

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова

**АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ПАРАМЕТРОВ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Лабораторный практикум

Томский политехнический университет
2025

УДК 621.311.22:621.1:004.94 (076.5)

ББК 31.37-5-05я7

A927

Атрошенко Ю.К. Автоматические системы регулирования параметров теплоэнергетических установок: лабораторный практикум / Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2025. – 91 с.

Пособие содержит методические указания к лабораторным работам, выполняемым на платформе SimInTech в рамках дисциплин, направленных на изучение систем управления в теплоэнергетике. Лабораторные работы структурированы от более простых к более сложным темам, а также позволяют комбинировать разные работы в зависимости от специализации образовательной программы. Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», а также по специальности 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг».

УДК 621.311.22:621.1:004.94 (076.5)

ББК 31.37-5-05я7

Рецензенты

Директор ООО «ЦЭТ» *Малиновский А.Н.*

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2025

© Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова 2025

© Оформление. Томский политехнический университет, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЗВЕНЬЕВ ...	4
2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	11
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	15
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПИ-РЕГУЛЯТОРОМ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	23
5. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	27
6. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОДНОКОНТУРНОЙ АСР С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ	32
7. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ И В ПЛОСКОСТИ КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ.....	37
8. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНОГО КРИТЕРИЯ МИХАЙЛОВА.....	42
9. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАГРЕВАНИЯ (ТЕРМОРЕГУЛЯТОР).....	46
10. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В ПРОМЫШЛЕННОМ РЕЗЕРВУАРЕ	52
11. НАСТРОЙКА АСР ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ ЦИГЛЕРА-НИКОЛЬСА.....	57
12. СИНТЕЗ АСР ДАВЛЕНИЯ В ДЕАЭРАТОРЕ.....	61
13. ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ С УЧЕТОМ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ.....	70
14. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГОДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ.....	75
15. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ОДНОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	81

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЗВЕНЬЕВ

Цели работы:

- освоение основных процедур работы на платформе SimInTech;
- получение переходных характеристик элементарных звеньев с заданными параметрами;
- исследование влияния параметров звена на его динамические характеристики.

1.1 Аперiodическое звено

Аперiodическое звено (инерционное звено первого порядка) – одно из элементарных звеньев, описываемое передаточной функцией вида:

$$W(P) = \frac{K}{TP + 1}, \quad (1)$$

где K – коэффициент передачи; T – постоянная времени.

Динамика этого звена описывает процессы в объектах, для которых характерно инерционное (не мгновенное) установление постоянного выходного сигнала при ступенчатом входном воздействии. Переходная характеристика аперiodического звена показана на рис. 1.

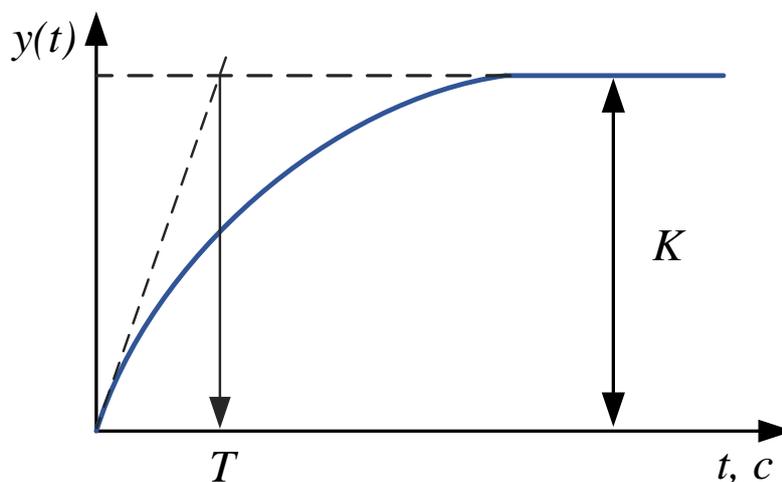


Рис. 1. Переходная характеристика аперiodического звена

Переходный процесс – реакция системы или объекта на единичное ступенчатое входное воздействие при нулевых начальных условиях. Временной график переходного процесса называется **переходной характеристикой**.

Порядок выполнения работы

1. Запустить программу через ярлык «SimInTech 64».
2. Создать проект, выполнив команду:
Файл ⇒ *Новый проект* ⇒ *Схема модели общего вида*.
3. После этого сохраняем проект в нужную папку:
Файл ⇒ *Сохранить проект как*.
4. Построить в сохраненном проекте структурную схему, показанную на рис. 2.

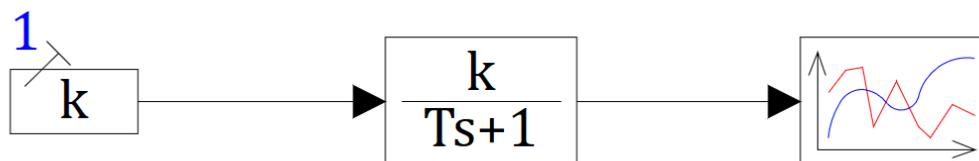


Рис. 2. Структурная схема модели для исследования аperiodического звена

Для этого необходимо:

- поместить на рабочее пространство блок аperiodического звена с вкладки «Динамические»;
 - поместить на рабочее пространство блок «Константа» (вкладка «Источники»);
 - поместить на рабочее пространство блок «Временной график» с вкладки «Данные»;
 - соединить блоки между собой.
5. Задать параметры k и T аperiodического звена (по варианту).

Для этого необходимо:

- дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на блок аperiodического звена;
- задать коэффициент усиления и постоянную времени в соответствующие строки;
- закрыть диалоговое окно.

Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для выполнения лабораторной работы № 1

№ варианта	Аperiodическое звено		Интегрирующее звено	Колебательное звено		
	k	T	k	k	T	β
1	2	0.6	10.2	1	10	0,2
2	3	2.46	0.1	2	12	0,5

№ варианта	Апериодическое звено		Интегрирующее звено	Колебательное звено		
	k	T	k	k	T	β
3	12.3	1.8	16.5	2	14	0,6
4	8.7	0.5	12.4	2	8	0,4
5	0.5	0.16	12	3	12	0,2
6	1	0.9	0.45	1	18	0,8
7	7.5	0.48	0.1	2	16	0,4
8	3.2	1.8	14.3	3	15	0,9
9	2.3	0.9	3.9	4	14	0,7
10	10	1.2	2.3	5	12	0,3
11	4	2.5	3.2	2	8	0,5
12	5	4.5	12.1	1	9	0,8

6. Построить график переходной характеристики

Для этого необходимо:

- нажать последовательно кнопки \odot и \blacktriangleright ;
- двойным нажатием левой кнопки мыши открыть график переходной характеристики;
- при необходимости увеличить временной интервал, на котором рассчитывается переходная характеристика, выполнив команду:

Расчёт \Rightarrow Параметры расчёта

и в полученном окне отредактировать конечное время расчета (по умолчанию **endtime** = 10 с).

7. Сохранить полученный график, скопировав изображение в документ MS Word.

8. Увеличить исходное значение коэффициента передачи k в 2 раза при фиксированном значении постоянной времени T , повторить действия по пп. 5–7.

9. Увеличить исходное значение постоянной времени T в 10 раз при фиксированном значении коэффициента передачи k , повторить действия по пп. 5–7.

10. Сделать выводы о влиянии параметров k и T на динамические характеристики апериодического звена.

1.2 Интегрирующее звено

Интегрирующее звено – элементарное звено, выполняющее интегрирование входного сигнала. Соответственно, передаточная функция звена записывается следующим образом:

$$W(P) = \frac{K_{II}}{P} = \frac{1}{T_{II}P}, \quad (2)$$

где K_{II} – коэффициент интегрирования; T_{II} – постоянная интегрирования.

Из определения звена следует, что скорость изменения выходной величины определяется входным сигналом. Переходная характеристика интегрирующего звена показана на рис. 3.

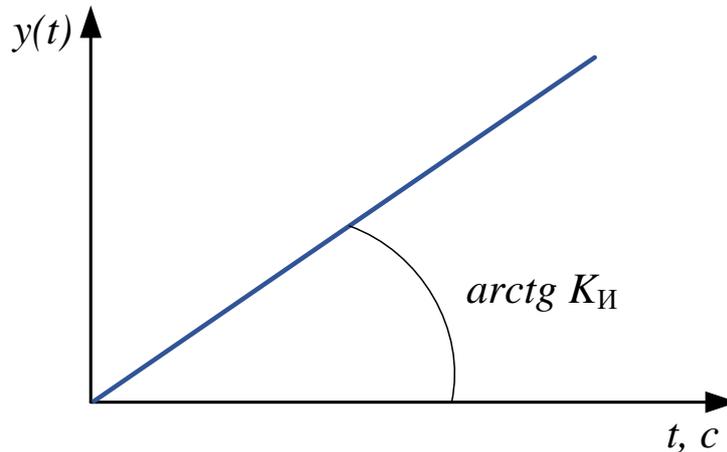


Рис. 3. Переходная характеристика интегрирующего звена

Типичными примерами физических объектов, динамика которых описывается интегрирующим звеном, являются накопительный резервуар, электродвигатель и другие элементы систем управления.

Порядок выполнения работы

1. Собрать структурную схему (рис. 4, а), состоящую из интегрирующего звена, на вход которого подается единичное воздействие.

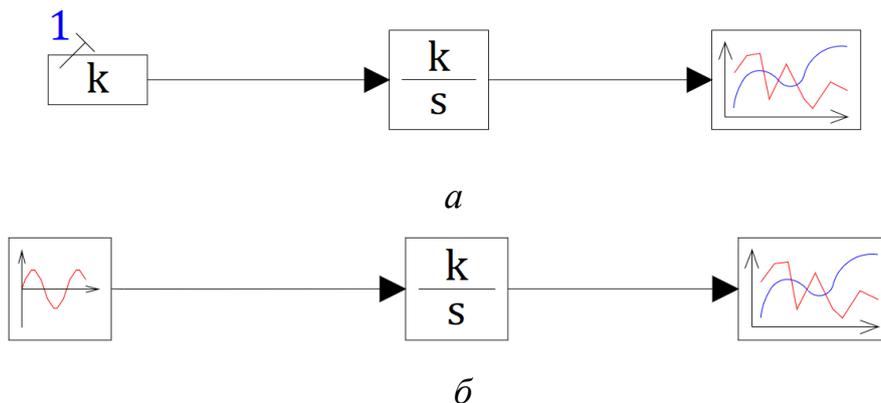


Рис. 4. Структурная схема для исследования интегрирующего звена

2. Для заданных в соответствии с вариантом (табл. 1) значений коэффициента усиления k построить график переходного процесса.

3. Увеличить коэффициент усиления в 2 раза, повторить расчет переходного процесса, сделать вывод о влиянии коэффициента усиления на переходный процесс.

4. Подать на вход интегрирующего звена гармонический сигнал (рис. 4, б). Для этого необходимо удалить блок «Константа» и поместить на его место блок «синусоида» (вкладка «Источники»).

5. Повторить расчет переходной характеристики, сделать вывод о влиянии вида входного сигнала на динамические характеристики звена.

1.3. Инерционное звено второго порядка

Инерционное звено второго порядка – звено, описываемое передаточной функцией:

$$W(P) = \frac{k}{T^2 P^2 + 2\xi TP + 1}, \quad (3)$$

где k – коэффициент передачи; T – постоянная времени, с; ξ – коэффициент демпфирования.

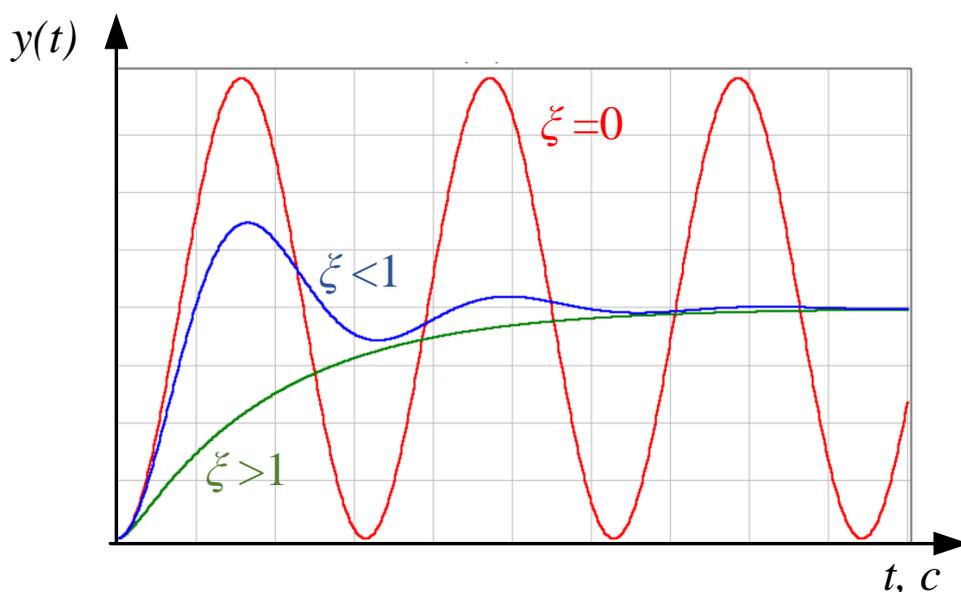


Рис. 5. Переходные характеристики звеньев второго порядка

В зависимости от величины коэффициента ξ различают три типа звеньев (рис. 5):

- аperiodическое звено второго порядка ($\xi > 1$);
- колебательное звено ($\xi < 1$);
- консервативное звено ($\xi = 0$).

Примерами таких звеньев являются электрический колебательный контур, маятник и т.п.

Порядок выполнения работы

1. В программе МВТУ составить структурную схему для исследования звеньев второго порядка (рис. 6). Для задания количества портов входа графика использовать свойства блока (меню «Свойства объекта»).

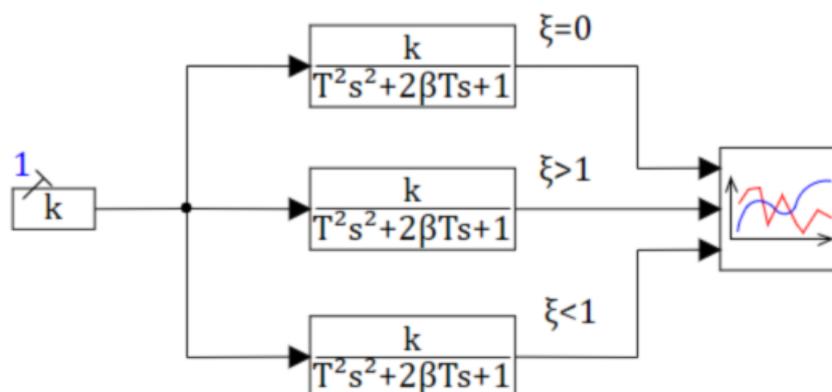


Рис. 6. Структурная схема для исследования динамики звена второго порядка

2. Задать параметры колебательного звена согласно варианту исходных данных (табл. 1) и провести три опыта:

1) коэффициент демпфирования равен заданному значению (см. табл. 1);

2) коэффициент демпфирования увеличен в 6 раз;

3) коэффициент демпфирования равен 0.

3. Получить графики переходных процессов в каждом из опытов, сделать вывод о влиянии коэффициента демпфирования на динамические характеристики звена.

Содержание отчета

1. Цели работы.
2. Исходные данные (по варианту).
3. Описание выполнения работы.
4. Графики полученных результатов по каждому разделу работы.
5. Анализ полученных результатов.
6. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. Что называется переходным процессом в системе?
2. Что понимается под элементарным звеном?
3. Какие виды входных сигналов использовались в работе? Запишите их математическое описание.

4. Приведите примеры физических объектов, систем и (или) процессов, динамику которых можно было бы описать с помощью рассматриваемых в работе элементарных звеньев.

2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: изучение метода анализа переходных процессов систем автоматического регулирования с помощью прямых оценок качества.

Прямые оценки качества

Входными сигналами в системе могут быть единичная ступенчатая функция, импульсная функция и гармонический сигнал. Прямые оценки качества определяют по кривой переходной характеристики при воздействии на нее единичной ступенчатой функции.

Пример определения прямых оценок качества колебательного переходного процесса показан на рис. 7.

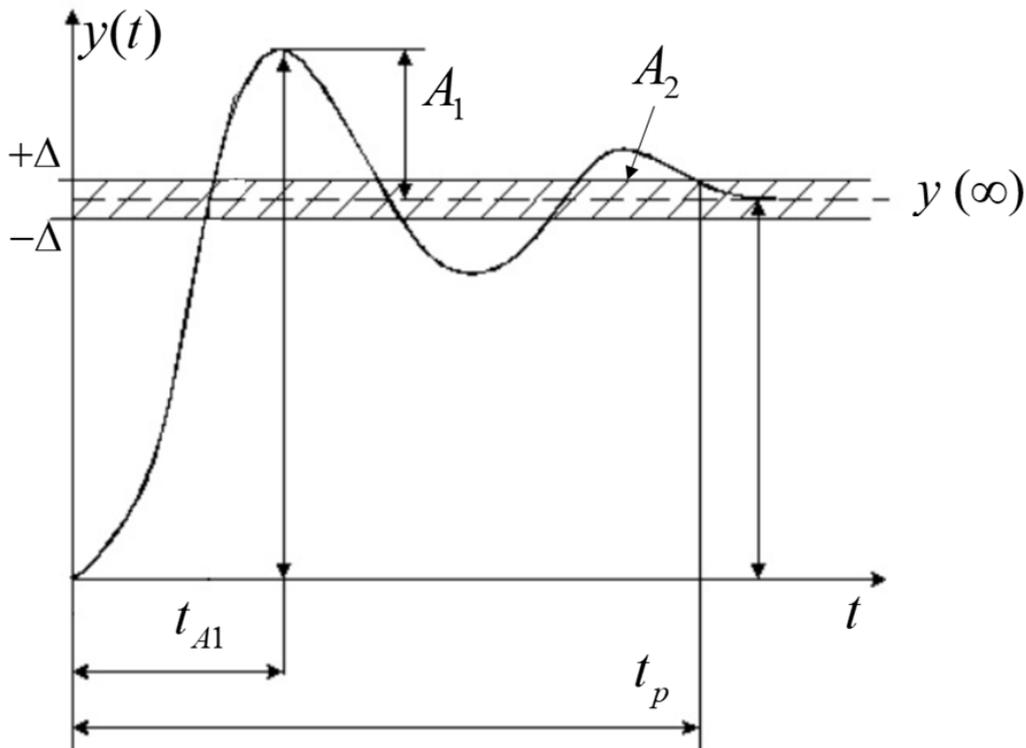


Рис. 7. Определение прямых оценок качества колебательного переходного процесса

1) **Максимальная динамическая ошибка A_1** – максимальное отклонение регулируемой величины от установившегося значения $y(∞)$;

2) **Перерегулирование $σ$** – максимальное отклонение A_1 , выраженное в процентах по отношению к установившемуся значению:

$$\sigma = \frac{A_1 \cdot 100\%}{y(\infty)}. \quad (4)$$

3) **Статическая ошибка $\varepsilon_{ст}$** – разность между величиной задания S и установившимся значением регулируемой величины:

$$\varepsilon_{ст} = S - y(\infty). \quad (5)$$

4) **Степень затухания ψ** определяет относительное уменьшение амплитуды колебаний переходного процесса:

$$\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100\% \quad (6)$$

где A_2 – вторая амплитуда колебания.

5) **Время регулирования t_p** – минимальное время, по истечении которого регулируемая величина не будет отклоняться от установившегося значения с заданной точностью. Допустимое отклонение называется зоной нечувствительности и задается в зависимости от объекта регулирования. В настоящей работе $\Delta = \pm 5\%$ от значения $y(\infty)$.

6) **Время достижения первого максимума t_{A1}** – время, соответствующее значению A_1 .

7) **Частота колебаний $\omega = 2\pi/T$** , где T – период колебаний.

8) **Число колебаний n** – число полных колебаний, совершенных переходной характеристикой в течение времени регулирования t_p .

Порядок выполнения работы

1. В программе собрать структурную схему (рис. 8).

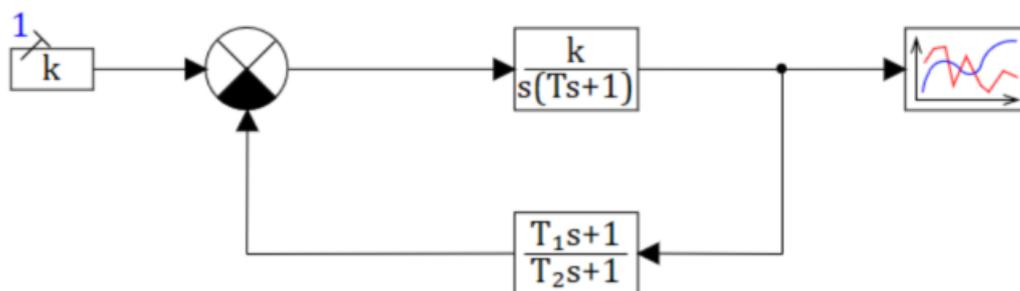


Рис. 8. Структурная схема моделируемой системы

2. Для изменения направлений портов ввода и вывода сигнала в блоке, расположенном на линии обратной связи, следует вызвать меню свойств объекта двойным нажатием левой кнопки, где на вкладке «Порты» для порта *inport* справа в пункте «Расположение» значение

«Слева» изменить на «Справа», для порта *outport* выполнить противоположное изменение. Также можно выбрать пункт меню «Повернуть порты блока», 180 °.

3. Для создания линии обратной связи следует выделить линию связи с графиком, нажать на правую кнопку мыши и в открывшемся меню выполнить команду:

Действия ⇒ Добавить ветвь.

4. Задать параметры блоков в соответствии с вариантом исходных данных (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные для лабораторной работы № 2

Вариант	Коэффициент усиления К	Постоянная времени Т	Постоянная времени Т ₁	Постоянная времени Т ₂
1	1.8	0.9	1	3
2	2.7	10	2.6	2
3	0.6	5.6	5.7	9
4	1.5	2	2.7	3.5
5	5	3	2.6	4.5
6	15	10	2	0.9
7	0.6	5	5	9
8	3	6.4	10.3	20
9	2.6	8	2	8
10	2.5	1.5	1.5	7.5
11	1.9	6	2.5	5.8
12	2.3	1.2	1.8	6.2

5. Получить график переходного процесса, при необходимости увеличить конечное время процесса. Для точного определения прямых оценок качества щелкнуть правой кнопкой мыши на пространстве графика и выбрать **Курсор**.

6. Выполнить расчет прямых оценок качества переходных процессов.

7. Путем изменения параметров блоков системы добиться уменьшения значения перерегулирования. Определить прямые оценки качества второго переходного процесса.

Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Исходные данные (по варианту).
3. Описание выполнения работы.
4. Полученные графики и расчет прямых оценок качества для двух переходных процессов.
5. Выводы.
6. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите прямые оценки качества.
2. Какие оценки качества не могут быть определены для монотонных переходных процессов?
3. Изобразите эскизы переходных процессов, для которых степень затухания $0 < \psi < 1$, $\psi < 0$, $\psi = 0$.
4. Как называется интервал допускаемого отклонения регулируемой величины от установившегося значения, определяемый при расчете времени регулирования?

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цели работы:

- изучение структуры типовых регуляторов;
- оценка влияния структуры и параметров настройки регуляторов на переходные процессы в системе автоматического регулирования.

Законы регулирования

Аналоговые регуляторы реализуют следующие законы регулирования:

- пропорциональный закон (П-регулятор);
- интегральный закон (И-регулятор);
- пропорционально-интегральный закон (ПИ-регулятор);
- пропорционально-дифференциальный (ПД-регулятор);
- пропорционально-интегро-дифференциальный (ПИД-регулятор).

Схема включения регулятора в систему показана на рис. 9.

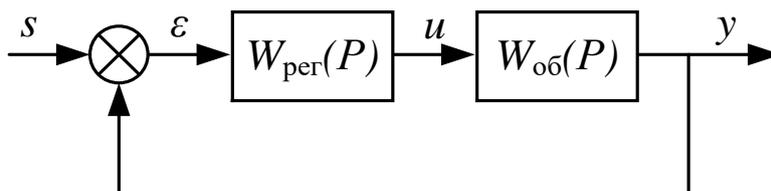


Рис. 9. Структурная схема моделируемой системы

На рис. 9 приняты обозначения:

- s – сигнал задания;
- ε – сигнал рассогласования (ошибка регулирования);
- u – управляющее воздействие;
- y – выходная величина.

Пропорциональное регулирование

Пропорциональный регулятор (П-регулятор) описывается передаточной функцией вида:

$$W_{\text{п}}(p) = k_{\text{п}}. \quad (7)$$

Структурная схема регулятора и временной график управляющего воздействия при единичном ступенчатом сигнале ошибки $\varepsilon=1(t)$ показаны на рис. 10.

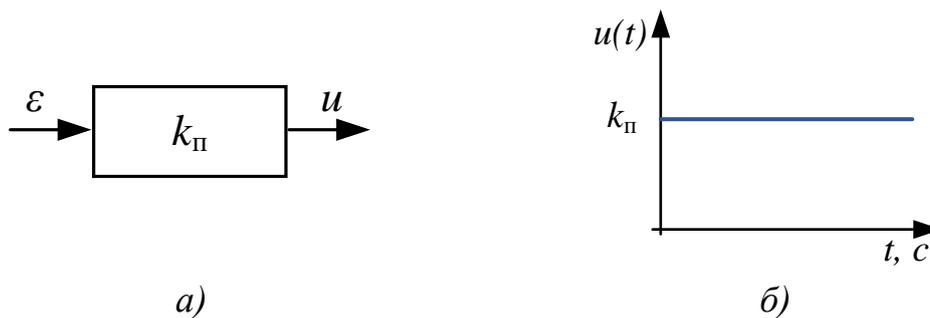


Рис. 10. Структурная схема (а) и график управляющего воздействия (б) при $\varepsilon=1(t)$ П-регулятора

Из графика (рис. 10, б) видно, что величина управляющего воздействия прямо пропорциональна величине сигнала рассогласования, величина которого, однако, ограничена значением $k_{\text{П}}$.

Преимуществом П-регулятора является высокое быстродействие, недостатком – наличие статической ошибки.

Интегральное регулирование

Интегральный регулятор (И-регулятор) описывается передаточной функцией вида:

$$W_{\text{И}}(p) = \frac{k_{\text{И}}}{p}. \quad (8)$$

Структурная схема регулятора и временной график управляющего воздействия при единичном ступенчатом сигнале ошибки $\varepsilon=1(t)$ показаны на рис. 11.

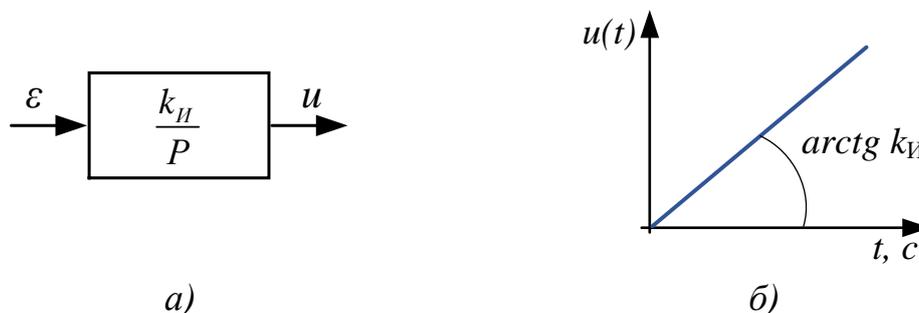


Рис. 11. Структурная схема (а) и график управляющего воздействия (б) при $\varepsilon=1(t)$ И-регулятора

Из графика (рис. 11, б) видно, что скорость изменения управляющего воздействия прямо пропорциональна величине сигнала рассогласования: с ростом $k_{\text{И}}$ скорость роста регулирующего воздействия увеличивается.

Недостатком И-регулятора является низкое быстродействие, преимуществом – отсутствие статической ошибки переходного процесса в системе.

Пропорционально-интегральное регулирование

Дифференциальный регулятор состоит из параллельного соединения П- и И-звена:

$$W_{\text{ПИ}}(p) = \frac{k_{\text{И}}}{p} + k_{\text{П}}. \quad (9)$$

Структурная схема регулятора и временной график управляющего воздействия при единичном ступенчатом сигнале ошибки $\varepsilon=1(t)$ показаны на рис. 12.

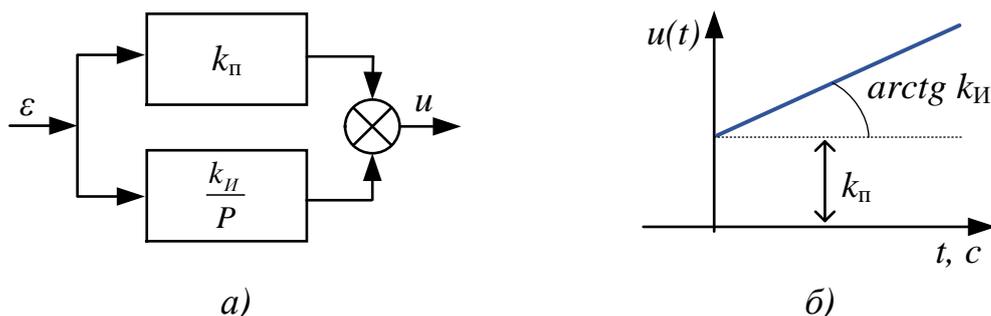


Рис. 12. Структурная схема (а) и график управляющего воздействия (б) при $\varepsilon=1(t)$ ПИ-регулятора

Из графика (рис. 12, б) видно, что при появлении сигнала ошибки управляющее воздействие сначала увеличивается до уровня, определенного значением $k_{\text{П}}$, а после – постепенно возрастает в соответствии со значением $k_{\text{И}}$.

ПИ-закон регулирования сочетает в себе достоинства П- и И-законов регулирования: отсутствие статической ошибки и быстродействие.

Пропорционально-дифференциальное регулирование

Структурная схема регулятора и временной график управляющего воздействия при единичном ступенчатом сигнале ошибки $\varepsilon=1(t)$ показаны на рис. 13.

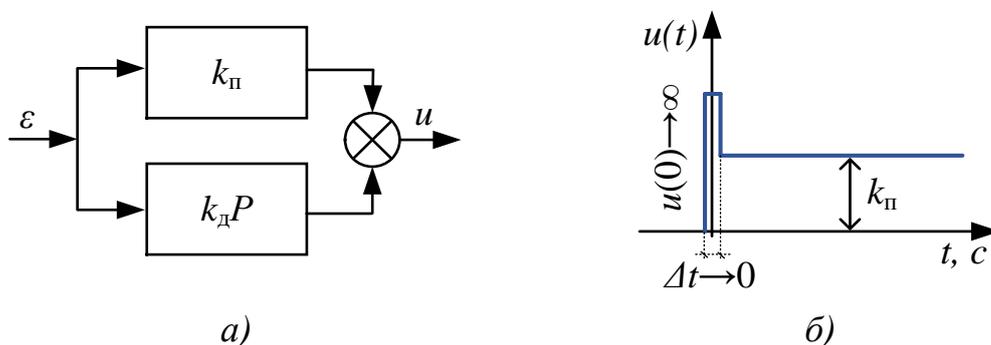


Рис. 13. Структурная схема (а) и график управляющего воздействия (б) при $\varepsilon=1(t)$ ПД-регулятора (с идеальным Д-звеном)

Дифференциальный регулятор состоит из параллельного соединения П- и Д-звена (рис. 13, а):

$$W_{\text{пд}}(p) = k_{\text{д}}P + k_{\text{п}}. \quad (10)$$

Из графика (рис. 13, б) видно, что в момент появления сигнала ошибки регулирующее воздействие увеличивается до максимального значения, затем уменьшается до уровня, соответствующего значению $k_{\text{п}}$, после чего остается постоянным. При практической реализации вместо идеального Д-звена используется реальное Д-звено. Передаточная функция регулятора при этом принимает вид:

$$W_{\text{пд}}(p) = \frac{k_{\text{д}}P}{TP+1} + k_{\text{п}}. \quad (11)$$

Временной график управляющего воздействия будет выглядеть так, как показано на рис. 14, б.

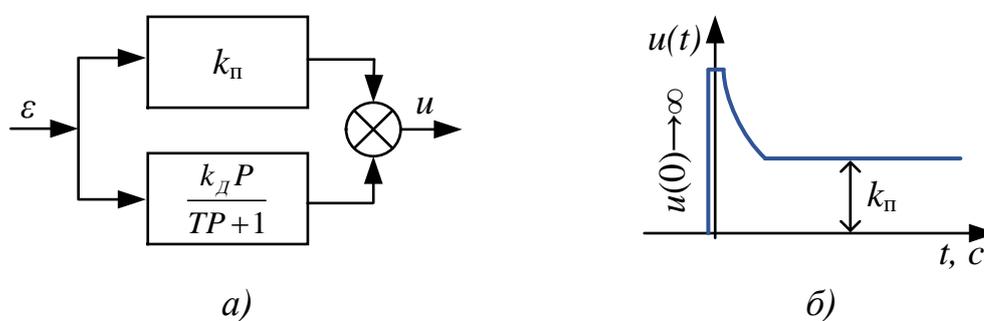


Рис. 14. Структурная схема (а) и график управляющего воздействия (б) при $\varepsilon=1(t)$ ПД-регулятора (с реальным Д-звеном)

Очевидно, что Д-составляющая этого регулятора реагирует только на изменение величины ошибки (в начальный момент времени ε изменяется от 0 до 1). Такой регулятор, также как П-закон, обладает статической ошибкой, поэтому без И-составляющей используется достаточно редко.

Пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирование

ПИД-регулятор состоит из параллельного соединения трех элементарных звеньев: пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего (рис. 15, а).

ПИД-регулятор описывается передаточной функцией:

$$W_{\text{пид}}(p) = k_{\text{п}} + \frac{k_{\text{д}}P}{TP+1} + k_{\text{и}}P. \quad (12)$$

Структурная схема регулятора и временной график управляющего воздействия при единичном ступенчатом сигнале ошибки $\varepsilon=1(t)$ показаны на рис. 15.

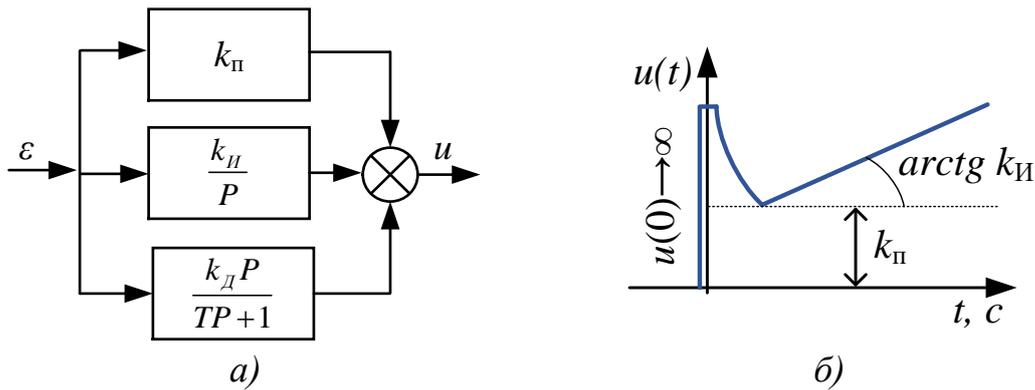


Рис. 15. Структурная схема (а) и график управляющего воздействия (б) при $\varepsilon=1(t)$ ПИД-регулятора (с реальным Д-звеном)

При появлении сигнала рассогласования ПИД-регулятор под воздействием Д-звена в начальный момент времени увеличивает регулирующее воздействие до максимального значения, затем оно уменьшается до величины, соответствующей $k_{П}$, а после – возрастает в соответствии с $k_{И}$.

Регуляторы, включающие Д-звено, иногда называют предваряющими. Это связано с тем, что Д-звено изменяет управляющее воздействие в сторону, соответствующую уменьшению сигнала рассогласования, уже тогда, когда ошибка только начинает меняться. Это делает регуляторы с Д-составляющими самыми быстродействующими. К недостаткам ПИД-регулятора можно отнести трудность настройки, так как он содержит три независимых параметра настройки: $k_{И}$, $k_{П}$, $k_{Д}$.

Порядок выполнения работы

1. Моделирование САР

1. В программе собрать структурную схему АСР так, как показано на рис. 16.

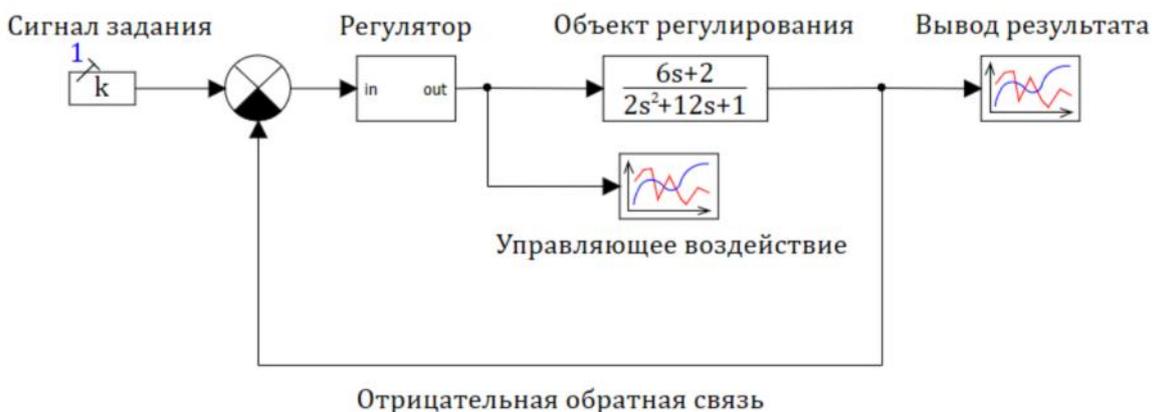


Рис. 16. Структурная схема одноконтурной АСР

2. Для создания регулятора следует выбрать элемент «Субмодель» (вкладка «Субструктуры»). По умолчанию этот элемент не имеет входов и выходов. Для их задания нужно открыть субмодель двойным нажатием левой кнопки мыши и в открывшемся окне собрать схему, показанную на рис. 17.

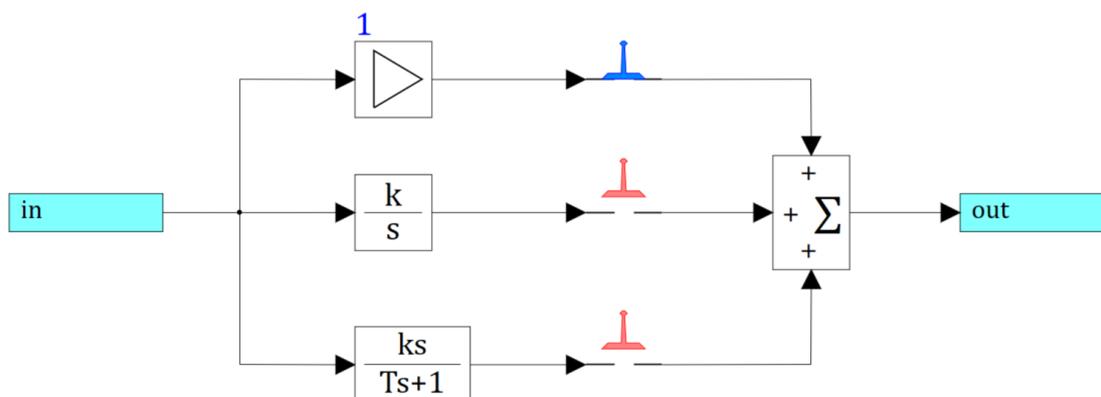


Рис. 17. Структурная схема регулятора

Для обозначения входа и выхода регулятора используются блоки «Порт входа» и «Порт выхода» (вкладка «Субструктуры»).

Пропорциональное звено реализуется блоком «Усилитель» (вкладка «Операторы»), дифференцирующее и интегрирующее звено – соответственно, блоками «Инерционно-дифференцирующее звено» и «Интегратор» (вкладка «Динамические»).

Сигналы указанных звеньев подключаются к сумматору (вкладка «Операторы») через ключ ручной управляемый (вкладка «Ключи»). Для размыкания ключа двойным нажатием открыть свойства ключа и убрать \checkmark в графе «Значение». На начальном этапе замкнутым ключом должен быть только ключ на линии пропорционального звена. Остальные ключи следует оставить разомкнутыми.

Сумматор по умолчанию имеет два входа. Для добавления третьего входа в свойствах сумматора в строке «Весовые множители...» добавить «1». Таким образом строка весовых множителей должна иметь вид [1, 1, 1].

После сборки схемы регулятора в левом верхнем углу нажать кнопку «Возврат из субмодели» (зеленая стрелка). Теперь субмодель регулятора можно соединить с другими элементами системы.

3. Для задания объекта следует выбрать блок «Передаточная функция общего вида» (вкладка «Динамические»). Передаточная функция этого звена имеет следующий общий вид:

$$W(p) = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n} \quad (13)$$

В соответствии с выражением (13) и вариантом исходных данных (табл. 3) необходимо задать коэффициенты передаточной функции объекта управления. Коэффициенты b_j , a_j вводятся через пробел по **возрастающим степеням P** в строках «Коэффициенты числителя» и «Коэффициенты знаменателя», соответственно в диалоговом окне свойств блока (вызывается двойным нажатием левой кнопки мыши по блоку). После ввода исходных данных в блоке на схеме появится передаточная функция, соответствующая варианту.

Таблица 3

Исходные данные для лабораторной работы № 3

№ варианта	b_0	b_1	a_0	a_1	a_2
1	1	0	1	20	100
2	10	20	10	6	40
3	60	20	74	30	225
4	10.3	3.5	9	2	63
5	2	1.3	1	0.3	1
6	2	0.5	1	0.6	3
7	17	3.8	80	60	900
8	5.3	10	12	30	98
9	2	8	2	5	150
10	2	0	8	31	600
11	2	0	1	25	130
12	1	0	10	50	500

2. Получение графиков переходных процессов в АСР

В работе требуется выполнить моделирование работы П-, И-, ПД-, ПИ- и ПИД-законов регулирования. Для реализации законов следует закрывать соответствующие ключи. Настройки регулятора на первом этапе оставить равными значениям «по умолчанию». Редактировать настройки регулятора только в случае получения незатухающего переходного процесса. Для каждого типа регулятора следует сохранять графики переходных процессов в системе и графики регулирующего воздействия.

3. Расчет оценок прямых оценок качества

Определить по полученным графикам прямые оценки качества переходных процессов (см. лабораторную работу № 2). Результаты расчетов свести в табл. 4.

Таблица 4

Форма представления результатов расчета прямых оценок качества

№ п/п	Оценка качества	П-закон	И-закон	ПД-закон	ПИ-закон	ПИД-закон
1	Динамическая ошибка A_1					
2	Перерегулирование σ					
3					

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные.
3. Порядок выполнения работы (включая рисунки структурных схем моделируемой АСР, регуляторов, а также графики полученных переходных процессов и регулирующих воздействий).
4. Результаты расчета прямых оценок качества переходных процессов.
5. Анализ полученных результатов, анализ преимуществ и недостатков регуляторов.
6. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. Почему Д- и ПД-законы регулирования практически не используются в реальных системах?
2. Сколько параметров настройки имеют П-, И-, ПИ- и ПИД-регуляторы?
3. Изобразите эскизы графиков управляющих воздействий для рассматриваемых законов регулирования для случая, когда сигнал ошибки, поступающий на регулятор, представляет собой единственный ступенчатый сигнал.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПИ-РЕГУЛЯТОРОМ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: исследование динамики работы одноконтурной системы автоматического регулирования с ПИ-регулятором для различных видов возмущающих воздействий.

Порядок выполнения работы

1. Моделирование исследуемой системы

В программе SimInTech смоделировать САР с ПИ-регулятором, структурная схема которой приведена на рис. 18.

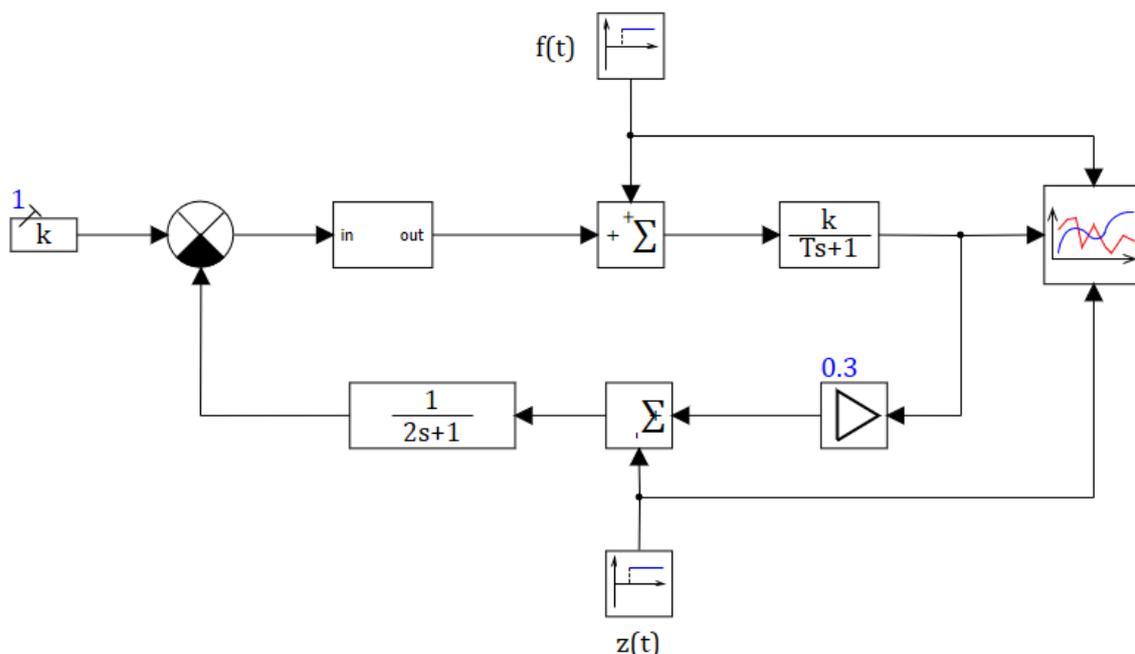


Рис. 18. Структурная схема одноконтурной АСР с возмущениями

Согласно варианту исходных данных (табл. 5) задать параметры объекта управления. Подачу возмущения $z(t)$ осуществить в элемент сравнения с весовым коэффициентом -1.

Таблица 5

Исходные данные для лабораторной работы № 4

№ вар.	Параметры объекта		Параметры регулятора		Параметры ступенчатого возмущения f	Параметры ступенчатого возмущения z	Дисперсия нормального шума	Блок с кусочно-линейной характеристикой
	k	T	$k_{\text{п}}$	$k_{\text{и}}$	$t \ f(0) \ f(t)$	$t \ z(0) \ z(t)$		
1	1	20	30	3,0	40 0 1,6	65 0 1,6	1,0	0 0 0 8 -4 1 5
2	1	12	25	3,5	35 0 1,4	60 0 1,4	0,9	0 0 0 12 -1 1 7

№ вар.	Параметры объекта		Параметры регулятора		Параметры ступенчатого возмущения f	Параметры ступенчатого возмущения z	Дисперсия нормального шума	Блок с кусочно-линейной характеристикой
	k	T	k_{Π}	$k_{И}$	$t f(0) f(t)$	$t z(0) z(t)$		
3	2	14	17	5,5	50 0 1,5	80 0 1,5	0,7	0 0 0 15 -3 1 9
4	2	10	19	4,8	60 0 2,0	85 0 2,0	1,1	0 0 0 10 -5 1 5
5	1	15	22	6,3	55 0 1,6	80 0 1,6	0,8	0 0 0 8 -4 1 5
6	2	20	23	6,5	80 0 1,5	110 0 1,5	0,9	0 0 0 12 -1 1 7
7	2	16	25	7,0	55 0 1,7	85 0 1,7	1,0	0 0 0 15 -3 1 9
8	3	12	30	7,2	70 0 1,4	100 0 1,4	1,2	0 0 0 10 -5 1 5
9	1	16	45	8,0	60 0 1,3	85 0 1,3	0,7	0 0 0 8 -4 1 5
10	1	18	50	10,5	65 0 1,5	90 0 1,5	0,9	0 0 0 12 -1 1 7
11	2	12	50	1	40 0 1	65 0 1,6	1,2	0 0 0 10 8 -2 6
12	1	8	32	2	40 0 10	65 0 10	0,8	0 0 0 16 10 -4 1

2. Получение и анализ графиков переходных процессов

1. Структурная схема (рис. 18) представляет собой модель системы со ступенчатыми возмущающими воздействиями по двум каналам – f и z . Перед выполнением расчета следует отредактировать конечное время расчета переходного процесса таким образом, чтобы оно было больше момента времени приложения воздействия по каналу z на 20–30 с. При необходимости конечное время расчета следует увеличить. Пример правильной переходной характеристики показан на рис. 19.



Рис. 19. Переходная характеристика в АСР

Полученный график иллюстрируют три переходных процесса в системе – по каналу задания ($s-y$) и по двум каналам возмущений ($f-y$, $z-y$). При этом время начала переходного процесса соответствует времени приложения возмущения, то есть для графика на рис. 19, время начала переходного процесса по каналу $f-y$ соответствует 40 с, а по каналу $z-y$ – 65 с. При определении времени регулирования для этих переходных процессов эти значения времени следует принимать за начало отсчета.

2. Для трех полученных графиков переходных процессов следует определить прямые оценки качества, представить результаты расчета в табличной форме.

3. Путем изменения параметров настройки регулятора добиться уменьшения времени регулирования по каналу задания.

4. Установить весовой коэффициент для подачи возмущения $z(t)=0$. Возмущение $f(t)$ заменить на блок «Нормальный шум» (вкладка «Источники»). Выполнить расчет переходного процесса, сохранить полученный график. Прямые оценки качества не определяются.

5. Установить весовой коэффициент для подачи возмущения $z(t)=0$. Возмущение $f(t)$ заменить на блок «Кусочно-постоянная» (вкладка

«Источники»). Выполнить расчет переходного процесса, сохранить полученный график. Прямые оценки качества не определяются.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные.
3. Порядок выполнения работы (включая рисунки структурных схем АСР с различными типами возмущающих воздействий, ПИ-регулятора, а также графики полученных переходных процессов).
4. Расчет прямых оценок качества. Полученные значения оценок качества свести в таблицу.
5. Анализ полученных результатов.
6. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие из рассматриваемых возмущений оказывают большее влияние на динамику системы?
2. Запишите эквивалентные передаточные функции для рассматриваемой системы по каналам задания и возмущений.
3. Каким образом изменение параметров регулятора влияет на качество переходных процессов?

5. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цели работы:

- изучение видов корректирующих устройств, применяющихся в системах регулирования в целях улучшения качества процесса регулирования;
- экспериментальное исследование влияние корректирующих устройств на переходные процессы в системе управления.

Корректирующие устройства в системах регулирования

Под улучшением качества регулирования в системах понимается изменение динамических свойств системы в сторону увеличения запаса устойчивости и быстродействия. При невозможности коррекции параметров существующей системы используются корректирующие устройства, применение которых позволяет желаемым образом изменить динамику существующей системы [1].

Корректирующие устройства могут быть:

- последовательного типа (рис. 20, а);
- параллельного типа (рис. 20, б);
- в виде местной (положительной или отрицательной) обратной связи (рис. 20, в):
 - жесткой обратной связи $W_{OC}(P)=K_{OC}$;
 - гибкой обратной связи $W_{OC}(P)=K_{OC}\cdot P$;
 - инерционной жесткой обратной связи $W_{OC}(P)=K_{OC}/(T_{OC}\cdot P+1)$;
 - инерционной гибкой обратной связи $W_{OC}(P)=K_{OC}\cdot P/(T_{OC}\cdot P+1)$.

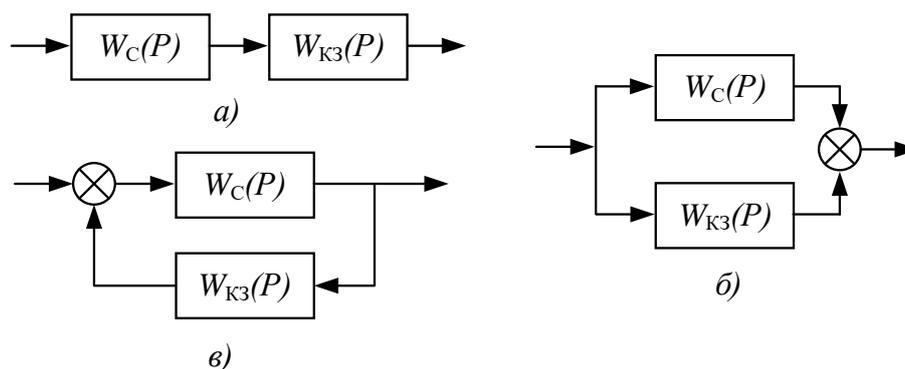


Рис. 20. Включение корректирующих звеньев в систему регулирования:
а) последовательного типа; б) параллельного типа; в) местная обратная связь

Использование конкретного типа корректирующего устройства определяется целями коррекции и возможностью технической реализации того или иного корректирующего устройства.

Порядок выполнения работы

1. Моделирование и анализ исходной системы

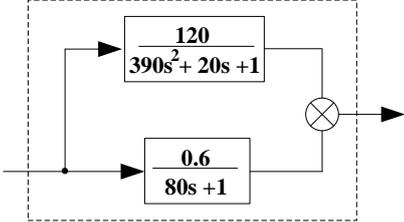
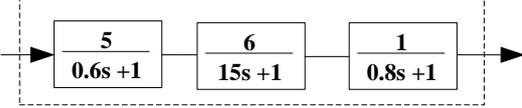
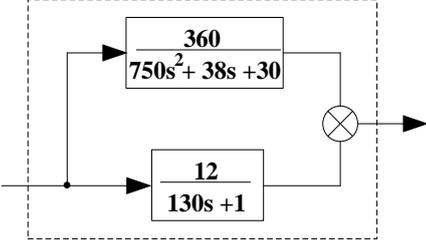
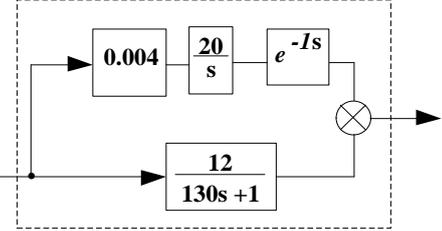
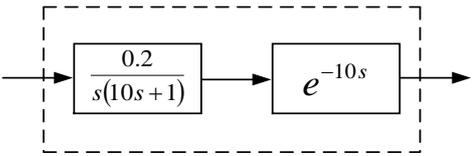
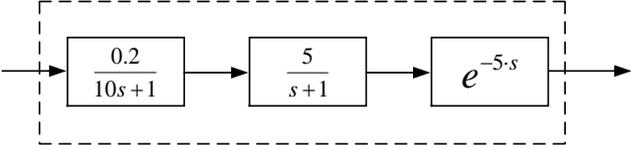
В программе SimInTech собрать модель системы, состоящую из заданного объекта (табл. 6). На вход системы подать единичное ступенчатое воздействие, предусмотреть регистрацию переходного процесса.

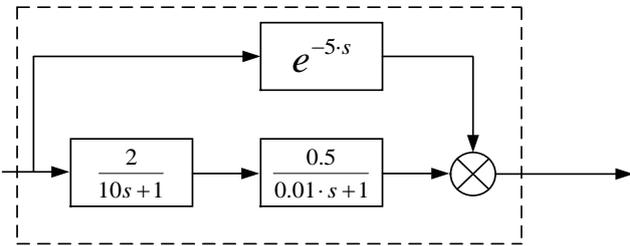
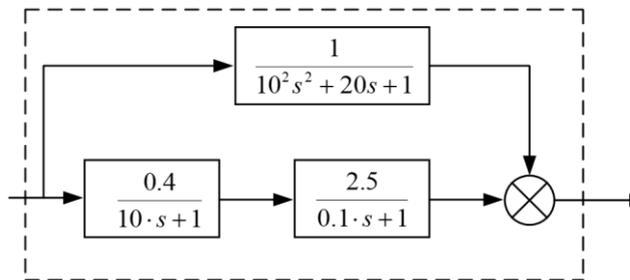
Для полученной системы определить прямые оценки качества переходного процесса.

Таблица 6

Исходные данные для лабораторной работы № 5

№ варианта	Объект управления	Требования к качеству переходного процесса
1		$\varepsilon_{ст} \leq 0,5$ $A_1 \leq 0,3$
2		$\varepsilon_{ст} \leq 0,5$ $A_1 \leq 0,3$
3		$\varepsilon_{ст} \leq 0,5$ $A_1 \leq 0,3$
4		$\varepsilon_{ст} \leq 0,5$ $A_1 \leq 0,2$

№ варианта	Объект управления	Требования к качеству переход- ного процесса
5		$\varepsilon_{\text{ст}} \leq 0,5$ $A_1 \leq 0,5$
6		$\varepsilon_{\text{ст}} \leq 0,5$ $A_1 \leq 0,3$
7		$\varepsilon_{\text{ст}} \leq 0,5$ $A_1 \leq 0,4$
8		$\varepsilon_{\text{ст}} \leq 0,5$ $A_1 \leq 0,5$
9		$\varepsilon_{\text{ст}} \leq 0,7$ $A_1 \leq 0,6$
10		$\varepsilon_{\text{ст}} \leq 0,5$ $t_p \leq 50 \text{ с}$

№ варианта	Объект управления	Требования к качеству переходного процесса
11		$\varepsilon_{ст} \leq 0,05$ $A_1 \leq 0,6$
12		$\varepsilon_{ст} \leq 0,05$ $A_1 \leq 0,$

2. Коррекция системы и ее анализ

Для полученной системы подобрать одно или несколько корректирующих устройств таким образом, чтобы прямые оценки качества удовлетворяли заданным условиям. Определить прямые оценки качества переходного процесса в откорректированной системе.

3. Вывод эквивалентной передаточной функции системы регулирования

Вывести эквивалентную передаточную функцию исходной и полученной системы регулирования.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные.
3. Порядок выполнения работы (включая рисунки структурных схем исходной и скорректированной системы).
4. Расчет прямых оценок качества переходных процессов с указанием требований к ним, результаты расчета в табличном виде.
5. Вывод эквивалентных передаточных функций исходной и скорректированной систем.

6. Ответы на контрольные вопросы и задания.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Для чего используются корректирующие устройства?
2. Какие типы корректирующих устройств применяются в системах регулирования?
3. Какие типа корректирующих устройств оказались подходящими для заданной в работе системы, а какие, наоборот, приводили к ухудшению динамики?

6. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОДНОКОНТУРНОЙ АСР С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Цели работы:

- исследование динамики работы одноконтурной АСР с запаздыванием с ПИ-регулятором при наличии воздействия внешних возмущений на объект управления;
- получение навыков ручной настройки регуляторов;
- исследование влияния закона регулирования на качество переходного процесса.

Объекты с запаздыванием

Запаздыванием называется свойство объектов, которое заключается в том, что между моментом подачи возмущающего воздействия и началом изменения выходной величины проходит некоторое время. Запаздывание в значительной степени усложняет процесс регулирования и при наличии технической возможности его стараются уменьшить.

Большинство объектов регулирования в теплоэнергетике представляют собой сложные динамические системы с распределенными параметрами. Определение статических и динамических характеристик таких объектов аналитически представляет собой сложную и трудоемкую задачу. Для упрощения таких задач применяется способ представления сложных объектов в виде более простых моделей. Например, энергетические котлы представляют собой сложные динамические системы, которые можно разделить на ряд участков: пылепитатели, топочная камера, барабан, опускные трубы, топочные экраны, пароперегреватель. При этом последовательное соединение аperiodических звеньев, описывающих динамику объекта регулирования, может быть представлено в виде одного аperiodического звена с учетом запаздывания объекта. Например, паровой котел типа ТП-87 по каналу «расход топлива – давление перегретого пара» описывается последовательным соединением аperiodического звена и звена запаздывания [2]:

$$W_K = \frac{K \cdot e^{-\tau P}}{TP + 1}. \quad (14)$$

Видно, что паровые котлы по каналу «расход топлива – давление перегретого пара» обладают свойством запаздывания. Эта величина зависит от вида топлива и характеристик пылепитателей. Ее величина может варьироваться от нескольких секунд до нескольких минут.

Порядок выполнения работы

1. Моделирование АСР

Собрать структурную схему так, как показано на рис. 21. Объектом регулирования в моделируемой системе является барабанный парогенератор с номинальным давлением перегретого пара 14 МПа (140 кгс/см²). Указанное значение давления задается с помощью блока «Константа» (вкладка «Источники»). Конечное время расчета в настройках установить равным 4500 с (при необходимости можно в дальнейшем изменить в нужную сторону). Весовой коэффициент для канала возмущения задать равным «0» для выполнения первого этапа работы.

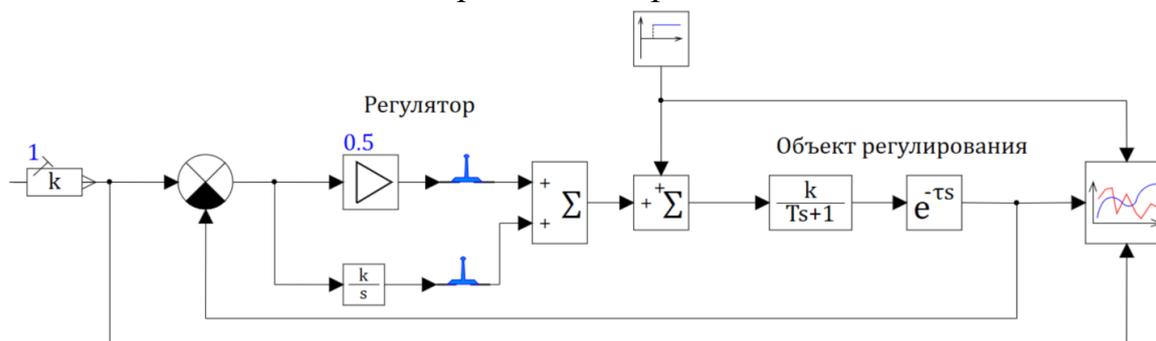


Рис. 21. Структурная схема моделируемой АСР

Характеристики объекта и первое приближение настроек регулятора приведены в табл. 7.

Таблица 7

Исходные данные для лабораторной работы № 6

№ вар.	Параметры объекта			Начальное приближение параметров ПИ-регулятора		Требования к переходному процессу по каналу задания
	K	T	τ	K_{Π}	$K_{\text{И}}$	
1	24,0	400	120	0,10	0,0004	$\varepsilon=0 \psi \geq 0,9 t_p \leq 650 \text{ с}$
2	24,0	375	50	0,41	0,0009	$\varepsilon=0 \sigma \leq 10 \% \psi \geq 0,9$
3	22,5	350	65	0,32	0,0007	$\varepsilon=0 \sigma \leq 8 \% t_p \leq 400 \text{ с}$
4	22,0	320	50	0,32	0,0007	$\varepsilon=0 \psi \geq 0,95 \sigma \leq 5 \%$
5	23,0	310	70	0,29	0,0005	$\varepsilon=0 \psi \geq 0,95 t_p \leq 400 \text{ с}$
6	23,5	330	80	0,22	0,0003	$\varepsilon=0 \sigma \leq 10 \% t_p \leq 600 \text{ с}$
7	25,0	340	90	0,22	0,0003	$\varepsilon=0 \sigma \leq 10 \% \psi \geq 0,95$
8	19,8	360	100	0,23	0,0004	$\varepsilon=0 \sigma \leq 10 \% \psi \geq 0,95$
9	22,0	370	130	0,20	0,0001	$\varepsilon=0 \sigma \leq 10 \% \psi \geq 0,90$
10	22,5	390	110	0,19	0,0005	$\varepsilon=0 \sigma \leq 10 \% t_p \leq 500 \text{ с}$
11	23,2	410	100	0,25	0,0006	$\varepsilon=0 \sigma \leq 10 \% \psi \geq 0,90$
12	23,8	395	90	0,23	0,0004	$\varepsilon=0 \sigma \leq 10 \% t_p \leq 500 \text{ с}$

2. Настройка АСР

На первом этапе работы анализируется процесс по каналу задания. После получения переходного процесса при первом приближении ПИ-регулятора, определить прямые оценки качества переходного процесса, сравнить их с требованиями к системе. При необходимости выполнить поэтапную итерационную настройку регулятора:

- при фиксированном значении $K_{и}$ уменьшать, затем увеличивать значение $K_{п}$, подобрать динамику изменения $K_{п}$ в сторону достижения требований к системе;
- при фиксированном значении $K_{п}$ уменьшать, затем увеличивать значение $K_{и}$, подобрать динамику изменения $K_{и}$ в сторону достижения требований к системе.

После получения переходного процесса, удовлетворяющего требованиям, определить все прямые оценки качества, включить в отчет в табличном виде с оценками, полученными при первом приближении настроек регулятора (табл. 8). Сделать вывод о влиянии пропорциональной и интегрирующей составляющих закона регулирования на вид переходной характеристики.

Таблица 8

Прямые оценки качества переходных процессов по каналу задания

№ п/п	Оценка качества	Переходный процесс по каналу задания при начальном приближении настроек	Переходный процесс по каналу задания после ручной настройки	Требования к системе
1	Статическая ошибка			
2	Максимальная динамическая ошибка			
3	Перерегулирование			
4	Степень затухания			
5	Время регулирования			
6	Период колебаний			
7	Время достижения первого максимума			
8	Число колебаний			

3. Исследование влияния закона регулирования на качество переходного процесса по каналу возмущения

После настройки ПИ-регулятора весовой коэффициент для канала возмущения задать равным «1» для выполнения второго этапа работы.

Величину возмущения задать $f(t)=5$ в момент времени $t=2200$ с. С использованием ключей смоделировать сначала работу П-регулятора, а затем И-регулятора, определить прямые оценки качества для переходных процессов по каналу возмущения, представить их в табличном виде (табл. 9).

Таблица 9

Прямые оценки качества переходных процессов по каналу возмущения

№ п/п	Оценка качества	ПИ-регулятор	П-регулятор	И-регулятор
1	Статическая ошибка			
2	Максимальная динамическая ошибка			
3	Перерегулирование			
4	Степень затухания			
5	Время регулирования			
6	Период колебаний			
7	Время достижения первого максимума			
8	Число колебаний			

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные.
3. Порядок выполнения работы (включая рисунки структурных схем АСР, графики полученных зависимостей).
4. Расчет оценок качества.
5. Анализ полученных результатов.
6. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. Что называется запаздыванием? Запишите передаточную функцию элементарного звена, имитирующего запаздывание объекта регулирования.
2. Приведите примеры физических объектов, которые описываются звеном запаздывания? Объясните, почему выбраны именно эти объекты.
3. Запишите эквивалентные передаточные функции АСР по каналам задания и возмущения.

4. Каким образом изменяется характер переходных процессов по каналу возмущения при использовании разных законов регулирования? Какой закон является предпочтительным?

7. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ И В ПЛОСКОСТИ КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

Цель работы: установить взаимосвязь между характером расположения корней характеристического уравнения и устойчивостью АСР, ее качеством (быстродействием, степенью затухания переходных процессов).

Необходимое и достаточное условие устойчивости АСР

Первым требованием, предъявляемым к системам управления, является ее устойчивость.

Система называется *устойчивой*, если после нанесения и снятия возмущения, она возвращается в состояние равновесия. Степень затухания переходных процессов в устойчивых системах находится в интервале $0 < \psi \leq 1$.

Система называется *неустойчивой*, если после нанесения и снятия возмущающих воздействий, она неограниченно удаляется от состояния равновесия или совершает вокруг него колебания с возрастающей амплитудой.

Пусть система описывается передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n}, \quad (15)$$

тогда необходимым условием устойчивости является положительность коэффициентов знаменателя передаточной функции (15).

Достаточным условием устойчивости является отрицательность вещественных корней характеристического уравнения системы:

$$a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n = 0, \quad (16)$$
$$p > 0.$$

Если характеристическое уравнение не имеет вещественных корней, то необходимым условием устойчивости является отрицательность вещественных частей комплексных корней характеристического уравнения.

Таким образом, если корни характеристического уравнения отметить на комплексной плоскости, то для устойчивости системы достаточно, чтобы все корни лежали слева от мнимой оси (рис. 22) [1, 3].

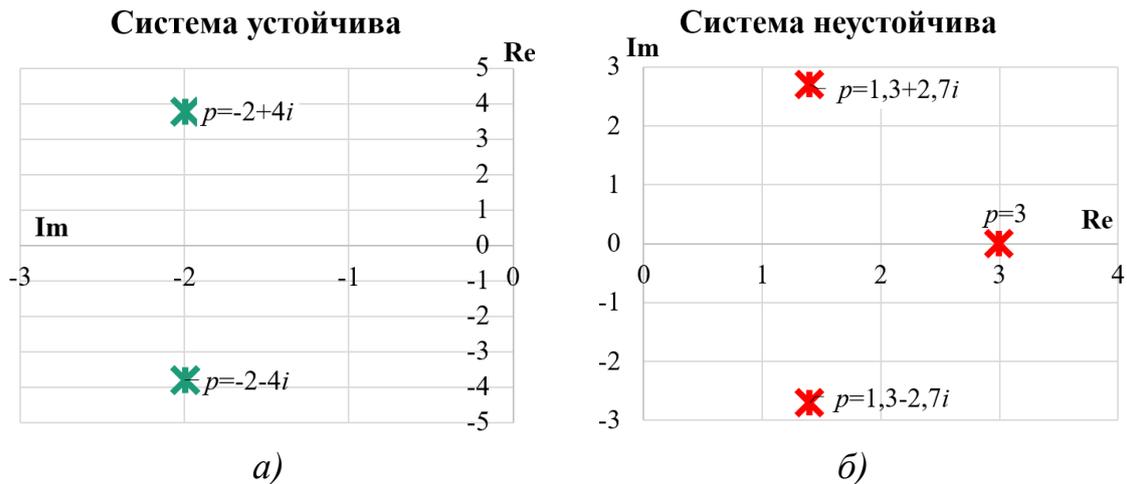


Рис. 22. Картина расположения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости

Порядок выполнения работы

1. Определение переходных характеристик

1. Смоделировать исследуемую систему (рис. 23).

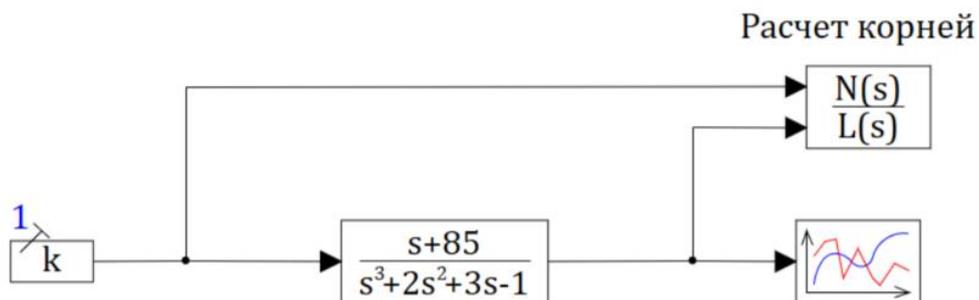


Рис. 23. Структурная схема для исследования устойчивости АСР

Для описания модели объекта выбрать «Передаточную функцию общего вида» вкладки «Динамические».

Для расчета корней характеристического уравнения системы следует выбрать блок «Построение передаточных функций» вкладки «Анализ и оптимизация».

2. Задание параметров передаточной функции системы осуществляется в общем виде в соответствии с выражением:

$$W(P) = \frac{K}{\sum_{i=1}^n a_i \cdot P^i + a_0}, K=1. \quad (17)$$

В строке «Коэффициенты числителя» задать значение «1». В строке «Коэффициенты знаменателя» задать значения в соответствии с вариантом (табл. 10) через пробел начиная с a_0 для порядка системы $N=2$. После этого построить переходную характеристику системы.

Таблица 10

Исходные данные для лабораторной работы

№ варианта	N	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
1	2	104	481	9615	—	—
	3	8.25	28.8	75	62.5	—
	4	8.42	-26.08	39.95	39.95	24.51
2	2	57	431	4310	—	—
	3	5.63	11.3	252	62.5	—
	4	10	59	328	1285	8790
3	2	9	90	300	—	—
	3	1.167	-8.33	-62.5	-208.3	—
	4	11	53	162	292	208
4	2	114	1724	34460	—	—
	3	12	-950	1270	25840	—
	4	4	16	80	160	150
5	2	1	20	100	—	—
	3	2.54	59.9	520	1200	—
	4	1.167	-8.33	36.9	-200	2000
6	2	1	30	9900	—	—
	3	3	-15	500	1200	—
	4	2.5	25	250	250	250
7	2	28	123	853	—	—
	3	2	0	280	3800	—
	4	31	82	305	583	420
8	2	1	0	1	—	—
	3	14	80	170	500	—
	4	1	-20	100	2000	6800
9	2	2	14	52	—	—
	3	2	18	120	1200	—
	4	1	20	125	1400	2000
10	2	2	22	118	—	—
	3	3	25	114	980	—
	4	5	24	98	650	850
11	2	6	62	102	—	—
	3	8	70	104	720	—

№ варианта	N	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
	4	2	78	121	780	820
12	2	10	82	85	—	—
	3	1	28	128	720	—
	4	3	21	120	800	2000

2. Определение корней характеристического уравнения

2.1. Двойным нажатием левой кнопки мыши открыть блок «Построение передаточных функций». Открывшееся окно имеет вид (рис. 24). Корни характеристического уравнения представлены в строке «Полюсы (корни уравнения $L(s)=0$)». Для системы, выбранной в качестве примера, найдено три корня (один вещественный и два комплексных): $p_1=0.28$; $p_2=-1.14+1.53i$; $p_3=-1.14-1.53i$.

Название	Формула
Числитель W(s)	[[0]]
Знаменатель W(s)	[[[-1, 3, 2, 1]]]
Нули (корни уравнения N(s) = 0)	[[[]]]
Полюсы (корни уравнения L(s) = 0)	[[[0.2756822037+0i, -1.137841102+1.527312251i, -1.137841102-1.527312251i]]]
Матрица A (собственная матрица)	[[[0, 1, 0]; [0, 0, 1]; [1, -3, -2]]]
Матрица B (матрица входов)	[[[0]; [0]; [0]]]
Матрица C (матрица выходов)	[[[85, 1, 0]]]
Матрица D (матрица обхода)	[[[0]]]

Рис. 24. Окно свойств блока «Определение передаточной функции»

Так как первый корень является вещественным положительным, рассматриваемая система является неустойчивой.

2.2. Зафиксировать полученный результат, с помощью пакета MS Excel сформировать картину расположения корней на комплексной плоскости.

3. Расчет оценок качества переходных процессов

Для устойчивых систем регулирования определить прямые оценки качества переходных процессов.

4. Выводы

По результатам выполненной работы сделать выводы:

- о связи между характером расположения корней характеристического уравнения в комплексной плоскости и устойчивостью системы;

- о связи между расположением корней в комплексной плоскости и быстродействием системы;
- о связи между расположением корней характеристического уравнения в комплексной плоскости и степенью затухания переходных процессов для устойчивых систем.

5. Индивидуальное задание

Повторить пп. 2–4 для систем с порядком $N=3$ и $N=4$ (см. табл. 10).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные.
3. Порядок выполнения работы (включая рисунки структурной схемы АСР, графики полученных зависимостей, картины расположения корней характеристического уравнения). Результаты расчета корней и определения переходных характеристик сгруппировать по системам.
4. Расчет оценок качества (п. 3).
5. Анализ полученных результатов, выводы.
6. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте необходимое и достаточное условие устойчивости АСР.
2. Как связано между собой расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости и степень затухания переходного процесса.
3. Почему устойчивость системы определяется вещественной частью корней характеристического уравнения? Что определяется вещественной частью корней?
4. Каким образом можно изменить характер устойчивости на противоположный для системы, описываемой передаточной функцией $W = \frac{1}{5P - 1}$ без изменения параметров системы?

8. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНОГО КРИТЕРИЯ МИХАЙЛОВА

Цель работы: изучить критерий Михайлова, получить практические навыки их применения при машинной реализации на ЭВМ и наглядного представления.

Теоретические основы

Критерий Михайлова является частотным критерием устойчивости системы, в соответствии с которым об устойчивости судят по виду годографа Михайлова $M(i\omega)$, описываемого в комплексной плоскости. Уравнение для кривой $M(i\omega)$ получают путем замены $P=i\omega$ в характеристическом уравнении.

Критерий основан на использовании необходимого и достаточного условия устойчивости – положительности вещественных частей корней характеристического уравнения. При этом известно, что характеристический полином степени n не будет иметь корней в правой части комплексной плоскости, если угол поворота годографа при изменении частоты ω от 0 до ∞ составляет $n\frac{\pi}{2}$. Если же характеристическое уравнение будет иметь l корней с положительной вещественной частью, то им будет соответствовать сумма углов поворотов $-l\frac{\pi}{2}$, при этом сумма углов поворотов для оставшихся корней будет равна $(n-l)\frac{\pi}{2}$, тогда общий угол поворота вектора кривой при изменении частоты ω от 0 до ∞ будет равен $n\frac{\pi}{2} - l\pi$. Тогда критерий устойчивости формулируется следующим образом: для того, чтобы система порядка n была устойчивой годограф Михайлова должен, начинаясь на положительной вещественной полуоси, проходить против часовой стрелки последовательно n квадрантов комплексной плоскости, нигде не обращаясь в нуль [1].

Порядок выполнения работы

1. Определение переходных характеристик

1. Собрать структурную схему исследуемой системы (рис. 25).

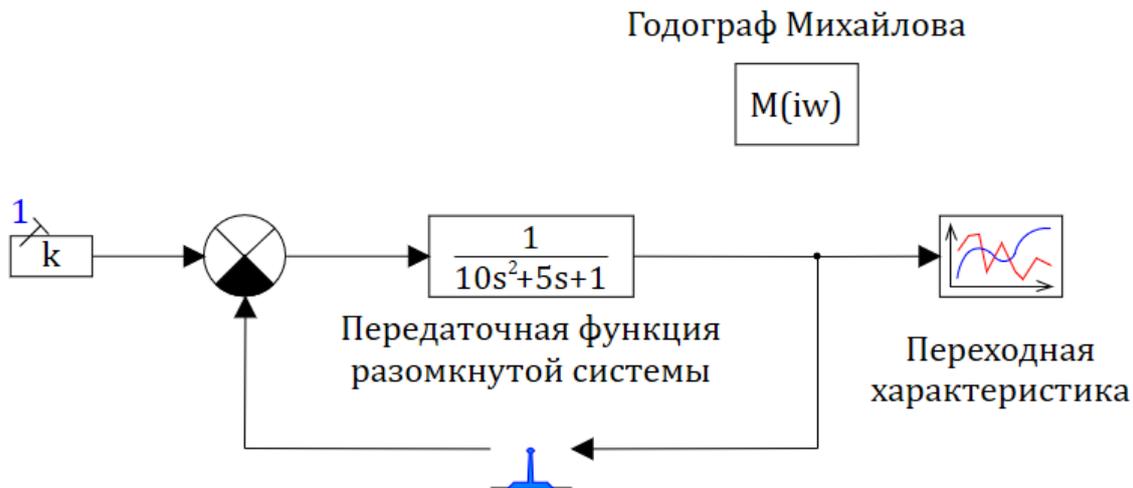


Рис. 25. Структурная схема для исследования устойчивости АСР (критерий Михайлова)

Для описания модели объекта выбрать «Передаточную функцию общего вида» вкладки «Динамические».

Для удобства замыкания-размыкания отрицательной обратной связи в ее цепь установлен ключ (Панель «Ключи»), который с помощью свойства «Значение» меняет состояние с замкнутого (значение «Да») на разомкнутое (значение «Нет»).

Блок для построения годографа Михайлова следует взять с вкладки «Анализ и оптимизация». Подключение его к системе не требуется. Передаточные функции разомкнутой системы приведены в табл. 11.

Таблица 11

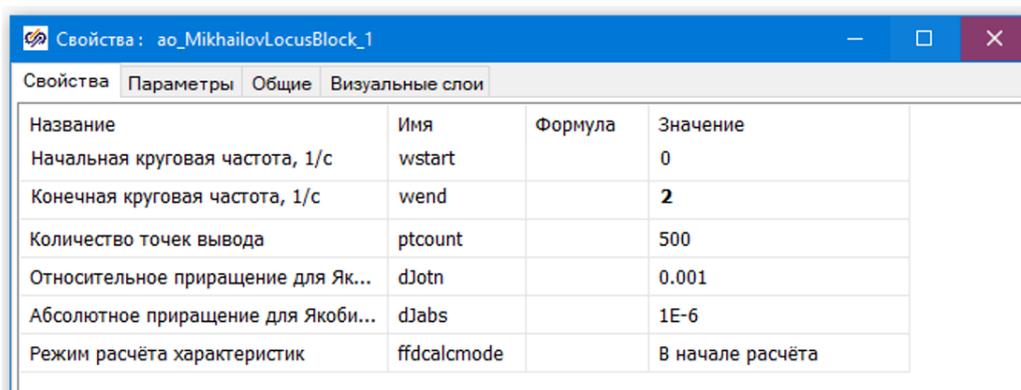
Исходные данные для лабораторной работы № 8

№ варианта	N	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1	5	1	16	80	160	150	200
2	5	4	16	80	160	200	320
3	5	2	18	82	180	155	202
4	5	10	52	170	280	290	208
5	5	1	5	15	30	36	37
6	5	1	5	15	30	40	100
7	5	2	5	15	25	25	12
8	5	1	6	20	40	55	42
9	5	2	24	92	150	120	200
10	5	1	28	90	155	145	250
11	5	3	32	86	170	158	300
12	5	5	48	88	165	190	150

2. Построение годографа Михайлова и переходных процессов для замкнутой и разомкнутой систем

2.1. В работе следует определить устойчивость замкнутой и разомкнутой системы. Для определения устойчивости разомкнутой системы ключ размыкается.

После этого нажатием правой кнопки мыши на блок «Годограф Михайлова» открыть свойства блока. В строке «Начальная круговая частота» указать значение 0 с^{-1} , в строке «Конечная круговая частота» – значение 2 с^{-1} (рис. 26). После этого система инициализируется и запускается расчет. При необходимости следует увеличить время расчета переходного процесса.



Название	Имя	Формула	Значение
Начальная круговая частота, 1/с	wstart		0
Конечная круговая частота, 1/с	wend		2
Количество точек вывода	ptcount		500
Относительное приращение для Якоби...	dJotn		0.001
Абсолютное приращение для Якоби...	dJabs		1E-6
Режим расчёта характеристик	ffdcalcmode		В начале расчёта

Рис. 26. Структурная схема для исследования устойчивости АСР (критерий Михайлова)

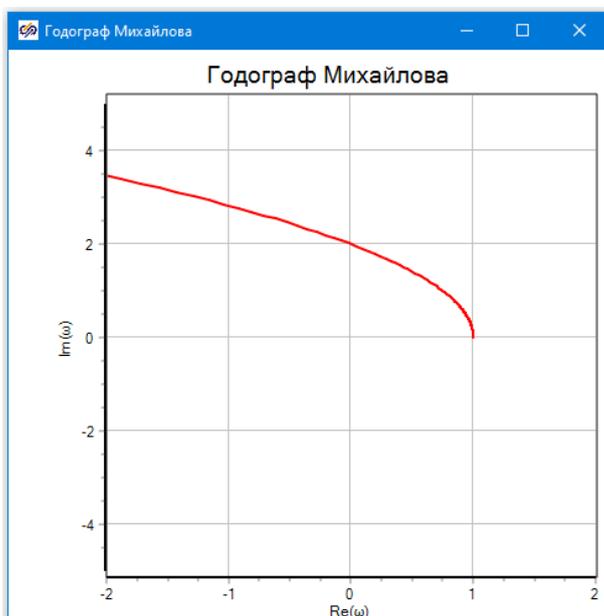


Рис. 27. Структурная схема для исследования устойчивости АСР (критерий Михайлова)

Сохранить полученные графики переходного процесса и годографа Михайлова. При необходимости откорректировать координаты комплексной плоскости таким образом, чтобы хорошо просматривалось расположение годографа относительно начала координат (рис. 27). По характеру годографа сделать вывод об устойчивости системы.

2.2. На следующем этапе систему следует разомкнуть и построить переходную характеристику и годограф Михайлова для разомкнутой системы.

3. Ручное построение годографа Михайлова

Для замкнутой АСР записать эквивалентную передаточную функцию. Для полученной системы записать уравнение кривой Михайлова, выделить действительную и мнимую часть, построить годограф на комплексной плоскости. Для расчета и построения допускается использование программных пакетов MS Excel, Mathcad.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные.
3. Порядок выполнения работы (включая рисунки структурной схемы АСР, графики полученных переходных характеристик и годографов для замкнутой и разомкнутой систем).
4. Расчет оценок качества для устойчивых систем.
5. Ручное построение годографа Михайлова для замкнутой системы.
6. Анализ полученных результатов, выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте критерий устойчивости Михайлова.
2. Изобразите эскизы годографов Михайлова для устойчивых систем порядка $n=1; 2; 3; 4; 5; 6$.
3. Сколько положительных вещественных корней (комплексных и вещественных) имеет характеристическое уравнение пятого порядка, если известно, что годограф Михайлова поворачивает на угол $\pi/2$ при изменении частоты от ω от 0 до ∞ с⁻¹.

9. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАГРЕВАНИЯ (ТЕРМОРЕГУЛЯТОР)

Цели работы:

- разработать математическую модель нагревателя;
- выполнить моделирование системы регулирования на основе двухпозиционного реле, проанализировать свойства модели и влияние параметров АСР на работу системы.

Порядок выполнения работы

1. Вывод дифференциального уравнения, описывающего процесс нагрева объекта

1. Изменение внутреннего тепла в нагревателе dQ при изменении температуры на $d\theta$ определяется разностью между подводимым теплом $dQ^+/d\theta$ и теплом, отдаваемым в окружающую среду $dQ^-/d\theta$:

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{dQ^+}{d\theta} - \frac{dQ^-}{d\theta}. \quad (18)$$

2. Известно, что количество тепловой энергии dQ определяется изменением температуры $d\theta$:

$$dQ = c \cdot m \cdot d\theta, \quad (19)$$

где m – масса нагревателя, кг; c – удельная теплоемкость нагревателя, Дж/(кг·°С).

3. Количество тепла, отдаваемое в окружающее пространство в единицу времени пропорционально разности между температурой тела и температурой окружающей среды θ_{oc} :

$$\frac{dQ^-}{dt} = k(\theta - \theta_{oc}), \quad (20)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Учитывая, что подводимое в единицу времени тепло есть мощность, а также соотношения (19) и (20), уравнение (18) можно записать следующим образом:

$$c \cdot m \frac{dQ}{dt} = N \cdot u(\theta) - k(\theta - \theta_{oc}) \quad (21)$$

или

$$\frac{cm}{k} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta = \frac{N}{k} \cdot u(\theta) + \theta_{oc}, \quad (22)$$

где $T=c \cdot m/k$ – постоянная времени нагревателя, с; $u(\theta)$ – управляющая функция, отражающая включение и выключение нагревателя в зависимости от температуры θ :

$$u = \begin{cases} 1, & \text{для режима нагревания,} \\ 0, & \text{для режима охлаждения.} \end{cases} \quad (23)$$

В уравнениях (20) и (21) неизвестна величина коэффициента пропорциональности k , который учитывает большое число факторов, влияющих на процесс теплообмена объекта с окружающей средой при остывании. К ним можно отнести конвективный теплообмен, инфракрасное излучение и т.д. Учесть все эти факторы достаточно сложно, поэтому обычно используются экспериментальные данные.

Допуская что коэффициент пропорциональности k является постоянным и одинаковым в режимах нагревания и охлаждения, его можно определить из экспериментальных данных: без подвода тепла нагреватель остывает от температуры $\theta_{нач}$ до температуры $\theta_{кон}$ в соответствии с законом:

$$\theta_{кон} = \theta_{нач} \cdot e^{-\frac{t_{охл}}{T}}, \quad (24)$$

где $t_{охл}$ – время охлаждения, с; T – постоянная времени нагревателя, с. Тогда:

$$T = \frac{t_{охл}}{\ln\left(\frac{\theta_{кон}}{\theta_{нач}}\right)}. \quad (25)$$

Тогда из уравнения (22) можно найти коэффициент пропорциональности:

$$T = \frac{c \cdot m}{k} \Rightarrow k = \frac{c \cdot m}{T}. \quad (26)$$

Дифференциальное уравнение процесса нагревания на основе уравнения (22):

$$T \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta = b_1 \cdot u(\theta) + b_0, \quad (27)$$

где коэффициенты правой части $b_1 = \frac{N}{k}$, $b_0 = \theta_{oc}$.

2. Моделирование регулятора

1. В качестве регулятора в лабораторной работе используется двухпозиционное реле с зоной возврата. Статическая характеристика реле показана на рис. 28. Зона возврата позволяет выполнять переключение

между позициями реле при разных значениях входного сигнала. На рис. 28 видно, что переключение из режима Y_2 в режим Y_1 будет выполнено, когда $\varepsilon=b$, а из режима Y_1 в режим Y_2 – когда $\varepsilon=a$. Таким образом положение реле (Y_1 или Y_2) внутри зоны возврата (когда $a<\varepsilon<b$) будет зависеть от того, увеличивается или уменьшается значение ε в этот момент, то есть от знака производной ε' .

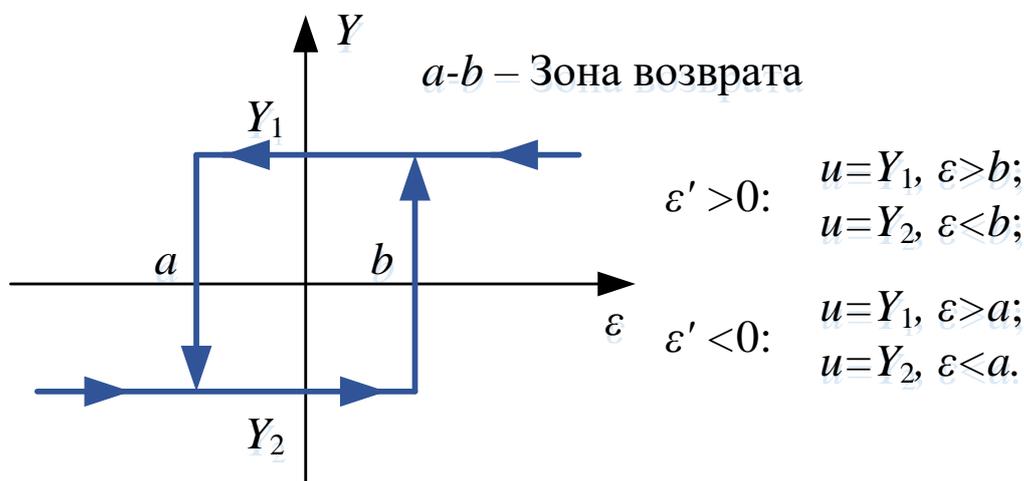


Рис. 28. Статическая характеристика двухпозиционного реле с зоной возврата

2. Величина ε определяет допустимую погрешность регулирования. Например, если $a = -10$, $b=10$, то температура нагревателя будет изменяться в диапазоне ± 10 °С. В лабораторной работе $|a|=|b|=\Delta_{\text{доп}}$.

3. Так как реле будет выполнять операцию включения/выключения, следует задать $Y_1=0$, $Y_2=1$ (рис. 29).

Свойства : ReleGisterezis_1			
Свойства			
Общие			
Порты			
Визуальные слои			
Название	Имя	Формула	Значение ▲
Нижняя граница переключения	a		[-10]
Нижнее значение функции	Y1		[0]
Начальные условия (0;1)	y0		[0]
Верхняя граница переключения	b		[10]
Верхнее значение функции	Y2		[1]
Исполнять на промежуточных шагах	exec_bad_s...		<input checked="" type="checkbox"/> Да

Рис. 29. Статическая характеристика двухпозиционного реле с зоной возврата

3. Моделирование системы регулирования

1. Собрать одноконтурную систему регулирования таким образом, чтобы получилась одноконтурная система автоматического регулирования (рис. 30).

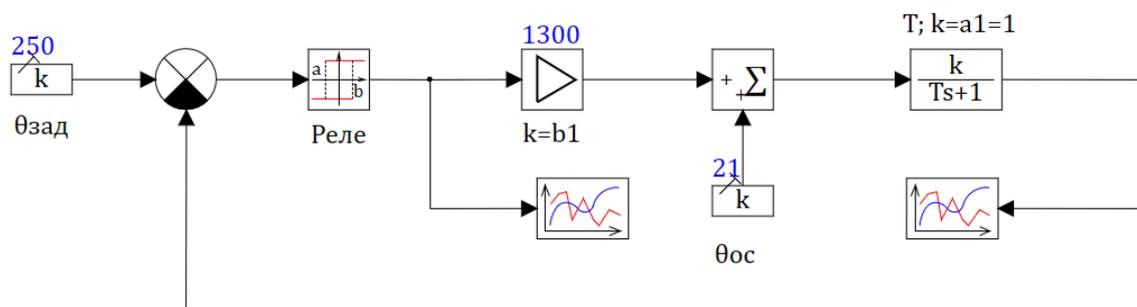


Рис. 30. Структурная схема релейной АСР температуры

2. Задать параметры системы в соответствии с рассчитанными значениями. Исходные данные представлены в табл. 12.

Таблица 12

Исходные данные для лабораторной работы № 9

№ вар.	N, Вт	m, кг	c, Дж/(кг·°C)	S, °C	$\Delta_{\text{доп}}$, °C	$\theta_{\text{ос}}$, °C	Экспериментальные данные		
							$\theta_{\text{нач}}$, °C	$\theta_{\text{кон}}$, °C	$t_{\text{охл}}$, Ч
1	1000	1,5	460	250	10	19	20	200	0,6
2	1100	1,2	420	280	15	18	15	200	0,8
3	800	2,0	450	350	20	20	10	200	0,5
4	1200	1,6	430	300	15	21	20	220	0,7
5	1050	1,7	440	320	10	22	10	210	0,5
6	1150	1,4	450	150	5	23	20	200	0,6
7	1000	1,6	480	200	10	25	15	205	0,8
8	900	1,5	470	250	12	40	20	200	0,7
9	800	1,2	400	200	16	25	20	200	0,5
10	950	0,8	380	220	15	-2	15	230	0,4
11	980	1,0	420	230	18	-10	18	250	0,6
12	1050	1,5	450	225	20	0	16	240	0,8

3. Графики управляющего воздействия ($u(t)$) и изменения температуры нагревателя ($\theta(t)$) с помощью меню «Свойства» назвать соответственно, «Управление» и «Температура». Если схема собрана корректно, графики должны иметь вид, как показано на рис. 31.

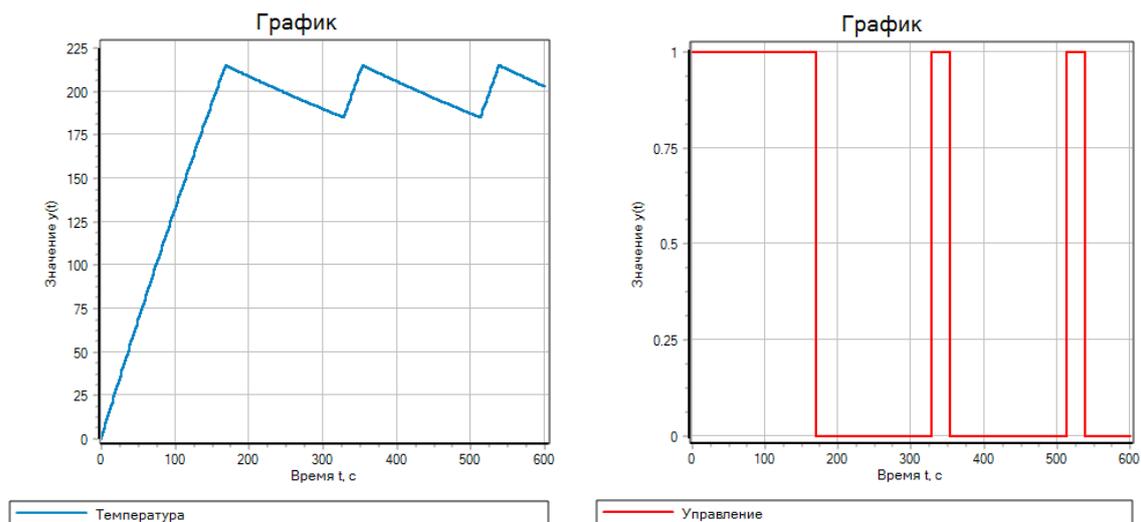


Рис. 31. Графики изменения температуры (слева) и управляющего воздействия (справа)

3. Сохранить полученные графики управляющего воздействия и изменения выходной величины.

4. Выполнить моделирование работы системы регулирования процесса нагревания для заданных значений температур S , $S+10$, $S+20$ (для фиксированного значения мощности), и для различных значений мощности: N , $0,9N$, $1,2N$ (для заданного значения поддерживаемой S).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные.
3. Вывод дифференциального уравнения, передаточную функцию объекта регулирования, расчет коэффициентов уравнения.
4. Порядок выполнения работы (включая рисунки структурной схемы САР, график полученных переходных характеристик для всех значений N , S).
5. Анализ полученных результатов, выводы.
6. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. К какому типу регулятора относится реле?
2. Для чего нужна зона возврата? Что обеспечивается изменением границ этой зоны?
3. Что называется статической характеристикой реле? Изобразите статические характеристики идеального двухпозиционного реле и

двухпозиционного реле с зоной возврата, объясните различия в их работе.

4. Какое влияние оказывает изменение мощности на характер график выходного сигнала?

10. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В ПРОМЫШЛЕННОМ РЕЗЕРВУАРЕ

Цели работы:

- разработать математическую модель одноконтурной системы регулирования уровня в резервуаре;
- выполнить моделирование работы системы с различными типами регуляторов, сравнить алгоритмы их работы.

Порядок выполнения работы

1. Вывод уравнения, описывающего процесс нагрева объекта

1. В технологическом аппарате (рис. 32) требуется поддерживать постоянным уровень h_3 рабочей среды в соответствии с заданными требованиями к автоматической системе регулирования.

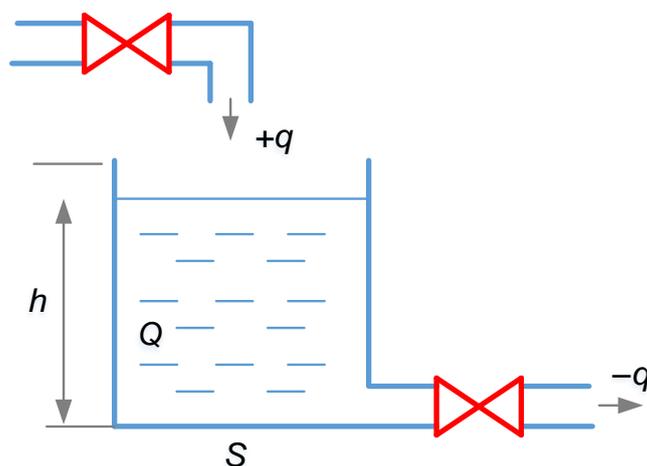


Рис. 32. Схема технологического процесса

2. Объем воды в резервуаре $Q = h \cdot S$. Тогда изменение объема будет

$$\frac{dQ}{dt} = S \frac{dh}{dt} = q^+ - q^- ,$$

где $q^+ = \frac{dQ^+}{dt}$ и $q^- = \frac{dQ^-}{dt}$ приток (подача) и расход воды соответственно.

Тогда уровень воды $h(t)$ определяется соотношением:

$$h(t) = \frac{1}{S} \int_0^t (q^+ - q^-) dt .$$

Коэффициент усиления интегратора, описывающего работу резервуара, определяется площадью резервуара: $k_{06}=1/S$.

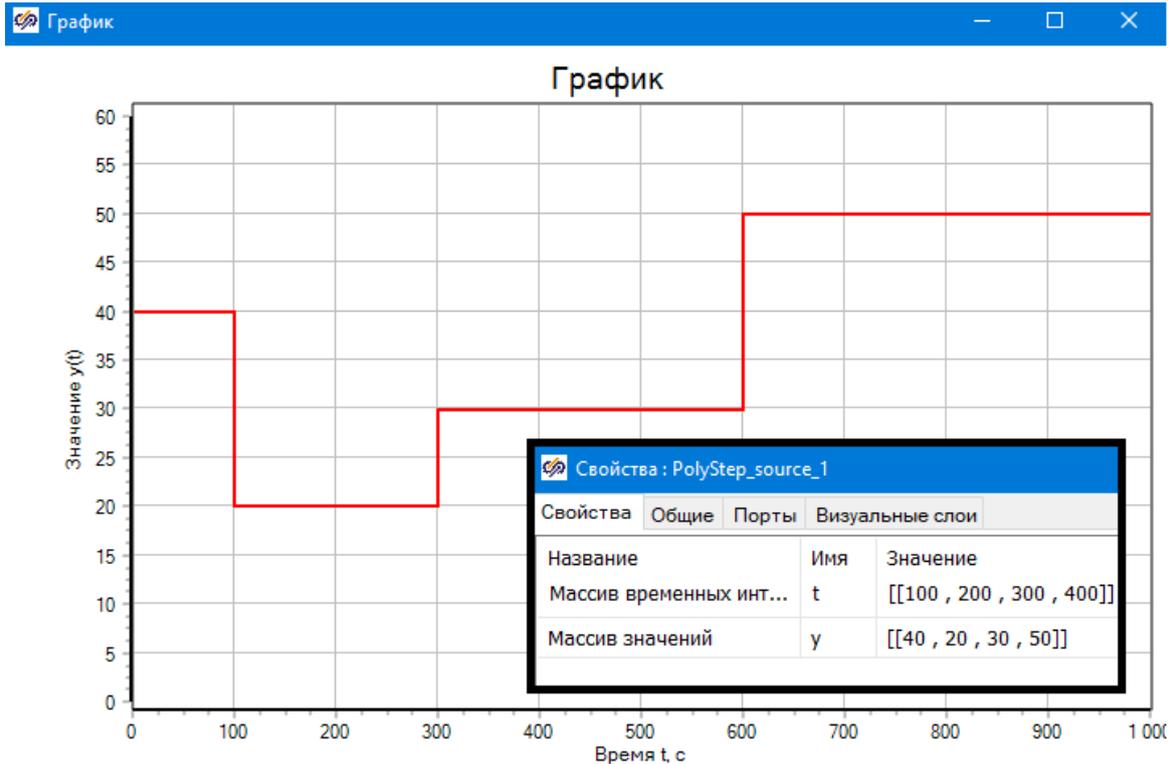


Рис. 35. Моделирование кусочно-постоянного возмущения

2.4. Требуемое значение уровня задается с помощью блока «Ступенька» и соответствует исходным данным. Выходной сигнал элемента сравнения (ошибка регулирования $\varepsilon = h - h_3$) подается на вход регулятора.

3. Моделирование работы системы с аналоговым регулятором

3.1. В соответствии с индивидуальным вариантом задать параметры объекта и первое приближение параметров ПИ-регулятора (см. табл. 13).

Таблица 13

Исходные данные для лабораторной работы № 10

№ вар.	h_3 , м	S , м ²	Возмущение (временной массив/ массив значений)	Требования к качеству	Параметры регулятора
1	3,0	100	0 20 25 30 100 200 300 400	$\varepsilon = 0$; $t_p \leq 3$ с; $\sigma \leq 28$ %; $\psi \geq 0,82$	$k_n = 3$; $k_i = 0,01$
2	2,6	80	0 20 25 30 120 240 350 460	$\varepsilon = 0$; $t_p \leq 50$ с; $\sigma \leq 50$ %; $\psi \geq 0,8$	$k_n = 5$; $k_i = 2$
3	2,8	110	0 21 25 35 120 240 350 460	$\varepsilon = 0$; $t_p \leq 18$ с; $\sigma \leq 15$ %; $\psi \geq 0,86$	$k_n = 4,5$; $k_i = 2,1$
4	2,5	200	0 21 25 35 140 100 250 350	$\varepsilon = 0$; $t_p \leq 19$ с; $\sigma \leq 10$ %; $\psi \geq 0,92$	$k_n = 10$; $k_i = 1,5$
5	5,0	160	0 32 24 36 90 120 200 450	$\varepsilon = 0$; $t_p \leq 20$ с; $\sigma \leq 10$ %; $\psi \geq 0,91$	$k_n = 8$; $k_i = 1,6$
6	1,8	155	0 14 20 29 110 180 280 350	$\varepsilon = 0$; $t_p \leq 10$ с; $\sigma \leq 15$ %; $\psi \geq 0,9$	$k_n = 2$; $k_i = 0,8$

№ вар.	$h_3, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	Возмущение (временной массив/ массив значений)	Требования к качеству	Параметры регулятора
7	2,1	50	0 18 22 30 95 185 325 405	$\varepsilon = 0; t_p \leq 10 \text{ с};$ $\sigma \leq 14 \%; \psi \geq 0,93$	$k_{\text{п}}=5; k_{\text{и}}=10$
8	2,4	120	0 16 24 28 100 190 250 360	$\varepsilon = 0; t_p \leq 14 \text{ с};$ $\sigma \leq 8 \%; \psi \geq 0,92$	$k_{\text{п}}=20; k_{\text{и}}=15$
9	2,5	80	0 18 21 32 120 180 250 390	$\varepsilon = 0; t_p \leq 17 \text{ с};$ $\sigma \leq 8 \%; \psi \geq 0,89$	$k_{\text{п}}=18; k_{\text{и}}=14$
10	2,6	75	0 24 28 41 100 210 250 390	$\varepsilon = 0; t_p \leq 16 \text{ с};$ $\sigma \leq 9 \%; \psi \geq 0,85$	$k_{\text{п}}=10; k_{\text{и}}=12$
11	3,0	90	0 20 26 30 120 140 250 400	$\varepsilon = 0; t_p \leq 15 \text{ с};$ $\sigma \leq 8,5 \%; \psi \geq 0,87$	$k_{\text{п}}=16; k_{\text{и}}=16$
12	3,2	85	0 18 28 36 100 200 280 410	$\varepsilon = 0; t_p \leq 16 \text{ с};$ $\sigma \leq 9 \%; \psi \geq 0,86$	$k_{\text{п}}=19; k_{\text{и}}=14$

3.2. Определить прямые оценки качества полученного переходного процесса (см. Лабораторную работу № 2).

3.3. При необходимости откорректировать параметры ПИ-регулятора для обеспечения соблюдения требований к системе.

4. Моделирование работы системы с релейным регулятором

4.1. Заменить в структуре системы аналоговый регулятор на двухпозиционное реле с зоной возврата, а также добавить усилительное звено аналогично схеме, используемой в лабораторной работе № 9. Структурная схем АСР примет вид (рис. 36).

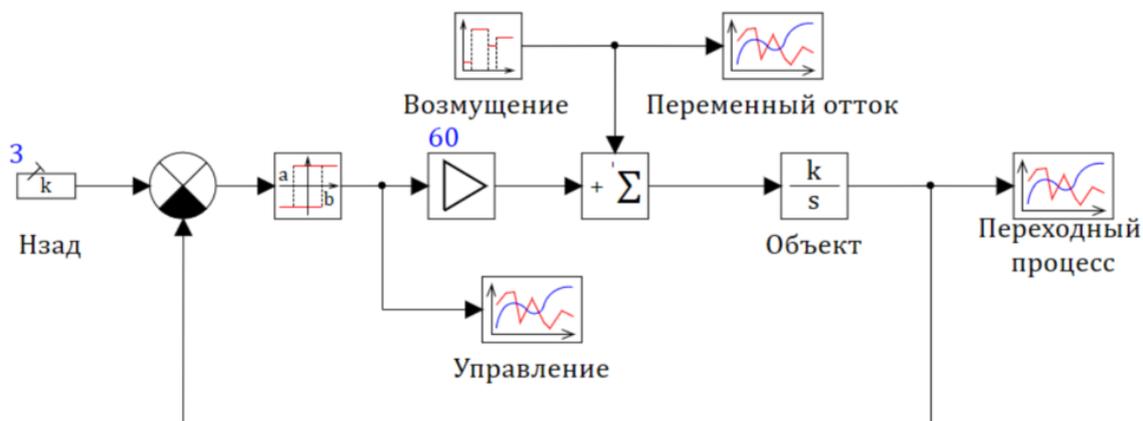


Рис. 36. Моделирование кусочно-постоянного возмущения

4.2. Выполнить настройку реле таким же образом, как в лабораторной работе № 9 (см. рис. 29). Точность поддержания уровня установить в размере $\pm 20 \%$ от заданного значения уровня.

4.3. Подобрать коэффициент усилителя таким образом, чтобы в период действия возмущения не допустить критического превышения/понижения уровня при минимально возможном числе переключений реле в единицу времени.

4.4. Для моделируемой системы определить параметры:

- диапазон колебания регулируемой величины;
- частота переключений регулятора в единицу времени.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные.
3. Вывод уравнения, описывающего работу объекта.
4. Вывод эквивалентной передаточной функции по каналу задания и по каналу возмущения.
5. Порядок выполнения работы (включая рисунки структурной схемы САР, ПИ-регулятора; графики полученных переходных характеристик).
6. Расчет прямых оценок качества переходных процессов для исходной и откорректированной систем.
7. Структурная схема системы с релейным регулятором, временные графики изменения возмущений и регулируемой величины с различными типами регуляторов.
8. Анализ полученных результатов, выводы о влиянии параметров настройки регулятора на качество работы системы, о целесообразности выбора того или иного типа регулятора.
9. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. Что в моделируемой системе является объектом управления, регулирующим воздействием, регулируемой величиной, возмущением?
2. Из каких соображений подбирается модель объекта управления? Каким элементарным звеном описывается резервуар по каналу «подача жидкости – уровень» и почему?
3. Какое влияние на работу системы оказывают параметры настройки ПИ-регулятора?
4. Каким образом на качество работы системы влияет коэффициент усиления пропорционального звена за реле?

11. НАСТРОЙКА АСР ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ ЦИГЛЕРА-НИКОЛЬСА

Цели работы:

- закрепление навыков идентификации элементов АСР;
- изучение алгоритма настройки регулятора методом незатухающих колебаний;
- получение навыков опытной настройки АСР.

Теоретические основы алгоритма

Суть метода заключается в том, что в работающей системе в регуляторе выключаются дифференциальная и интегральная составляющие, то есть реализуется только П-закон регулирования. На вход системы подается единичное ступенчатое воздействие. Коэффициент передачи П-регулятора последовательно увеличивается до тех пор, пока на выходе системы не установятся колебания с постоянной амплитудой и система не окажется на границе устойчивости. При этом фиксируются значения коэффициента передачи $k_{кр}$ и период колебаний $T_{кр}$. По найденным значениям $k_{кр}$ и $T_{кр}$ определяют параметры настройки регуляторов (см. табл. 14).

Таблица 14

Расчет параметров настройки типовых регуляторов

Закон регулирования	Параметры настройки		
	k_p	T_i	k_d
P	$0,55 k_{кр}$	—	—
PI	$0,45 k_{кр}$	$0,54 k_{кр} / T_{кр}$	—
PID (1 вариант)	$0,6 k_{кр}$	$1,2 k_{кр} / T_{кр}$	$0,7 k_{кр} T_{кр}$
PID (2 вариант)	$0,6 k_{кр}$	$0,5 T_{кр}$	$0,125 T_{кр}$

Порядок выполнения работы

1. Моделирование автоматической системы регулирования

1.1. В программе SimInTech смоделировать систему, структура которой показана на рис. 37. Моделирование регулятора выполнить аналогично лабораторной работе № 3.

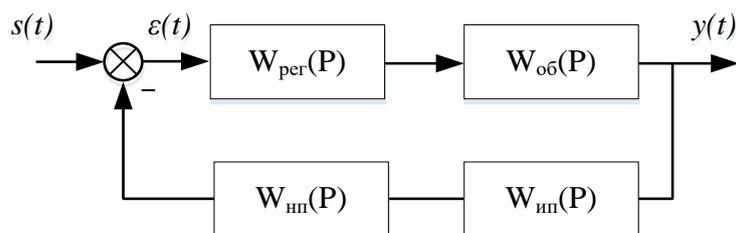


Рис. 37. Структурная схема АСР температуры

1.2. Параметры объекта задать в соответствии с исходными данными (см. табл. 15).

Таблица 15

Исходные данные к лабораторной работе № 11

№ варианта	Объект управления	Измерительный преобразователь температуры	Выходной сигнал нормирующего преобразователя, мА
1	$W_{об}(P) = \frac{2}{10P^2 + 4P + 1}$	ТЭП 1	0...5
2	$W_{об}(P) = \frac{3}{12P^2 + 4P + 1}$	ТЭП 2	0...20
3	$W_{об}(P) = \frac{5}{25P^2 + 3P + 1}$	ТЭП 3	0...20
4	$W_{об}(P) = \frac{1}{15P^2 + 2P + 1}$	ТЭП 4	0...20
5	$W_{об}(P) = \frac{4}{28P^2 + 12P + 1}$	ТЭП 5	4...20
6	$W_{об}(P) = \frac{2}{35P^2 + 10P + 1}$	ТЭП 6	0...5
7	$W_{об}(P) = \frac{3}{42P^2 + 12P + 1}$	ТПС 1	0...20
8	$W_{об}(P) = \frac{2}{25P^2 + 6P + 1}$	ТПС 2	0...5
9	$W_{об}(P) = \frac{8}{45P^2 + 7P + 1}$	ТЭП 2	4...20
10	$W_{об}(P) = \frac{2}{25P^2 + 5P + 2}$	ТЭП 4	4...20

№ варианта	Объект управления	Измерительный преобразователь температуры	Выходной сигнал нормирующего преобразователя, мА
11	$W_{об}(P) = \frac{1}{35P^2 + 10P + 7}$	ТЭП 5	0...20
12	$W_{об}(P) = \frac{2}{30P^2 + 8P + 5}$	ТЭП 6	0...20

1.3. Первичный измерительный преобразователь температуры $W_{ин}(P)$ описать аperiodическим звеном первого порядка. Коэффициент передачи определить по номинальной статической характеристике [4, 5] как отношение изменения выходного сигнала датчика (ЭДС/сопротивление) к вызвавшему его изменению температуры. Постоянную времени определить по экспериментальной кривой разгона (см. табл. 16).

Таблица 16

Данные для построения кривых разгона датчиков температуры

t, c	ТЭП 1	ТЭП 2	ТЭП 3	ТЭП 4	ТЭП 5	ТЭП 6	ТПС 1	ТПС 2
	$K(XA)$	$L(XK)$	$E(XKH)$	$S(ПП)$	$J(TЖК)$	$A(TBP)$	50M	100П
	0...600	0...600	0...200	0... 1300	0...300	300... 1000	0...150	0...400
0,0	19,472	21,878	21,347	20,873	20,912	16,136	31,170	34,652
0,5	25,239	32,592	28,700	23,336	21,662	19,281	35,031	38,975
1,0	30,771	42,104	41,334	27,344	24,661	23,596	44,098	46,295
1,5	42,052	58,012	65,715	34,122	29,892	25,397	53,237	53,629
2,0	70,255	94,555	98,606	47,713	36,804	34,026	61,446	61,192
2,5	120,655	161,151	163,336	68,638	48,658	44,173	68,032	66,762
3,0	197,189	253,985	224,853	116,540	64,280	60,650	74,074	71,393
3,5	252,068	276,774	237,520	174,229	79,997	109,037	79,105	76,307
4,0	271,962	283,751	243,006	208,156	97,531	210,260	83,718	80,567
4,5	275,871	282,671	244,121	221,509	118,323	257,590	87,858	84,766
5,0	277,582	280,936	247,891	229,647	148,420	279,365	91,288	88,424
5,5	277,274	281,106	248,669	237,409	178,789	290,436	94,608	91,744
6,0	277,131	281,776	246,843	237,847	210,145	292,287	97,322	94,938
6,5	277,430	283,429	245,548	238,092	244,984	291,809	100,044	97,719
7,0	277,453	284,685	244,755	241,308	260,995	291,212	102,006	100,086
7,5	277,653	284,260	244,162	243,002	266,743	291,495	102,531	100,315
8,0	277,706	284,055	243,653	245,169	271,317	292,110	102,649	100,737

1.4. Нормирующий преобразователь $W_{\text{нп}}(P)$ описать пропорциональным звеном. Коэффициент передачи определить как отношение изменения выходного сигнала постоянного тока к вызвавшему его изменению входного сигнала (ЭДС/сопротивление) в заданном диапазоне измеряемых температур.

2. Настройка регулятора, оценка качества переходных процессов

2.1. Выполнить настройку регуляторов, построить переходные характеристики для всех типов регуляторов *в одной системе координат*. Для этого щелкнуть по графику переходной характеристики правой кнопкой мыши и выполнить команду «Сохранить в текстовый файл». При этом полученная зависимость выходной величины от времени будет экспортирована в текстовый документ с расширением .txt. После этого данные можно импортировать в документ MS Excel, Origin или любой другой для построения графиков.

2.2. Для всех полученных переходных характеристик выполнить расчет прямых оценок качества переходных процессов, свести в одну таблицу.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Структурная схема системы в программе SimInTech.
3. Передаточные функции компонентов системы, порядок их определения.
4. Порядок определения значений $k_{\text{кр}}$ и $T_{\text{кр}}$ по графику переходной функции (система на границе устойчивости).
5. Результаты расчетов параметров настройки регуляторов в табличном виде.
6. Графики переходных процессов в системе для всех регуляторов в одной плоскости.
7. Результаты расчета прямых оценок качества переходных процессов в табличном виде.
8. Выводы по полученным результатам.
9. Ответы на контрольные вопросы

Контрольные вопросы

1. Каково назначение нормирующего преобразователя в системе?
2. Определение статической характеристики первичного измерительного преобразователя температуры.
3. Какие недостатки имеют рассмотренные типы регуляторов?

12. СИНТЕЗ АСР ДАВЛЕНИЯ В ДЕАЭРАТОРЕ

Цели работы:

- закрепление навыков идентификации компонентов АСР;
- получение опыта моделирования АСР давления на объектах теплоэнергетики;
- изучение методики машинной настройки регулятора.

АСР параметров деаэратаора

Деаэратор как объект управления имеет две регулируемые величины – давление и уровень.

Возмущающими воздействиями на давление являются расход и давление греющего пара, расход и температура конденсата. Влиянием уровня воды в баке на давление можно пренебречь. Возмущающими воздействиями на уровень являются расходы пара, конденсата и питательной воды. Регулирующим воздействием для стабилизации давления является расход греющего пара, а для стабилизации уровня – расход химически очищенной воды.

Динамика деаэратаора по давлению по каналу регулирования описывается дифференциальным уравнением первого порядка (28) и передаточной функцией апериодического звена (29):

$$T_{\delta} \frac{dP_{\delta}}{dt} + P_{\delta} = KD_n, \quad (28)$$

$$W(P) = \frac{K}{TP + 1}, \quad (29)$$

где P_{δ} – давление в деаэратаоре (регулируемая величина), D_n – расход пара (регулирующее воздействие), K – коэффициент передачи, T_{δ} – постоянная времени. Так как постоянная времени T_{δ} при испарении и конденсации пара имеет различные значения, то деаэратаор по давлению является нелинейным объектом, однако в рамках настоящей лабораторной работы этим можно пренебречь. Приближенно постоянная времени может быть определена как отношение объема парового пространства деаэратаора к объемному расходу пара в деаэратаор и, как правило, находится в пределах $T_{\delta} = 3 \div 6$ с.

Для регулирования давления применяется ПИ-регулятор, допустимое отклонение давления в стационарном режиме работы составляет не более 500 Па [6].

Регулирующим воздействием в АСР давления является расход пара $D_{п}$. Возмущающими воздействиями на давление пара в деаэратаоре являются расход конденсата $G_{к}$, его температура $\theta_{к}$ и давление греющего

пара P_n . Так как регулирующий клапан (РК) устанавливается на некотором расстоянии от головки деаэратора, то участок паропровода от РК до деаэратора также является элементом объекта управления и описывается апериодическим звеном с передаточной функцией $W_{ин}(P)$. Эти положения учтены при формировании структурной схемы АСР давления (рис. 38).

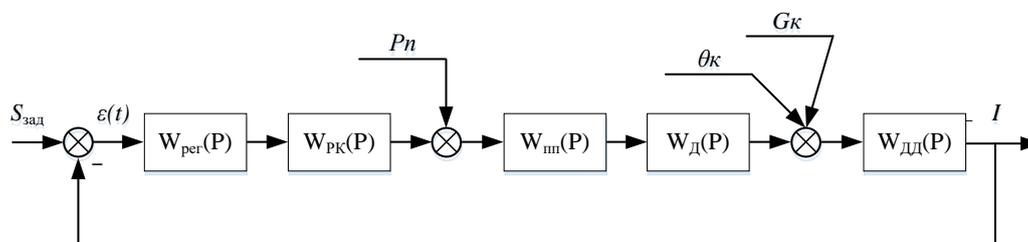


Рис. 38. Структурная схема АСР давления в деаэраторе

На схеме приняты обозначения:

$W_{пер}(P)$ – передаточная функция регулятора;

$W_{РК}(P)$ – передаточная функция регулирующего клапана;

$W_{ин}(P)$ – передаточная функция участка паропровода;

$W_{д}(P)$ – передаточная функция деаэратора по каналу «расход пара – давление в деаэраторе»;

$W_{дд}(P)$ – передаточная функция датчика давления.

Расходные характеристики регулирующих клапанов обычно определяются экспериментально. Пример расходной характеристики для шиберного клапана приведен в табл. 17.

Таблица 17

Расходная характеристика шиберного клапана

Q/Q_{max}	0,05	0,14	0,28	0,40	0,52	0,63	0,74	0,83	0,91	0,96	1,00
% ИМ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Регулирующий клапан описывается передаточной функцией пропорционального звена с коэффициентом передачи, определяемом по расходной характеристике для определенного диапазона изменения расхода:

$$W_{РК} = K_{РК} = \frac{\Delta Q}{\Delta \% ИМ}. \quad (30)$$

Передаточная функция участка трубопровода представляет собой модель апериодического звена:

$$W_{ин}(P) = \frac{1}{T_{ин} \cdot P + 1}, \quad (31)$$

где T_{III} – постоянная времени, определяемая выражением:

$$T_{III} = \frac{L \cdot Q_m \cdot \rho}{g \cdot f \cdot \Delta p}, \quad (32)$$

здесь L – протяженность участка трубопровода [м], Q_m – массовый расход среды [кг/с], ρ – плотность пара [кг/м³], $g=9,81$ м/с², f – площадь сечения трубопровода [м²], Δp – перепад давления на участке трубопровода [Па].

Коэффициент усиления K_{III} определяется как отношение давления в трубопроводе P_{max} к площади прохода при максимально открытой заслонке S_{max} [Па/м²].

Передаточную функцию датчика давления в рамках индивидуального задания принять в следующем виде:

$$W_{дд} = \frac{1}{0.63P + 1}. \quad (33)$$

Порядок выполнения работы

1. Общие положения

В режиме «Оптимизация» программа выполняет расчет параметров регулятора. При выполнении работы формируется две модели – синтезируемая и эталонная (отвечает требованиям к системе). Синтезируемая модель создается на основе желаемого закона регулирования и заданного объекта управления, эталонная формируется с учетом заданных критериев оптимизации. Расчет параметров регулятора выполняется интерполяционным методом.

2. Моделирование системы

2.1. Моделирование объекта

Модель участка регулирования формируется с помощью субмодели (см. Лабораторную работу № 3). Структура показана на рис. 39.

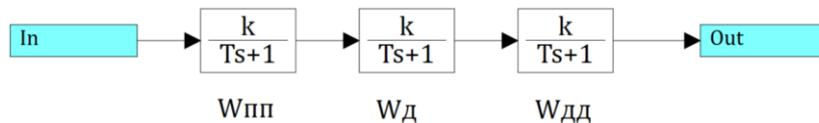


Рис. 39. Структура субмодели (участок паропровода – деаэратор – датчик давления)

Параметры звеньев определяются с помощью исходных данных, приведенных в табл. 18.

Таблица 18

Исходные данные к лабораторной работе № 12

№ вар.	Параметры для идентификации участка трубопровода						Задание по давлению в деаэраторе, МПа	Параметры модели деаэратора		Требования к системе		
	Q_m	Δp	p	t	$L, м$	$d, мм$		K_d	T_d	$t_p, с$ не более	σ не более	ψ не менее
1	10,63	0,076	1,52	279,98	6,8	20	1,445	0,45	3,2	8,2	18	0,95
2	7,41	0,066	1,31	267,18	5,8	15	0,588	0,55	4,5	8,5	17	0,92
3	12,45	0,059	1,17	247,35	6,5	20	0,700	0,56	5,0	9,5	15	0,90
4	9,23	0,073	1,47	266,94	7,2	20	0,700	0,58	5,5	8,6	16	0,94
5	31,93	0,069	1,38	194,45	8,4	32	0,690	0,60	6,0	8,0	19	0,95
6	11,79	0,066	1,31	261,80	5,2	20	0,588	0,42	4,8	9,2	15	0,88
7	8,56	0,063	1,26	497,65	12,8	20	0,588	0,54	3,6	9,0	15	0,94
8	13,60	0,066	1,32	265,34	9,4	20	0,588	0,55	4,8	8,8	19	0,92
9	8,16	0,064	1,28	264,02	8,6	20	0,588	0,48	3,8	9,0	20	0,90
10	9,45	0,061	1,22	471,71	9,7	20	0,588	0,56	5,8	8,9	16	0,98
11	12,10	0,082	1,38	315,52	8,8	20	0,700	0,50	5,2	9,0	15	0,95
12	11,15	0,069	1,21	320,85	7,8	25	0,690	0,52	6,2	5,5	20	0,92

Принятые обозначения:

Q_m – массовый расход пара, кг/с

Δp – потери давления на участке паропровода, МПа

p – максимальное давление на участке паропровода, МПа

t – температура пара на участке паропровода, °С

L – протяженность участка трубопровода, м

d – внутренний диаметр трубопровода, мм

K_d – коэффициент передачи деаэратора, Па/мм²

T_d – постоянная времени деаэратора, с

t_p – время регулирования, с

σ – перерегулирование, %

ψ – степень затухания переходного процесса

2.2. Моделирование АСР давления

После сбора участка управления в основном поле собрать схему, структура которой показана на рис. 41.



Рис. 41. Структурная схема моделируемой АСР

Для моделирования регулятора можно воспользоваться алгоритмом, приведенным в лабораторной работе № 3, или типовой моделью PID вкладки «Регуляторы». При открытии свойств регулятора видны имена его параметров настройки (рис. 42).

Свойства : reg_PID_1			
Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение ▲
Тип регулятора	mode		PID
Постоянная времени диффе...	tdif		[0.01]
Начальные условия	y0		[0]
Пропорциональная составля...	k _p		[1]
Интегральная составляющая	k _i		[1]
Дифференциальная составл...	k _d		[1]

Рис. 42. Свойства PID-регулятора

Эти параметры настройки в данной системе являются варьируемыми параметрами, значения которых будут вычисляться с помощью оптимизатора. Для реализации этой системы требуется установить взаимосвязь между рассчитанными оптимизатором параметрами и настройками регулятора. Для этого нужно выполнить команду *Сервис* → *Сигналы*. В открывшемся окне с помощью кнопок нижней панели добавить три сигнала и задать их параметры (рис. 43).

Список сигналов проекта: F:\SimInTech\Lab11_deaerator_3.prt							
№	Имя	Название	Тип данных ▲	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k _p	Пропорциональное	Вещественное	Ненаправленный		0.001	Переменная
2	k _i	Интегрирующее	Вещественное	Ненаправленный		0.001	Переменная
3	k _d	Дифференцирующее	Вещественное	Ненаправленный		0.001	Переменная

Рис. 43. Список сигналов проекта

Настройки регулятора оставить по умолчанию. Запустить расчет переходного процесса. Сохранить полученный график, рассчитать прямые оценки качества переходного процесса, представить их в табличном виде.

2.3. Оптимизация АСР

Для расчета оптимальных параметров настройки ПИД-регулятора в рамках лабораторной работы используется функция «Оптимизация», реализуемая с помощью блока «Оптимизатор» вкладки «Анализ и оптимизация». Оптимизация параметров настройки выполняется по одному или нескольким параметрам. Для реализации процесса оптимизации в настоящей работе используется еще одна субмодель, внутри которой собирается следующая структура (рис. 40).

Эта модель имеет два входа: ошибка регулирования ε и выходная величина $y(t)$.

Первая (верхняя) линия модели (рис. 40) предназначена для вычисления времени регулирования t_p , которое является одним из оптимизируемых (минимизируемых) параметров. Настройки блоков «Часы» и «Абсолютное значение» следует оставить по умолчанию. Настройки блока «Ключ-3» показаны на рис. 44. Величину периода квантования блока «1/Z» принять равной 0.01.

Свойства : Key3_4					
Свойства		Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название			Имя	Формула	Значение ▲
Значения уставок			k		[0.05]
Тип управляющего сигнала			fl		Вектор

Рис. 44. Настройки блока «Ключ-3» субмодели оптимизатора

Средняя линия используется для вычисления среднеквадратического отклонения, величина которого также оптимизируется (минимизируется) в лабораторной работе.

Нижняя линия используется для вычисления максимальной динамической ошибки. В настройках блока «Нижний или верхний предел» тип операции изменить на «Максимум».

Настройки оптимизатора показаны на рис. 45.

Название	Имя	Формула	Значение
Режим оптимизации параметров	optmode		По полному переходному процессу
Периодичность анализа критериев оптимизации при расчёте...	optstep	0.001	0.001
Выставить начальную точку вручную	manualpoint		<input type="checkbox"/> Нет
Начальное приближение выходов блока	x0	[1,0,1e-5]	[1, 0, 1E-5]
Минимальные значения выходов блока	ymin	[1,1e-5,1e-5]	[1, 1E-5, 1E-5]
Максимальные значения выходов блока	ymax	[10,10,10]	[10, 10, 10]
Абсолютная точность подбора значений выходов	yabserror	3#0.0001	[0.0001, 0.0001, 0.0001]
Начальное приращение выходов	dparams	3#0.01	[0.01, 0.01, 0.01]
Минимальные значения входных критериев оптимизации	umin	[1,0,1]	[1, 0, 1]
Максимальные значения входных критериев оптимизации	umax	[1.1,0.1,1.1]	[1.1, 0.1, 1.1]
Тип суммарного критерия оптимизации	usumtype		Аддитивный
Метод оптимизации	optmethod		Симплекс
Максимальное количество повторных моделирований при ра...	maxiter	500	500
Выдача информации о процессе оптимизации	printoptinfo		<input checked="" type="checkbox"/> Да

Рис. 45. Настройки блока «Оптимизатор»

После сбора субмодели и задания ее входов и выходов, модель можно подключить к основной схеме (см. рис. 46).

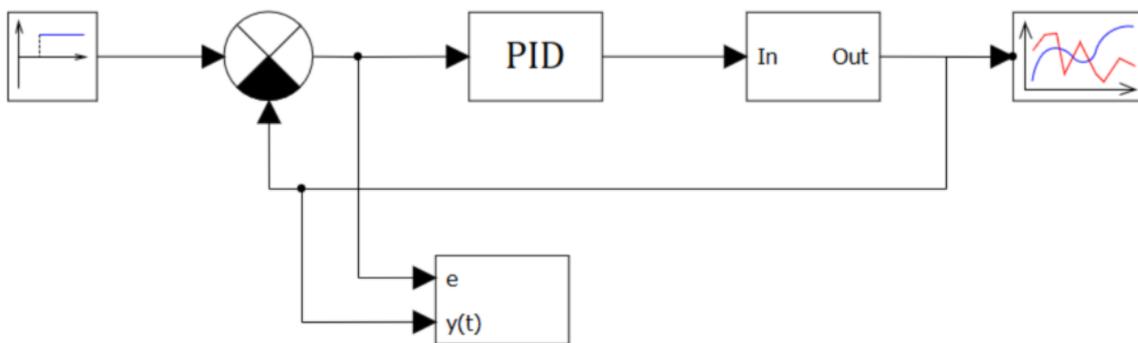


Рис. 46. Включение оптимизатора в основную схему АСР

После задания всех параметров системы ее следует инициализировать и выполнить расчет.

При правильном выполнении всех действий в нижней части диалогового окна появятся текущие расчетные значения параметров настройки. Расчет выполняется итерационным методом (в данном случае Симплекс), поэтому будут представлены результаты расчета на каждом шаге. После окончания расчета сохранить график полученного переходного процесса, рассчитать прямые оценки качества переходного процесса, представить в табличном виде совместно с полученными ранее прямыми оценками качества до настройки регулятора и требуемыми показателями качества. Оптимальные параметры настройки будут записаны в список сигналов (рис. 43). Их следует представить в отчете по лабораторной работе.

Содержание отчета

1. Цели работы.
2. Расчетная структурная схема моделируемой АСР.
3. Структурные схемы системы и субмоделей в программе SimInTech.
4. Порядок расчета передаточных функций.
5. Результаты расчета параметров настройки регулятора.
6. Переходные характеристики в синтезируемой модели до и после синтеза регулятора.
7. Результаты расчета прямых оценок качества переходных процессов.
8. Выводы.
9. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимается под *оптимизацией*?
2. Сколько параметров настройки имеет ПИД-регулятор?
3. Что такое синтез АСР?
4. Какими преимуществами обладает ПИД-регулятор перед другими типовыми законами регулирования?
5. Каким элементарным звеном описывается деаэратор по каналу регулирования давления?

13. ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ С УЧЕТОМ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Цели работы:

- закрепление навыков определения оптимальных параметров настройки регуляторов;
- изучение влияния внешних возмущений на работу системы;
- сравнение различных методов определения оптимальных параметров настройки.

Частотные методы оценки качества регулирования

Частотные методы оценки широко используются в инженерной практике для анализа работы систем автоматического регулирования. К частотным характеристикам относятся: амплитудная частотная характеристика (АЧХ), фазовая частотная характеристика (ФЧХ), вещественная частотная характеристика (ВЧХ), мнимая частотная характеристика (МЧХ) и амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ).

АСР температуры воздуха в помещении

В данной работе рассматривается система регулирования температуры воздуха в помещении на базе аналогового регулятора. Объектом регулирования является помещение, а температура воздуха внутри – регулируемой величиной. Регулирующим воздействием в данной системе является изменение температуры греющего теплоносителя, которое регулируется соотношением расходов прямой и обратной сетевой воды (рис. 47).

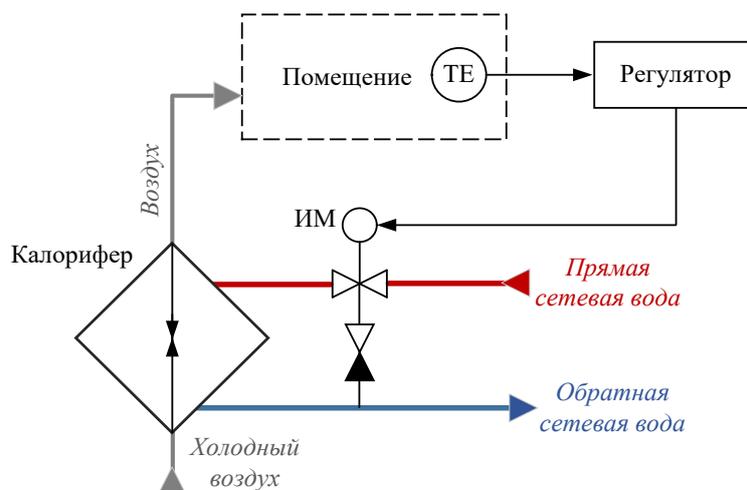


Рис. 47. Принципиальная схема АСР температуры воздуха в помещении

Путем изменения температуры греющего теплоносителя регулируется температура воздуха в системе приточной вентиляции, то есть на выходе калорифера. Основным возмущением в системе является температура наружного воздуха.

Порядок выполнения работы

1. Моделирование АСР

В программе SimInTech собрать структурную схему, показанную на рис. 48.

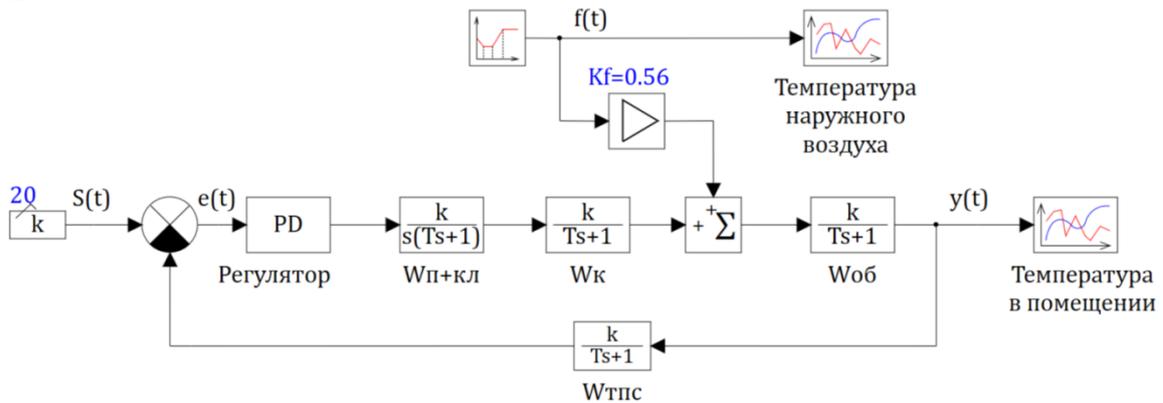


Рис. 48. Структурная схема АСР температуры воздуха в помещении

На схеме (рис. 48) используются обозначения:

S – задающее воздействие; f – возмущающее воздействие; y – выходной сигнал; e – сигнал ошибки регулирования;

$W_{n+кл}(P) = \frac{k_{n+кл}}{T_{n+кл}P^2 + P}$ – передаточная функция клапана с приводом;

$W_{к}(P) = \frac{k_{к}}{T_{к}P + 1}$ – передаточная функция калорифера;

$W_{об}(P) = \frac{1}{T_{об}P + 1}$ – передаточная функция объекта регулирования (помещения);

$W_{тпс}(P) = \frac{k_{тпс}}{T_{тпс}P + 1}$ – передаточная функция датчика температуры.

Исходные данные приведены в табл. 19. Возмущения задать произвольно, привести в отчете данные о заданных значениях.

Исходные данные к лабораторной работе № 13

№ вар.	Параметры системы							
	K_f	$k_{ДК}$	$T_{ДК}$	k_K	T_K	$T_{об}$	$k_{ТПС}$	$T_{ТПС}$
1	0,56	0,002	0,062	20	20	600	1	1,4
2	0,62	0,001	0,075	15	20	550	1	1,2
3	0,72	0,0018	0,065	12	20	400	1	0,8
4	0,42	0,002	0,080	11	22	420	1	0,9
5	0,58	0,003	0,085	14	22	350	1	1,2
6	0,60	0,004	0,055	9	24	370	1	1,3
7	0,64	0,0025	0,060	10	18	320	1	1,0
8	0,66	0,0035	0,058	12	20	400	1	1,1
9	0,68	0,0016	0,062	14	22	500	1	1,4
10	0,70	0,0014	0,068	16	20	520	1	1,5
11	0,64	0,003	0,058	13	22	450	1	2,5
12	0,58	0,0025	0,061	11	19	530	1	5,3

2. Настройка системы

Используя метод Циглера-Никольса выполнить настройку регулятора (использовать различные законы регулирования). Выбрать наиболее оптимальный закон регулирования. Определить прямые оценки качества полученных переходных процессов, результаты расчета представить в табличном виде.

3. Частотный анализ системы

3.1. Для расчета частотных характеристик системы используется блок «Построение частотных характеристик» вкладки «Анализ и оптимизация». Для удобства использования порт «Out» расположить с правой стороны (рис. 49).

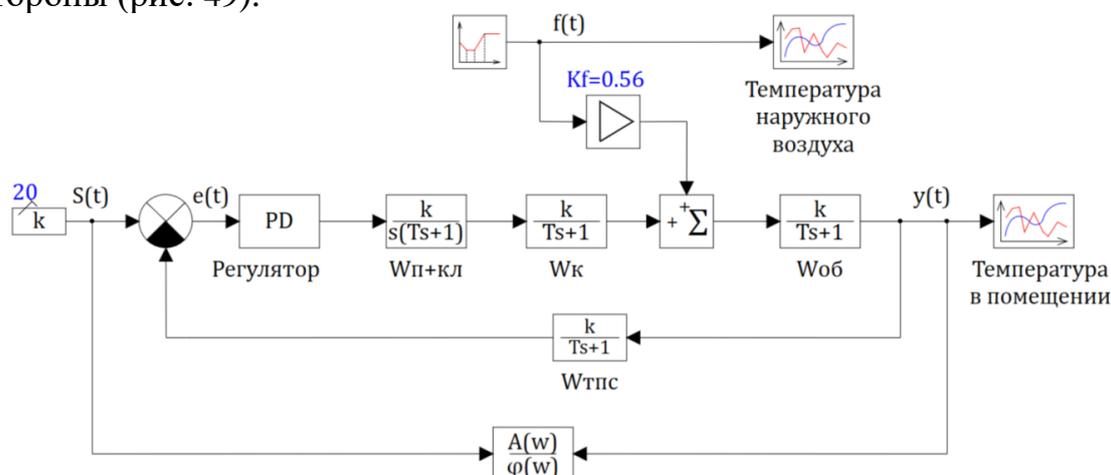


Рис. 49. Включение блока вычисления частотных характеристик

3.2. Нажатием правой кнопки мыши открыть меню «Свойства» блока «Построение частотных характеристик». Значения в строках «Начальная круговая частота» и «Конечная круговая частота» задать равными, соответственно 0 с^{-1} и 1 с^{-1} .

В строке «Типы рассчитываемых характеристик» нажать кнопку, показанную на рис. 50.

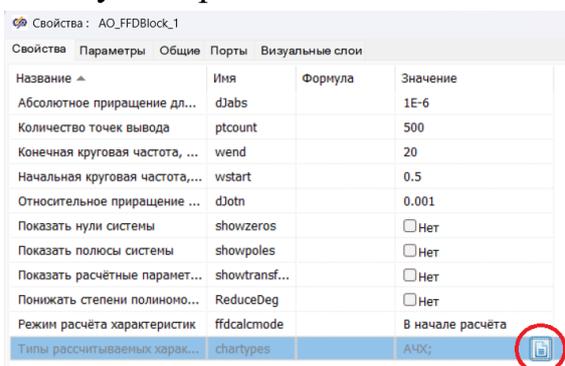


Рис. 50. Свойства блока «Построение частотных характеристик»

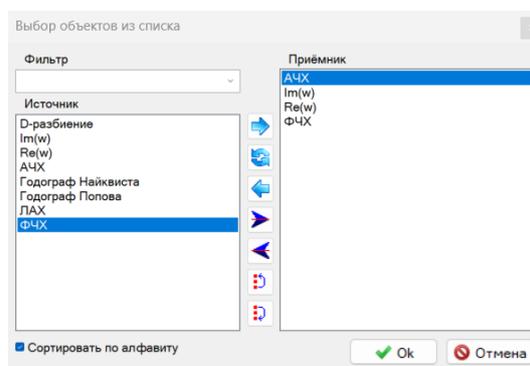


Рис. 51. Выбор рассчитываемых частотных характеристик

В открывшемся окне выделить вещественную ($Re(w)$), мнимую ($Im(w)$), фазовую (ФЧХ) частотные характеристики и с помощью стрелки => переместить их в правую часть (окно «Приёмник»). После этого нажать кнопку «Ok».

Запустить расчет, сохранить полученные графики частотных характеристик.

3.3. Построить АФЧХ разомкнутой системы. Для этого отдельно по очереди построить вещественную и мнимую частотные характеристики, сохранить их табличном виде и построить точки АФЧХ с использованием любого программного пакета (MS Excel, Origin и т.д.).

Содержание отчета

1. Цели работы.
2. Расчетная структурная схема моделируемой АСР.
3. Передаточные функции элементов системы.
4. График изменения возмущения.
5. Переходные процессы и прямые оценки качества переходного процесса для различных типов регуляторов.
6. Результаты расчета частотных характеристик системы.
7. Выводы.
8. Ответы на контрольные вопросы и задания.

Контрольные вопросы и задания

1. Каким образом осуществляется регулирование температуры воздуха в помещении?
2. Запишите выражения для частотных характеристик апериодического, интегрирующего и дифференциального звеньев.
3. Рассчитайте 2-3 значения для полученных частотных характеристик.

14. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГОДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Цели работы:

- изучение программируемого блока, разработка простейшей программы;
- закрепление навыков применения методов оптимизации для настройки регулятора;
- имитация работы АСР температуры сетевой воды за водогрейным котлом.

Погодное регулирование температуры теплоносителя в системе теплоснабжения

Под погодным регулированием понимается изменение количества вырабатываемой тепловой энергии в зависимости от температуры наружного воздуха. В настоящей работе изменение количества вырабатываемой энергии подразумевается за счет изменения температуры теплоносителя при его постоянном расходе.

Зависимость температуры теплоносителя от температуры наружного воздуха определяется температурным графиком. Пример такого графика показан на рис. 52. На графике применены обозначения: T1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе, T2 – температура теплоносителя в обратном трубопроводе.

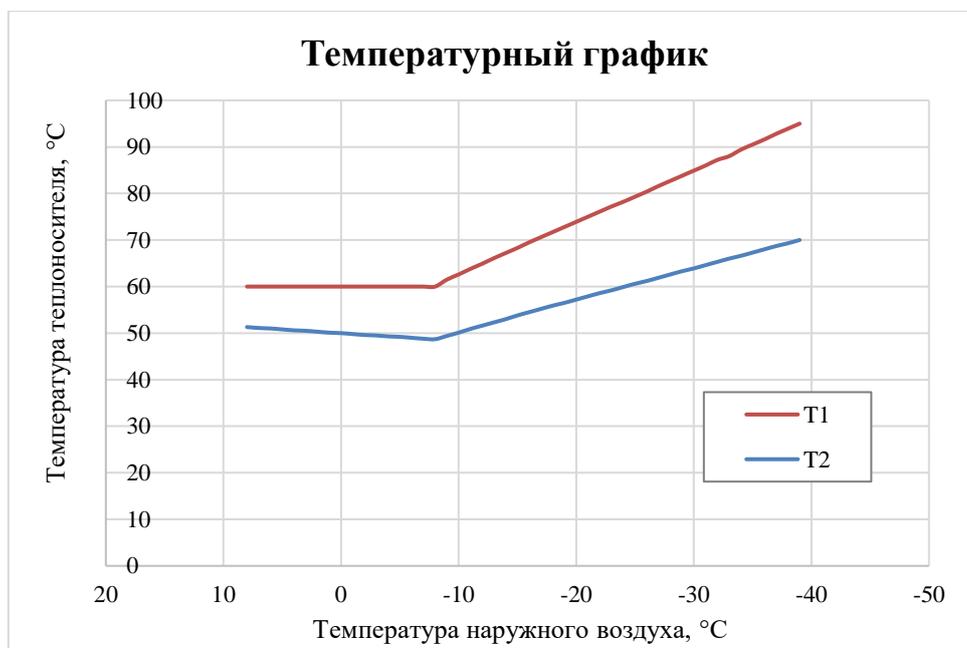


Рис. 52. Температурный график отпуска тепловой энергии

В данном случае график представляет собой кусочно-линейную функцию в разных интервалах температур: при температуре $t \geq -8 \text{ }^\circ\text{C}$ график имеет спрямление ($T_1=60 \text{ }^\circ\text{C}$), которое обусловлено необходимостью подогрева воды в системах горячего водоснабжения, а при температуре $t < -8 \text{ }^\circ\text{C}$ температура теплоносителя линейно возрастает с уменьшением температуры. Таким образом, задание по температуре теплоносителя не известно заранее и зависит от температуры наружного воздуха.

Порядок выполнения работы

1. Аппроксимация температурного графика

По исходным данным (табл. 20, 21) построить температурный график (рекомендуется использовать пакет MS Excel). Если график имеет участки спрямления и (или) срезки, участки построить по отдельности. Каждый участок аппроксимировать прямой линией, зафиксировать полученные уравнения прямых. Для получения аппроксимирующего уравнения выделить прямую, нажать правую кнопку мыши, выбрать пункт меню *Добавить линию тренда*, в настройках поставить «галочку» в пункте *Показывать уравнение на диаграмме*. Полученный результат для графика (рис. 52) в интервале температур $t < -8 \text{ }^\circ\text{C}$, показан на рис. 53.

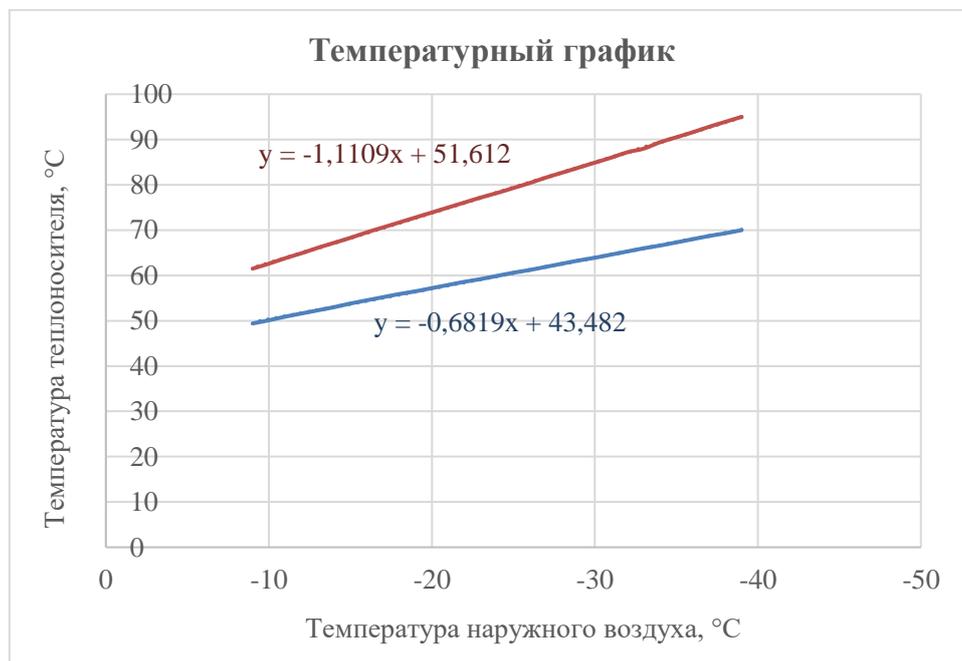


Рис. 53. Аппроксимация температурного графика

Аналогичным образом определяются уравнения для других интервалов графика. Для рассматриваемого примера аппроксимация кусочно-линейной функции описывается формулами:

$$T1 = \begin{cases} -1,1109t_{нв} + 51,612, & t_{нв} < -8; \\ 60, & t_{нв} \geq -8. \end{cases} \quad (34)$$

$$T2 = \begin{cases} -0,6819t_{нв} + 43,482, & t_{нв} < -8; \\ 0,1637t_{нв} + 43,482, & t_{нв} \geq -8. \end{cases} \quad (35)$$

Таблица 20

Исходные данные к лабораторной работе № 14

№ вар.	Температурный график	Параметры системы			
		$T_{об}$	$K_{об}$	$\tau_{об}$	$k_{рк}$
1	1	600	0,17	10	1,6
2	2	580	0,14	12	1,4
3	3	570	0,15	14	1,3
4	4	610	0,16	10	1,2
5	1	605	0,18	8	1,5
6	2	590	0,15	9	1,6
7	3	575	0,16	11	1,4
8	4	580	0,15	12	1,3
9	1	600	0,18	10	1,2
10	2	650	0,17	9	1,5
11	3	640	0,16	8	1,3
12	4	635	0,18	5	1,4

Таблица 21

Температурные графики

$t_{нв}$	Температурный график 1		Температурный график 2		Температурный график 3		Температурный график 4	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
8	60,0	51,3	40,3	35,3	60,0	49,0	38,0	32,0
4	60,0	50,6	45,6	39,0	60,0	48,1	42,9	34,9
0	60,0	50,0	50,7	42,4	60,0	47,2	47,7	37,7
-4	60,0	49,3	55,6	45,6	60,0	46,2	52,3	40,3
-8	60,0	48,7	60,3	48,7	60,0	45,3	56,7	42,7
-12	64,9	51,6	64,9	51,6	61,1	45,7	61,1	45,1
-16	69,5	54,5	69,5	54,5	65,4	47,4	65,4	47,4
-20	73,9	57,2	73,9	57,2	69,7	49,7	69,7	49,7
-24	78,2	59,9	78,2	59,9	73,8	51,8	73,8	51,8
-28	82,7	62,6	82,7	62,6	78,1	54,0	78,1	54,0
-32	87,2	65,3	87,2	65,3	82,4	56,2	82,4	56,2
-36	91,6	68,0	91,6	68,0	86,8	58,4	86,8	58,4
-39	95,0	70,0	95,0	70,0	90,0	60,0	90,0	60,0

2. Моделирование АСР

1. В программе SimInTech составь схему (рис. 54).

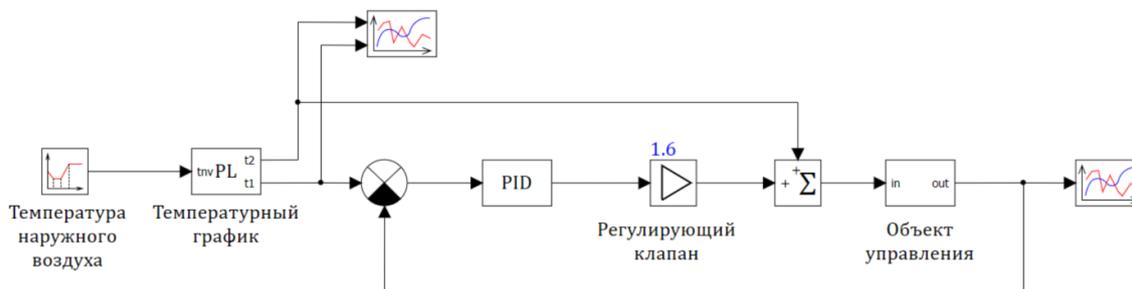


Рис. 54. Структурная схема моделируемой системы

2. Задание температуры наружного воздуха осуществляется с помощью блок «Кусочно-линейная» вкладки «Источники». На первом этапе задать постоянную температуру наружного воздуха, например, равную -39 °С.

3. Для реализации переменного задания (блок «Температурный график» следует использовать блок «Язык программирования» вкладки «Динамические». В этом блоке следует задать входной сигнал (температура наружного воздуха $t_{нв}$) и выходные сигналы (температура теплоносителей в подающем (Т1) и обратном (Т2) трубопроводах). После этого с помощью цикла *if* задать уравнения температурного графика (рис. 55).

```
Блок "Язык программирования": LangBlock23
Файл  Правка  Поиск  Расчёт  Справка  Инструменты
               
1  input tnv;
-  output T2;
-  output T1;
-
-
-  if tnv>-8 then T1=60
-  else T1=-1.1109*tnv+51.612
-
-  if tnv>-8 then T2=0.1637*tnv+49.976
-  else T2=-0.6819*tnv+43.482;
```

Рис. 55. Описание температурного графика

4. Объект управления (водогрейный котел по каналу «расход топлива – температура теплоносителя») описывается последовательным соединением апериодического звена и звена запаздывания (рис. 56). Реализацию можно выполнить с помощью субмодели.



Рис. 56. Структура субмодели «Объект управления»

5. После сборки системы запустить расчет (параметры настройки регулятора оставить «по умолчанию»). Сохранить полученный переходный процесс.

6. Используя навыки, полученные при выполнении предыдущих лабораторных работ, подобрать настройки регулятора, обеспечивающие устойчивый переходный процесс со статической ошибкой не более $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7. Выполнить оценку качества устойчивого переходного процесса.

8. Произвольно задать изменение температуры наружного воздуха на $15\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение $1000\text{--}2500\text{ с}$. Рассчитать переходный процесс в системе с учетом изменения заданной температуры.

Содержание отчета

1. Цели работы.
2. Расчетная структурная схема моделируемой АСР.
3. Заданный температурный график.
4. Аппроксимация температурного графика.
5. Скриншоты задания исходных данных.
6. Переходная характеристика в системе при постоянной температуре наружного воздуха, оценка качества переходного процесса.
7. Графики изменения температуры наружного воздуха, задания температуры теплоносителя T_1 .
8. График изменения температуры теплоносителя T_1 при произвольно заданном изменении температуры наружного воздуха.
9. Выводы.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое температурный график? Каким образом осуществляется погодное регулирование отпуска тепловой энергии?
2. Каким образом осуществляется программное изменение сигнала задания?
3. Какими элементарными звеньями описывается объект управления?

4. Опишите порядок аппроксимации температурного графика. Функциями какого порядка осуществляется аппроксимация и почему?
5. Каким образом в данной работе выполнен синтез устойчивой системы регулирования?

15. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ОДНОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: получение навыков разработки структурной схемы одноконтурной системы автоматического регулирования с помощью программных средств.

Структурные схемы систем автоматического контроля и регулирования

Структурная схема содержит в общем виде основные решения по организационной, функциональной и технической структурам системы управления при соблюдении иерархии построения системы, а также данные о взаимосвязи между пунктами управления и контроля. При этом принципы организации оперативного управления технологическим объектом, состав и обозначения отдельных элементов структурной схемы, принятые при выполнении структурной схемы, сохраняются во всех документах проекта автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП).

Элементы структурной схемы изображаются, как правило, прямоугольниками, внутри которых обозначается их производственная структура. При этом выделяются цехи, участки, технологические линии, которые являются существенными для раскрытия в документах проекта всех взаимосвязей.

Проектирование структурных схем автоматических систем управления начинается с определения компонентов системы: составляющих измерительную часть АСУ ТП и управляющую часть. Компоненты измерительной части определяются измеряемыми параметрами и методами измерения.

1. Измерение температуры

При измерении температуры используются термоэлектрические преобразователи (ТЭП) или термопреобразователи сопротивления (ТПС), которые могут иметь выходной сигнал в виде ТЭДС (для ТЭП) и сопротивления (для ТПС) или унифицированный выходной токовый сигнал (0...5 мА, 0...20 мА или 4...20 мА). Если постоянный контроль температуры не предусмотрен, а ее измерение требуется только для функционирования АСУ ТП, то преобразователь температуры, не имеющий унифицированного выходного сигнала, комплектуется только нормирующим преобразователем с соответствующей номинальной статической характеристикой и выходным унифицированным сигналом. Если в АСУ ТП предусмотрен постоянный контроль измеряемой температуры, то сигнал

от нормирующего преобразователя поступает в АСУ ТП и на регистрирующий прибор. Описанные структурные схемы приведены на рис. 57.

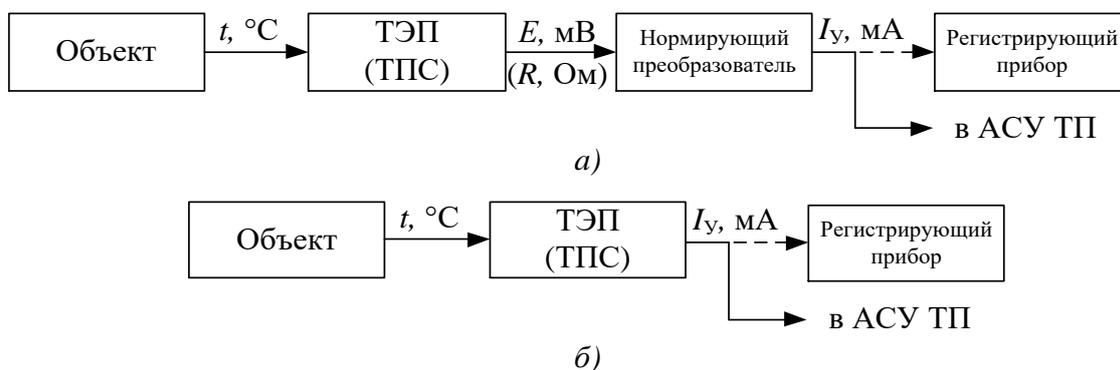


Рис. 57. Структурные схемы измерительного канала температуры:
а – с нормирующим преобразователем; б – без нормирующего преобразователя

2. Измерение давления

При измерении давления используются преобразователи давления, имеющие выходные сигналы в виде постоянного тока, напряжения постоянного тока и др. Наиболее распространёнными являются преобразователи давления с выходным унифицированным токовым сигналом. Если требуется постоянный контроль давления, сигнал от преобразователя поступает к регистрирующему прибору и подается в АСУ ТП. Примеры структурных схем при измерении давления приведены на рис. 58.



Рис. 58. Структурные схемы измерительного канала давления:
а – с постоянным контролем давления; б – без постоянного контроля давления

3. Измерение расхода

Структурная схема измерительного канала расхода главным образом определяется методом измерения. В случае использования метода переменного перепада давления составляющими измерительной системы будут: сужающее устройство, вспомогательное устройство (конденсационный/уравнительный сосуд), преобразователь перепада давления, блок

преобразования сигнала (для преобразователей перепада давления с квадратичной характеристикой), регистрирующий прибор. Примеры структурных схем измерительного канала расхода приведены на рис. 59.

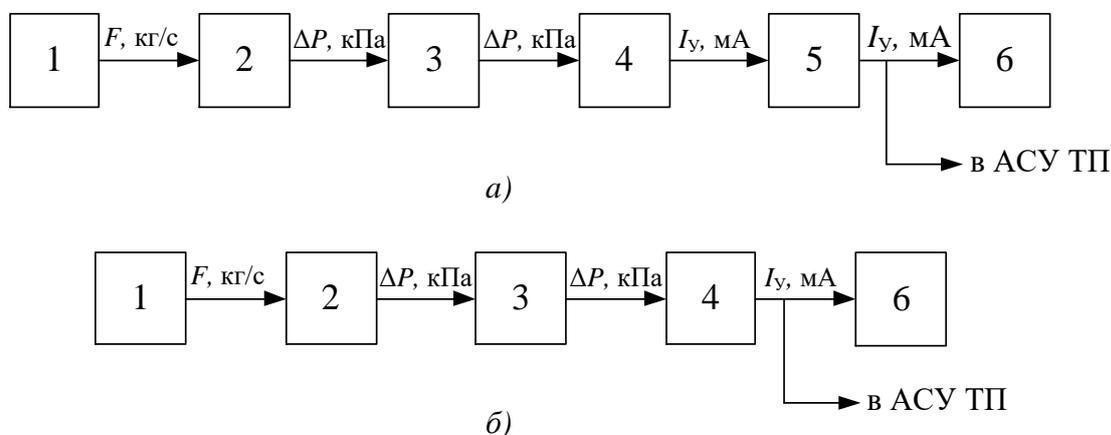


Рис. 59. Структурные схемы измерительного канала расхода методом переменного перепада давления:

а – с преобразователем перепада давления с квадратичной характеристикой; б – с преобразователем перепада давления с линейной характеристикой; 1 – объект управления; 2 – сужающее устройство; 3 – вспомогательное устройство; 4 – преобразователь разности давлений; 5 – блок преобразования сигналов; 6 – регистрирующий прибор

4. Измерение концентрации и уровня

Структурные схемы измерения концентрации и уровня также определяются методом измерения и типов средств измерений. Примеры структурных схем приведены на рис. 60.

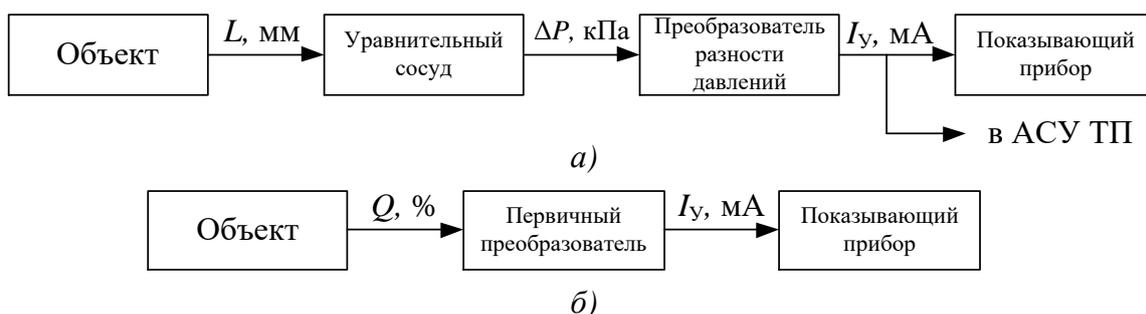


Рис. 60. Структурные схемы измерительных каналов уровня (а) и концентрации (б)

После разработки структуры измерительного канала, разрабатывается структура управляющего канала.

На вход регулирующего устройства от измерительного канала поступает текущее значение регулируемого параметра и заданное значение

это параметра, формируемое с помощью задатчика регулируемого параметра. При появлении отличия между этими значениями – рассогласования, регулирующее устройство вырабатывает воздействие, которое направлено на уменьшение появившегося рассогласования и приближение регулируемого параметра к заданному значению. Управляющее воздействие через блок ручного управления поступает на пусковое устройство. Блок ручного управления имеет два режима работы и выступает в роли коммутатора цепей. Так, в автоматическом режиме работы управление регулирующим органом выполняется регулирующим устройством, в ручном режиме работы управление осуществляется оператором. Пусковое устройство предназначено для усиления сигнала до уровня, необходимого для запуска исполнительного механизма, который в свою очередь воздействует на регулирующий орган.

Если АСУ ТП построена на основе микропроцессорного контроллера, связанного с автоматизированным рабочим местом оператора с помощью SCADA-системы, то выполнять переключение режима работы между ручным и автоматическим, а также задавать значения регулируемого параметра можно напрямую при помощи мнемосхемы.

Порядок выполнения работы

1. Интерфейс пакета Microsoft Visio

1. Основные используемые инструменты расположены на вкладке меню «Главная». Здесь располагаются инструменты для редактирования свойств текста, а также основные инструменты для редактирования разрабатываемых изображений.

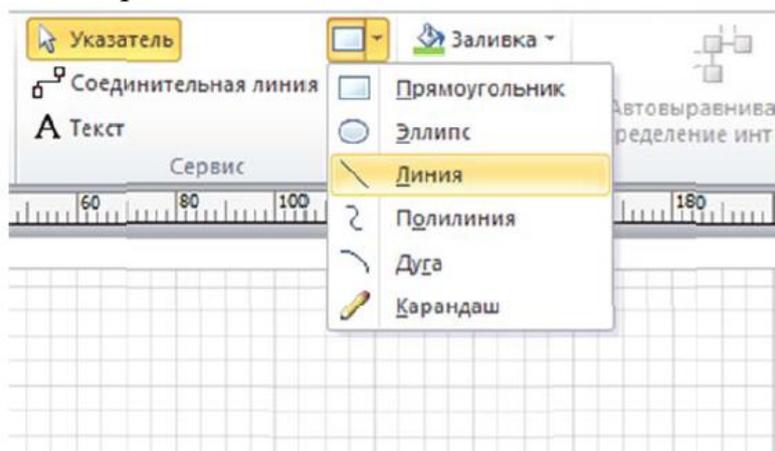


Рис. 61. Инструменты редактирования графики

Для создания элементов схемы используется меню, показанное на рис. 61. Здесь наиболее часто используемые инструменты – прямоугольник и линия.

Взаимное расположение объектов редактируется при помощи меню «Положение» (рис. 62).

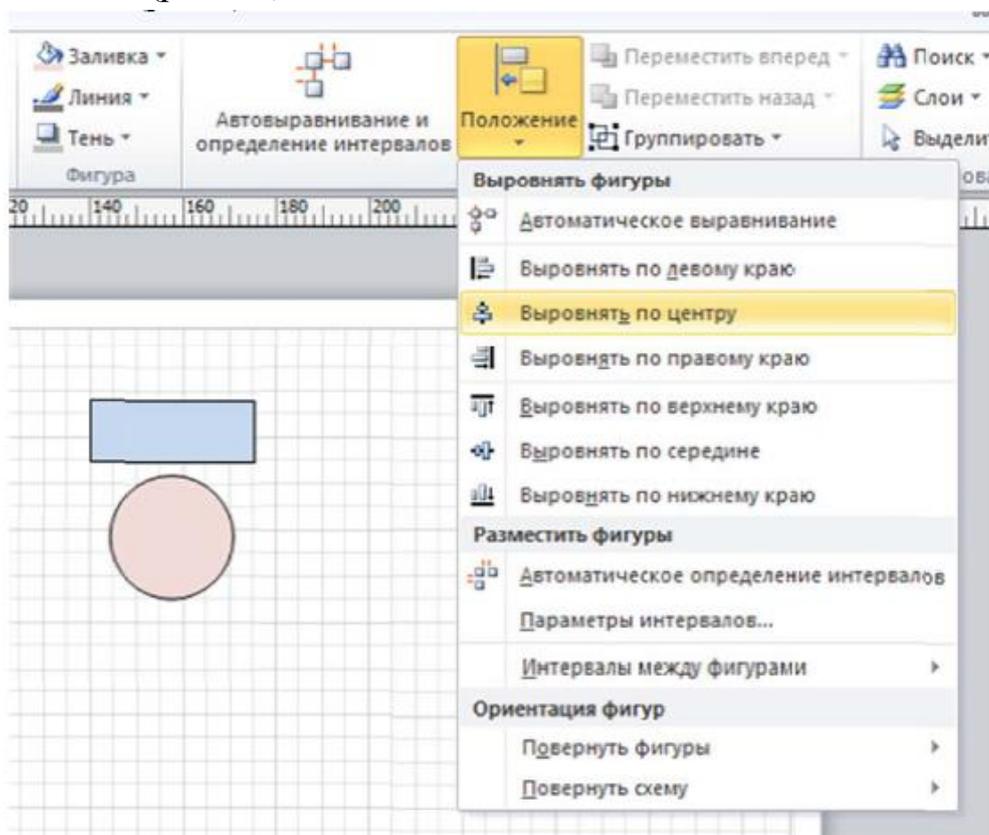


Рис. 62. Инструменты редактирования положения объектов

Меню «Положение» содержит ряд команд, описание которых приведено в табл. 22.

Таблица 22

Команды взаимного выравнивания фигур

Название команды	Действие
Автоматическое выравнивание	Выравнивание по начальному положению
Выровнять по левому краю	Выравнивание всех фигур по их левому краю (горизонтально расположение фигур не меняется)
Выровнять по правому краю	Выравнивание всех фигур по их правому краю (горизонтально расположение фигур не меняется)
Выровнять по центру	Фигуры располагаются на одной вертикальной оси

Название команды	Действие
Выровнять по верхнему краю	Линия верхнего края фигур совпадает
Выровнять по нижнему краю	Линия верхнего края фигур совпадает
Выровнять по середине	Фигуры располагаются на одной вертикальной оси

Команда «Группировать/разгруппировать» позволяет объединить фигуры в одну, в этом случае действия (изменение размера, цвета и др.) будет применено к выделенной группе фигур.

Увеличение формата листа, на котором создается чертеж, выполняется автоматически при превышении границ имеющегося листа, при этом границы форматов будут показаны пунктирной линией. По умолчанию при создании нового чертежа формат листа будет А4, расположение горизонтальное. Изменить формат и положение начального листа можно с помощью команд «Размер» и «Ориентация» вкладки «Конструктор».

Добавление основных видов фигур выполняется с помощью меню «Фигуры» (рис. 63).

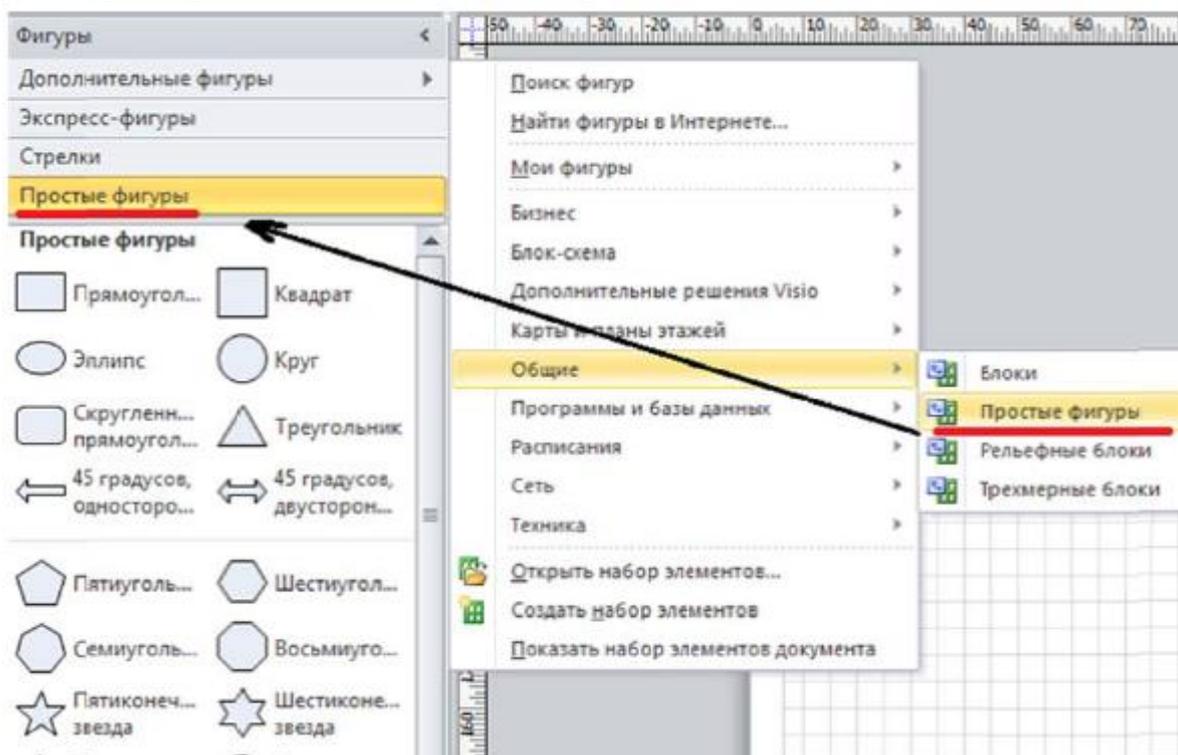


Рис. 63. Меню дополнительных фигур

После выбора типа выбранный тип появится в меню слева. Выбор нужной фигуры из меню осуществляется перетаскиванием фигуры из меню в левой части в рабочую зону.

2. Разработка чертежа

Структурная схема вычерчивается на листе формата А4 с рамкой и основной надписью (рис. 64).

185						
17	23	15	10			
				15	15	20
				ФЮРА.421000.009 С1		
				Паровой котел ТПП-312		
Разраб.	Иванов В.В.	3.09	Система теплотехнического контроля	Станд	Лист	Листов
Проб.	Сергеев П.С.	7.09		ТРП	1	1
				Схема структурная		ТПУ ЭНИИ 56М43

Рис. 64. Основная надпись чертежа

Размеры основной надписи 55×185 мм. Высота строк основной надписи – 5 мм.

Для выполнения рамки используется инструмент «Линия» вкладки «Главная». Толщина линии должна составлять 1 мм. Отступ от левого края должен быть 2 см, от верхнего, нижнего и правого – 0,5 см. Разметка для основной надписи также выполняется с помощью инструмента «Линия». Чертеж должен выглядеть таким образом как показано на рис. 65.

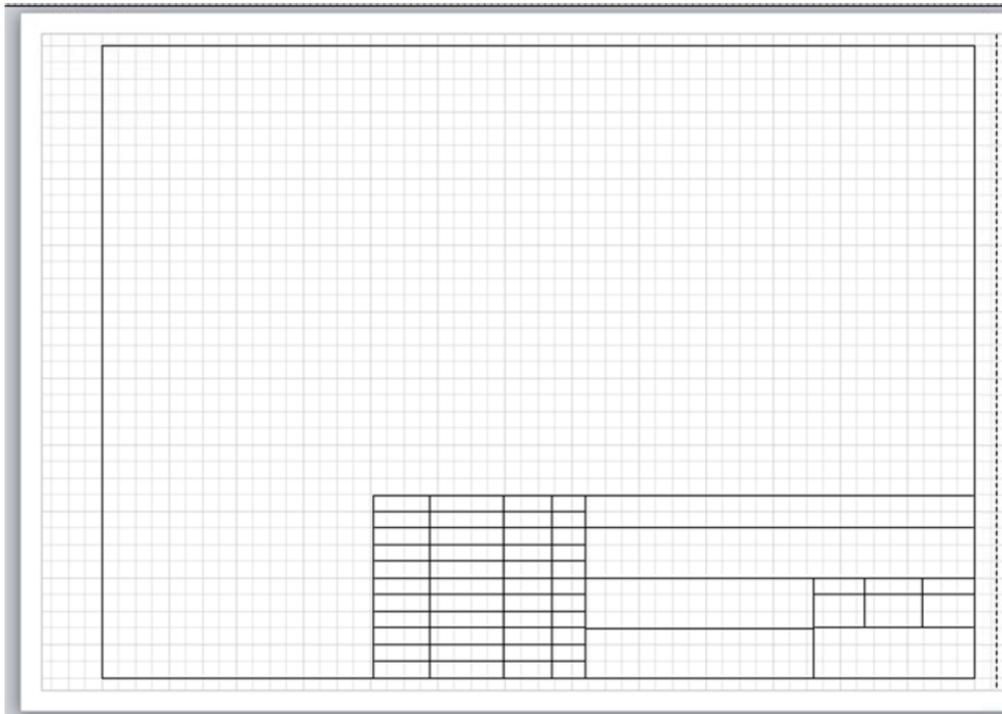


Рис. 65. Рамка чертежа

Создание основной надписи осуществляется с помощью инструмента «Прямоугольник». После добавления прямоугольника в поле чертежа, выделите его и впишите текст надписи, после этого необходимо отредактировать свойства объекта. Параметры линии: *Формат* → *Линия*, тип штриха «00: нет», параметры заливки: *Формат* → *Заливка* и установить тип узора «00: нет». После этого прямоугольник с надписью помещается в нужное место чертежа (поля основной надписи), его размер должен соответствовать размеру поля (рис. 66).

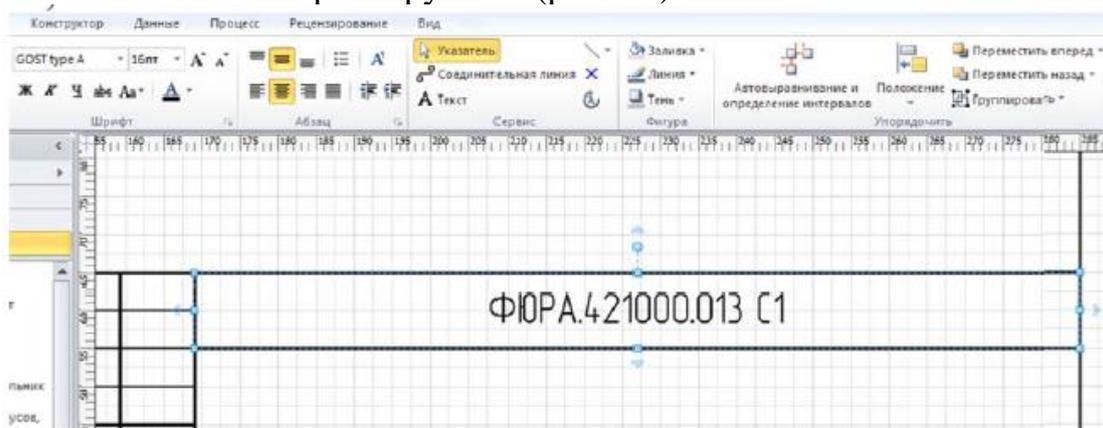


Рис. 66. Заполнение основной надписи

Аналогичным образом заполняется вся основная надпись. Окончательный вид рамки и основной надписи показан на рис. 67.

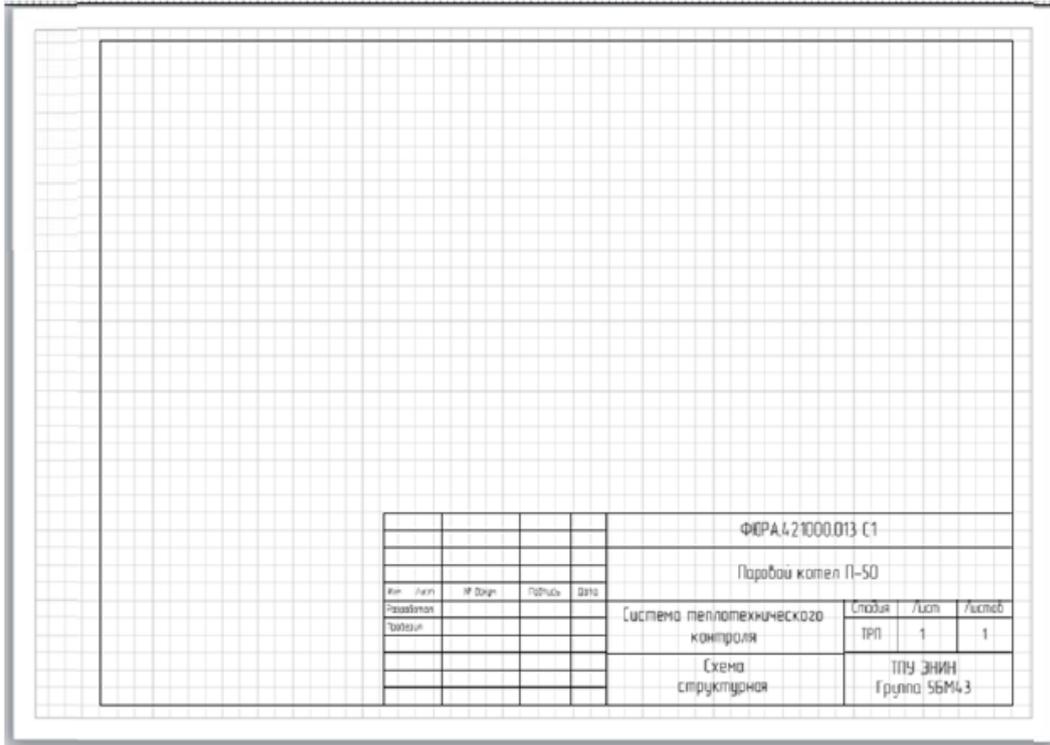


Рис. 67. Рамка чертежа и основная надпись

После формирования рамки и основной надписи выполняется чертеж структурной схемы одноконтурной системы регулирования в соответствии с заданным вариантом.

Таблица 23

Исходные данные для лабораторной работы № 15

№ варианта	Заданная АСР
1	АСР питания барабанного парового котла
2	АСР давления в ПНД
3	АСР давления в деаэраторе
4	АСР уровня в деаэраторе
5	АСР температуры сетевой воды
6	АСР уровня в конденсаторе
7	АСР температуры пара после РОУ
8	АСР давления пара после РОУ
9	АСР уровня воды в парогенераторе
10	АСР уровня в ПНД

Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Описание работы системы регулирования.
3. Описание работы измерительных каналов.
4. Порядок выполнения работы.
5. Чертеж структурной схемы на формате А4.

Контрольные вопросы и задания

1. Что представляют на структурной схеме?
2. Какая структура измерительных каналов выбрана в работе и почему?
3. Что в рассматриваемой АСР является объектом управления, регулируемой величиной, регулирующим воздействием?
4. Какие возмущения могут оказывать влияние на работы рассматриваемой системы?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Санкт-Петербург: Профессия, 2007. – 747 с.
2. Плетнев Г.П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций: учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 344 с.
3. Воронов А.А. Теория автоматического управления: учебник в 2 ч. Часть 1: 3-е изд., стер. / под ред. А.А. Воронова. – Екатеринбург: АТП, 2015. – 367 с.
4. ГОСТ Р 8.585-2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – Москва: Стандартиформ, 2010. – 81 с.
5. ГОСТ 6651-2009. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. – Москва: Стандартиформ, 2011. – 29 с.
6. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. – Одесса: Астропринт, 2001. – 308 с.

Учебное издание

АТРОШЕНКО Юлиана Константиновна
ИВАНОВА Евгения Владимировна

**АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ПАРАМЕТРОВ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
Лабораторный практикум**

Методическое пособие