либо по критерию МО, либо по критерию СО (табл. 3.1).

Настроечные параметры регуляторов кр, Ти и Тд, обеспечивающие получение определенных показателей качества, будем называть гарантирующими.

Если у объекта второго порядка (8) $T_{02} \leq 4T_{01}$, то предпочтителен критерий МО. Для выполнения требований критерия применяют ПИ-регулятор

$$W_p(s) = k_p (T_i s + 1) / T_i s \quad (3.11)$$

с постоянной времени интегрирования Ти, равной наибольшей постоянной времени объекта $T_i = T_{02}$. Тем самым достигается полная компенсация этой наибольшей постоянной времени.

Передаточная функция разомкнутого контура принимает вид

$$W(s) = W_p(s)W_0(s) = k_p k_0 / [T_i s(T_{01} s + 1)] \quad (3.12)$$

и совпадает с передаточной функцией разомкнутого контура колебательной модели, для которой критерий МО сводится к условию $\xi = 0.7$. Отсюда в соответствии с ранее приведенными формулами для колебательной модели $kT_{01} = 1/4\xi^2$; $T_{01} = T/2\xi$ находим

$$(3.13)$$

Учитывая, что для рассматриваемого контура с ПИ - регулятором

$$k = k_p k_0 / T_i \text{ и } T_i = T_{02}, \quad (3.14)$$

получим, кроме (3.13), второе условие настройки на МО

$$k_p = T_{02}/2k_0T_{01} . \quad (3.15)$$

На рис. 14,а показаны логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутого контура и переходная характеристика замкнутой системы с объектом (10) и ПИ-регулятором, настроенным на МО.

На рис. 14,б приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика и переходная характеристика разомкнутой системы, настроенной на симметричный оптимум. Из рис. 14,б видно, что логарифмическая амплитудно-частотная характеристика имеет симметричную форму, поэтому подход к выбору настроек регулятора получил название симметричного оптимума. Переходный процесс в одноконтурной замкнутой системе при этом характеризуется большим перерегулированием.

Выводы о влиянии критериев настройки и параметров регулятора на показатели переходного процесса:

Увеличение передаточного коэффициента k_p приводит к уменьшению перерегулирования.

Увеличение постоянной интегрирования T_i приводит к увеличению времени переходного процесса и снижению перерегулирования.

Критерий МО предпочтителен при оптимизации систем, обрабатывающих в основном задающее воздействие.

Критерий СО целесообразно применять при настройке стабилизирующих систем, обрабатывающих в основном возмущающее воздействие.

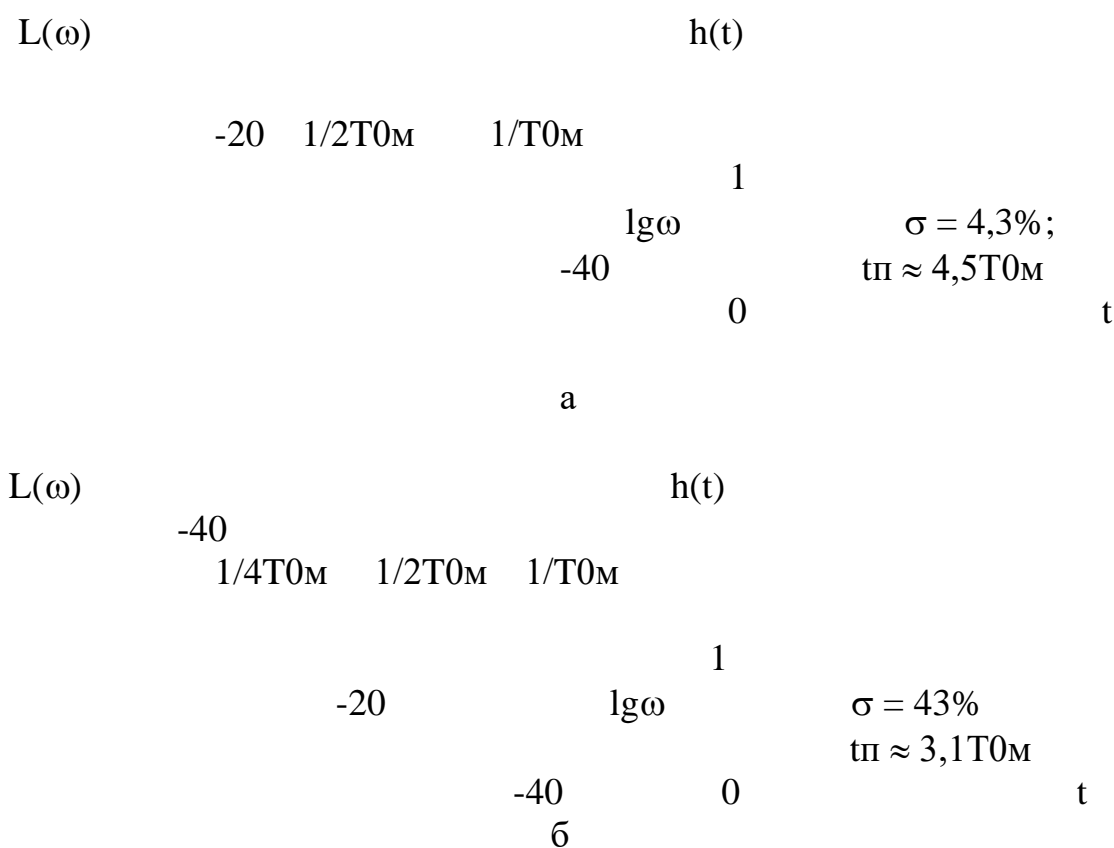


Рис. 14. Частотные и переходные характеристики одноконтурной системы регулирования, настроенной по критериям модульного (а) и симметричного (б) оптимумов

Задание для выполнения работы

Изучить основные законы регулирования.

Изучить структуры регуляторов, соответствующих законам регулирования.

Произвести выбор типа регулятора в зависимости от структуры объекта управления и расчет настроечных параметров регулятора.

Провести экспериментальное исследование свойств САУ с различными типами регуляторов.

4. Порядок выполнения работы

Набрать структурную схему одноконтурной замкнутой САУ с ПИД-регулятором в среде моделирующей программы CLASSIC-3 (рис. 4). Передаточную функцию по возмущающему воздействию установить равной

Возмущающее воздействие установить равным нулю, а обратную связь установить единичной.

Отредактировать передаточную функцию объекта управления согласно (8) по заданному варианту табл. 3.2.

Таблица 3.2

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
k_0	10	11	15	14	13	12	10	9
T_{01}	0,10	0,12	0,14	0,15	0,11	0,14	0,15	0,12
T_{02}	0,30	0,36	0,42	0,45	0,33	0,36	0,40	0,30

Рис. 15. Структурная схема одноконтурной САУ

1. Определить по табл. 1 тип регулятора, критерий оптимума и рассчитать настроечные параметры регулятора k_p , T_i , T_d . Если дифференциальная составляющая в регуляторе не должна присутствовать, то ее передаточная функция в структурной схеме приравнивается нулю. Данные занести в табл.3.3.

2. Снять переходный процесс в системе и определить его длительность и перерегулирование σ при возмущающих воздействиях $Z=0$ и $Z=1$. График переходного процесса зарисовать или скопировать программно-аппаратными средствами компьютера.

3. Разомкнуть систему (рис. 16).

4. Снять логарифмическую амплитудно-частотную характеристику разомкнутой САУ.

5. Определить частоты среза $\omega_{ср}$ и сопряжения $\omega_{сопр}$. Проверить соответствие $\omega_{ср} = 1/2T_{01}$, $\omega_{сопр} = 1/T_{01}$.

Таблица 3.3

Настроечный параметр	Расчетная формула	Расчетное значение	Критерий оптимума
K_p			
T_u			
T_δ			

Отредактировать передаточную функцию (9) объекта управления согласно заданному в табл. 3 варианту.

Выполнить задания по пунктам 3, 4 и 5.

Рис. 16. Структурная схема разомкнутой САУ

1. Содержание отчета

В отчете привести задание на выполнение лабораторной работы, структурные схемы исследуемых систем, расчеты настроечных параметров регуляторов, экспериментальные переходные характеристики, логарифмические амплитудно-частотные характеристики, выводы и ответы на вопросы.

2. Вопросы

1. Как называются основные законы регулирования?
2. Какими достоинствами и недостатками характеризуются каждый из законов регулирования?

2. Методические указания к проведению практических работ

Практическое занятие – эта форма систематических учебных занятий, с помощью которых студенты изучают тот или иной раздел определенной учебной дисциплины, входящей в состав учебного плана. Для того чтобы практические занятия приносили максимальную пользу, необходимо при подготовке к практическим занятиям использовать материал лекций, который должен закрепляться на практических занятиях как в результате обсуждения и анализа лекционного материала, так и с помощью решения проблемных ситуаций и задач. При подготовке к практическим занятиям следует использовать основную литературу из представленного списка, а также руководствоваться данными указаниями и рекомендациями. Рекомендуется следующая схема подготовки к практическому занятию: - открыть методические указания по практическим работам к данной дисциплине - ознакомиться с целью практического занятия - просмотреть необходимый теоретический материал из методических указаний - просмотреть материал из рекомендуемых источников по данной теме практического занятия - ознакомиться с вариантами заданий для данного практического занятия.

Примерные темы, выносимые на рассмотрение на практических занятиях:

1. Схемы систем управления. Принципы управления
2. Описание систем в виде дифференциальных уравнений
3. Переходная характеристика и весовая функция систем управления
4. Преобразование Лапласа и его свойства
5. Разложение дробно-рациональной функции на простые дроби
6. Передаточная функция
7. Вычисление частотных характеристик систем управления
8. Определение характеристик элементарных звеньев
9. Преобразование структурных схем систем управления
10. Критерий устойчивости Гурвица
11. Критерий устойчивости Михайлова
12. Критерий устойчивости Найквиста
13. Частотные критерии оценки качества управления
14. Корневые критерии оценки качества управления
15. Последовательные корректирующие звенья
16. Параллельная коррекция
17. Корректирующие обратные связи

3 Методические указания для организации самостоятельной работы

3.1 Общие положения

Целями самостоятельной работы являются систематизация, расширение и закрепление теоретических знаний.

Самостоятельная работа студента по дисциплине включает следующие виды активности:

1. Изучение тем теоретической части дисциплины, вынесенных для самостоятельной проработки.
2. Подготовка к практическим работам.
3. Подготовка к лабораторным работам.
4. Выполнение индивидуальных заданий.

3.2 Изучение тем теоретической части дисциплины, вынесенных для самостоятельной проработки

Изучение тем теоретической части дисциплины, вынесенных для самостоятельной проработки к разделам:

- 1 Математическое описание систем управления
- 2 Структурный анализ систем управления
- 3 Устойчивость систем управления
- 4 Качество управления
- 5 Синтез систем управления

Рекомендуемая литература:

1. Озеркин, Д. В. Основы автоматики и системы автоматического управления : учебное пособие / Д. В. Озеркин. — Москва : ТУСУР, 2012. — 179 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/10906125741> (дата обращения: 26.12.2022)
2. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. — 5-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/125741125741> (дата обращения: 26.12.2022)

3.3 Подготовка к лабораторным работам

В рамках выполнения подготовки к лабораторным работам рекомендуется детально познакомиться с теоретическим материалом по темам лабораторных работ.

Рекомендуемая литература:

1. Озеркин, Д. В. Основы автоматики и системы автоматического управления : учебное пособие / Д. В. Озеркин. — Москва : ТУСУР, 2012. — 179 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/10906> (дата обращения: 26.12.2022)
2. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. — 5-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/125741> (дата обращения: 26.12.2022)

3.4 Выполнение индивидуального (творческого) задания (ИЗ)

В рамках выполнения индивидуального (творческого) задания (ИЗ) необходимо подготовить 7 минутный доклад, раскрывающий одну из следующих тем:

Вариант индивидуального задания определяется преподавателем в индивидуальном порядке, основываясь на уровень знаний и студента.

Примеры тем:

1. Иерархическая кластеризация
2. Метод опорных векторов (SVM –support vector machines)
3. Линейный дискриминантный анализ (LDA - Linear discriminant analysis)
4. Алгоритм T-SNe (T-distributed stochastic neighbor embedding)
5. EM-алгоритм (Expectation-maximization algorithm)
6. Алгоритм AdaBoost
7. CART: Classification and Regression Trees
8. Скрытые Марковские модели (Hidden Markov Models)
9. Сингулярное разложение матрицы (SVD Singular-value decomposition)
10. Алгоритмы кластеризации на основе сеток и плотности (Gridbased and density based clustering)
11. Алгоритмы кластеризации данных большой размерности (CLIQUE, PROCLUS, ORCLUS)
12. Анализ выбросов (Outlier analysis)
13. Методы обучения с частичным привлечением учителя (semisupervised learning)
14. Методы кластеризации текстовых данных (Clustering methods for texts)
15. Алгоритмы кластеризация временных рядов (Time series clustering)
16. Методы классификации временных рядов (Time series classification)
17. Кластеризация графов (Graph clustering)
18. Алгоритм поиска ассоциативных правил FP-growth (Frequent Pattern-Growth)
- 19.Использование модификаций генетического алгоритма при решении задачи глобальной оптимизации.
20. Алгоритмы настройки нейро-нечетких систем вывода
21. Модель иерархической временной памяти НТМ.
22. Осцилляторные нейронные сети.
23. Рекуррентные нейронные сети.
24. Кластеризация графов.

Основная и дополнительная литература

Основная литература:

1. Озеркин, Д. В. Основы автоматики и системы автоматического управления : учебное пособие / Д. В. Озеркин. — Москва : ТУСУР, 2012. — 179 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/10906> (дата обращения: 26.12.2022).
2. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. — 5-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/125741> (дата обращения: 26.12.2022).

Дополнительная литература:

1. Власов, К.П. Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета: Учебное пособие / К.П. Власов. - Харьков: Гуман. Центр, 2013. - 544 с.
2. Власов, К.П. Теория автоматического управления. Основные положения .Программы расчета / К.П. Власов. - М.: Гуманитарный Центр, 2013. - 544 с.
3. Гайдук, А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления(полиномиальный подход) / А.Р. Гайдук. - М.: Физматлит, 2012. - 360 с.
4. Гайдук, А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB. 2-е изд., испр / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев и др.. - СПб.: Лань, 2011. - 464 с.
5. Гайдук, А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: Учебное пособие. 3-е изд., стер / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев и др.. - СПб.: Лань, 2016. - 464 с.
6. Ерофеев, А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / А.А. Ерофеев. - СПб.: Политехника, 2008. - 302 с.
7. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. учебник и практикум для академического бакалавриата / Д.П. Ким. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 276 с.
8. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. 2-е изд., испр и доп. / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2010. - 312 с.
9. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 2-е изд., испр и доп. / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2007. - 440 с.
10. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Том 1. Линейные системы / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2007. - 312 с.
11. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Том 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2007. - 440 с.
12. Коновалов, Б.И. Теория автоматического управления: Учебное пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев.. - СПб.: Лань, 2010. - 224 с.
13. Коновалов, Б.И. Теория автоматического управления: учебное пособие. 3-е изд., пер. и доп. / Б.И. Коновалов. - СПб.: Лань, 2010. - 224 с.
14. Коновалов, Б.И. Теория автоматического управления: Учебное пособие. 4-е изд., стер / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. - СПб.: Лань, 2016. - 224 с.
15. Кудинов, Ю.И. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB - SIMULINK): Учебное пособие / Ю.И. Кудинов, Ф.Ф. Пашенко. - СПб.: Лань, 2016. - 256 с.
16. Ощепков, А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. / А.Ю. Ощепков. - СПб.: Лань, 2013. - 208 с.
17. Подчукаев, В.А. Теория автоматического управления (аналитические методы) / В.А. Подчукаев. - М.: Физматлит, 2005. - 392 с.
18. Савин, М.М. Теория автоматического управления: Учебное пособие / М.М. Савин, В.С. Елсуков, О.Н. Пятина; Под ред. В.И. Лачин.. - Рн/Д: Феникс, 2007. - 469 с.
19. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления. 4-е изд., пер. и доп. / Е.И. Юревич. - СПб.: BHV, 2016. - 560 с.