

Показатели качества автоматических систем регулирования

Лекция 25

Качество регулирования

- Если исследуемая АСР устойчива, то может возникнуть вопрос о том, насколько качественно происходит регулирование в этой системе и удовлетворяет ли оно технологическим требованиям.
- На практике качество регулирования может быть определено визуально по графику переходной кривой, однако, имеются точные методы, дающие конкретные числовые значения.

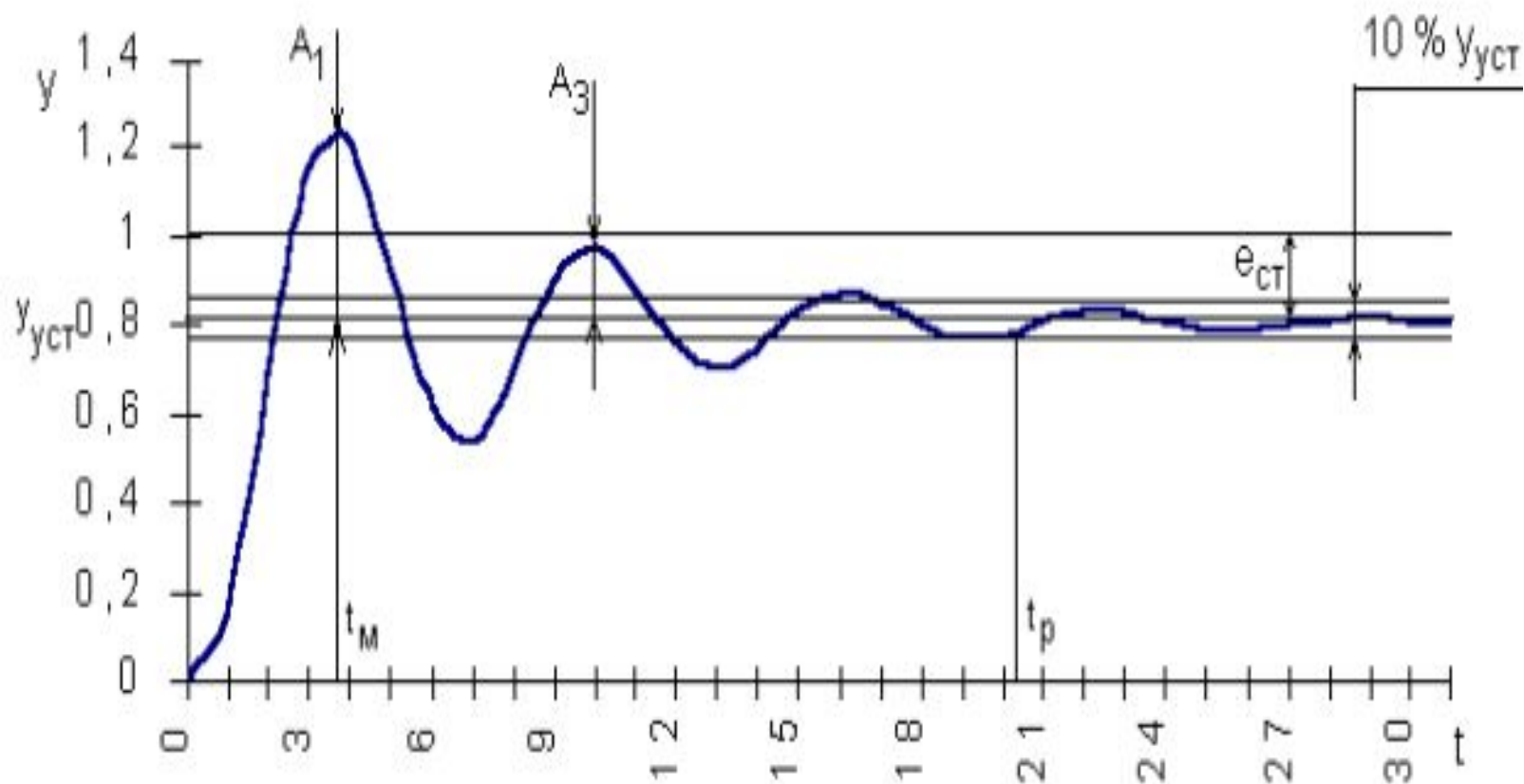
Показатели качества регулирования

- Показатели качества разбиты на 4 группы:
- 1) прямые – определяемые непосредственно по кривой переходного процесса,
- 2) корневые – определяемые по корням характеристического полинома,
- 3) частотные – определяемые по частотным характеристикам,
- 4) интегральные – получаемые путем интегрирования функций.

Прямые показатели качества

- К ним относятся:
- степень затухания ψ ,
- перерегулирование σ ,
- статическая ошибка $e_{ст}$,
- время регулирования t_p и др.

Колебательный вид снятой переходной характеристики



Степень затухания

- *Степень затухания* ψ определяется по формуле

$$\Psi = 1 - \frac{A_3}{A_1},$$

- где A_1 и A_3 - соответственно 1-я и 3-я амплитуды переходной кривой.

Перерегулирование

- По колебательной переходной характеристике определяется *установившееся значение выходной величины* $y_{уст}$.
- *Перерегулирование* определяется так:

$$\sigma = A1/ y_{уст} = (y_{max} - y_{уст})/ y_{уст},$$

- где y_{max} - максимум переходной кривой.

Статическая ошибка

- *Статическая ошибка* определяется так:
-

$$e_{\text{ст}} = x - y_{\text{уст}'}$$

- где **x** - входная величина.

Время регулирования

- *Время достижения* первого максимума: t_m определяется по графику.
- *Время регулирования* t_r определяется следующим образом: Находится допустимое отклонение $\Delta = 5\% y_{уст}$ и строится «трубка» толщиной 2Δ .
- Время t_r соответствует последней точке пересечения $y(t)$ с данной границей. То есть время, когда колебания регулируемой величины перестают превышать 5 % от установившегося значения.

Корневые показатели качества

- К ним относятся: степень колебательности m , степень устойчивости η и др.
- Не требуют построения переходных кривых, поскольку показатели определяются по корням характеристического полинома. Для этого корни полинома откладываются на комплексной плоскости и по ним определяются:
- - *Степень устойчивости* η — аница, правее которой корней нет, т.е.

$$\eta = \min |\operatorname{Re}(s_i)|,$$

-
-
- Где $\operatorname{Re}(s_i)$ - действительная часть корня s_i .

- - *Степень колебательности* m рассчитывается через угол γ :

$$m = \operatorname{tg} \gamma.$$

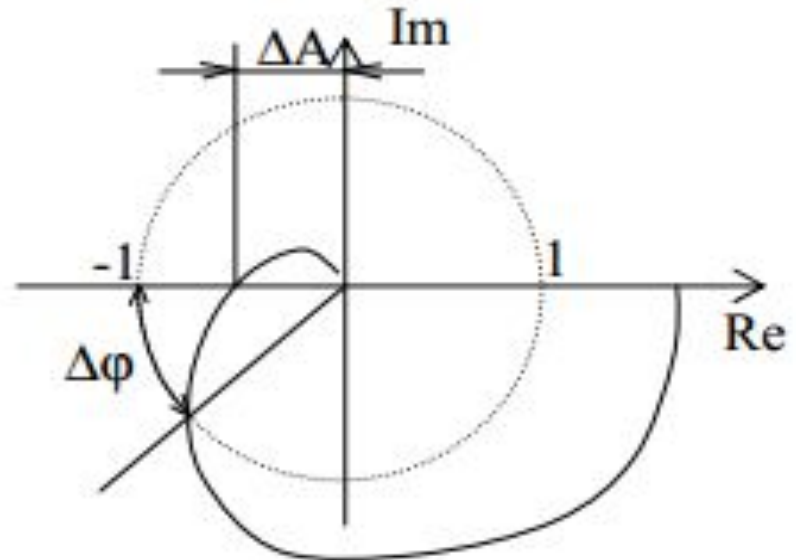
- Для определения γ проводятся два луча, которые ограничивают все корни на комплексной плоскости, γ - угол между этими лучами и мнимой осью. Степень колебательности может быть определена также по формуле:

$$m = \min \left| \frac{\operatorname{Re}(s_i)}{\operatorname{Im}(s_i)} \right|.$$

Частотные показатели качества

- Для определения частотных показателей качества требуется построение АФХ разомкнутой системы и АЧХ замкнутой системы, рисунок .
- По АФХ определяются запасы: ΔA – по амплитуде, $\Delta\varphi$ – по фазе.
- Запас ΔA определяется по точке пересечения АФХ с отрицательной действительной полуосью. Для определения $\Delta\varphi$ строится окружность единичного радиуса с центром в начале координат. Запас $\Delta\varphi$ определяется по точке пересечения с этой окружностью.
- По АЧХ замкнутой системы определяются *показатели колебательности* по заданию M и ошибке ME как максимумы соответственно АЧХ по заданию и АЧХ по ошибке.

- Рисунок – АФХ разомкнутой системы и АЧХ замкнутой системы



Связи между показателями качества

- Описанные выше показатели качества связаны между собой определенными соотношениями:

$$\Psi = 1 - e^{-2\pi m};$$

$$t_p = \frac{3}{\eta};$$

$$\Psi = 1 - M^{\frac{\pi}{m}};$$

$$M = \frac{m^2 + 1}{2m}.$$

Настройка регуляторов

Типы регуляторов

- Для управления объектами технологических систем, как правило, используют типовые регуляторы, названия которых соответствуют названиям типовых звеньев:
- *1) П-регулятор (пропорциональный регулятор),*
- *2) И-регулятор (интегрирующий регулятор),*
- *3) Д-регулятор (дифференцирующий регулятор),*
- *4) ПИ-регулятор (пропорционально-интегральный регулятор),*
- *5) ПД-регулятор (пропорционально-дифференциальный регулятор),*
- *6) ПИД - регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор).*

P-регулятор

- Его передаточная функция
- - $W_p(s) = K_1$.
-
- Принцип действия заключается в том, что он вырабатывает управляющее воздействие на объект пропорционально величине ошибки (чем больше ошибка e , тем больше управляющее воздействие u).

И-регулятор

- Его передаточная функция

$$W_{И}(s) = \frac{K_0}{s}.$$

- Управляющее воздействие пропорционально интегралу от ошибки.

Д-регулятор

- Его передаточная функция

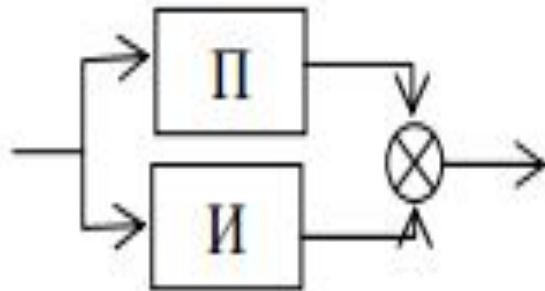
$$W_D(s) = K_2 s.$$

- Генерирует управляющее воздействие только при изменении регулируемой величины:

- $$u = K_2 \frac{de}{dt}.$$

ПИ-регулятор

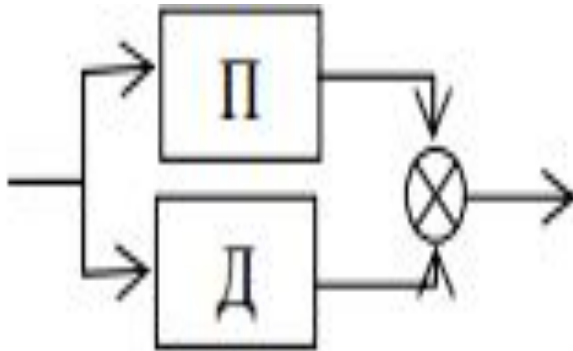
- Структурная схема и передаточная функция ПИ-регулятора:



$$W_{\text{ПИ}}(s) = K_1 + \frac{K_0}{s}.$$

ПД-регулятор

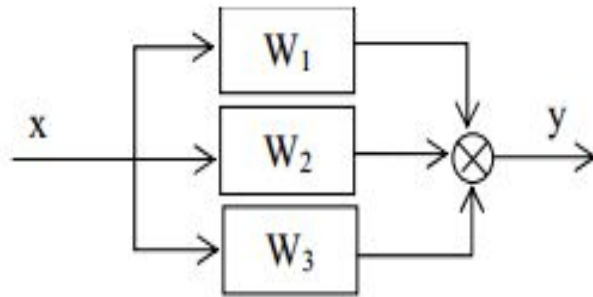
- Структурная схема и передаточная функция ПД-регулятора:



$$W_{\text{ПД}}(s) = K_1 + K_2 s.$$

ПИД - регулятор

- Структурная схема и передаточная функция ПИД-регулятора:



$$W_{\text{ПИД}}(s) = K_1 + \frac{K_0}{s} + K_2 s.$$

- W_1 – П-регулятор, W_2 – И-регулятор, W_3 – Д-регулятор
- Наиболее часто используется ПИД-регулятор, поскольку он сочетает в себе достоинства всех трех типовых регуляторов.

Определение оптимальных настроек регуляторов

- Регулятор, включенный в АСР, может иметь несколько настроек, каждая из которых может изменяться в достаточно широких пределах. При этом при определенных значениях настроек система будет управлять объектом в соответствии с технологическими требованиями, при других может привести к неустойчивому состоянию. Поэтому стоит задача определить настройки, соответствующие устойчивой системе, но и выбрать из них оптимальные.
- *Оптимальными настройками* регулятора называются настройки, которые соответствуют минимуму (или максимуму) какого-либо показателя качества. Требования к показателям качества устанавливаются непосредственно, исходя из технологических особенностей.

Настраиваемые параметры

- Чаще всего накладываются требования на *время регулирования* (минимум) и *степень затухания* ($\Psi \geq \Psi_{\text{зад}}$). Однако, изменяя настройки таким образом, чтобы увеличить степень затухания, мы можем прийти к слишком большому времени регулирования, что нецелесообразно. И, наоборот, стремясь уменьшить время регулирования, мы получаем более колебательные процессы с большим значением Ψ .
- Зависимость Ψ от t_p в общем случае имеет вид, изображенный на графике (см. рисунок).

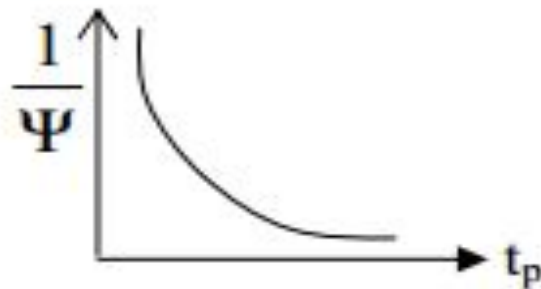


Рисунок – Зависимость обратной степени затухания от времени регулирования

Математические методы настройки

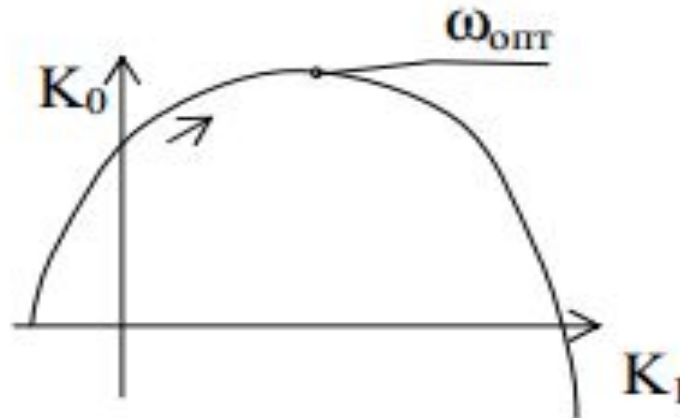
- Поэтому для определения оптимальных настроек разработан ряд математических методов, среди которых метод D-разбиения. Кривой D-разбиения называется кривая в плоскости настроек регулятора, которая соответствует определенному значению какого-либо показателя качества.
- Например, требуется обеспечить степень затухания $\Psi \geq \Psi_{зад}$.
- Имеется формула, связывающая Ψ со степенью колебательности m :
$$\Psi = 1 - e^{-2\pi m}$$
-
-
- Далее строится кривая D-разбиения равной степени колебательности m .

Построение кривой D-разбиения

- Последовательность построения:
- 1) Определяется характеристический полином замкнутой системы **ХПЗС $D_3(s)$** с неизвестными настройками.
- 2) Делается подстановка $s = j\omega - m\omega$ и разделение характеристического выражения замкнутой системы
$$D_3(j\omega - m\omega) = \text{Re}(\omega) + \text{Im}(\omega).$$
- 3) Полученное выражение приравнивается к нулю и получается система
 - $$\begin{cases} \text{Re}(\omega) = 0 \\ \text{Im}(\omega) = 0 \end{cases}$$
 -
 -
- Данная система имеет несколько неизвестных: ω и настройки регулятора.
- 4) Далее, изменяя ω от 0 до ∞ эта система решается относительно настроек регулятора.
- 5) По полученным данным строится кривая, по которой определяются оптимальные настройки.

Пример кривой D-разбиения

- Например, для ПИ-регулятора кривая D-разбиения может иметь вид, представленный на рисунке



- Рисунки – Кривая D-разбиения для П-регулятора
- Оптимальные настройки соответствуют максимальному значению K_0 (для ПИ- и ПИД-регуляторов) или K_1 (для ПД-регулятора).

Автоматическое регулирование на основе нечеткой логики

Нечеткая логика

- В последнее время для управления системами, например системой светодиодного освещения или системой кондиционирования воздуха активно развивается принципиально новые законы регулирования, получившие название «нейротехнология и нечеткая логика» (Neuro&Fuzzy logic).
- Нейротехнология - это новая технология управления, в которой в качестве модели используется нейронная система. Данный способ заключается в использовании параметров PMV (Predicted Mean Voice - предсказанное усредненное голосование), определяющих для человека комфорт окружающей среды по величине индексов дискомфорта D_n .

Система кондиционирования

- Система измеряет температуру в помещении и автоматически выбирает режим работы. Выбор основывается на практическом анализе - за эталон берутся стандартные предпочтения людей, пользующихся системой. Величины D_n отражают уровни различных факторов, от значения которых зависит комфорт человека: температура, влажность, интенсивность воздушных потоков, тип одежды (летняя зимняя) и др.
- Приведем пример учета воздействия влажности на состояние человека. Ощущение теплоты или прохлады является следствием не только температуры воздуха, но и его влажности. Температура воздуха 26°C и влажность 50-60% считаются комфортными летом, тогда как температура 22°C будет комфортной зимой. Однако даже температура 29°C будет находиться в зоне комфортности, если влажность составляет 50%. тогда как эта же температура при влажности 70% будет казаться высокой и вызывать ощущение «паркости». Для оценки совместного влияния температуры и влажности на ощущение дискомфорта введен индекс
- $$D_n = 0,72(t_c + t_{вл}) + 40,6,$$
- где t_c - температура сухого термометра; $t_{вл}$ - температура влажного термометра.

Таблица степени дискомфорта

Индекс дискомфорта D_n	Степень дискомфорта
70 или менее	Комфортно
70-75	Некоторые люди чувствуют себя некомфортно
75-80	50 % людей чувствуют себя некомфортно
80-85	Все чувствуют себя некомфортно
86 и более	Невыносимый дискомфорт

Понятия нечеткой логики

- Такой подход хорошо согласуется с логической системой обработки информации “нечеткая логика” (fuzzy logic), которая применяется в нечетких логических регуляторах (НЛР).
- Нечеткая логика имеет преимущества по сравнению с использованием ПИД-регуляторов при обработке очень сложных процессов, нелинейных процессов высоких порядков, обработке экспертных (лингвистически сформулированных) данных.
- Нечеткая логика оперирует не цифровыми, а лингвистическими понятиями. Ключевыми понятиями нечеткой логики являются:
 - - фаззификация - преобразование множества значений аргумента (x) в некоторую функцию принадлежности $M(x)$, т. е. перевод значений (x) в нечеткий формат;
 - - дефаззификация - процесс обратный фаззификации.
- Системы с нечеткой логикой функционируют по следующему принципу: показания измерительных приборов фаззифицируются (переводятся в нечеткий формат), обрабатываются, дефаззифицируются и затем в виде обычных сигналов подаются на исполнительные устройства.

Принцип управления холодопроизводительностью кондиционера

- Рассмотрим принцип управления холодопроизводительностью кондиционера с использованием нечеткой логики.
- Холодопроизводительность, которую должен обеспечить кондиционер, определяется разностью между температурой в помещении и температурой, которую мы хотели бы получить (температура установки). Эта переменная лингвистически может быть сформулирована как “разность температур” и принимать значения “малая”, “средняя” и “большая”. Естественно, чем больше разность температур в данный момент, тем больше должна быть холодопроизводительность.
- Второй лингвистической переменной определим “скорость изменения температуры” в помещении, которой также дадим лингвистические значения “малая”, “средняя” и “большая”. Если скорость изменения температуры большая, то требуется большая холодопроизводительность. По мере приближения температуры в помещении к температуре установки скорость изменения температуры в помещении будет уменьшаться, а холодопроизводительность кондиционера снижаться.

Оценка холодопроизводительности

- Холодопроизводительность является выходной переменной, которой присваиваются следующие термы: “очень малая”, “малая”, “средняя”, “большая” и “очень большая”.
- Связь между входом и выходом занесем в таблицу нечетких правил
- Таблица – Зависимость холодопроизводительности от разности температур и скорости ее изменения

Скорость изменения температуры	Разность температур		
	малая	средняя	большая
малая	очень малая	малая	средняя
средняя	малая	средняя	большая
большая	средняя	большая	очень большая

Принцип работы кондиционера

- Каждая запись соответствует своему нечеткому правилу. Например, если разность температур средняя, а скорость изменения большая, то холодопроизводительность должна быть большая.
- Кондиционер с нечеткой логикой работает по следующему принципу: сигналы от датчиков будут фаззифицированы, обработаны, дефаззифицированы и полученные данные в виде сигналов поступят на частотный регулятор двигателя компрессора, скорость вращения которого (а, следовательно, и производительность) будут меняться в соответствии со значением *функции принадлежности*.

Функции принадлежности

- Построим две функции принадлежности. В одном случае аргументом является разность температур (Δt) (рис. 1), а во втором - скорость изменения температуры (V_t) (рис. 2).
- Для первой функции диапазон температур составляет от 0 до 30 К, для второй - от 0 до 0.3 К/мин.
-
-

Рис. 1 – Функция принадлежности для лингвистического аргумента «разность температур»

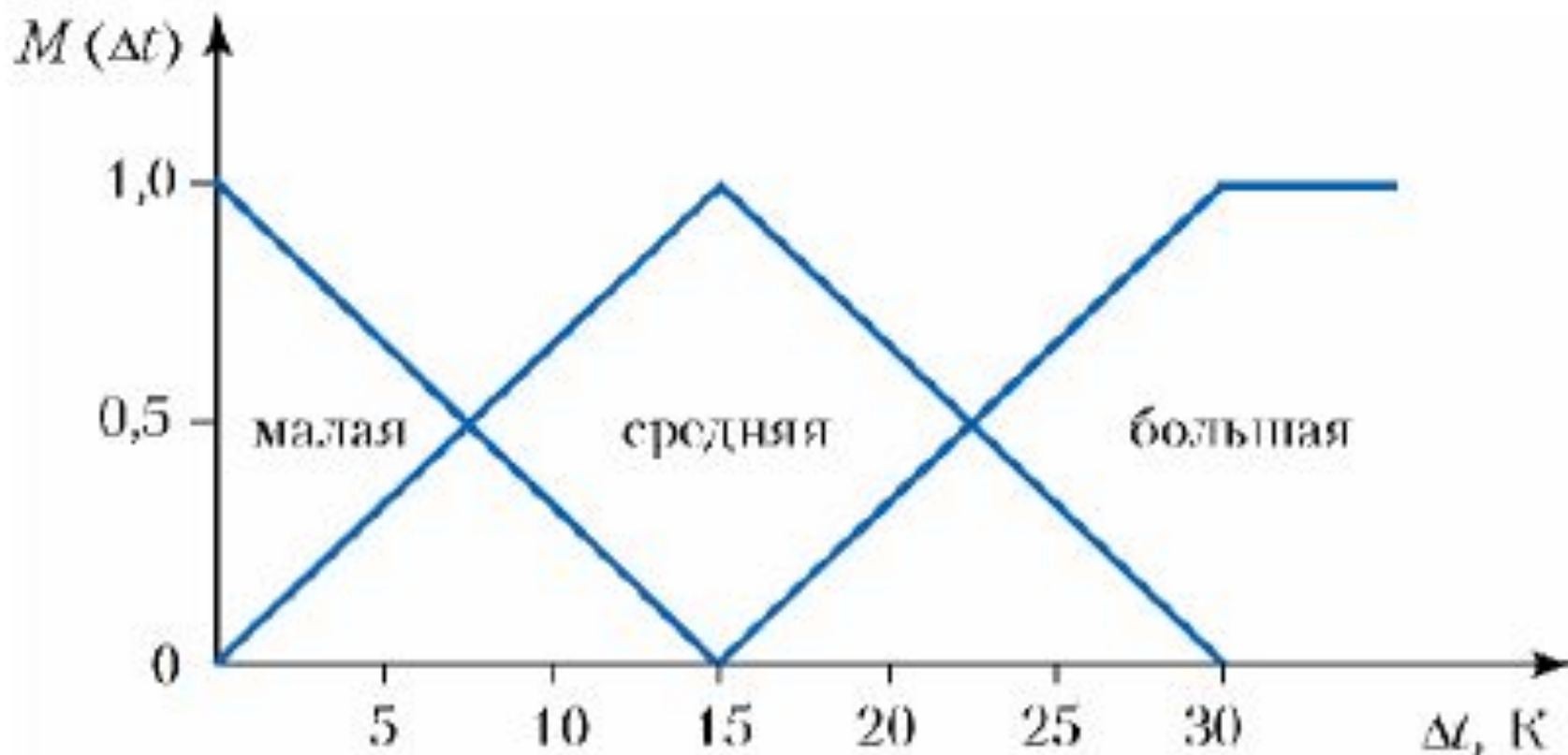
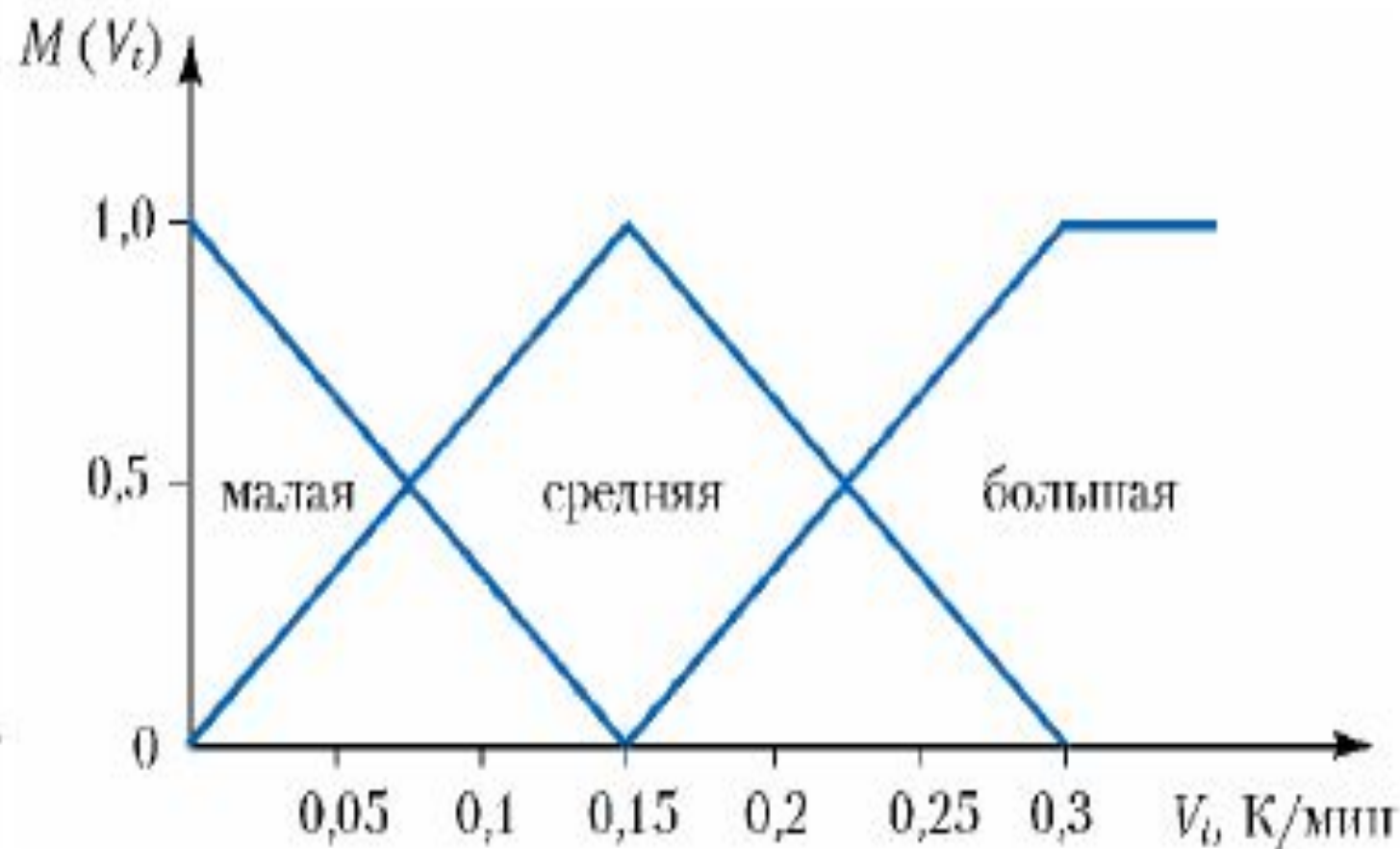


Рис.2– Функция принадлежности для лингвистического аргумента «скорость изменения температуры»



Совместное влияния двух функций принадлежности

- Результат совместного влияния двух функций принадлежности на значение выходного параметра

$$M_{\Sigma} = f[M(\Delta t), M(V_t)]$$

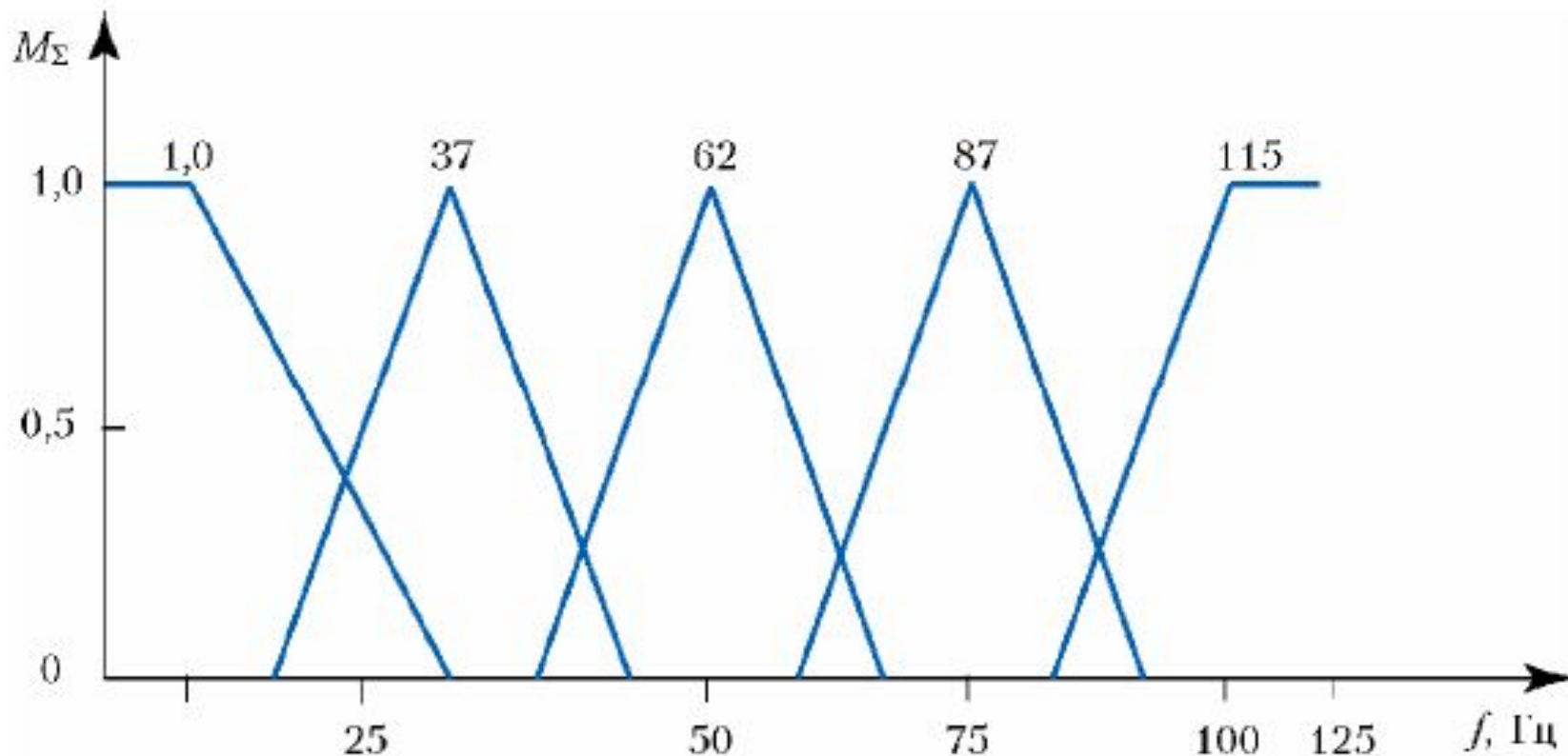
- "холодопроизводительность" определяется соответствующей программой, заложенной в логическое устройство.

Переход к скоростям вращения

- Учитывая, что холодопроизводительность пропорциональна частоте вращения компрессора, можно построить зависимость результирующей функции принадлежности M_{Σ} от частоты вращения компрессора, придав лингвистическим термам скорость вращения компрессора с рангом 1.0 следующие значения:
 - малая - 37 Гц;
 - средняя - 62 Гц;
 - большая – 87 Гц;
 - очень большая - 115 Гц.

•

Зависимость параметра «частота вращения компрессора» от значения суммарной функции принадлежности



Результат

- Таким образом, найдя лингвистическим методом суммарную функцию принадлежности, после дефаззификации можно перейти к четкому значению выходного параметра – частоте вращения компрессора или холодопроизводительности.

Блок-схема микроконтроллера, реализующего нечеткую логику

- Микроконтроллер, реализующий нечеткую логику, содержит в своем составе следующие составные части: блок фаззификации, базу знаний, логическое устройство, блок дефаззификации, управляемая система.



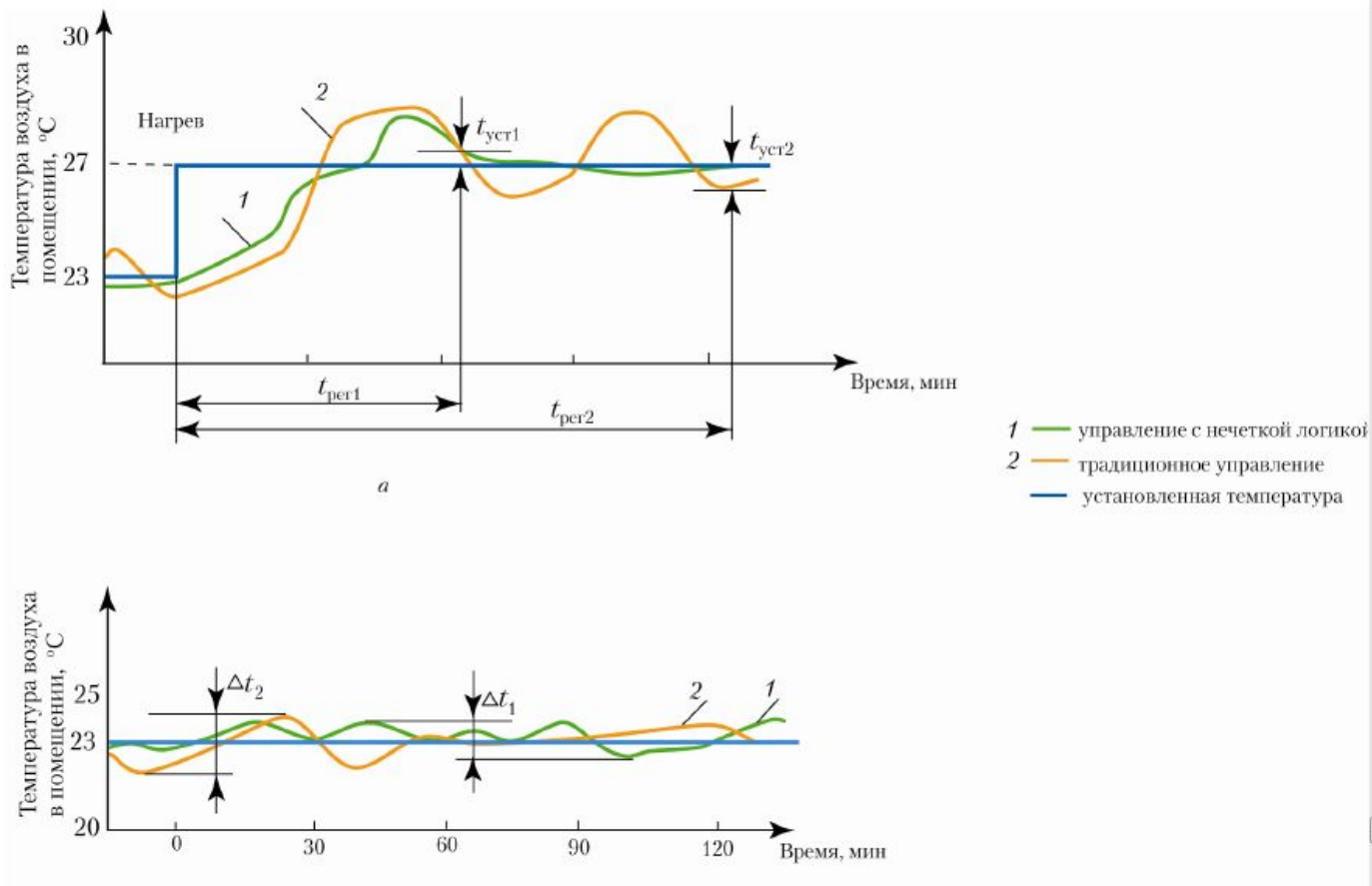
Состав микроконтроллера

- *Блок фаззификации* преобразует четкие величины, измеренные на выходе объекта управления, в нечеткие величины, описываемые лингвистическими переменными.
- *Логическое устройство* использует нечеткие условные правила, заложенные в базе данных, для преобразования нечетких входных данных в управляющие воздействия, которые также носят нечеткий характер.
- *Блок дефаззификации* преобразует нечеткие данные с выхода блока решений в четкую величину, которая используется для управления объектом.

Преимущества метода нечеткой ЛОГИКИ

- В системе управления “Fuzzy Logic” температура постоянно корректируется, исходя из текущих значений температуры и влажности помещения.
- Колебания температуры уменьшаются даже по сравнению с ПИД-регуляторами (рис.).
- Поддерживаемая температура в помещении находится на уровне минимального допуска, благодаря чему снижается энергопотребление.

Графики изменения температуры в помещении



- а - кривая разгона; б - изменение температуры в помещении

Характеристики метода

- Таким образом, управление кондиционером с применением нечетких логических регуляторов обеспечивает:
 - - изменение температуры в соответствии с санитарными нормами (отсутствие резкого перепада температур в помещении. поддержание допустимой скорости потока воздуха и др.);
 - - установку необходимой холодопроизводительности;
 - - выбор режима работы и установку температуры, исходя из температуры и влажности в помещении;
 - - выбор оптимального (комфортного) распределения и интенсивности потока воздуха;
 - - минимальное время выхода на заданный режим;
 - - уменьшение расхода электроэнергии на 20-40 %.