

Основы автоматического регулирования

Руководство обучающегося · Тема 2.5

СОДЕРЖАНИЕ

Руководство обучающегося

Интерактивный тренажёр «Основы автоматического регулирования»

Тема 2.5

Тренажёр предназначен для последовательного изучения замкнутых и разомкнутых систем автоматического регулирования, динамики объекта, типовых динамических звеньев, законов регулирования и показателей качества.

Главная задача обучающегося — не просто изменять ползунки, а понимать причинно-следственную цепочку:

что изменилось → почему изменился PV → какой стала ошибка e → что сделал регулятор → как изменились потоки → к какому результату пришла система.

1. С чего начинать

Первый запуск выполняйте во вкладке «**1. Контур САР**».

1. Выберите режим «**Замкнутый**».
2. Оставьте **ПИ-регулятор**.
3. Найдите на экране **SP**, **PV** и **u**.
4. Нажмите «**Старт**».
5. Следите одновременно за 3D-баком и графиком.
6. Когда PV приблизится к SP, измените SP на 5-10 %.
7. После установления нажмите «**+ Возмущение**».
8. Проследите: дополнительный слив → изменение PV → ошибка e → действие регулятора → изменение LV → восстановление уровня.

Правило учебного опыта. Меняйте один параметр за один опыт. Если одновременно изменить SP, Kp, Ti, Td, T и L, причину результата определить трудно.

2. Как устроен экран

Область	Назначение
Верхние вкладки	Шесть последовательных учебных модулей.
Левая панель	Режимы, параметры, запуск, пауза, сброс, возмущение.
Центр — 3D	Физическая модель бака или стенд динамического звена.
Центр — график	Изменение входов и выходов во времени.
Правая панель	Формулы, показатели качества, пояснения и результаты.
Подсказки 3D	Наведение на объект показывает назначение и текущее значение.

Работайте слева направо: **задать условия → наблюдать 3D и график → анализировать показатели справа.**

3. Главные обозначения

Обозначение	Что означает	Как понимать
SP	Set Point — задание	Какой уровень требуется поддерживать.
PV	Process Value — текущее значение	Фактический измеренный уровень.
e	Ошибка / рассогласование	$e = SP - PV$.
u	Управляющее воздействие	Выход регулятора, управляющий LV.
d	Возмущение	Внешнее воздействие; в тренажёре — дополнительный

Обозначение	Что означает	Как понимать
		слив.
qvx	Приток	Поток жидкости в бак.
qосн	Основной слив	Естественный слив, зависящий от PV в учебной модели.
qd	Дополнительный слив	Расход по ветке возмущения DV.
LV	Регулирующий клапан	Исполнительный орган САР на притоке.
DV	Клапан возмущения	Создаёт дополнительный слив.
LT	Датчик уровня	Измеряет PV и передаёт его в контур.
Kp	Пропорциональный коэффициент	Интенсивность реакции на текущую ошибку.
Ti	Время интегрирования	Параметр интегральной составляющей.
Td	Время дифференцирования	Параметр упреждающей составляющей.
T	Постоянная времени	Инерционность объекта.
L	Запаздывание	Задержка реакции объекта.

Ошибка регулирования

$$e = SP - PV$$

- $e > 0$: уровень ниже задания;
- $e < 0$: уровень выше задания;
- $e = 0$: PV совпадает с SP.

Баланс потоков бака

$$dPV/dt = (q_{вх} - q_{осн} - q_{д}) / T$$

Если приток больше суммарного слива, уровень растёт. Если суммарный слив больше притока, уровень падает.

В самовыравнивающейся учебной модели основной слив принят линейно зависящим от уровня: $q_{осн} \approx PV$. Это учебное упрощение, позволяющее ясно показать свойства объекта первого порядка.

Замкнутый контур автоматического регулирования уровня

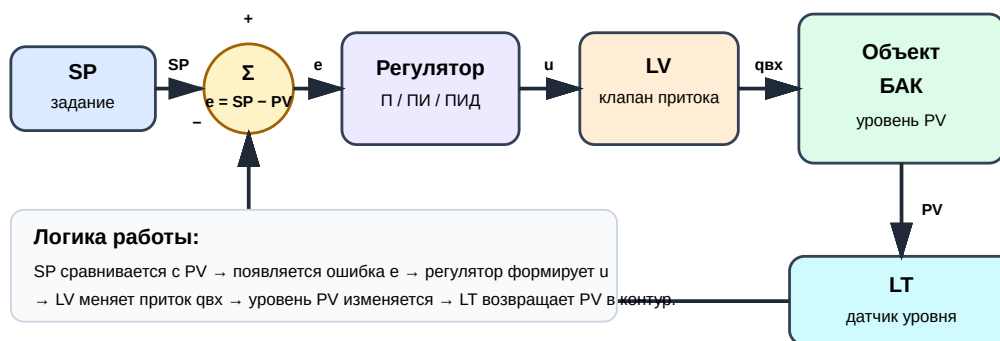


Рисунок 1. Замкнутый контур САУ уровня.

4. Управление 3D

Действие	Управление
Повернуть модель	ЛКМ + перемещение мыши
Переместить по X/Y	Shift + ЛКМ, ПКМ или средняя кнопка
Приблизить / отдалить	Колесо мыши
Получить пояснение	Навести курсор на элемент
Сбросить вид динамического звена	Двойной щелчок

Подсказки работают для бака, жидкости, LV, DV, LT, основного и дополнительного сливов, шкалы уровня и элементов динамического звена.

5. Модуль 1. Контур САР

Цель: понять обратную связь, ошибку e , управляющее воздействие u и возмущение d .

Разомкнутый и замкнутый контуры

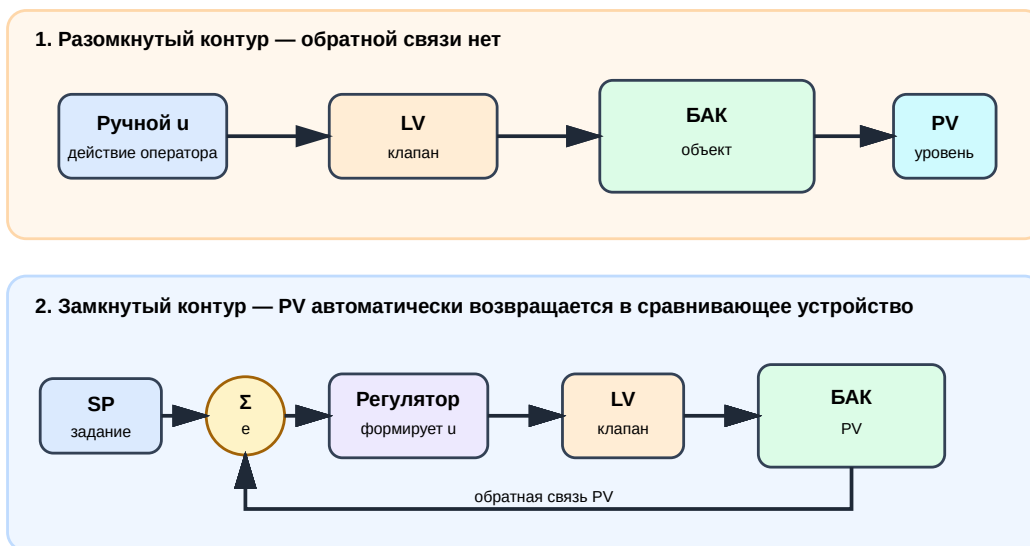


Рисунок 2. Сравнение разомкнутого и замкнутого контуров.

Замкнутый режим

1. Выберите «**Замкнутый**» и ПИ-регулятор.
2. Установите SP около 60–65 %.
3. Нажмите «**Старт**».
4. Следите за PV, e , u и положением клапана LV.
5. Сравнивайте $q_{вх}$ и $q_{осн}$.
6. Измените SP и проследите реакцию.
7. Создайте возмущение и найдите дополнительный слив q_d через DV.

Разомкнутый режим

В разомкнутом режиме обратная связь отключена. Ползунок « **u • ручной выход**» задаёт воздействие вручную. Система не исправляет отклонение автоматически.

Объект регулирования: баланс потоков в баке

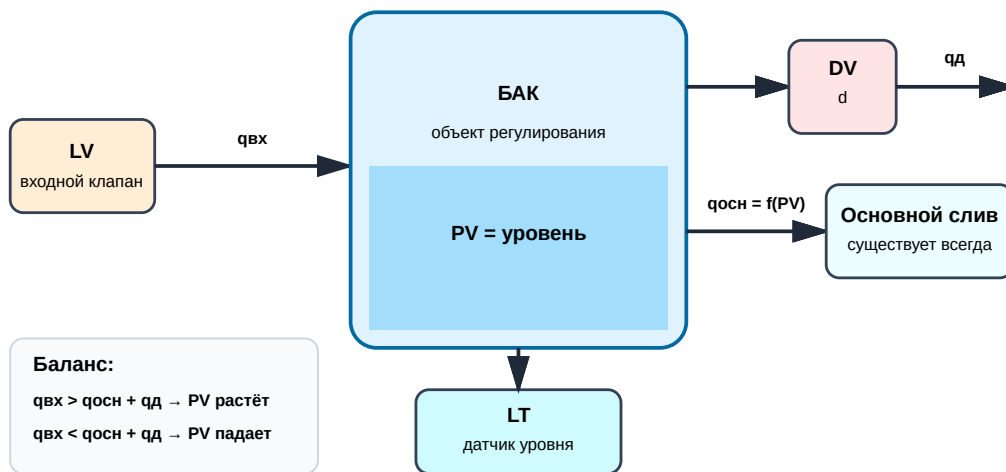


Рисунок 3. Баланс потоков в баке.

Возмущение и автоматическая компенсация

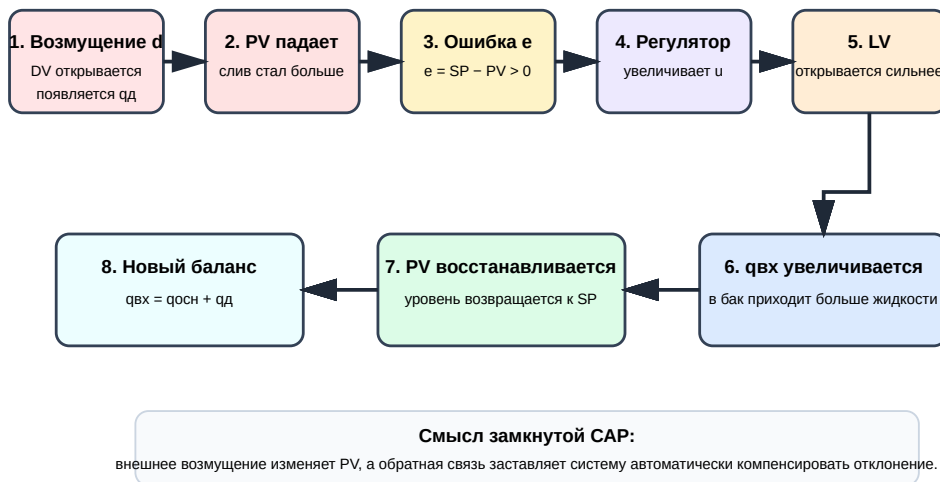


Рисунок 4. Возмущение и его автоматическая компенсация.

Не путайте: u — действие системы управления, d — внешнее воздействие, мешающее системе.

На что смотреть

- достиг ли PV заданного SP;

- какой знак имеет e ;
- как изменяется u ;
- почему уровень растёт или падает по балансу потоков;
- насколько процесс быстрый и устойчивый на графике.

6. Модуль 2. Кривая разгона

Цель: исследовать объект без регулятора по реакции на ступенчатое воздействие.

1. Выберите объект «**С самовыравниванием**».
2. Задайте u_0 и u_1 .
3. Задайте K , T и L .
4. Нажмите «**Подать ступень**».
5. На графике найдите момент ступени, начало реакции и установившееся значение.
6. Используйте отметку 63,2 % для понимания постоянной времени T .
7. Повторяйте опыт, меняя только один параметр.
8. Сравните объект «**Без самовыравнивания**».

Параметр	Если увеличить	Что видно
K	Усиливается статическая реакция	PV изменяется сильнее
T	Растёт инерционность	PV меняется медленнее
L	Растёт задержка	Реакция начинается позже

7. Модуль 3. Динамические звенья

Цель: узнавать тип звена по форме $y(t)$.

Типовые динамические звенья: вход $u \rightarrow$ звено $\rightarrow$ выход y

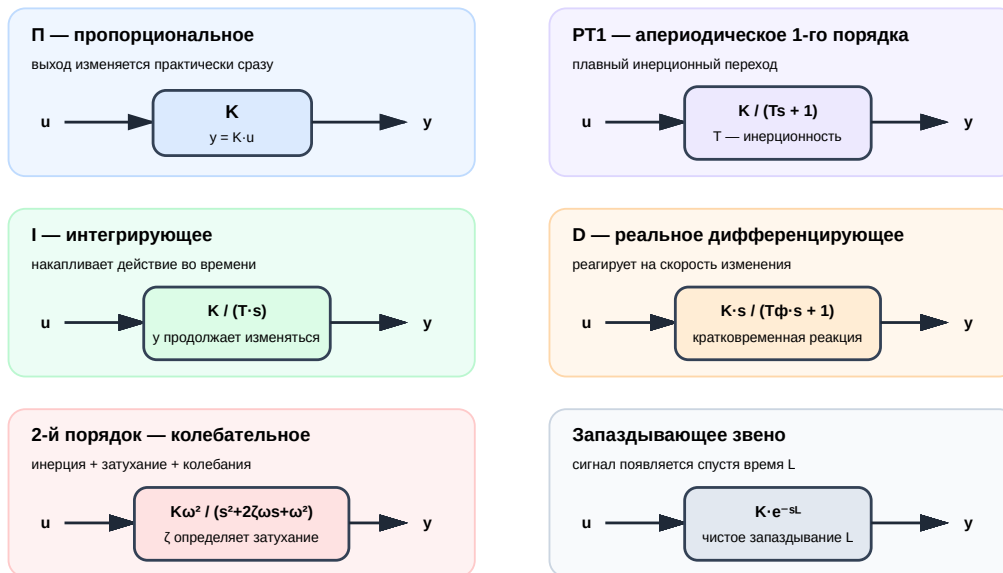


Рисунок 5. Блок-схемы типовых динамических звеньев.

Звено	Главный признак
П	Практически мгновенная пропорциональная реакция
PT1	Плавное аperiodическое приближение
I	При постоянном небалансе y продолжает изменяться
D	Кратковременная сильная реакция на изменение входа
2-й порядок	Колебания при малом затухании
Запаздывание	Выход появляется только через время L

Порядок работы:

1. Выберите тип звена.
2. Задайте параметры.
3. Нажмите «**Подать ступень**».
4. Сравните вход u и выход y .
5. Следите за графиком и фиолетовой кареткой.

6. Наведите курсор на центральный блок: подсказка показывает название, смысл, уравнение и параметры.
7. Повторите опыт для другого звена.

8. Модуль 4. Законы регулирования

Цель: сравнить П, И, ПИ, ПД, ПИД и двухпозиционное регулирование.

Законы регулирования: как ошибка e превращается в управление u

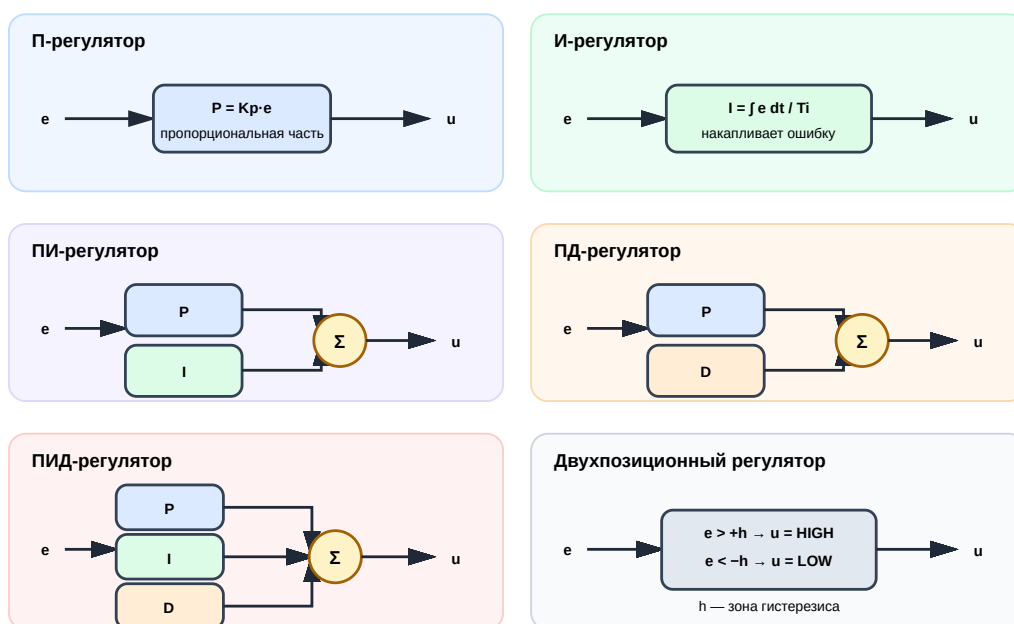


Рисунок 6. Состав управляющего воздействия для разных законов регулирования.

Закон	Что важно увидеть
П	Быстрая реакция, но возможна статическая ошибка
И	Устранение постоянной ошибки, возможна медленная/колебательная реакция
ПИ	Практичный баланс скорости и точности
ПД	Упреждение реакции
ПИД	Комбинация скорости,

Закон	Что важно увидеть
2-позиционный	точности и упреждения Переключения между двумя уровнями выхода

Для честного сравнения сохраняйте одинаковые SP, T и L. После каждого изменения закона выполняйте сброс и новый опыт.

9. Модуль 5. Качество регулирования

Цель: оценивать процесс по совокупности показателей.

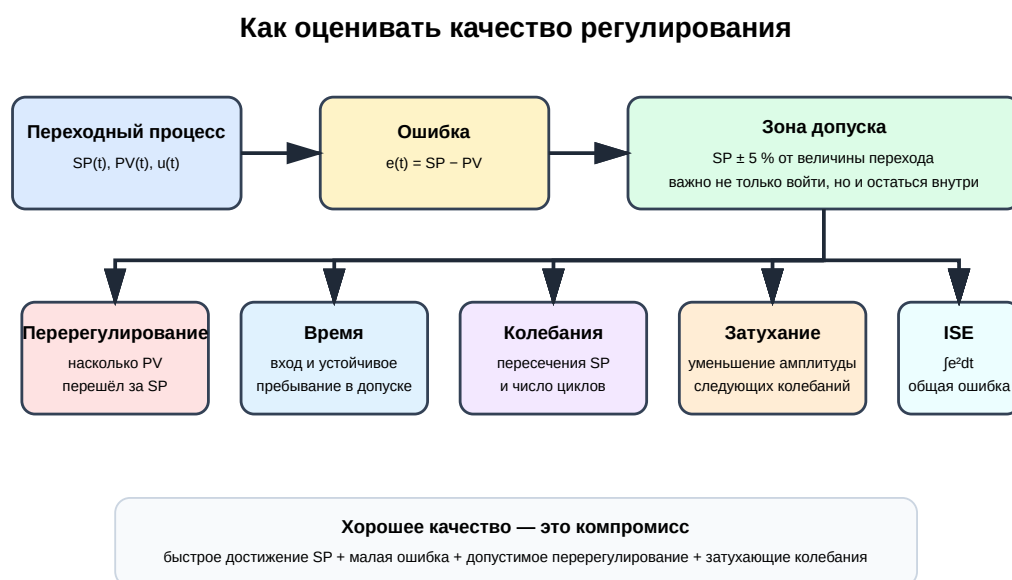


Рисунок 7. Блок-схема оценки качества регулирования.

Используйте три режима:

- **Плавный** — спокойный процесс без выраженного перерегулирования;
- **Быстрый** — более энергичная реакция;
- **Колебательный** — повторные пересечения SP и выраженные колебания.

Показатель	Что означает
Статическая ошибка	Остаточное рассогласование SP и PV
Максимальная ошибка	Наибольшее отклонение за опыт

Показатель	Что означает
Перерегулирование	Выход PV за SP
Время регулирования	Вход в допустимую зону с устойчивым пребыванием
Колебания	Число полных колебаний
Степень затухания	Уменьшение амплитуды последовательных колебаний
ISE	Интегральная квадратичная оценка ошибки
SP $\pm$ 5 %	Допустимая зона вокруг задания

Почему уровень падает при $d = 0$

Основной слив существует постоянно. Если регулятор прикрыл LV и $q_{вх} < q_{осн}$, уровень уменьшается даже при отсутствии дополнительного слива. Ветка DV создаёт только дополнительное возмущение.

10. Модуль 6. Итоговые задания

Модуль содержит восемь заданий по всем разделам.

1. Прочитайте вопрос.
2. Определите раздел темы.
3. Для расчёта сначала выберите формулу.
4. Выберите вариант или введите число.
5. Нажмите «**Проверить**».
6. Прочитайте пояснение.
7. Нажмите «**Следующее задание →**».
8. После восьмого задания откройте итог.
9. Для повторения используйте «**Новый вариант**».

В текущей версии результат итоговой работы отображается на странице, но ещё не передаётся автоматически в журнал/базу данных.

11. Три рекомендуемых учебных опыта

Опыт 1. Обратная связь

Контур САР → Замкнутый → ПИ. Установите SP около 65 %, запустите и дождитесь приближения PV к SP. Измените SP.

Наблюдайте:

SP изменился → e изменилось → u изменилось → LV изменил $q_{\text{вх}}$ → PV движется к новому заданию.

Опыт 2. Возмущение

При устойчивом PV нажмите «+ **Возмущение**».

Наблюдайте:

открылся DV → появился $q_{\text{д}}$ → PV уменьшился → e стало положительным → регулятор увеличил u → LV открылся сильнее → PV восстанавливается.

Опыт 3. Колебательная настройка

Качество → Колебательный → Старт.

Наблюдайте многократные пересечения SP. Сравнивайте $q_{\text{вх}}$ и $q_{\text{осн}}$, число колебаний, перерегулирование и ISE.

12. Типичные ошибки

- менять сразу несколько параметров;
- смотреть только на 3D и не анализировать график;
- путать SP и PV;
- путать u и d;
- считать, что основной слив появляется только при возмущении;
- оценивать качество только по скорости;
- сравнивать режимы без сброса опыта;
- пропускать пояснение после проверки задания.

13. Итоговая самопроверка

После прохождения тренажёра ответьте без запуска программы:

1. Что такое SP и чем оно отличается от PV?
2. Как вычисляется e и что означает её знак?

3. Почему $q_{осн}$ меняется при изменении PV?
4. Чем d отличается от u ?
5. Что произойдёт, если $q_{вх}$ меньше $q_{осн} + q_{д}$?
6. Чем замкнутый контур отличается от разомкнутого?
7. Что показывают T и L на кривой разгона?
8. Как отличить PT1 от интегрирующего и запаздывающего звена?
9. Почему П-регулятор может оставлять статическую ошибку?
10. Какие показатели учитывают при оценке качества?

Краткий алгоритм анализа любого опыта

1. Определить, что изменено: SP, d , настройка регулятора или параметр объекта.
 2. Сравнить SP и PV.
 3. Определить знак и величину e .
 4. Посмотреть на u и исполнительный орган.
 5. Сравнить приток и суммарный слив.
 6. Оценить график и численные показатели.
 7. Сформулировать физический вывод одним-двумя предложениями.
-

Электронное руководство: /sar_basics_guide.php

Тренажёр: /sar_basics.php