

## Семь секунд из жизни ПИД регулятора.

**Пид – регулятор** довольно древняя разработка, когда о транзисторах еще ничего не знали, не то, что о контролерах. На кафедре автоматики видел механический **ПИД - регулятор**, в котором вместо, электрических сигналов использовался воздух. Сам принцип работы регулятора очень простой и реализовать программно его не сложно, вот несколько ссылок, где **обсуждается эта тема**.

<http://forum.skunksworks.net/Forum10/HTML/000085.html>

[http://icm-tec.com/main1\\_10.htm](http://icm-tec.com/main1_10.htm)

<http://www.rlda.ru/TechnicalNotes.htm>

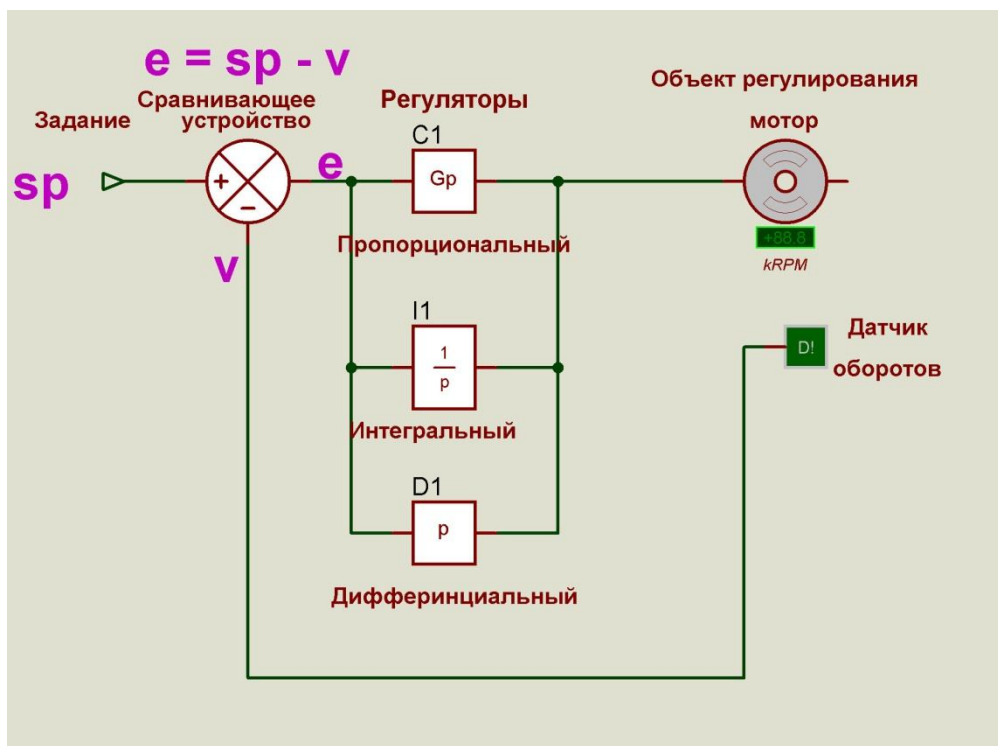
**ПИД - регулятор** описывается выражением:

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

**K** – коэффициент пропорциональности, **T<sub>i</sub>** – постоянная интегрирования, **T<sub>d</sub>** – постоянная дифференцирования, **t** – время, **e** – сигнал рассогласования (ошибка), **U(t)** – выходная переменная с регулятора на исполнительный механизм.

Рассмотрим принцип его работы. Так как у нас микроконтроллерная система, то программа ПИД – регулятора у нас выполняется циклически, пусть один цикл равен одной секунде.

Перейдем к практике, на рисунке представлена простейшая схема использования ПИД – регулятора в регулировании оборотов двигателя



Разберем его по порядку.

**Задание** - это, какое- то число вами заданное, которое означает, сколько оборотов должен делать двигатель в секунду. Назовем её **SP**.

**Сравнивающее устройство** – это устройство, которое сравнивает заданное вами количество оборотов, которые должен делать двигатель, с количеством оборотов которые делает двигатель в текущий момент, и выдает разницу. Количество оборотов мы получаем от датчика, это в регулировании называется обратная связь.

Через уравнение сравнения находим ошибку рассогласования **E**.

$$E = SP - V$$

Где **V** – сколько делает двигатель оборотов в секунду.

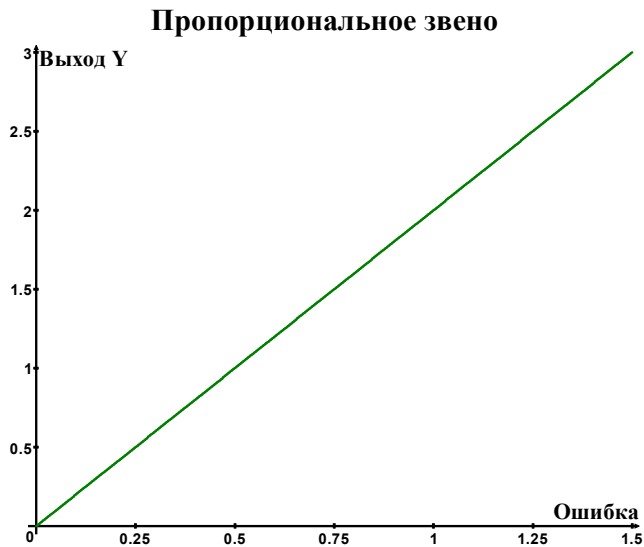
Пример: если заданное **SP = 70 об./сек.**, а текущий момент двигатель делает **V = 50 об./мин.**, то получаем на выходе сравнивающего устройства **E = 70 – 50 = 20**. Число **20** – будет ошибкой рассогласования **E**.

## **Базовые регуляторы (ЗВЕНЬЯ).**

**ПИД – регулятор** состоит из трех базовых регуляторов(звеньев) включенных параллельно, это пропорциональный, интегральный, дифференциальный регулятор. Из начальных букв названия регуляторов получается **ПИД**. Каждый регулятор можно настроить или совсем выключить из процесса регулирования, соответствующим коэффициентом. Встречаются разные регуляторы различной комбинацией базовых регуляторов, это **ПД, ПИ, П**.

**Пропорциональный регулятор** - это обычный усилитель у которого вход связан с выходом обычным линейным уравнением  $Y=KE$ , где **Y** – выходная переменная с этого регулятора, **K** – коэффициент пропорциональности ( усиления), а **E** - ошибка рассогласования, входная переменная. В таблице приведены результаты решения этого уравнения при различных значениях переменных **E, K**.

<b>K</b>	0,2	1	3
<b>E</b>	2	2	2
<b>Y</b>	0,4	2	6



Обратите внимание, выходная переменная с этого регулятора пропорциональна входной переменной.

Рассмотрим на примере:

Для этого возьмем кусок времени (момент) равный семи секундам и заполним таблицу.

Задает задание регулятору переменная  $S_p$  равная **30 об./сек.**  $K$ , коэффициент пропорциональности пусть будет равен **2**. Входная переменная  $V$  – количество оборотов в секунду.

Через сравнение находим ошибку рассогласования.

$$E = S_p - V$$

$$S_p = 30 \text{ об./сек.}$$

$$K = 2$$

Время	0 сек.	1 сек.	2 сек.	3 сек.	4 сек.	5 сек.	6 сек.	7 сек.
<b>Обороты(V) в секунду</b>	20	25	32	45	48	38	33	30
<b>E</b>	10	5	-2	-15	-18	-8	-3	0
<b>Y</b>	20	10	-4	-30	-36	-16	-6	0

В нулевую секунду двигатель вращался со скоростью **20 об./сек.**, задание регулятору **30 об./сек.** ошибка рассогласования будет равна **10**

$$E = S_p - 20 = 30 - 20 = 10$$

Так как коэффициент пропорциональности **K** равен **2**, то  $Y=K * E = 2 * 10 = 20$  // **K**, коэффициент пропорциональности умножается на ошибку рассогласования **E**, и выход с регулятора будет **20**.

В первую секунду количество оборотов увеличилось до **25 об./сек.** **E** – ошибка рассогласования равна **5**.

Также находим **Y**, умножив **E** на **K**.

$$Y=K * E = 2 * 5 = 10$$

И так с каждой секундой. Ниже представлены графики изменения переменной **Y** от **E**.



**Зеленый график** – как менялись обороты двигателя в течение семи секунд.

**Черный график** – как течение этого же времени менялась ошибка рассогласования.

**Синий график** - как менялась переменная **Y** на выходе пропорционального регулятора(звена).

Пропорциональный регулятор не может ошибку рассогласования вывести на ноль.

**Интегральный регулятор** – это регулятор, который не имеет установившегося режима и является астатическим. Выход с этого регулятора пропорционален ошибке рассогласования и времени. Благодаря этому регулятору, регулируемый параметр, в нашем случае это обороты двигателя, выходит на задание, а ошибка рассогласования устанавливается в ноль.

**Алгоритм интегрального регулятора.**

**$S = 0$  // включение регулятора.**

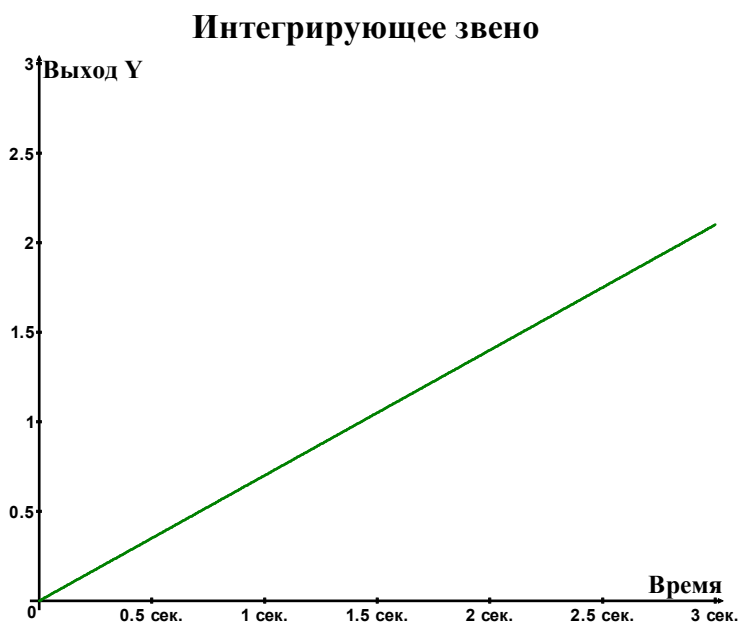
Начало цикла:

**$S = S + E$  // к переменной  $S$  прибавляется  $E$  ошибка рассогласования**

**$Y = K_i * S$  //  $K_i$ , коэффициент интегрирования умножается на переменную  $S$**

Конец цикла.

Рассмотрим алгоритм интегрального регулятора.  $S$  – интегральная сумма. При включении регулятора, переменная  $S = 0$ , далее к ней при каждом цикле, раз в секунду прибавляется переменная  $E$  – ошибка рассогласования и умножается на  $K_i$ , коэффициент интегрирования и в итоге получаем выходную переменную  $Y$ , которая растет если  $E$  положительная и убывает если отрицательная.



Выход с интегрального регулятора зависит от времени и  $E$  - ошибки рассогласования.

Рассмотрим на примере:

Для этого, как и в предыдущем примере с пропорциональным звеном, возьмем кусок времени (момент) равный семи секундам и заполним таблицу.

Задание регулятору тоже  $S_p = 30$ .  $K_i$  - коэффициент интегрирования пусть будет равен 2. Входная переменная  $V$  – количество оборотов в секунду.

Также, через сравнение находим ошибку рассогласования.

$$E = SP - V$$

**Sp = 30 об./сек.**

**Ki = 2 //** коэффициент интегрирования

Время	0 сек.	1 сек.	2 сек.	3 сек.	4 сек.	5 сек.	6 сек.	7 сек.
<b>Обороты(V) в секунду</b>	20	25	32	45	48	38	33	30
<b>E</b>	10	5	-2	-15	-18	-8	-3	0
<b>S</b>	10	15	13	-2	-20	-28	-31	-31
<b>Y</b>	20	30	26	-4	-40	-56	-62	-62

В нулевую секунду двигатель вращался со скоростью **20 об./сек.**, задание регулятору **30 об./сек.** ошибка рассогласования будет равна **10**

$$E = Sp - 20 = 30 - 20 = 10$$

Интегральная сумма стала равна **10**.

**S = 0 //** включение регулятора.

$$S = S + E = 0 + 10 = 10 \quad // \text{ к переменной } S \text{ прибавляется } E \text{ ошибка рассогласования}$$

Так как коэффициент интегрирования **Ki** равен **2**, то выход с регулятора будет **20**.

$$Y = Ki * S = 2 * 10 = 20 \quad // \text{ Ki, коэффициент интегрирования умножается на переменную } S$$

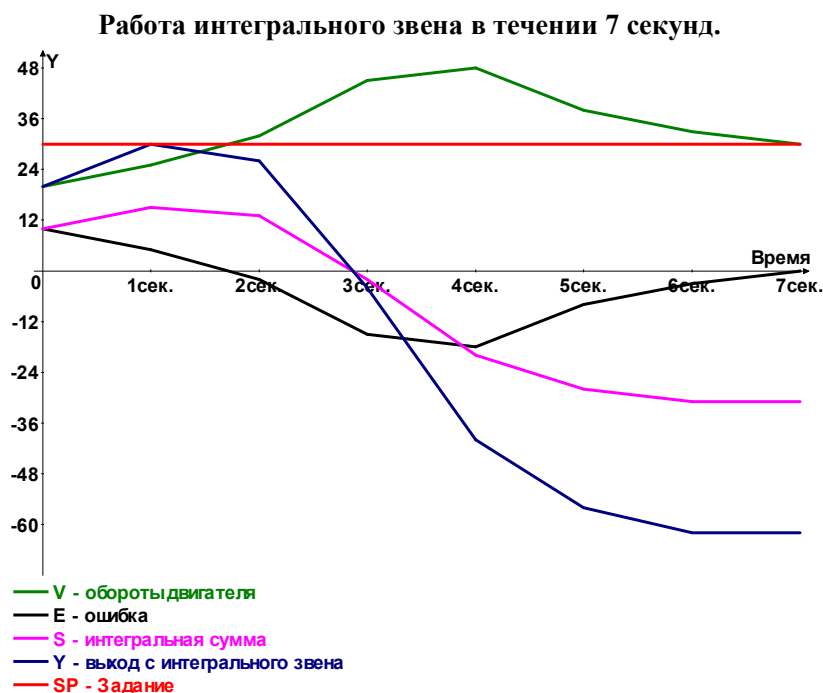
В первую секунду количество оборотов увеличилось до **25 об./сек.** **E** – ошибка рассогласования равна **5**. Прибавляем её к переменной **S = 10**.

$$S = S + E = 10 + 5 = 15$$

Находим **Y**, умножив интегральную сумму на **Ki**.

$$Y = Ki * S = 2 * 15 = 30$$

И так с каждой секундой. Ниже представлены графики изменения переменных: **V, E, S, Y**.



**Зеленый график** – как менялись обороты двигателя в течении семи секунд.

**Черный график** – как течение этого же времени менялась ошибка рассогласования.

**Сиреневый график** - как менялась интегральная сумма S.

**Синий график** - как менялась переменная Y на выходе интегрального регулятора.

На сиреневом графике видно как меняется интегральная сумма. Пока обороты двигателя были ниже Sp – задания, сумма росла, только обороты превысили Sp, сумма стала убывать. Выход с интегрального регулятора есть интегральная сумма, умноженная на коэффициент Ki.

**Дифференциальный регулятор** – представляет собой устройство, которое отслеживает, резкие изменения ошибки рассогласования и компенсирует выходной сигнал на выходе регулятора. Математически – она является производной от ошибки, то есть показывает скорость изменения ошибки рассогласования. Более подробно как оно работает, рассмотрим дальше.

Алгоритм дифференциального звена:

$E_n = E$  // включение регулятора.

Начало цикла:

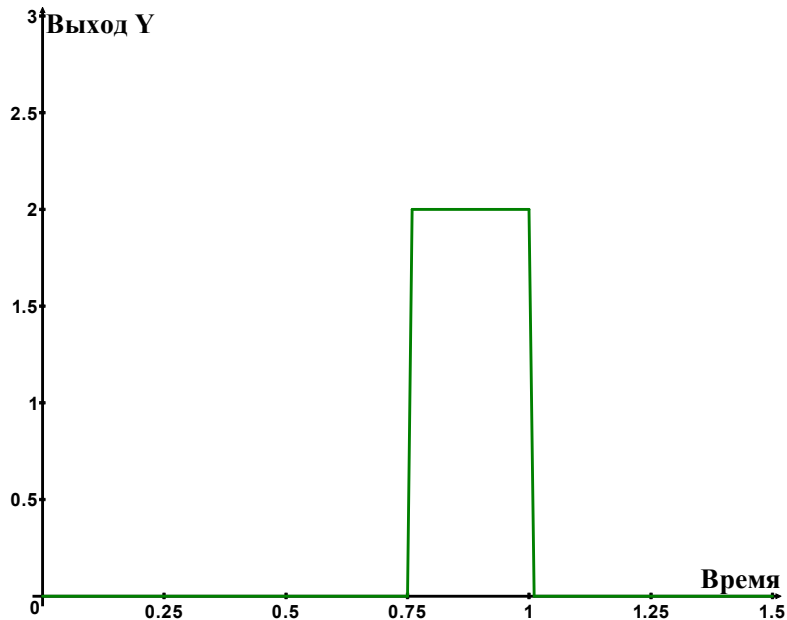
$Y = K_d * (E - E_n)$  // Kd, коэффициент дифференцирования умножается на разность E, En.

$E_n = E$

Конец цикла.

Рассмотрим алгоритм дифференциального регулятора. **En** – ошибка рассогласования секунду назад. При включении регулятора, в переменную **En** записываем переменную **E** – ошибка рассогласования. Далее в каждом цикле из **E** – ошибки рассогласования вычитаем переменную **En** и умножаем на **Kd**, коэффициент дифференцирования и получаем выходную переменную **Y**.

### Дифференциальное звено



Выход с дифференциального регулятора зависит от скорости изменения **E**, ошибки рассогласования.

Рассмотрим на примере:

Для этого, как и в предыдущих примерах, возьмем момент времени равный семи секундам и заполним таблицу.

Задание регулятору тоже **Sp = 30**. **Kd** – коэффициент дифференцирования пусть будет равен **2**. Входная переменная **V** – количество оборотов в секунду.

Также, через сравнение находим ошибку рассогласования.

$$E = SP - V$$

$$Sp = 30 \text{ об./сек.}$$

**Kd = 2** // коэффициент дифференцирования

Время	0 сек.	1 сек.	2 сек.	3 сек.	4 сек.	5 сек.	6 сек.	7 сек.
Обороты(V) в секунду	20	25	32	45	48	38	33	30



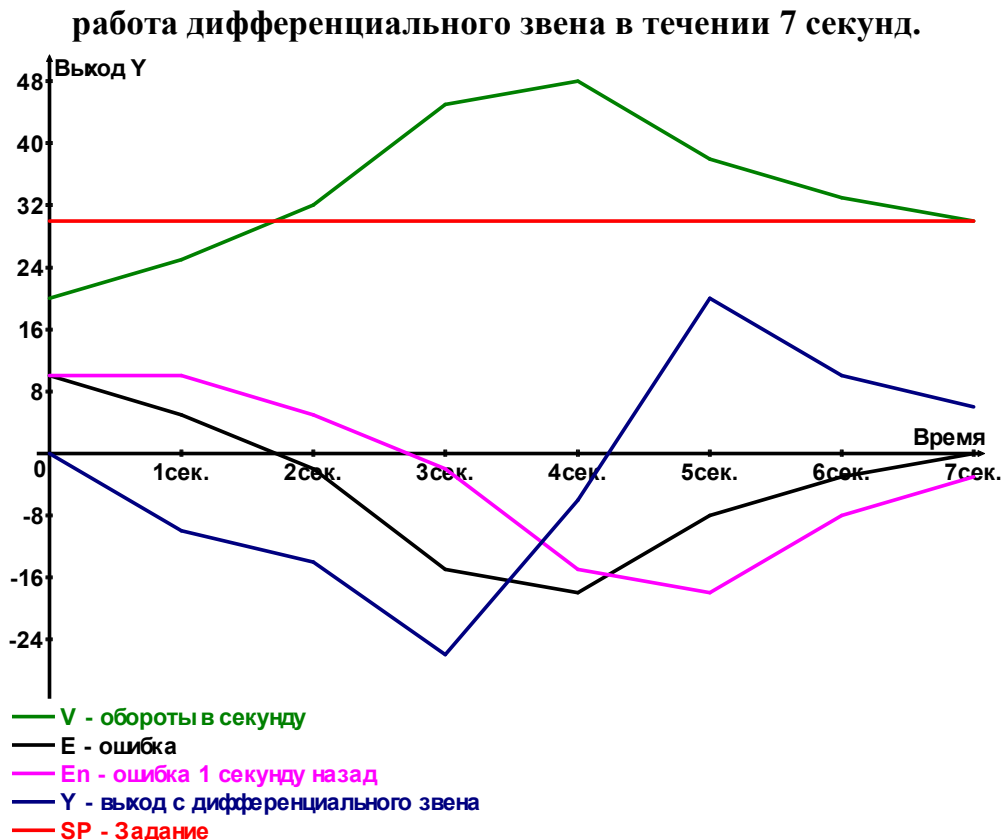
<b>E</b>	10	5	-2	-15	-18	-8	-3	0
<b>En</b>	10	10	5	-2	-15	-18	-8	-3
<b>Y</b>	0	-10	-14	-26	-6	20	10	6

**En** повторяет **E** со смещением во времени в одну секунду.

1. Нулевая секунда  $Y = Kd * (E - En) = 2 * (10 - 10) = 0$
2. Первая секунда  $Y = 2 * (5 - 10) = -10$
3. Вторая секунда  $Y = 2 * (-2 - 5) = -14$
4. Третья секунда  $Y = 2 * (-15 - (-2)) = -26$

И так далее.

Ниже представлены графики изменения переменных: **V**, **E**, **En**, **Y**.



**Зеленый график** – как менялись обороты двигателя в течение семи секунд.

**Черный график** – как течение этого же времени менялась ошибка рассогласования.

**Малиновый график** – как менялась ошибка рассогласования секунду назад.

**Синий график** - как менялась переменная **Y** на выходе дифференциального регулятора.

На синем графике видно как менялся выход с дифференциального регулятора в зависимости от оборотов двигателя. Как только обороты двигателя начали расти, выходная переменная  $Y$  стала резко падать, и наоборот, когда обороты упали,  $Y$  выросла.

## ПИД

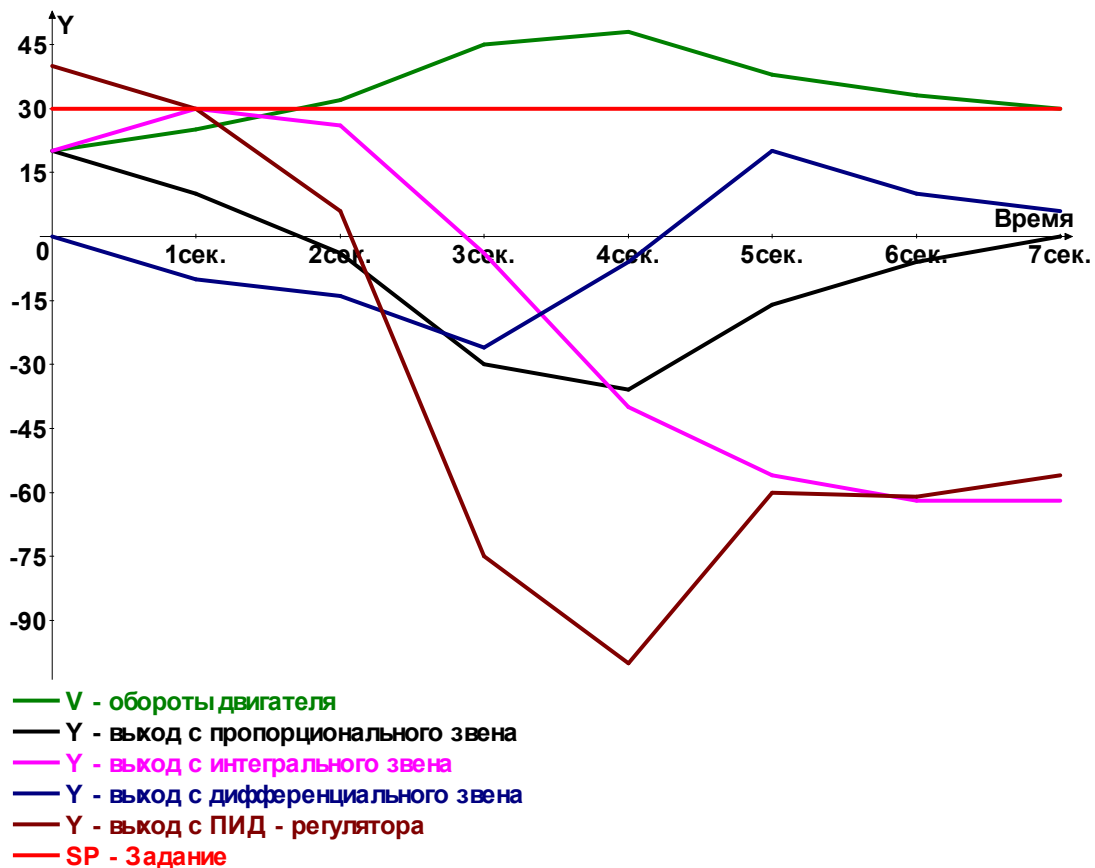
Как говорилось выше, **ПИД** – регулятор состоит из трех регуляторов(звеньев) включенных параллельно, это пропорциональный, интегральный, дифференциальный регуляторы. То есть сумма выходов этих регуляторов  $Y$  и будет выходом с **ПИД** – регулятора.

Составим таблицу.

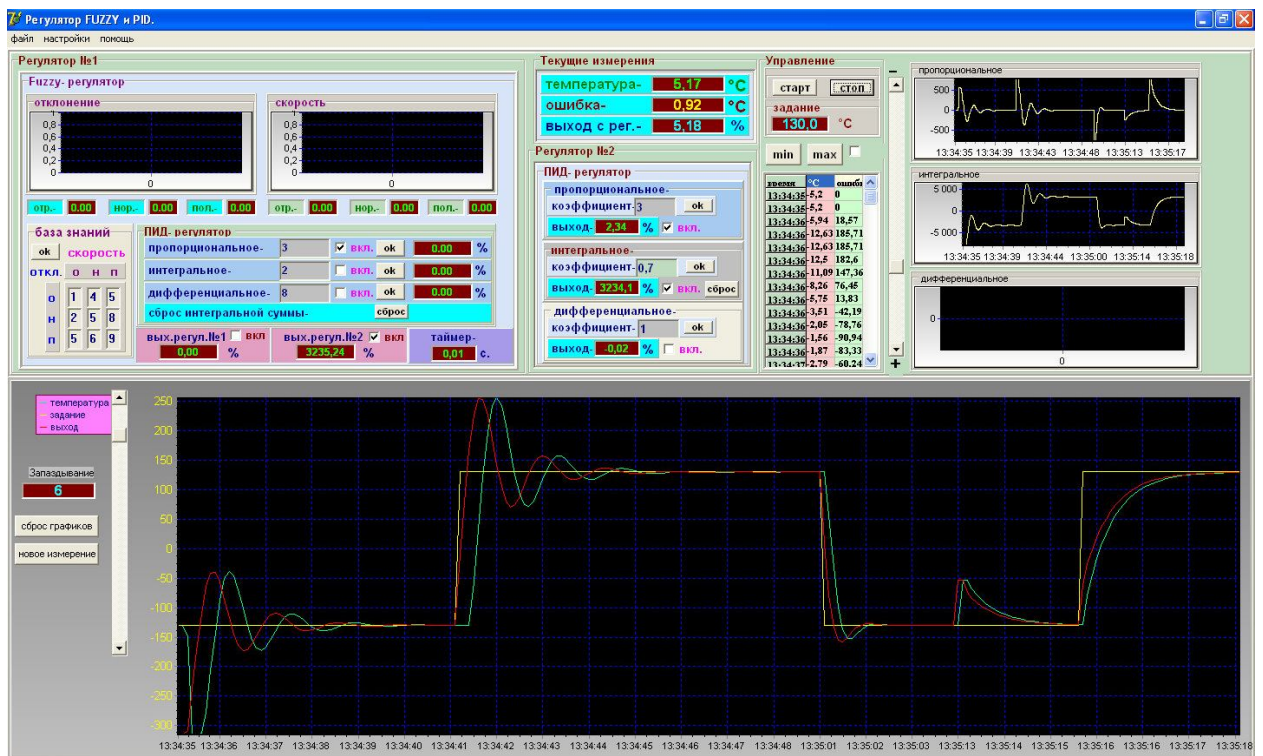
Время	0 сек.	1 сек.	2 сек.	3 сек.	4 сек.	5 сек.	6 сек.	7 сек.
<b>Обороты(V) в секунду</b>	20	25	32	45	48	38	33	30
<b>E</b>	10	5	-2	-15	-18	-8	-3	0
<b>P</b>	20	10	-4	-30	-36	-16	-6	0
<b>Pi</b>	20	30	26	-4	-40	-56	-62	-62
<b>Pd</b>	0	-10	-14	-26	-6	20	10	6
<b>Y</b>	40	30	6	-75	-100	-60	-61	-56

Построим по ней графики.

### Работа 3 звеньев в течении 7 секунд.



Работу ПИД – регулятора можно изучить с помощью программы «Регулятор Fuzzy PID».



Программа использовалась для управления реальной лабораторной установкой «Калорифер», и переделана в математическую модель для изучения свойств регуляторов. Установка «Калорифер»

представляет из себя нагреватель с датчиком температуры, подключенными к компьютеру, и программы, которая с помощью ШИМ поддерживаем нужную температуру, подробно в «каталог статей «Калорифер». Эта аппаратная часть установки заменена звеном запаздывания, регулятор запаздывания выведен слева внизу, рядом в окне отображается его значение. Ниже находится кнопка «Очистка графиков» и кнопка «Новое измерение». Первая просто очищает графики без прерывания регулирования, вторая и очищает и прерывает регулирование. Что бы начать снова, нажмите кнопку «Старт». Выход с регулятора через звено запаздывания подключен к устройству сравнения, куда раньше подавалась температура. В программе не предусмотрены возмущающие воздействия, но какие то из них можно компенсировать изменением запаздывания. На графике видно, красный – выход с регулятора, а зеленый – это выход с регулятора пропущенный через звено запаздывания и фильтр низкой частоты. Справа сверху добавился регулятор для изменения задания, и три графика с выходов звеньев регулятора. Все остальное осталось по старому, так что привожу выдержку из руководства на установку «Калорифер», с небольшими исправлениями. Система регуляторов работает по приведенной схеме №1. Программа позволяет задействовать любой регулятор, установкой галочки в панели регулятора, а также установкой соответствующих коэффициентов. Чтобы выключить пропорциональное звено, нужно установить его в единицу, а интегральное и дифференциальное – в ноль.

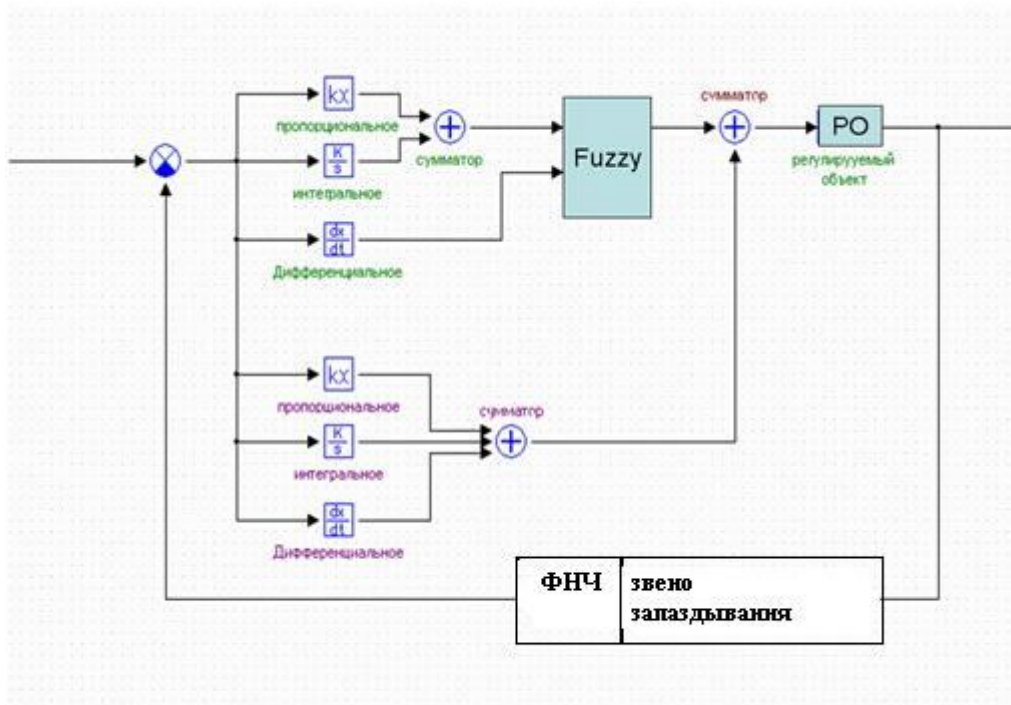


Схема №1. САР.

### Описание интерфейса компьютера лабораторной установки

Программное обеспечение лабораторной установки позволяет изучить принцип работы и настройку программных ПИД- и FUZZY – регуляторов.

На рис. 1 приведено главное окно САР температуры.

### Описание главного окна САР температуры

Главное окно (см. рис.1) состоит из меню (1), панелей «Регулятор №1» (2), «Регулятор №2» (3), «текущие измерения» (4), «управление» (5), «ШИМ» (6), «вых. регул. №1», «вых. регул. №2», «таймер» (7). Внизу отображаются графики изменения текущего параметра (температуры) и ее заданного значения (8).

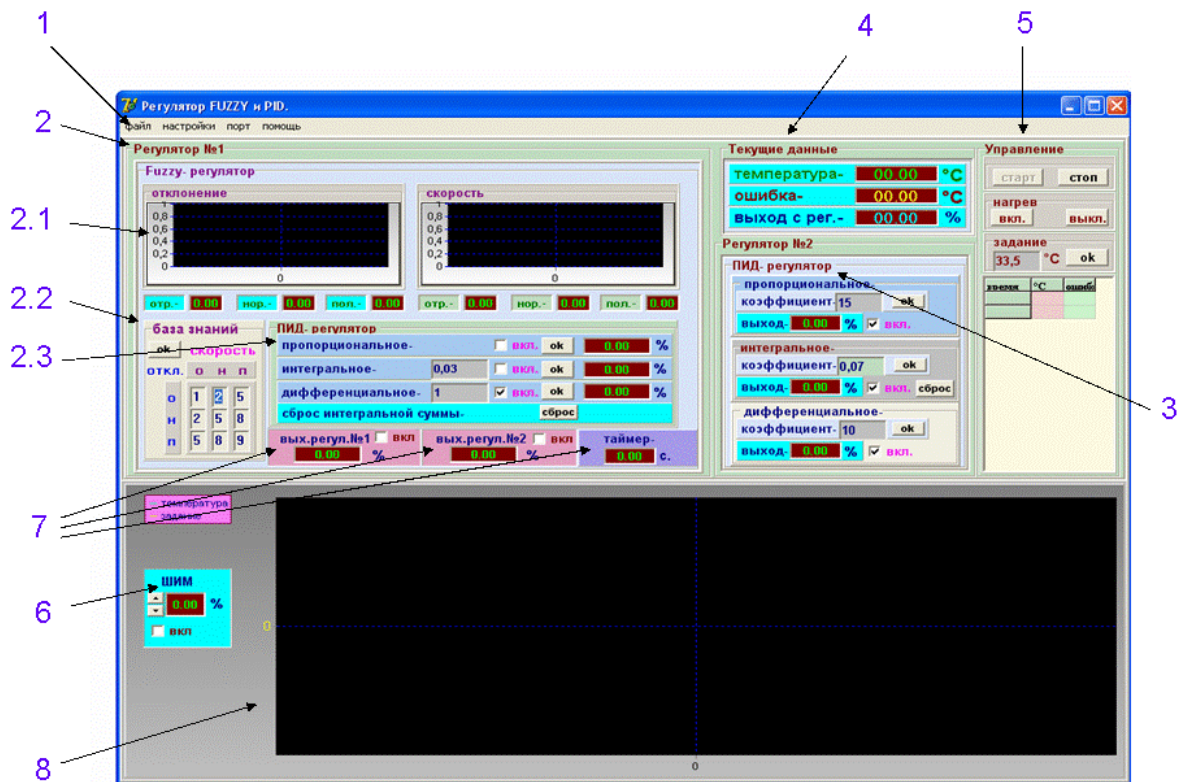


Рис 1. Главное окно САР температуры

Панель (2) «Регулятор №1» содержит регулирующее устройство типа «Fuzzy – регулятор». Фаззификатор «Fuzzy – регулятора» переводит четкие значения лингвистических переменных «Отклонение» и «Скорость» в нечеткие значения с помощью трех терм, соответственно, графики которых показаны в панели (2.1) с указанием степеней принадлежности к термам. Ниже слева находится база знаний и продукционных правил (панель 2.2), в которой задаются девять терм дефаззификатора. В панели (2.3) задаются коэффициенты пропорциональный и интегральной составляющей отклонения и дифференциальной составляющей (скорости) входа базы знаний (см. рис. 1) , там же отображается выход каждой составляющей и находится включатель каждой составляющей, а также можно произвести сброс накопленной интегральной составляющей отклонения.

Панель (3) «Регулятор №2» содержит регулятор типа «ПИД – регулятор». В панели задаются коэффициенты пропорциональный, интегральной и дифференциальной составляющей ПИД- регулятора, там же отображается выход с каждой составляющей и находится включатель каждой составляющей, а также можно выполнить сброс накопленной интегральной составляющей регулятора.

Панель (4) «текущие измерения» отображает численные значения текущей температуры, отклонения текущего значения от задания и выход отдельно с регуляторов №1 и №2 (управляющее воздействие, которое идет на нагреватель калорифера) в текущий момент времени в процентах.

На панели (5) находятся кнопки управления. Кнопка «старт» запускает в работу выбранный регулятор в системе. Кнопкой «вкл.» в панели «нагрев» включается нагреватель только для снятия кривой разгона. При этом на объект подается максимальная мощность.

В панели «задание» указывается заданное значение температуры. Ниже в виде таблицы выдаются текущие значения температуры, ошибки регулирования и время отсчета через равные интервалы времени.

В панели (7) «вых. регул. №1», «вых. регул. №2» цифровые индикаторы показывают по желанию выход каждого регулятора. Там же находятся выключатели, позволяющие включить нужный регулятор в схему регулирования (см. рис.1).

В панели «таймер» задается интервал времени для снятия отсчетов при записи заданного и текущего значений.

- в меню (1) во вкладке «настройка» выбрать «термы» или два раза щелкните левой мышкой на графике (2.1) входных терм. Откроется окно «Термы», где задаются термы фаззификатора и дефаззификатора и диапазон их отображения. Любые проведенные изменения предыдущей информации нужно подтвердить кнопкой «ОК»;

- выбрать регулятор, который хотите использовать в панели (7) «вых.регул. №1» или «вых.регул. №2» и задать нужные коэффициенты;

- в меню (1) во вкладке «скорость» задать скорость измерения в миллисекундах (например,  $1000\text{мс}=1\text{с}$ );

- нажать кнопку «старт».

После нажатия кнопки «старт» начнётся регулирование по заданному Вами закону.

На рис.2 приведена панель настройки термов.

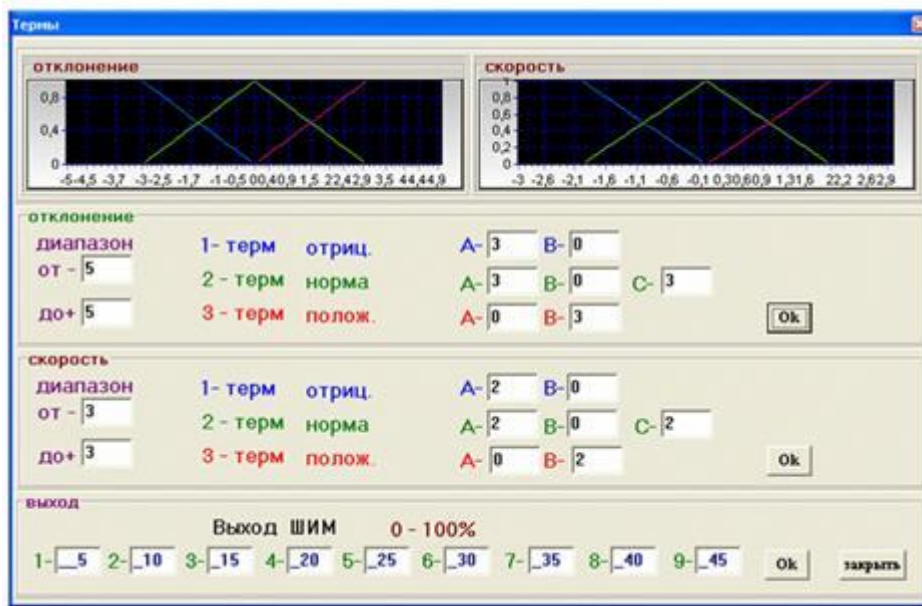
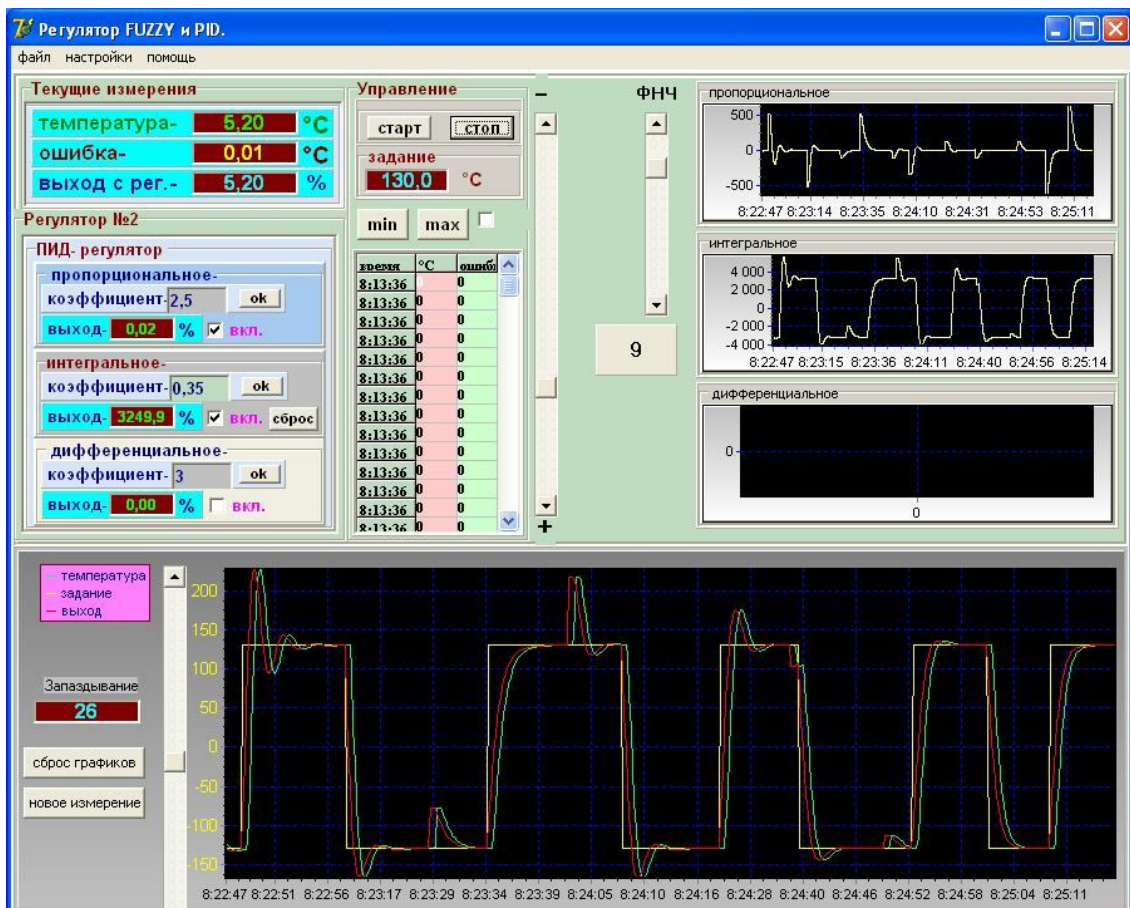


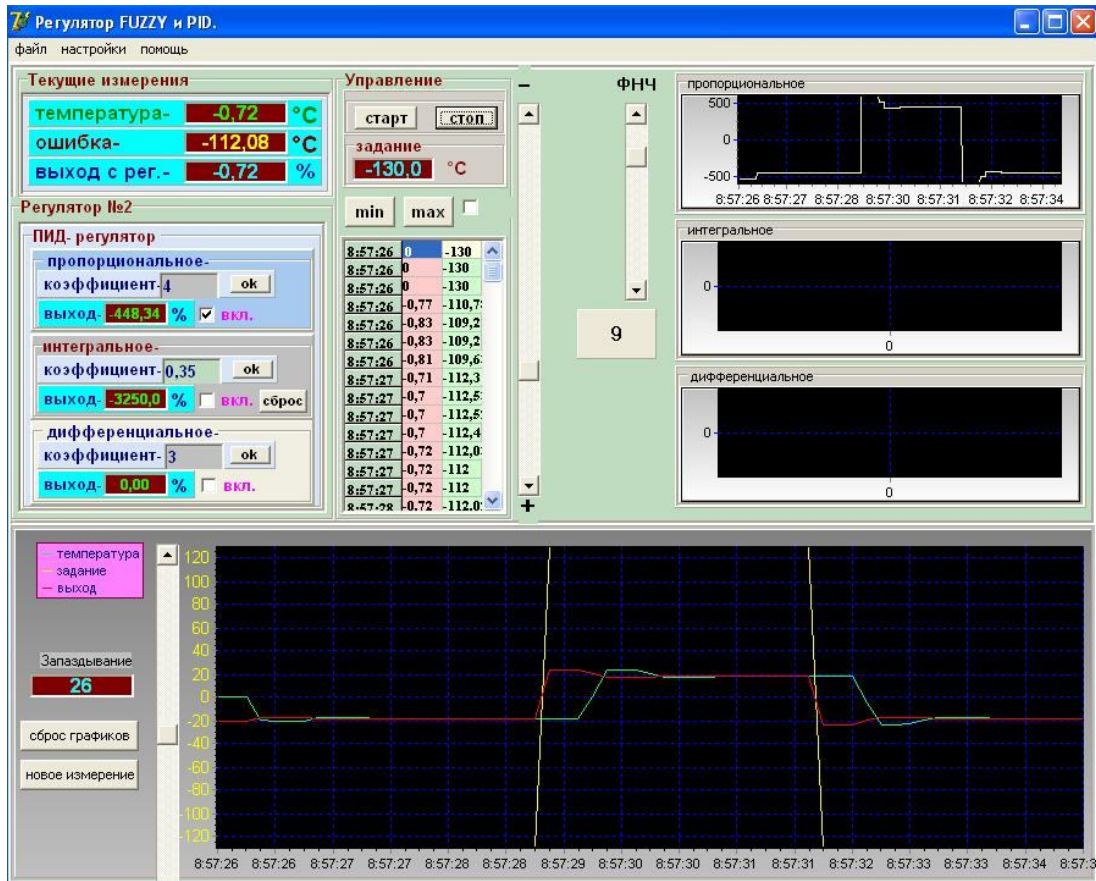
Рис. 2. Панель настройки термов

Подобная программа, только с одним ПИД регулятором.



Проведем эксперимент по настройке ПИ - регулятора, так как у нас достаточно инерционный объект( медленно реагирует на изменение задание(ступенчатое воздействие), дифференциальное звено выключим.

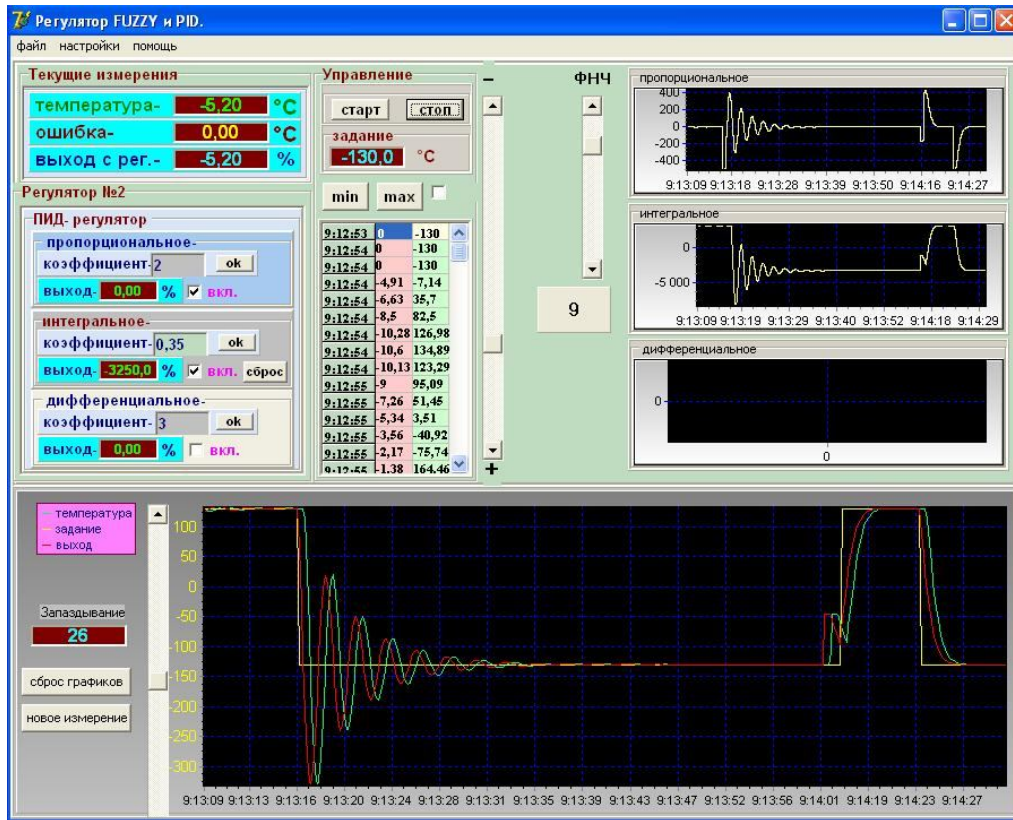
Установим пропорциональный коэффициент четырем, интегральный выключим, дифференциальный выключим, звено запаздывания поставим 26. ФНЧ (фильтр низких частот)=9. При скорости 100 миллисекунд звено запаздывания будет задерживать входной сигнал на две с половиной секунды. Включим ПИД – регулятор и нажмем кнопку старт. У вас запустится регулирование, кнопками «min», «max» создается ступенчатое воздействие.



При четырех наблюдаются затухающие колебания, установим пропорциональный коэффициент двум.

Установим интегральный коэффициент единице и включим интеграл.





Наблюдается колебательный процесс, уменьшив интеграл до 0.35, система стала быстро выходить на задание.

Программы можно скачать [WWW.Chipsystem.ru](http://WWW.Chipsystem.ru)

Автор: Шакиров Марат Рифович.