Практическая работа №2

Структура системы автоматического управления. Типовые динамические звенья

Цель работы: изучить функциональную структуру системы автоматического управления и назначение её элементов, освоить классификацию систем по принципу управления, научиться составлять структурные схемы, вычислять передаточные функции соединений звеньев и оценивать статическую ошибку замкнутой системы с пропорциональным регулятором.

Оборудование и программное обеспечение: калькулятор или табличный редактор (Microsoft Excel, LibreOffice Calc) для расчётов и построения графиков.

Краткие теоретические сведения

Элементы системы автоматического управления

Система автоматического управления (САУ) — совокупность объекта управления и управляющего устройства, взаимодействующих без участия человека. Цель управления — поддерживать регулируемую (управляемую) величину y объекта равной заданному значению g или изменять её по заданному закону, несмотря на действие возмущений f. Функциональная схема замкнутой САУ показана на рисунке 1, назначение её элементов — в таблице 1.

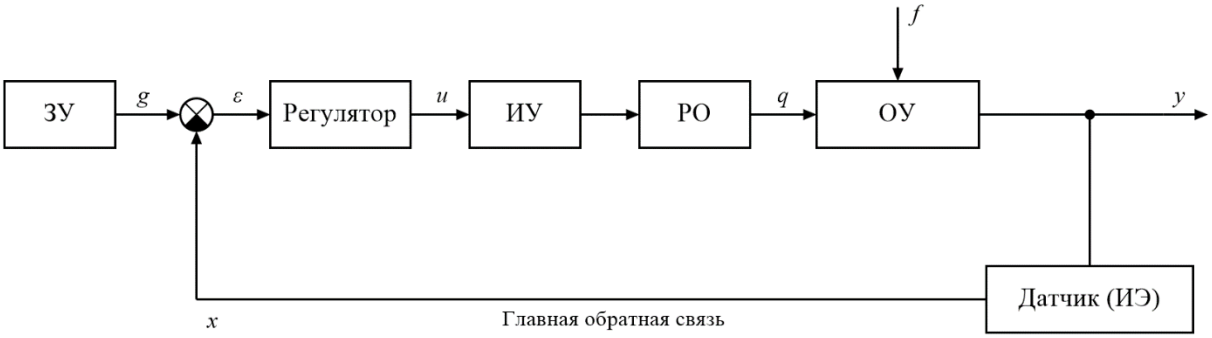


Рисунок 1 – Функциональная схема замкнутой системы автоматического управления

Таблица 1 – Элементы системы автоматического управления

Обозначение	Элемент	Назначение
ОУ	объект управления	технологический аппарат или процесс, в котором поддерживается регулируемая величина y (уровень, температура, давление, скорость)
ЗУ	задающее устройство	формирует задание g — требуемое значение регулируемой величины
⊗	сравнивающее устройство	вычисляет рассогласование (ошибку) ε = g − x
—	регулятор (управляющее устройство)	по рассогласованию по заданному закону формирует управляющее воздействие u
ИУ	исполнительное устройство	преобразует сигнал u в механическое перемещение (электропривод, пневмопривод)

Обозначение	Элемент	Назначение
РО	регулирующий орган	изменяет поток вещества или энергии q, поступающий в объект (клапан, заслонка, тиристорный блок)
ИЭ	измерительный элемент (датчик)	измеряет регулируемую величину и преобразует её в сигнал x, удобный для сравнения

Возмущение f — внешнее воздействие на объект, отклоняющее регулируемую величину от задания: изменение расхода потребителя, температуры окружающей среды, напряжения питания. Цепь, по которой информация о регулируемой величине поступает обратно на вход, называют главной обратной связью. Обратная связь отрицательна: при увеличении y сигнал x увеличивается, ошибка ε уменьшается, и регулятор уменьшает воздействие на объект.

Классификация систем по принципу управления

– **принцип разомкнутого управления** (по заданию, рисунок 2, а): управляющее воздействие вырабатывается только по заданию; результат управления не контролируется, поэтому возмущения не компенсируются;

– **принцип управления по возмущению** (компенсации, рисунок 2, б): основное возмущение измеряется, и управляющее устройство заранее компенсирует его влияние; неизмеряемые возмущения не компенсируются;

– **принцип управления по отклонению** (обратной связи, рисунок 1): регулятор реагирует на отклонение y от g независимо от причины отклонения; это основной принцип построения САУ;

– **комбинированный принцип**: сочетание управления по отклонению и по возмущению.

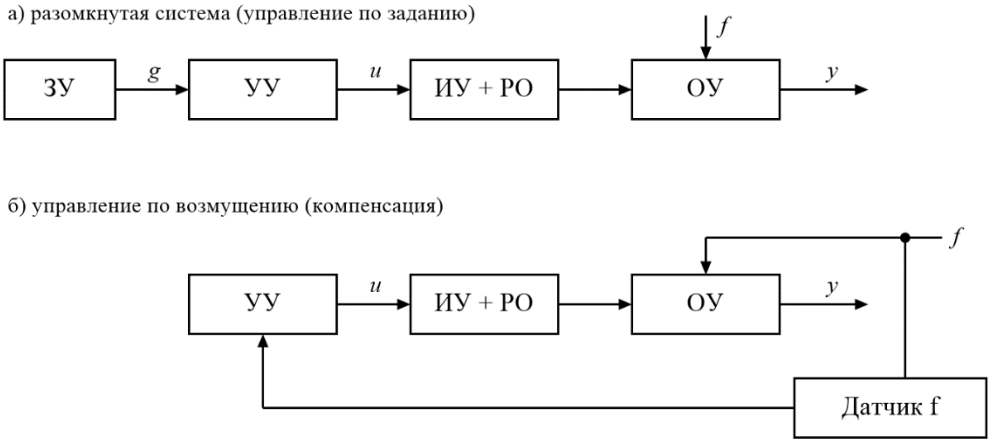


Рисунок 2 – Разомкнутые системы: а) управление по заданию; б) управление по возмущению

По характеру задающего воздействия различают системы стабилизации (g = const), программного управления (g изменяется по заранее известной программе во времени) и следящие системы (g изменяется по заранее неизвестному закону).

Передаточная функция и типовые звенья

Для расчёта САУ каждый её элемент описывают передаточной функцией W(s) — отношением изображений по Лапласу выходного и входного сигналов при нулевых начальных условиях; s — комплексная переменная. Схему, составленную из звеньев с

передаточными функциями, называют структурной. Реальные элементы автоматики описываются небольшим набором типовых звеньев (таблица 2).

Таблица 2 – Типовые динамические звенья

Звено	W(s)	Пример элемента
усилительное (безынерционное)	K	рычаг, редуктор, электронный усилитель
апериодическое (инерционное) первого порядка	K / (T·s + 1)	резервуар с истечением, нагреваемое тело, RC-цепь, двигатель постоянного тока по скорости
интегрирующее	K / s	электропривод задвижки (перемещение по скорости), резервуар без истечения
колебательное	K / (T²·s² + 2ξT·s + 1)	пружинный механизм с демпфером, RLC-цепь
запаздывающее	K·e^(−τ·s)	транспортёр, длинный трубопровод

Здесь K — коэффициент передачи (отношение установившихся значений выхода и входа), T — постоянная времени, τ — время запаздывания, ξ — коэффициент демпфирования.

Переходная характеристика апериодического звена

Переходной характеристикой h(t) называют реакцию звена на единичное ступенчатое входное воздействие при нулевых начальных условиях. Для апериодического звена

$$h(t) = K \cdot (1 - e^{(-t/T)}).$$

Выходной сигнал нарастает по экспоненте и стремится к установившемуся значению K (рисунок 3). За время t = T выход достигает 63 % установившегося значения, касательная к кривой в начале координат пересекает уровень K при t = T. За время 3T выход достигает 95 % установившегося значения; это время принимают за время переходного процесса tп ≈ 3T.

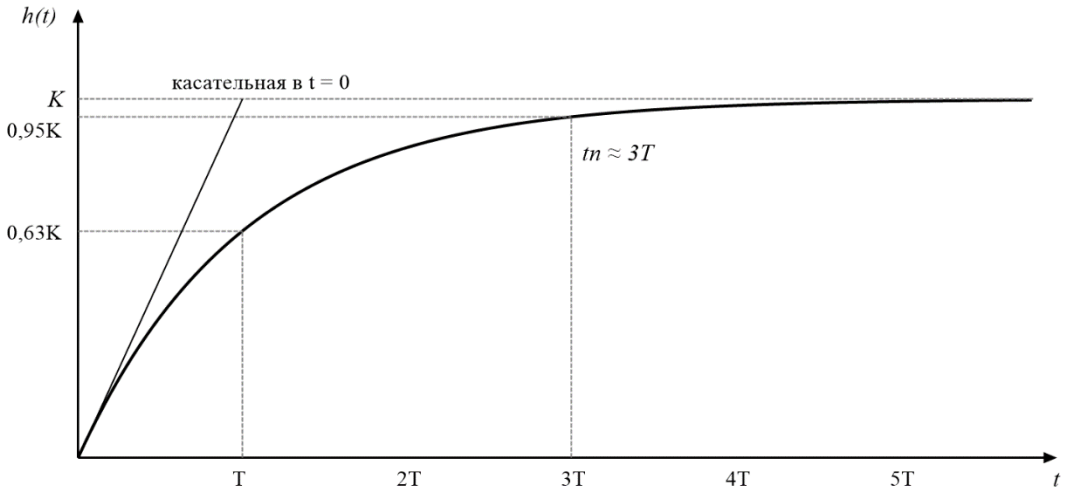


Рисунок 3 – Переходная характеристика апериодического звена

Пример расчёта. Звено с K = 2 и T = 5 с. При t = 5 с: h = 2 · (1 − e^(−1)) = 2 · 0,632 = 1,26; при t = 10 с: h = 2 · (1 − e^(−2)) = 2 · 0,865 = 1,73; время переходного процесса tп ≈ 3 · 5 = 15 с, к этому моменту h = 2 · 0,95 = 1,90.

Соединения звеньев

Передаточная функция соединения звеньев (рисунок 4):

– последовательное соединение — W(s) = W1(s) · W2(s);

– параллельное соединение — W(s) = W1(s) + W2(s);

– соединение с отрицательной обратной связью — Wз(s) = W(s) / (1 + W(s) · Woc(s)), где W(s) — передаточная функция прямой цепи, Woc(s) — цепи обратной связи.

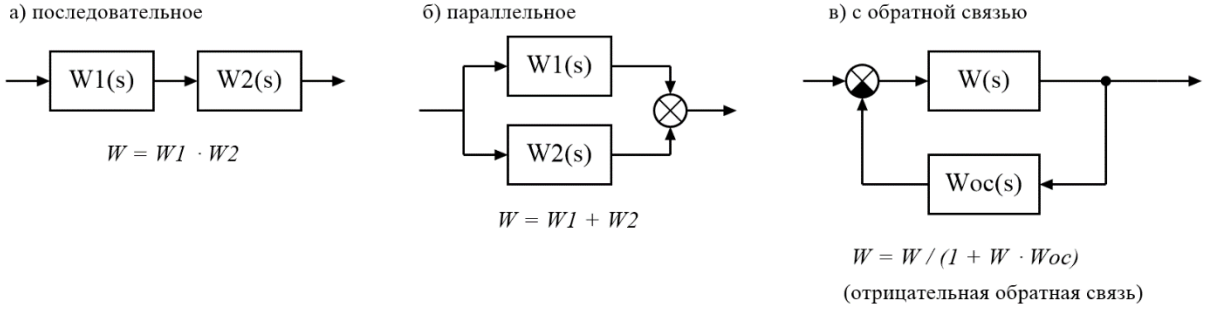


Рисунок 4 – Соединения звеньев: а) последовательное; б) параллельное; в) с обратной связью

Пример расчёта. Последовательно соединены усилительное звено K1 = 3 и апериодическое звено K2 / (T·s + 1) с K2 = 2, T = 4 с. Передаточная функция соединения W(s) = 3 · 2 / (4s + 1) = 6 / (4s + 1) — апериодическое звено с K = 6 и T = 4 с.

Замкнутая система с пропорциональным регулятором

Пропорциональный (П-) регулятор вырабатывает управляющее воздействие, пропорциональное ошибке: u = Kp · ε, его передаточная функция Wp(s) = Kp. Пусть объект вместе с исполнительным устройством и регулирующим органом описывается апериодическим звеном Wоб(s) = Kоб / (Tоб·s + 1), а обратная связь единичная (рисунок 5).

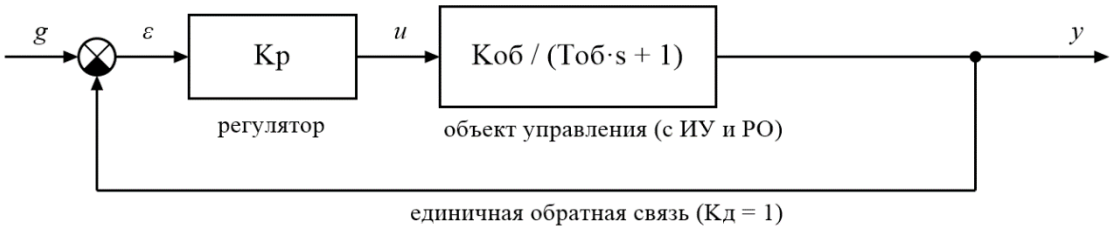


Рисунок 5 – Структурная схема замкнутой системы с П-регулятором и апериодическим объектом

Передаточная функция разомкнутой системы W(s) = Kp · Kоб / (Tоб·s + 1), её коэффициент передачи Kраз = Kp · Kоб. Передаточная функция замкнутой системы по формуле для обратной связи:

$$W_з(s) = K_{раз} / (T_{об}\cdot s + 1 + K_{раз}) = K_з / (T_з\cdot s + 1),\ K_з = K_{раз} / (1 + K_{раз}),\ T_з = T_{об} / (1 + K_{раз}).$$

Замкнутая система — также апериодическое звено, но с меньшей постоянной времени: обратная связь ускоряет переходный процесс в (1 + Kраз) раз. При

постоянном задании g установившееся значение регулируемой величины и статическая (установившаяся) ошибка:

$$y_{уст} = K_з \cdot g, \quad \varepsilon_{уст} = g - y_{уст} = g / (1 + K_{раз}).$$

Система с П-регулятором и статическим объектом всегда имеет статическую ошибку; её относительное значение $\delta = \varepsilon_{уст} / g = 1 / (1 + K_{раз})$. Чтобы ошибка не превышала допустимого значения $\delta_{доп}$, коэффициент регулятора должен быть не меньше

$$K_р \geq (1 / \delta_{доп} - 1) / K_{об}.$$

Пример расчёта. Объект: $K_{об} = 0{,}5$, $T_{об} = 60$ с; регулятор $K_р = 4$; задание $g = 100$ %. $K_{раз} = 4 \cdot 0{,}5 = 2$; $K_з = 2 / 3 = 0{,}667$; $T_з = 60 / 3 = 20$ с. Установившееся значение $y_{уст} = 0{,}667 \cdot 100 = 66{,}7$ %, статическая ошибка $\varepsilon_{уст} = 100 / 3 = 33{,}3$ %. Время регулирования $3T_з = 60$ с, тогда как сам объект приходит к установившемуся состоянию за $3T_{об} = 180$ с. Чтобы ошибка не превышала 5 % ($\delta_{доп} = 0{,}05$), нужен $K_р \geq (1 / 0{,}05 - 1) / 0{,}5 = 38$.

Обратите внимание. В примерах и вариантах все сигналы (задание, регулируемая величина, управляющее воздействие) выражены в процентах диапазона измерения или управления. Поэтому коэффициенты передачи безразмерны, а обратную связь можно считать единичной.

Порядок выполнения работы

Работа выполняется по описанию системы из карточки варианта. Результаты оформляются в отчёте: таблицы, схемы, расчёты и график.

Шаг 1. Анализ системы

Прочитайте описание системы в карточке варианта и заполните таблицу элементов по образцу таблицы 3: для каждого элемента функциональной схемы укажите конкретное устройство системы своего варианта.

Таблица 3 – Образец таблицы элементов системы

Элемент	Устройство в системе варианта
Объект управления	
Регулируемая величина y	
Основное возмущение f	
Регулирующий орган	
Исполнительное устройство	
Измерительный элемент (датчик)	
Регулятор и задающее устройство	

Шаг 2. Функциональная схема

Начертите функциональную схему системы по образцу рисунка 1, подписав в блоках конкретные устройства (например, «Электропривод МЭО» вместо «ИУ»). Обозначьте сигналы g, ε, u, q, y, x, f.

Шаг 3. Классификация системы

Определите: замкнутая или разомкнутая система; по какому принципу осуществляется управление; система стабилизации, программного управления или следящая. Предложите, какое возмущение можно было бы измерять для перехода к комбинированному управлению.

Шаг 4. Переходная характеристика объекта

По параметрам Kоб и Tоб из карточки варианта рассчитайте переходную характеристику объекта h(t) = Kоб · (1 − e^(−t/Tоб)) для моментов t = 0; 0,5Tоб; Tоб; 2Tоб; 3Tоб; 4Tоб; 5Tоб. Результаты сведите в таблицу и постройте график h(t) (вручную или в табличном редакторе). Отметьте на графике уровни 0,63Kоб и 0,95Kоб и время переходного процесса tп.

Обратите внимание. В табличном редакторе удобно задать столбец времени с шагом 0,1Tоб и формулу вида =K*(1-EXP(-A2/T)), где A2 — ячейка со временем, K и T — ячейки с параметрами объекта. График строится как точечная диаграмма с гладкими линиями.

Шаг 5. Замкнутая система с П-регулятором

Начертите структурную схему замкнутой системы по образцу рисунка 5 с числовыми значениями параметров. Рассчитайте: коэффициент передачи разомкнутой

системы Kраз; передаточную функцию замкнутой системы Wз(s), её коэффициент передачи Kз и постоянную времени Tз; установившееся значение регулируемой величины yуст и статическую ошибку εуст при задании g; время регулирования 3Tз. Сравните время регулирования с временем переходного процесса объекта из шага 4 и сделайте вывод о влиянии обратной связи.

Шаг 6. Выбор коэффициента регулятора

Рассчитайте наименьший коэффициент Kр, при котором относительная статическая ошибка не превышает δдоп из карточки варианта. Для найденного Kр вычислите постоянную времени замкнутой системы Tз. Объясните, почему в реальной системе коэффициент регулятора нельзя увеличивать неограниченно.

Индивидуальное задание

Вариант 1 выполняют студенты с нечётным номером в списке группы, вариант 2 — с чётным. Выполните шаги 1–6 для системы, описанной в карточке своего варианта.

Содержание отчёта

1) Тема и цель работы.
2) Таблица элементов системы своего варианта.
3) Функциональная схема системы.
4) Классификация системы с обоснованием.
5) Таблица и график переходной характеристики объекта.
6) Структурная схема замкнутой системы и расчёты шагов 5 и 6.
7) Ответы на контрольные вопросы и выводы.

Контрольные вопросы

1) Из каких элементов состоит замкнутая система автоматического управления? Каково назначение каждого?

2) Чем регулирующий орган отличается от исполнительного устройства? Приведите примеры.

3) В чём состоят принципы управления по отклонению и по возмущению? Каковы их достоинства и недостатки?

4) Чем системы стабилизации отличаются от программных и следящих систем?

5) Что такое передаточная функция и переходная характеристика звена?

6) Как по графику переходной характеристики апериодического звена определить K и T?

7) Запишите передаточные функции последовательного, параллельного соединений и соединения с обратной связью.

8) Почему в системе с П-регулятором и статическим объектом существует статическая ошибка?

9) Как изменятся статическая ошибка и быстродействие замкнутой системы при увеличении Kр?

10) Рассчитайте статическую ошибку системы с Kр = 9 и Kоб = 1 при задании 50 %.

Вариант 1

Система стабилизации уровня воды в напорном баке

Напорный бак водонапорной башни снабжает водой потребителей посёлка. Вода поступает в бак по подающему трубопроводу через регулирующий клапан, положение которого изменяет электрический исполнительный механизм. Расход воды потребителями изменяется в течение суток. Уровень воды в баке измеряется гидростатическим уровнемером, сигнал которого поступает на регулятор; на регуляторе оператор задаёт требуемый уровень.

Параметр	Значение
Коэффициент передачи объекта Kоб	0,8
Постоянная времени объекта Tоб, с	40
Коэффициент П-регулятора Kр	5
Задание g, %	60
Допустимая относительная статическая ошибка δдоп, %	2

Результат	Значение
Время переходного процесса объекта tп, с	
Kраз / Kз / Tз	
yуст, % / εуст, %	
Время регулирования 3Tз, с	
Kр для δ ≤ δдоп и соответствующая Tз, с	

Вариант 2

Система стабилизации температуры воздуха в сушильной камере

В сушильной камере деревообрабатывающего цеха воздух нагревается паровым калорифером. Подача пара в калорифер изменяется регулирующим клапаном с пневматическим исполнительным механизмом. На температуру в камере влияют загрузка влажного материала и температура наружного воздуха. Температура воздуха измеряется термопреобразователем сопротивления, сигнал которого поступает на регулятор с задатчиком температуры.

Параметр	Значение
Коэффициент передачи объекта Kоб	1,5
Постоянная времени объекта Tоб, с	120
Коэффициент П-регулятора Kр	3
Задание g, %	70
Допустимая относительная статическая ошибка δдоп, %	5

Результат	Значение
Время переходного процесса объекта tп, с	
Kраз / Kз / Tз	
yуст, % / εуст, %	
Время регулирования 3Tз, с	
Kр для δ ≤ δдоп и соответствующая Tз, с	