



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П.О. Сухого»

Кафедра «Промышленная электроника»

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
по выполнению лабораторных работ по курсу  
«Управление промышленными объектами»  
для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»**

Гомель 2006

УДК 62.50(075.8)  
ББК 32.965.9я73  
М74

*Рекомендовано научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого*

Автор-составитель: *В. Д. Ежов*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная электроника» ГГТУ им. П. О. Сухого  
*Э. М. Виноградов*

**М74 Моделирование** дискретных систем управления : практ. пособие по выполнению лаб. работ по курсу «Управление промышленными объектами» для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» / авт.-сост. В. Д. Ежов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006. – 42 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

Практическое пособие включает методические аспекты теоретических положений о свойствах и процессах в цифровых системах управления.  
Для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника».

**УДК 62.50(075.8)  
ББК 32.965.9я73**

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П.О. Сухого», 2006

## Введение

**В.1.** Функциональная схема цифровой системы управления показана на рис.1. Регулятор представляет дискретную часть системы управления, исполнительное устройство и объект управления являются непрерывными. Дискретная часть может быть расширена путем дискретных измерений выхода  $y(k)$  и дискретного задания  $W(k)$  от центральной ЭВМ.

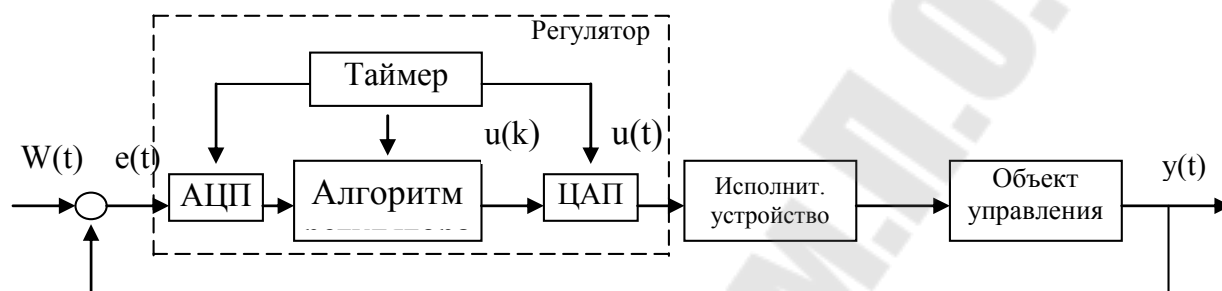


Рис. 1 Функциональная схема цифровой системы управления

Объекты в промышленности имеют самые разнообразные свойства, от многомерных неустойчивых объектов с нелинейными характеристиками и изменяющимися динамическими свойствами, до простейших с апериодическими характеристиками первого порядка. Некоторое представление об особенностях регулирования объектов дает моделирование процессов регулирования на моделях, представленных в данном курсе.

Промышленные исполнительные устройства (в большинстве непрерывные - пневматические, гидравлические, с электрическим приводом) имеют большое разнообразие характеристик. Главная их особенность – наличие ограничений: механических, электрических, тепловых и пр., а также люфты, нелинейности характеристик, зоны нечувствительности и пр. Эти особенности должны учитываться цифровым регулятором или собственной системой управления для исполнительного устройства

Типовая структурная схема цифровой системы управления показана на рис.2



Рис. 2. Типовая структурная схема цифровой системы управления

Объект регулирования  $G_p$  имеет непрерывный вход и выход. Регулятор  $G_R$  – это алгоритм вычисления управляющего сигнала, реализуемого управляющей ЭВМ. ЭВМ через фиксированные интервалы (такты квантования) измеряет ошибку и выдает код рассчитанного сигнала управления. ЦАП преобразует дискретный сигнал управления в ступенчатый непрерывный сигнал на вход непрерывного объекта. Цикл расчета считается неизмеримо малым по отношению к такту квантования, и ЭВМ до следующего момента квантования может выполнять другие операции, например, управление другим объектом.

**В.2.** Типичный вид процесса регулирования ПИД-регулятором при ступенчатом изменении задания  $W$  показан на рис.3. Теоретически переходный процесс по управлению  $U$  и по выходу  $Y$  устанавливается (успокаивается) бесконечно долго. Поэтому, в зависимости от требуемой точности регулирования, считают процесс регулирования законченным, если ошибка  $Y$  входит в заданную точность. Здесь принята 3%-я точность, поэтому процесс регулирования закончился на восьмом такте.

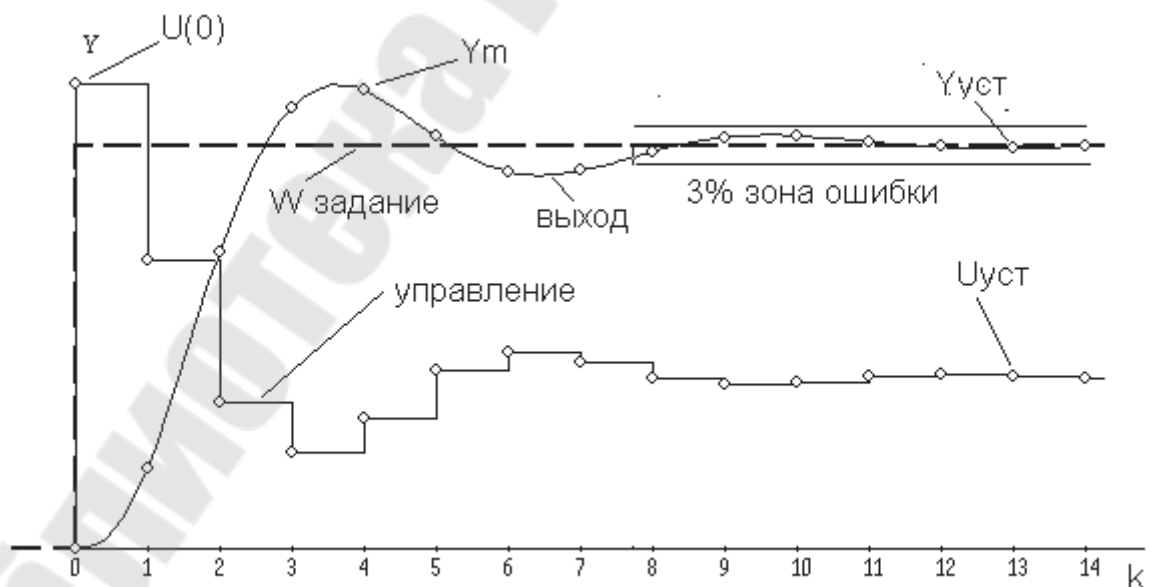


Рис. 3. Пример процесса регулирования.

**В.3. Показатели качества регулирования по управляемой (выходной) переменной** позволяют объективно сравнивать между собой различные процессы регулирования.

В реальных объектах любая ошибка – это несоответствие выхода заданному значению (не рабочая температура, не заданный состав смеси, не заданная скорость перемещения, не достигнутая позиция рабочего инструмента, и т.д.). Это удлинённые периоды выхода в рабочий режим, брак, потеря рабочего времени и т.д. Особенно велики неизбежные ошибки на первых тактах переходного процесса (на Рис.3 это  $e(1) \approx 0,8$  и  $e(2) \approx 0,3$ ).

**Динамическая ошибка регулирования (или перерегулирование)** – это относительное превышение максимального значения выхода  $Y_m$  над заданием  $W$ :

$$e_{\text{дин}} = \frac{Y_m - W}{W}$$

При большой динамической ошибке регулируемая величина может превысить максимально допустимое значение. Например, при разгоне на максимальную рабочую скорость вращения (10000 об/мин) с перерегулированием  $e_{\text{дин}} = 0,3$  можно превысить максимально допустимую скорость (например, 12000 об/мин), что может привести к аварии из-за больших центробежных сил. Поэтому важно соблюдать ограничения по динамической ошибке.

**Время регулирования  $t_{\text{рег}}$**  определяется как время, от начала переходного процесса до такта, с которого значения регулируемого параметра  $Y(k)$  входят в заданную точность регулирования 3%, т.е. ошибка регулирования становится меньше заданной  $|e(k)| < 0,03W$ , и объект регулирования начинает работать в заданном режиме, например, без брака.

**Время достижения заданного значения  $t_w$**  – время от начала переходного процесса до момента, когда выход  $Y$  первый раз достигает заданное значение  $W$ . Иногда важно, чтобы объект быстрее вышел на заданный режим, даже если время регулирования будет увеличенным.

**Статическая ошибка регулирования** определяет разность между установившимся значением регулируемого параметра  $Y_{\text{уст}}$  и его заданным значением  $W$ :

$$e_{\text{ст}} = \frac{Y_{\text{уст}} - W}{W}$$

Обычно процессы регулирования со статической ошибкой получаются с регулятором без интегральной составляющей (рис.4.). Для уменьшения статической ошибки приходится увеличивать коэффициент усиления. Это приводит к большим долго не затухающим колебаниям процесса. Поэтому установившееся значение можно оценивать как среднее значение выхода на последних тактах моделирования.

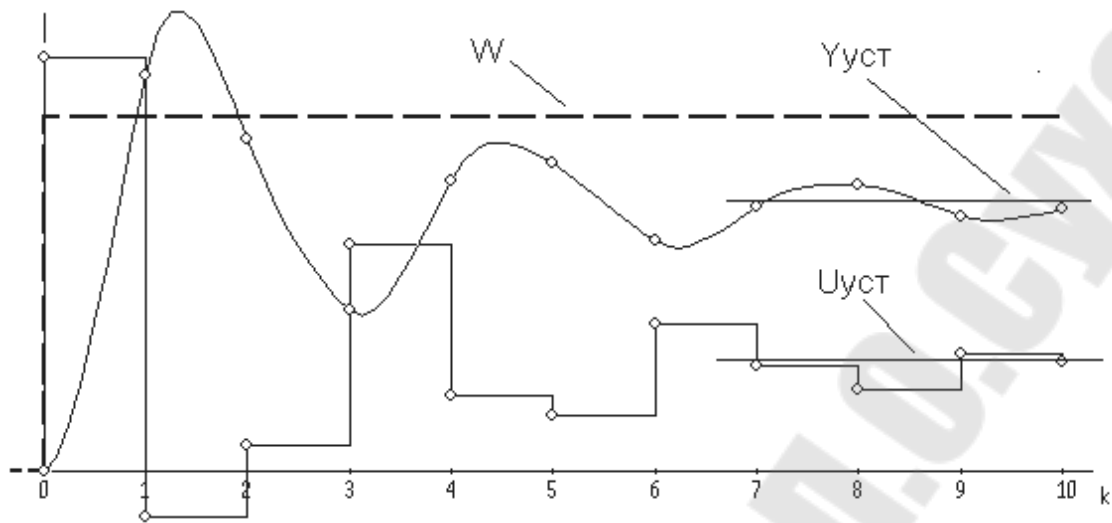


Рис.4. Пример процесса регулирования со статической ошибкой

*Среднеквадратичная ошибка регулируемой величины (ошибка выхода)*

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N e^2(k)}$$

где  $N=T_{\text{мод}}/T_0$  - количество учитываемых тактов квантования, зависящее от длительности такта квантования  $T_0$  и от времени моделирования  $T_{\text{мод}}$ , которое принимают одинаковым для всех сравниваемых переходных процессов.

Этот интегральный показатель учитывает сумму всех ошибок выхода объекта от начала до окончания регулирования, и косвенно учитывает все вышеприведенные показатели.

**В.4. Показатели качества регулирования по управляющей переменной** позволяют учитывать режим работы регулятора в процессе регулирования.

*Начальное значение управляющей переменной* -  $U(0)$  при ступенчатом изменении сигнала задания  $W(0)$  - это относительное превышение сигнала управления на нулевом такте  $k=0$  над установившимся значением  $U_{\text{уст}}$ .

В промышленных системах регулирования управляющая переменная реализуется исполнительным устройством, мощность которого определяется установившимися режимами. Поэтому  $U(0)$  характеризует требуемую кратность запаса мощности исполнительного устройства. Эта крат-

ность должна быть не очень большой, чтобы не удорожать систему регулирования.

В электронных устройствах  $U(0)$  может значительно превышать установившееся значение  $U_{уст}$ , если входные цепи объекта не входят в насыщение, и малое квантованное значение установившегося значения  $U_{уст}$  обеспечивает достаточную точность регулирования. В промышленных технологических объектах само исполнительное устройство, реализующее  $U(0)$ , имеет ограничения. Например, задвижка регулирования потока, или регулируемый электропривод, где и преобразователь и двигатель имеют ограничения по напряжению.

*Среднеквадратичное изменение управляющей переменной (затраты на управление)*

$$S_u = \sqrt{\frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \Delta u^2(k)}$$

где  $\Delta u(k) = u(k) - u_{уст}$  - отклонение управляющей переменной от установившегося значения. Этот показатель характеризует затраты на управление (работу исполнительного механизма) на протяжении всего учитываемого времени моделирования.

**В.5.** В данном курсе лабораторных работ исследуются объекты, показанные в таблице 1. По виду переходной характеристики можно судить о свойствах объекта. Объекты второго - третьего порядка имеют пологое начало переходной характеристики. Объекты с неминимально-фазовой характеристикой имеют отрицательный выброс в начале характеристики. У колебательных объектов степень затухания определяется коэффициентом затухания  $\varepsilon$ , а период колебаний определяется следующим соотношением:

$$T = \frac{2\pi T_1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}$$

Таблица 1.

Переходные характеристики и передаточные функции объектов разных типов.  
(для упрощения принят  $K=1$ )

	$G(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$ <p>Объект второго – третьего порядка</p>
	<p>Объект с неминимально – фазовой характеристикой</p> $G(s) = \frac{K(1-T_3s)}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$
	<p>Колебательный объект с коэффициентом затухания <math>\epsilon=0,1</math></p> $G(s) = \frac{K}{(T_1^2s^2 + 2\epsilon T_1s + 1)}$
	<p>Колебательный объект с коэффициентом затухания <math>\epsilon=0,3</math></p>
	<p>Колебательный объект с коэффициентом затухания <math>\epsilon=0,6</math></p>



## В.6. Особенности работы с программой моделирования.

После выбора объекта через "Установите объект" экран показывает передаточную функцию объекта по Лапласу  $G_p(s)$  и его переходную характеристику для заданных по умолчанию параметров, а также параметры  $a_1, a_2, v_1, v_2$  соответствующей дискретной передаточной функции  $G_p(z)$ . Здесь вводят заданные параметры объекта.

В закладке "Регуляторы" выбирают тип регулятора, его настройки и такт квантования. Настройки  $K, Cи, Cд$  меняют большими кнопками на 0,1 и малыми – на 0,01. Можно менять их клавишами  $\uparrow\downarrow$  на 0,1, а с **Shift** – на 0,01. Переход между  $K, Cи, Cд$  – **Tab** или **Shift+Tab**.

Вверху графика показаны:

- время регулирования;
- параметры регулятора  $p[i], q[i]$  (если включены);
- измеренные по графику значения выхода  $Y_{izm}$  и управления  $U_{izm}$  (измеритель **F3/F4**);
- максимумы  $Y_{max}, U_{max}$  и минимумы  $Y_{min}, U_{min}$  выхода и управления и значение  $U(0)$ .

Снизу графика показаны:

- значения критериев качества **I2, I4, I5**;
- параметры объекта  $a[i], b[i]$ ;
- среднеквадратичная ошибка выхода  $Se$  и изменение управляющей переменной  $Su$ ;
- вид непрерывной передаточной функции объекта;
- в строке показаны номер объекта, регулятор и такт квантования.

Правым щелчком по экрану можно вызвать переключатели шкалы в такты или секунды, показать/скрыть параметры регулятора. При отключении флажка "Учитывать параметры объекта" регуляторы  $AP$  и  $AP+1$  перестают учитывать параметры объекта, что необходимо при исследовании чувствительности этих регуляторов к изменениям параметров объекта.

Графики  $W(k)$  (красный),  $U(k)$  (желтый),  $Y(k)$  (белый) для наглядности показаны непрерывными. Реально в дискретной части систем регулирования цифровые коды указанных величин появляются только в моменты квантования.

Весь экран показывает время моделирования (количество учитываемых тактов). Если переходный процесс занимает малую область экрана, то все интегральные показатели  $Se, Su, I2, I4, I5$  для разных переходных процессов усредняются за счет длинного установившегося участка графика. Поэтому надо выбирать минимальное и одинаковое время моделирования для сравниваемых процессов регулирования.

Настроенный процесс регулирования можно запоминать в файлы как картинку **F12** и как таблицу значений **F5**, которые можно просмотреть и перенести в отчет.

## 1. Лабораторная работа №1

### Настройка процессов управления

**Цель работы** - исследовать влияние различных критериев качества **I2**, **I4** и **I5** на качество регулирования объекта с ПИД- регулятором при единичном ступенчатом управляющем воздействии.

#### 1.1. Теоретические сведения

1.1.1. Для получения хорошего качества процессов управления параметры дискретной передаточной функции регулятора  $q_0, q_1, q_2, \dots, q_v$  должны выбираться с учетом характеристик объекта. Расчет этих параметров может быть выполнен следующим образом:

а) на основе метода, использующего модель объекта управления, в результате минимизации критерия качества с использованием параметрической оптимизации, причем аналитическое решение возможно лишь для объектов и регуляторов очень низкого порядка; в остальных случаях следует применять численные методы;

б) с использованием алгоритмов параметрической настройки, позволяющих получить параметры регулятора, близкие к оптимальным для некоторого критерия. Обычно для этого необходимо оценивать либо параметры переходного процесса в системе при ступенчатом задающем воздействии, либо критическое значение коэффициента усиления и период колебаний на границе устойчивости системы;

в) путем последовательного увеличения значений параметров от малых начальных значений до тех пор, пока процесс в замкнутой системе не приобретет значительной колебательности. После этого следует понемногу уменьшать значения параметров (метод проб и ошибок).

Если к системе управления не предъявляется каких-либо специфических требований и если ее переходный процесс отличается простотой и малым временем установления, то для оптимизации параметров регулятора достаточно использовать методы, упомянутые в пп. б) и в). Если же требования строги или переходный процесс оказывается сложным, медленным или существенно изменяющимся, то следует применять метод, упомянутый в п. а). Этот метод также пригоден для автоматизации проектирования регуляторов.

1.1.2. Оценка качества процессов управления должна выполняться с учетом требований, предъявляемых конкретным объектом управления. Однако и в этом случае оценка оказывается несколько субъективной. Существует много способов оценки качества управления, которые зависят как от характера прилагаемых возмущающих воздействий, так и от свойств рассматриваемого объекта и регулятора. Для упрощения процессов на-

стройки параметров регуляторов и более наглядного сравнения различных систем управления часто используют ступенчатое изменение возмущающих воздействий и задающего сигнала.

При синтезе параметрически оптимизируемых систем для оценки качества управления удобно использовать какой-либо единственный показатель. В частности, для непрерывных систем таким показателем с большим успехом может служить интегральный критерий качества (для дискретных систем вместо интеграла берется сумма). Следует отметить, что критерий суммы квадратов ошибок управления предпочтительнее с математической точки зрения, кроме того, он может быть интерпретирован как средняя мощность и в связи с этим использоваться в других методах проектирования регуляторов. Таким образом, в дальнейшем для параметрической оптимизации будут использоваться квадратичные критерии качества.

1.1.3. Интегральные критерии качества регулирования управляемой (выходной) переменной в отличие от прямых показателей (рассмотренных выше), дают обобщенную оценку регулирования.

В автоматике используют несколько видов интегральных критериев

$$I_2 = \sum_{k=0}^{\infty} e^2(k) - \text{сумма квадратов ошибок,}$$

$$I_4 = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot |e(k)| - \text{сумма произведения абсолютных значений ошибок}$$

на номер такта.

1.1.4. Наиболее часто используют критерий **I<sub>2</sub>**, при суммировании которого каждая ошибка выхода увеличивается пропорционально самой себе. Таким образом, этот критерий минимален если нет больших ошибок, а малые ошибки долго незатухающего процесса, когда  $e(k) \rightarrow 0$ , для критерия **I<sub>2</sub>** не существенны. Поэтому переходные процессы с минимальным критерием **I<sub>2</sub>** отличаются малой суммой динамических ошибок (особенно первой ошибкой) и малым временем достижения заданного значения  $t_w$ , но относительно слабым затуханием и, следовательно, большим временем регулирования.

1.1.5. Особый интерес представляет критерий **I<sub>4</sub>**, в котором каждая ошибка выхода  $e(k)$  увеличивается пропорционально номеру такта  $k$ . Таким образом, этот критерий минимален если малы ошибки, далеко отстоящие от начала процесса, а первые большие ошибки для критерия **I<sub>4</sub>** несущественны. Переходные процессы с минимальным критерием **I<sub>4</sub>** отличаются малым временем регулирования.

1.1.6. Обобщенный квадратичный критерий качества регулирования совмещает показатели по управляемой и управляющей переменной

$$I_5 = S_e + r \cdot S_u = \sum_{k=0}^N (e^2(k) + r \Delta u^2(k))$$

где  $\Delta u(k) = u(k) - u_{уст}$  - отклонение управляющей переменной от установившегося значения.

$r$  - весовой коэффициент при управляющей переменной.

Выбор  $r$  зависит от конкретных условий применения регулятора. Увеличение весового коэффициента приводит к уменьшению затрат на управление  $S_u$ , возрастанию ошибки выхода  $S_e$  и уменьшению динамической ошибки регулирования  $e_{дин}$ . Приемлемый компромисс между хорошим качеством процессов в системе и малыми затратами на управление может быть получен при  $r = 0.1 \dots 0.25$ , если коэффициент передачи объекта равен единице.

1.1.7. Необходимо отметить, что обеспечить наилучшие значения одновременно всех показателей невозможно, так как часть из них оказываются противоречащими друг другу. Например, повышение степени затухания системы приводит к уменьшению времени регулирования, но влечет за собой увеличение динамической ошибки.

1.1.8. С другой стороны при использовании какого-либо одного критерия можно получить множество переходных процессов, удовлетворяющих этому критерию. Поэтому при расчете систем регулирования обычно используют два показателя качества: для одного из них, называемого критерием, добиваются наилучшего (т.е. максимального или минимального) значения, для другого вводят ограничение в виде неравенства.

Например, можно добиваться минимального значения динамической ошибки при условии, чтобы степень затухания была не ниже заданной. Возможно и другая постановка задачи: минимизировать время регулирования при условии, что динамическая ошибка будет меньше допустимой.

## 1.2. Методические указания

1.2.1. Изучите теоретические сведения, запишите определения и расчетные формулы критериев качества

1.2.2. Запустите программу моделирования. Выберите заданный объект регулирования и установите его параметры: постоянные времени, коэффициент затухания и запаздывание. Экран показывает реакцию объекта (без регулятора) на единичный скачек управления, т.е. переходную характеристику. Запомните график и время регулирования  $t_{рег}$  переходной характеристики.

Вариант объекта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
№ объекта	1	1	2	1	2	1	2	3	4	5
Вариант парам	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постоянная $T_1$	11	6	18	8	21	14	22	16	15	14
Постоянная $T_2$	7	14	15	16	10	8	12	8	9	11
Пост. $T_3$ (числитель)	3	2	4	3	2	3	4	3	2	2
Пост. $T1$ (д/колеб.)	15	8	16	12	13	10	18	20	12	10
Коеф. затухания $\varepsilon$	0,4	0,6	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,2

Такт квантования надо выбрать самостоятельно по виду переходной характеристики объекта, показывающей его собственную динамику.

Для апериодического объекта выберите такт квантования  $T_0$  по следующему соотношению

$$T_0 \approx (0,07 \dots 0,25) T_{97}$$

где  $T_{97}$  – время выхода объекта на заданную точность регулирования 3%

Для колебательного объекта выберите такт квантования  $1/8 \dots 1/16$  от периода переходной характеристики.

Чем меньше такт квантования, тем лучше качество регулирования. Но при уменьшении такта квантования увеличиваются требования к ресурсам вычислительных устройств.

1.2.3. Включите ПИД-регулятор, и, изменяя параметры **К**, **Си**, **Сд** регулятора, настройте процесс регулирования с минимальными трег и един. Во время настроек обращайте внимание на то, как согласуется с теорией влияние изменений **К**, **Си**, **Сд** на вид переходного процесса.

Настройки выполняют следующим образом:

- кнопками (а быстрее клавишами  $\uparrow \downarrow$ ) изменяйте коэффициент усиления **К** до получения минимума значения **I2** (уменьшение и увеличение значения **I2** отображается цветом);
- переключитесь на коэффициент интегрирования **Си** и изменяйте его до получения нового минимума значения **I2**;
- переключитесь на коэффициент дифференцирования **Сд** и изменяйте его до получения нового минимума значения **I2**;
- повторите пункты а), б), в) пока критерий **I2** перестанет уменьшаться;
- повторите пункты а), б), в), г) с уточненными до сотых значениями коэффициентов (клавишами **Shift** +  $\uparrow \downarrow$ )
- запомните настройки **К**, **Си**, **Сд** этого процесса регулирования.

Иногда формальный поиск минимума критерия от заданных начальных значений **К**, **Си**, **Сд** может привести к неверному результату, так как может быть несколько разных минимумов критерия в пространстве **К**, **Си**, **Сд**. Тогда при данной настройке минимума критерия процесс регулирования оказывается неудовлетворительным. В этом случае

можно начать настройку от "своей" настройки, а затем уточнить ее по минимуму критерия.

1.2.4. Аналогично п.1.2.3. определите оптимальные настройки ПИД-регулятора по критериям I4, I5, запоминая графики и таблицы для каждого критерия.

1.2.5. Выполните «свою» настройку процесса регулирования с минимальными показателями  $t_{рег}$ ,  $\epsilon_{дин} < 0.3$ ,  $U(0) < 7$ . Во время настроек обращайте внимание на то, как K, Си, Сд влияют на вид переходного процесса. «Свои» настройки K, Си, Сд также занесите в таблицу.

1.2.6. Если полученное для четырех настроек наибольшее время регулирования  $t_{рег}$  окажется значительно меньше учетного времени моделирования Тучт, то установите минимальное одинаковое Тучт для всех графиков. (Тучт переходной характеристики может быть другим ) После этого придется повторить все пункты 1.2.3 – 1.2.5 с запомненными настройками, запоминая графики и таблицы процессов и окончательно заполняя таблицу.

1.2.7. Полученные результаты сведите в таблицу 1.

Таблица 1.

Показатели качества регулирования объекта № ... ПИД- регулятором, настроенным по различным критериям.

Параметры объекта:  $T_1=.....$ ;  $T_2=.....$ ;  $T_3=.....$ ;  $T_0=.....$ ; Тучт=.....;

	Переходная характер-ка		по критерию I2		по критерию I4		по критерию I5		Своя настройка	
	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y
I2	0		x		x		x		x	
I4	0		x		x		x		x	
I5	0		x		x		x		x	
K										
Си										
Сд										
$t_{рег}, c$										
$t_w, c$										
u(0)										
$\epsilon_{дин}$										
Se										
Su										
№ инт-вала	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y
0										
1										
2										
3										
$t_{рег}$										

где  $n_{рег} = t_{рег} / T_0$  - номер такта окончания самого длинного процесса регулирования.

1.2.8. По данным таблицы, основываясь на конкретных показателях, определите, с каким критерием качества процесс регулирования имеет наилучшие показатели. Как применение того или иного критерия влияет на какой-либо показатель качества:

- на динамическую ошибку регулирования  $e_{дин}$  ?
- на время достижения заданного значения  $t_w$
- на статическую ошибку регулирования  $e_{ст}$  ?
- на время регулирования  $t_{рег}$  ?
- на начальное значение управляющей переменной  $U(0)$  ?

### 1.3. Содержание отчета

В отчет с обычными реквизитами включите следующие данные:

- 1) определения и расчетные формулы для показателей качества процесса регулирования и критериев качества регулирования;
- 2) сводную таблицу показателей качества регулирования для всех критериев качества и своей настройки;
- 3) передаточную функцию  $G(s)$  моделируемого объекта и графики его переходной характеристики и настроенных процессов регулирования для каждого критерия **I2**, **I4** и **I5** и своей настройки;
- 4) Выводы по результатам работы с обоснованным сравнением эффективности каждого критерия.

### 1.4. Контрольные вопросы

- 1) Как показатели качества регулирования влияют на экономические показатели реальной САР?
- 2) Какие показатели реальной САР зависят от показателя  $U(0)$ ?
- 3) В чем отличия и особенности различных критериев качества?
- 4) Как определять показатели качества регулирования из графика и из таблицы?
- 5) Как параметры **K**, **Сп**, **Сд** регулятора влияют на вид переходного процесса?
- 6) Почему вид переходной характеристики объекта не зависит от такта квантования объекта?
- 7) Какими методами можно определять настройки параметров регулятора?

## 1.5. Литература.

1. Теория автоматического управления/ Под ред. А.А.Воронова.М.:Высшая школа , 1986.504с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир,1984, 540с.
3. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов./Под ред. Е.Г.Дудникова.- М.: Химия, 1987>368с.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. М., «Машиностроение», 1973, 606 с.



## 2. Лабораторная работа 2

### Выбор регулятора

**Цель работы:** изучение особенностей дискретных регуляторов, аппроксимирующих аналоговые регуляторы и сравнение их с регуляторами, реализующими дискретные алгоритмы управления.

#### 2.1. Теоретические сведения

2.1.1. Выделяют две основные группы систем управления: параметрически и структурно оптимизируемые. Системы, структура которых, т. е. вид и порядок описывающих их уравнений, задана, а свободные параметры подстраиваются под управляемый объект с использованием критерия оптимизации или определенных правил настройки, называются параметрически оптимизируемыми. Системы управления называются структурно оптимизируемыми, если и структура, и параметры регулятора оптимально подстраиваются под структуру и параметры модели объекта.

В каждой из рассмотренных двух основных групп регуляторов можно выделить несколько подгрупп: для параметрически оптимизируемых регуляторов это различные типы ПИД-регуляторов невысокого порядка. Структурно оптимизируемые регуляторы подразделяются на компенсационные регуляторы (апериодические AP- регуляторы) и регуляторы с управлением по состоянию (регуляторы состояния).

2.1.2. Обычно при проектировании используют правила настройки, критерии качества или задают расположение полюсов замкнутой системы. Решающую роль при проектировании играет выбор критерия управления. Компенсационные регуляторы задают качество процессов по управляемым переменным либо на протяжении всего времени переходного процесса, либо после некоторого конечного интервала времени.

Более полно задать поведение систем управления позволяют прямые методы расчета, которые основаны на использовании различных критериев качества. В последнее время при проектировании непрерывных систем управления, как правило, используют интегральные критерии качества — интеграл от ошибки управления, квадрата ошибки управления, абсолютной величины этой ошибки и т. д. Следует отметить, что в этих интегральных критериях можно также учитывать и время.

Применение дискретных регуляторов, аппроксимирующих аналоговые регуляторы позволяет использовать накопленный опыт работы с аналоговыми регуляторами и применять уже хорошо известные правила настройки их параметров.

2.1.3. Дискретный регулятор – это алгоритм управляющей ЭВМ реализующий требуемую зависимость между входным сигналом регулятора  $e(k)$  и его выходным сигналом  $u(k)$ .



Рис.2.1. структурная схема замкнутой САР

2.1.4. Уравнение непрерывного ПИД- регулятора включает три составляющие: пропорциональную П, интегральную И и дифференциальную Д.

$$u(t) = K \left[ \underbrace{e(t)}_{\text{П}} + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

где **K** - коэффициент передачи;  
**T<sub>I</sub>** - постоянная интегрирования;  
**T<sub>D</sub>** - постоянная дифференцирования.

2.1.5. В дискретных системах непрерывный регулятор реализуется при малых тактах квантования  $T_0$ . Дискретная передаточная функция ПИД- регулятора:

$$G_R(z) = \frac{K[(1 + C_D) + (C_I - 2C_D - 1) + C_D z^2]}{1 - z^{-1}}$$

где **K** - коэффициент передачи регулятора;  
**C<sub>I</sub>** =  $T_0 / T_I$  - коэффициент интегрирования регулятора;  
**C<sub>D</sub>** =  $T_D / T_0$  - коэффициент дифференцирования регулятора;

2.1.6. В промышленных регуляторах реализуют следующие типовые законы регулирования

- пропорциональный **П**;
- интегральный **И**;
- пропорционально - интегральный **ПИ**;
- пропорционально - дифференциальный **ПД**;
- пропорционально - интегрально - дифференциальный **ПИД**.

2.1.7. Пропорциональный **П**- регулятор получают при  $C_{и} = 0$  и  $C_{д} = 0$ , его передаточная функция:

$$G_R(z) = K;$$

где **K** - параметр настройки регулятора (коэффициент передачи),

Особенность работы САР с **П**-регулятором в том, что выход  $u(k)$  регулятора пропорционален разности между выходом объекта  $y(k)$  и заданием  $w(k)$ . Поэтому чтобы выход  $u(k)$  **П**-регулятора был не нулевым, эта разность должна быть не нулевой, т. е. должна быть статическая ошибка регулирования  $e(k) \neq 0$ .

$$e_{ст} = K_{об} / (1 + K_{об}K).$$

Таким образом, статическая ошибка регулирования определяется коэффициентами усиления объекта  $K_{об}$  и регулятора  $K$ , причем, чем больше  $K$ , тем меньше статическая ошибка. Чтобы уменьшить статическую ошибку, приходится увеличивать коэффициент усиления регулятора, что увеличивает колебательность САР. Следовательно, наличие статической ошибки регулирования является неотъемлемым недостатком САР с **П**-регулятором.

2.1.8. Интегральный **И**- регулятор получают при  $K = 0$  и  $C_{д} = 0$ , его передаточная функция:

$$G_R(z) = \frac{KC_{и}z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

где  $C_{и} = T_0/T_I$  - параметр настройки регулятора.

Интегральным регулятором служит интегрирующее звено с настраиваемой постоянной интегрирования  $1/C_{и}$ , включенное в отрицательную обратную связь к объекту. Статическая ошибка в САР с **И**-регулятором:

$$e_{ст} = \lim_{s \rightarrow 0} \{W_{об}(s) / [1 + W_{об}(s)T_I/s]\} = 0;$$

Таким образом, при использовании интегрального регулятора статическая ошибка регулирования всегда равна нулю. В этом заключается основное достоинство интегрального регулятора.

2.1.9. Пропорционально - дифференциальный **ПД**- регулятор получают при  $C_{и} = 0$ , его передаточная функция:

$$G_R(z) = K[(1 + C_{д}) - C_{д}z^{-1}]$$

где  $K$  и  $C_{д} = T_D/T_0$  - параметры настройки регулятора.

С точки зрения качества процессов регулирования в замкнутой САУ пропорционально - дифференциальный регулятор обладает особенностями обеих простейших составляющих: наличие дифференцирующей составляющей увеличивает быстродействие регулятора и уменьшает динамическую ошибку регулирования. В установившихся же режимах регулятор ведет себя как обычный **П**- регулятор и статическая ошибка должна остаться такой же, как в случае использования **П**-регулятора.

2.1.10. Пропорционально-интегральный **ПИ**- регулятор получают при  $C_d = 0$ , его передаточная функция

$$G_R(z) = \frac{K[1 + (C_{и} - 1)z^{-1}]}{1 - z^{-1}}$$

где  $K$  и  $C_{и} = T_0/T_I$  - параметры настройки регулятора.

Пропорционально- интегральный регулятор сочетает в себе достоинства **П**- и **И**-законов регулирования: пропорциональная составляющая обеспечивает достаточное быстродействие регулятора, а интегральная - ликвидирует статическую ошибку.

2.1.11. Пропорционально- интегрально- дифференциальный **ПИД**- регулятор имеет передаточную функцию:

$$G_R(z) = \frac{K[(1 + C_d) + (C_{и} - 2C_d - 1)z^{-1} + C_d z^2]}{1 - z^{-1}}$$

где  $K$ ,  $C_d = T_D/T_0$  и  $C_{и} = T_0/T_I$  - параметры настройки регулятора.

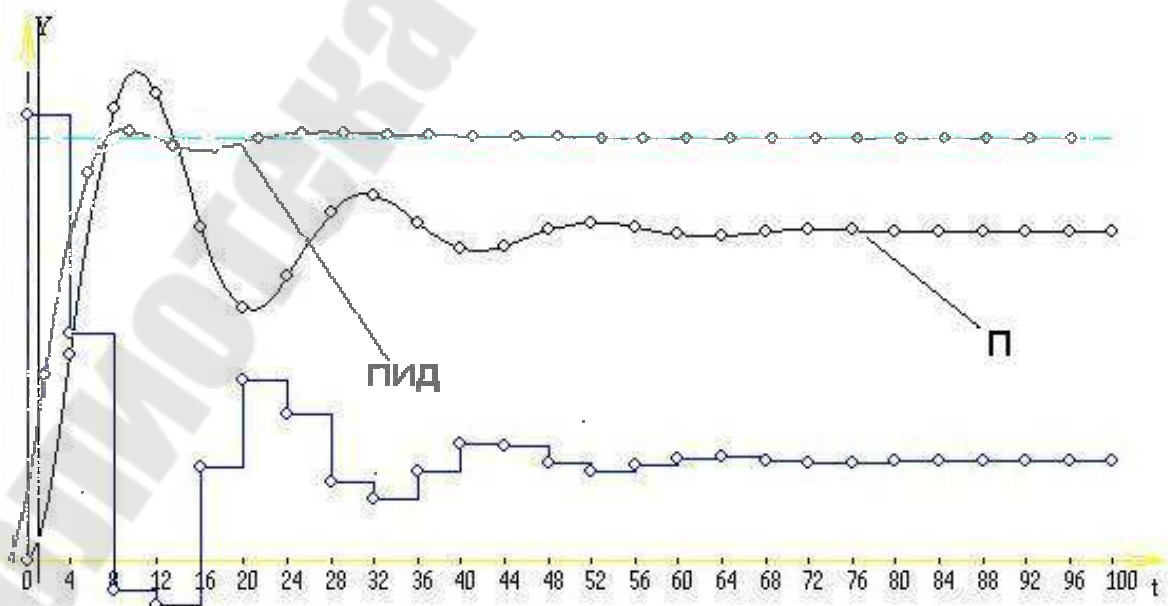


Рис.2.2. Процессы регулирования с ПИД- и П- регулятором

На рис.2.2. приведены для сравнения процессы регулирования объекта различными регуляторами

2.1.12. Дискретный апериодический регулятор **AP** имеет передаточную функцию, синтезируемую по параметрам передаточной функции объекта, когда задан вид переходного процесса на выходе САР. По этому условию переходный процесс заканчивается через  $m$ -интервалов, а выход САР достигает заданного значения.

$$G_R(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{q_0 A(z^{-1})}{1 - q_0 B(z^{-1})} = \frac{q_0 (1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m})}{1 - q_0 (b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m})}$$

здесь  $A(z^{-1})$  и  $B(z^{-1})$  - полиномы из передаточной функции объекта.

Передаточная функция апериодического регулятора повышенного порядка  $AP+1$ , ограничивающего первый импульс управляющего воздействия:

$$G_R(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{q_0 A(z^{-1}) [1 - z^{-1}/\alpha]}{1 - q_0 B(z^{-1}) [1 - z^{-1}/\alpha]}$$

где  $1/\alpha = 1 - 1/(q_0 \sum b_i)$

Из передаточных функций **AP**-регуляторов следует, что их параметры рассчитываются по известным параметрам объекта регулирования и не требуют покоординатного поиска настроек своих параметров по качеству переходного процесса.

## 2.2. Методические указания

2.2.1. Изучите теоретические сведения, запишите определения и расчетные формулы законов регулирования.

2.2.2. Запустите программу моделирования, выберите заданный объект регулирования и запишите его передаточную функцию  $Gp(s)$ , постоянные времени и заданные ограничения.

Вариант объекта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
№ объекта	1	1	2	1	2	1	2	3	4	5
Вариант парам	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постоянная $T_1$	11	6	18	8	21	14	22	16	15	14
Постоянная $T_2$	7	14	15	16	10	8	12	8	9	11
Пост. $T1$ (д/колеб.)	15	8	16	12	13	10	18	20	12	10
Коеф. затухания $\varepsilon$	0,4	0,6	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,2
Пост. $T_3$ (числитель)	3	2	4	3	2	3	4	3	2	2
Дин. ошибка $един <$	0,2	0,4	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3
Макс.упр. $U(0) <$	5	6	7	5	8	7	5	6	7	4

Такт квантования выберите по переходной характеристике объекта.  
 Для апериодического объекта выберите такт квантования  $T_0$  по следующему соотношению

$$T_0 \approx (0,07 \dots 0,25)T_{97}$$

где  $T_{97}$  – время выхода объекта на заданную точность регулирования 3%  
 Для колебательного объекта выберите такт квантования  $1/8 \dots 1/16$  от периода переходной характеристики.

Регуляторы **АР** и **АР+1** могут превысить заданные ограничения  $\epsilon_{\text{дин}}$  и  $U(0)$ . Поэтому сначала надо включить регулятор **АР** и скорректировать такт квантования, чтобы не превысить эти ограничения.

2.2.3. Запомните график и  $t_{\text{рег}}$  переходной характеристики.

2.2.4. Включите ПИД-регулятор определите "свои" оптимальные настройки ПИД-регулятора с учетом ограничений  $\epsilon_{\text{дин}} < 0.3$ ,  $U(0) < 7$  (можно воспользоваться критериями I2 I4 I5). Запомните настройки  $K$ ,  $Si$ ,  $Sd$ .

2.2.5. Начиная с настроек  $K$ ,  $Si$ ,  $Sd$  процесса с ПИД-регулятором повторите п.2.2.4 с ПИ- регулятором и П- регулятором. Для регуляторов **АР** и **АР+1** настройки не требуются.

2.2.6. Скорректируйте  $T_{\text{учт}}$  по самому длинному процессу и установите  $T_{\text{учт}}$  одинаковым для всех процессов и повторите их с запомненными настройками. Запомните графики и таблицы процессов, и полученные результаты окончательно сведите в таблицу 2

Таблица 2.

Показатели качества регулирования объекта № ....  
 с регуляторами различных типов

$T1 = \dots$ ;  $T2 = \dots$ ;  $T3 = \dots$ ;  $T_0 = \dots$ ;  $T_{\text{учт}} = \dots$ ,  $\epsilon_{\text{дин}} < \dots$ ,  $U(0) < \dots$

	Перех. хар-ка	ПИД	ПИ	П	АР	АР+1
$T_0$						
$K$					-	-
$Si$					-	-
$Sd$					-	-
$t_{\text{рег}}, c$						
$t_w, c$						
$U(0)$						

ест											
един											
Se											
Su											
№такта	у	и	у	и	у	и	у	и	у	и	у
0											
1											
2											
...											
...											
прег											

где  $\text{прег} = t_{\text{рег}} / T_0$  - номер такта окончания самого длинного процесса регулирования.

На основе сравнительного анализа полученных процессов регулирования оцените влияние пропорциональной, интегральной и дифференциальной настроек регулятора на качество регулирования САР.

### 2.3. Содержание отчета.

Отчет с обычными реквизитами должен содержать:

- 1) определения и дискретные передаточные функции регуляторов, примененных в работе;
- 2) описание, передаточную функцию  $G(s)$  моделируемого объекта, таблицу и график его переходной характеристики, выбранный критерий качества и заданные ограничения;
- 3) сводную таблицу настроенных процессов регулирования для каждого регулятора ПИД, ПИ, П, АР и АР+1 с расчетами прямых показателей качества;
- 4) графики процессов регулирования для всех регуляторов и график переходной характеристики;
- 5) Выводы по результатам работы с обоснованным сравнением эффективности каждого регулятора.

### 2.4. Контрольные вопросы

1. Каким методом отыскиваются настройки для регуляторов ПИД- типа и АР?
2. Каким образом влияет на вид переходного процесса изменение настройки:
  - пропорциональной **К**?
  - интегральной **Си**?
  - дифференциальной **Сд**?

3. В чем отличие и особенности непрерывных регуляторов основных типов?
4. В чем отличие дискретных регуляторов от аналоговых регуляторов основных типов?
5. От чего зависит и на что влияет показатель регулирования  $U(0)$ ?
6. Чем устраняется статическая ошибка в системах регулирования?

## **2.5. Литература.**

1. Теория автоматического управления/ Под ред. А.А.Воронова. М.: Высшая школа, 1986. 504с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984, 540с.
3. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов./ Под ред. Е.Г.Дудникова.- М.: Химия, 1987. 368с.
4. Остром К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ М.: Мир, 1987, 480с



### 3. Лабораторная работа №3

#### Выбор такта квантования.

**Цель работы:** исследовать качество процессов управления объектами при изменении длительности такта квантования с целью определения оптимального такта.

#### 3.1. Теоретические сведения

3.1.1. Длительность такта квантования во многом определяет качество регулирования. При уменьшении такта квантования дискретный ПИД-регулятор приближается по качеству регулирования к аналоговому ПИД-регулятору, полностью используя возможности аналогового регулирования.

Дискретный АР- регулятор с уменьшением такта квантования во столько же раз уменьшает время регулирования. Но с другой стороны с уменьшением такта квантования увеличивается начальное значение управляющей переменной  $U(0)$ , что требует увеличения мощности регулятора или, другими словами, приводит к увеличению затрат на регулирование. Поэтому вводят ограничение на максимумы управляющих воздействий в системах регулирования.

3.1.2. В ПИД-регуляторе начальное значение управляющей переменной  $U(0)$  зависит от коэффициента передачи  $K$  и коэффициента дифференцирования  $C_D$ , поэтому с увеличением этих составляющих в алгоритме управления дополнительно приводит к увеличению значения  $U(0)$ .

$$U(0) = q_0 = K(1 + C_D)$$

При синтезе ПИД-регулятора при прочих равных условиях можно ограничить значение  $U(0)$  за счет увеличения следующего значения  $U(1)$ . Для этого надо для конкретных условий регулирования определить максимальное изменение сигнала задания  $W_0$  (или ошибки  $e(k)$ ) и после этого положить  $q_0 = U(0)/W_0$ . А для того, чтобы значение  $U(1)$  управляющей переменной было меньше  $U(0)$ , параметр  $q_1$  регулятора выбирается с учетом неравенства:

$$q_1 \leq -q_0(1 - q_0 b_1)$$

3.1.3. В апериодическом регуляторе АР начальное значение управляющей переменной  $U(0)$  обратно пропорционально сумме коэффициентов полинома  $B(z)$  в числителе передаточной функции объекта управления:

$$q_0 = \frac{1}{b_1 + b_2 + \dots + b_m} = U(0)$$

Значение суммы этих коэффициентов уменьшается с уменьшением такта квантования. Это связано с особенностью дискретных передаточных функций. Следовательно, с уменьшением такта квантования начальное значение  $U(0)$  увеличивается. Таким образом, задавая ограниченное значение управляющей переменной  $U(0)$  можно определить такт квантования.

3.1.4. Можно ограничить значение  $U(0)$  другим способом - применяя AP+1-регулятор. В этом регуляторе время регулирования увеличено на один такт  $m+1$  по сравнению с AP-регулятором. За счет этого стало возможным заменить один такт с большим управляющим воздействием  $U(0)$  на два такта с уменьшенными воздействиями  $u(0)=u(1)$ . Значение  $U(0)$  в этом случае уменьшается в  $(1-a_1)$  раз. С учетом этого для AP+1-регулятора такт квантования можно выбирать меньшим, чем для AP-регулятора.

Экспериментально установлены следующие оптимальные значения тактов квантования:

для AP- регулятора -  $T_0/T_{\Sigma} \geq 0.36$  или  $T_0/T_{95} \geq 0.18$

для AP+1- регулятора -  $T_0/\Sigma T \geq 0.22$  или  $T_0/T_{95} \geq 0.11$

где  $T_{\Sigma}$ - сумма постоянных времени объекта управления;  
 $T_{95}$ - время достижения выходным сигналом значения 95% от установившегося значения.

В дискретных системах управления предпочтительнее большие такты квантования, что экономит ресурсы ЭВМ и позволяет догружать ее другими задачами. ПИД-регулятор с увеличением такта квантования становится дискретным, приобретая новые свойства. Для ПИД-регулятора есть некоторое оптимальное увеличение такта, экономящее ресурсы ЭВМ и улучшающее регулирование. Дальнейшее увеличение такта ухудшает регулирование. Например для колебательных объектов, увеличенный такт может совпасть с периодом автоколебаний

## 3.2. Методические указания

3.2.1. Изучите теоретические сведения, запишите определения и расчетные формулы, определяющие ограниченное значение управляющей переменной.

3.2.2. Запустите программу моделирования, выберите заданный объект регулирования, запишите его описание, передаточную функцию  $G(s)$ , постоянные времени и заданные ограничения.

Вариант объекта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
№ объекта	1	1	2	1	2	1	2	3	4	5
Вариант парам	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постоянная $T_1$	11	6	18	8	21	14	22	16	15	14
Постоянная $T_2$	7	14	15	16	10	8	12	8	9	11
Пост. $T_1$ (д/колеб.)	15	8	16	12	13	10	18	20	12	10
Коеф. затухания $\varepsilon$	0,4	0,6	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,2
Пост. $T_3$ (числитель)	3	2	4	3	2	3	4	3	2	2
Дин. ошибка $e_{дин}$	0,2	0,4	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3
Макс.упр. $U(0)$	5	6	7	5	8	7	5	6	7	4

Первое приближение среднего такта квантования выберите по переходной характеристике объекта. Для апериодического объекта выберите такт квантования  $T_0 \approx 0,12T_{97}$ . Для колебательного объекта выберите такт квантования примерно 1/12 от периода переходной характеристики.

3.2.3. Запомните график и  $t_{рег}$  переходной характеристики.

3.2.4. Настройте "свои" оптимальные (или по критерию I4 или I2) процессы регулирования с ПИД-регулятором с учетом ограничений:

- при минимально возможном и максимально возможном такте квантования (Предел уменьшения или увеличения такта наступает тогда, когда наступают ограничения по  $e_{дин}$  или  $U(0)$  или значительно ухудшается время регулирования);
- после определения минимального и максимального такта средний такт можно скорректировать, с целью получить наилучшее регулирование или просто "сдвинуть" его в середину
- запомните настройки для каждого процесса.

3.2.5. Определите минимально возможный такт квантования для процессов регулирования с AP-регулятором и AP+1-регулятором с учетом ограничений. Запомните настройки каждого процесса.

3.2.6. Скорректируйте  $T_{учт}$  по самому длинному процессу и установите  $T_{учт}$  одинаковым для всех процессов и повторите их с запомненными настройками. Запомните графики и таблицы процессов, и полученные результаты окончательно сведите в таблицу 3

Таблица 3

Показатели качества регулирования объекта №.....;  $T_1=.....$ ;  $T_2=.....$ ;  $T_3=.....$ ;  
для разных тактов квантования  $U(0)\leq.....$ ;  $\epsilon_{\text{дин}} \leq.....$ ;  $T_{\text{учт}}=...$ ;

	перех. хар-ка	ПИД						АР		АР+1	
		$T_{0\text{ мин}}=$		$T_{0\text{ ср}}=$		$T_{0\text{ макс}}=$		$T_0=$		$T_0=$	
К											
$c_1$											
$c_D$											
$t_{\text{рег}}, \text{с}$											
$t_w, \text{с}$											
$U(0)$											
$\epsilon_{\text{дин}}$											
Se											
Su											
№ такта	у	и	у	и	у	и	у	и	у	и	у
0											
1											
2											
...											
...											
$n_{\text{рег}}$											

где  $n_{\text{рег}} = t_{\text{рег}} / T_0$  - номер такта окончания самого длинного процесса регулирования.

3.2.7. По данным таблицы определите, с каким тактом квантования процесс регулирования имеет наилучшие показатели. Как изменение такта квантования влияет на какой-либо показатель качества.

### 3.3. Содержание отчета .

В отчет с обычными реквизитами включите следующие данные:

- 1) определения и расчетные формулы для значений  $U(0)$ ;
- 2) описание, передаточную функцию  $G(s)$ , такты квантования исследуемого объекта, таблицу и график его переходной характеристики;
- 3) таблицы и графики настроенных процессов управления для каждого такта квантования с ПИД-, АР- и АР+1- регуляторами.
- б) Выводы по результатам работы с обоснованным анализом изменения качества регулирования при изменении такта квантования.

### 3.4. Контрольные вопросы

1. Как показатели качества регулирования влияют на экономические показатели реальной САР?
2. Почему с изменением такта квантования изменяются показатели качества переходного процесса:  $U(0)$ ;  $e_{\text{дин}}$ ;  $t_{\text{рег}}$ ;  $Se=...$ ;  $Su=...$ ?
3. Как требуется изменять настройки ПИД- регулятора при изменении такта квантования?
4. При каких тактах квантования проявляются преимущества или недостатки дискретных AP- или AP+1- регуляторов?
4. При каких тактах квантования проявляются преимущества или недостатки ПИД- регуляторов?
5. Почему изменяется вид переходного процесса с ПИД- регулятором при изменении такта квантования?

### 3.5. Литература.

1. Теория автоматического управления/ Под ред. А.А.Воронова.М.:Высшая школа , 1986.504с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир,1984, 540с.
3. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов./ Под ред. Е.Г.Дудникова.- М.: Химия, 1987. 368с.

## 4. Лабораторная работа № 4

### Управление объектами с запаздыванием.

**Цель работы:** сравнить качество и особенности процессов управления объектами с запаздыванием при управлении от регуляторов различных типов.

#### 4.1. Теоретические сведения

4.1.1. Управление объектами с запаздыванием, малым по сравнению с их другими динамическими характеристиками, можно аппроксимировать малыми постоянными времени непрерывной модели объекта. Большие запаздывания следует рассматривать как задержки в передаче сигнала. Такие запаздывания в дискретной модели объекта учитывают коэффициентом  $z^{-d}$ . Объекты с запаздыванием и собственной динамикой имеют передаточную функцию

$$G_p(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}} z^{-d}$$

где  $d = T_{\text{запазд}} / T_0$  - количество тактов запаздывания (целое, время запаздывания должно быть кратно такту квантования).

4.1.2. Непрерывные ПИД- регуляторы при небольших запаздываниях с соответствующей настройкой обеспечивают удовлетворительное качество регулирования. ПИ-регуляторы обеспечивают несколько лучшее качество регулирования за счет меньшей колебательности переходного процесса

Передаточная функция ПИД- регулятора:

$$G_R(z) = \frac{K \left[ (1 + c_D) + (c_I - 2c_D - 1)z^{-1} + c_D z^{-2} \right]}{1 - z^{-1}}$$

Для объектов с большим запаздыванием непрерывными ПИД- регуляторами можно получить удовлетворительное время регулирования, если в обратную связь регулятора включить модель объекта с запаздыванием. Но такие регуляторы относительно дороги и очень чувствительны к несоответствию реального и заложенного при синтезе времени запаздывания.

4.1.3. Дискретные регуляторы позволяют непосредственно учитывать большие запаздывания. Возможное наилучшее качество переходного процесса достигается в системе с апериодическими регуляторами AP( $\nu$ ) или AP( $\nu+1$ ). Однако эти регуляторы не рекомендуется использовать в том случае, когда запаздывание в объекте известно не точно, поскольку при

отличии реального и принятого при синтезе запаздывания система становится неустойчивой.

Синтез дискретных регуляторов для объектов с запаздыванием заключается в простом учете этого запаздывания. Передаточная функция аperiodического регулятора AP для объекта с запаздыванием отличается от передаточной функции аperiodического регулятора для объекта без запаздывания лишь дополнительным коэффициентом в знаменателе  $z^{-d}$

$$G_R(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{q_0 A(z^{-1})}{1 - q_0 B(z^{-1}) z^{-d}} \quad (4.1)$$

здесь  $A(z^{-1})$  и  $B(z^{-1})$  - полиномы из передаточной функции объекта;  
 $d$  – запаздывание объекта.

4.1.4. Передаточная функция аperiodического регулятора повышенного порядка AP+1 для объекта с запаздыванием

$$G_R(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{q_0 A(z^{-1}) [1 - z^{-1}/\alpha]}{1 - q_0 B(z^{-1}) z^{-d} [1 - z^{-1}/\alpha]} \quad (4.2)$$

где  $1/\alpha = 1 - 1/(q_0 \sum b_j)$

Из соотношений (4.1) и (4.2) следует, что параметры аperiodических регуляторов рассчитываются по известным параметрам объекта регулирования и не требуют покоординатного поиска настроек по качеству переходного процесса.

Разработаны также другие типы дискретных регуляторов, реализующих различные принципы учета запаздывания объекта.

## 4.2. Методические указания

4.2.1. Изучите теоретические сведения, запишите определения и расчетные формулы синтеза дискретных регуляторов для объектов с запаздыванием.

4.2.2. Запустите программу, установите заданный объект регулирования и запишите его передаточную функцию  $G(s)$ .

<b>Вариант объекта</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
№ объекта	1	1	2	1	2	1	2	3	4	5
<b>Вариант парам</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
Постоянная $T_1$	11	6	18	8	21	14	22	16	15	14
Постоянная $T_2$	7	14	15	16	10	8	12	8	9	11
Пост. $T_3$ (числитель)	3	2	4	3	2	3	4	3	2	2
Пост. $T1$ (д/колеб.)	15	8	16	12	13	10	18	20	12	10
Коэф. затухания $\varepsilon$	0,4	0,6	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,2

Такт квантования надо выбрать самостоятельно по виду переходной характеристики объекта, показывающей его собственную динамику.

Для апериодического объекта выберите такт квантования  $T_0$  по следующему соотношению

$$T_0 \approx (0,07 \dots 0,25)T_{97}$$

где  $T_{97}$  – время выхода объекта на заданную точность регулирования 3%

Для колебательного объекта выберите такт квантования  $1/8 \dots 1/16$  от периода переходной характеристики.

4.2.3. Снимите переходную характеристику выбранного объекта с запаздыванием один такт, и задайте время моделирования  $T_{учт}$  немного больше времени установления.

4.2.4. Попробуйте настроить регулирование ПИД или ПИ-регулятором с таким минимальным запаздыванием. Затем попробуйте настроить регулирование, увеличивая время запаздывания  $T_{зап}$  количеством тактов запаздывания  $d$  или длительностью такта  $T_0$ . В результате надо получить приемлемое регулирование с временем установления  $0,4-0,6$  от переходной характеристики. Управляющий сигнал также должен устанавливаться, т.е. не должно быть незатухающих колебаний  $U(k)$ , и должно соблюдаться ограничение по  $U(0) < 10$ . Желательны два варианта - при наибольшем и наименьшем такте квантования.

4.2.5. Для АР - регулятора установите минимально допустимый по  $U(0) < 6$  такт (это обеспечит минимальное время динамики регулирования), а запаздывание  $d$  примерно равное этому времени.

Таблица 4

Показатели качества регулирования объекта № .... с запаздыванием  
 $T_1 = \dots; T_2 = \dots; T_3 = \dots;$

	Без регулятора	ПИД/ПИ $T_0$ мин	ПИД/ПИ $T_0$ макс	АР,
$d$ , такт				
$T_0$ , сек				
$T_{зап}$ , сек				
$t_{рег}$ , с				
$e_{дин}$				
$U(0)$	-			
$S_e$	-			
$S_{ст}$	-			
$K$	-			
$S_{и}$	-			
$S_{д}$	-			



№ такта	U	Y	U	Y	U	Y	U	Y
0								
1								
2								
3								
...								
...								
$n_{\text{рег}}$								

где  $n_{\text{рег}} = t_{\text{рег}} / T_0$  - номер такта окончания процесса регулирования.

### 4.3. Содержание отчета

- 1) определения и расчетные формулы для регуляторов различных типов;
- 2) описание, передаточную функцию  $G(s)$ , значение запаздывания, таблицу и график его переходной характеристики с запаздыванием.
- 3) сводную таблицу показателей качества регулирования, таблицы и графики управляющей  $U$  и выходной  $Y$  переменной с ПИД/ПИ и АР регулятором.

По сводной таблице определите, с каким регулятором процесс регулирования имеет наилучшие показатели.

### 4.4. Контрольные вопросы

1. Как показатели качества регулирования влияют на экономические показатели реальной САР?
2. В чем преимущества и недостатки непрерывных регуляторов для объектов с запаздыванием?
3. В чем преимущества и недостатки дискретных АР и АР+1 регуляторов для объектов с запаздыванием?
4. Как определять показатели качества регулирования из графика и из таблицы?
5. Как параметры  $K$ ,  $c_i$ ,  $c_D$  регулятора влияют на качество регулирования объектов с запаздыванием?
6. Почему вид переходной характеристики объекта не зависит от такта квантования объекта?
7. Как настраивают непрерывные и дискретные регуляторы для объектов с запаздыванием?

### 4.5. Литература.

1. Теория автоматического управления/ Под ред. А.А.Воронова.М.:Высшая школа , 1986.504с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир,1984, 540с.
3. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов./Под ред. Е.Г.Дудникова.- М.: Химия, 1987>368с.

## 5. Лабораторная работа 5

### Регулирование нестабильных объектов

**Цель работы:** исследовать чувствительность регуляторов различных типов к изменениям параметров объекта или неточному заданию параметров модели объекта.

#### 5.1. Теоретические сведения

5.1.1. В реальных условиях регулирования статические и динамические свойства объектов подвержены изменениям под воздействием многих факторов. Это и окружающая среда, и изменения на входе, например перерабатываемых продуктов, изменения нагрузки и пр. С другой стороны алгоритм неадаптивного регулятора не меняется, или адаптация выполнена один раз, или выполняется редко. Поэтому при изменении объекта неизменившийся регулятор, настроенный на прежние параметры объекта может ухудшить регулирование.

5.1.2. В большинстве случаев модель объекта является аппроксимацией реального объекта, так что алгоритмы управления нельзя оценивать без учета их чувствительности к ошибкам в модели объекта. Как для теоретических, так и для экспериментальных (идентифицированных) моделей объектов ошибки в отдельных параметрах редко оказываются независимыми. Поэтому оценка чувствительности только по отдельным параметрам может привести к неверным заключениям.

5.1.3. В данной лабораторной работе рассматривается чувствительность к пропорционально завышенным или заниженным параметрам аperiодических объектов: постоянных  $T_1, T_2, T_3, \dots$ , и независимые ошибки оценки постоянных  $T_1, T_2, \dots$  и коэффициента затухания  $\varepsilon$  - для колебательных объектов. Сравнение чувствительности неточным моделям объектов поводится для замкнутых систем для основных алгоритмов управления ПИД, АР.

5.1.4. Для оценки чувствительности вначале определяют показатели замкнутой системы по управляемой переменной для точной модели объекта (т. е. реального объекта)  $t_{3T}$  с оптимально настроенными регуляторами. Затем определяют эти же показатели  $t_{3H}$  для неточной модели, и определяют ошибку по формуле

$$\Delta t_3 = t_{3H} / t_{3T}$$

Ошибка выхода объекта  $\Delta t_3$  рассматривается по отношению к изменению объекта без регулятора, т.е. изменению переходной характеристики

$$\Delta t_{об} = t_{обH} / t_{обT}$$

здесь  $t_{обт}$  – время установления переходной характеристики в заданное значение для точной модели объекта реального объекта (или неизменившегося объекта);

$t_{обн}$  - время установления для неточной модели объекта(или изменившегося объекта).

5.1.5. Чувствительность замкнутой системы к неточности задания модели объекта оценивают по формуле

$$\beta = \Delta t_3 / \Delta t_{об}$$

Чем меньше величина  $\beta$ , тем меньше влияет неточность модели или изменения объекта регулирования на поведение замкнутой системы. Другими словами регулятор менее чувствителен к изменениям параметров объекта.

## 5.2. Методические указания

5.2.1. Изучите теоретические сведения, запишите определения и расчетные формулы определения чувствительности замкнутой системы к неточности задания модели объекта.

5.2.2. Запустите программу, установите заданные объекты регулирования и запишите их передаточные функции  $G(s)$ .

Варианты заданий.

Вариант объекта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Апериодический	1	3	2	1	3	1	2	3	2	1
Колебательный	4	5	5	5	4	4	4	5	4	5

Вариант парам.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постоянная $T_1$	11	6	18	8	21	14	22	16	15	14
Постоянная $T_2$	7	14	15	16	10	8	12	8	9	11
Пост. $T_3$ (числитель)	3	2	4	3	2	4	3	4	3	2
Пост. $T_1$ (колеб.)	15	6	10	12	13	10	13	20	9	11
Параметр $\varepsilon$	0,4	0,6	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,2

5.2.3. Для апериодического объекта установите заданные параметры и запомните график и время установления его переходной характеристики  $t_{обт}$ . Настройте замкнутую систему с ПИД – регулятором для точной модели объекта и запомните график и время регулирования  $t_3$ .

5.2.4. Пропорционально изменяя все постоянные объекта определите изменения времени установления переходной характеристики "неточной" модели  $t_{обн}$  и изменения времени регулирования замкнутой системы с ПИД – регулятором для "неточной" модели объекта  $t_3$ . Определите из-

менения показателя чувствительности замкнутой системы  $\beta$  и запомните график и время регулирования  $t_{3n}$  для максимально неточной модели.

5.2.5. Повторите п.5.2.3. для замкнутой системы с АР – регулятором при установленном флажке «Учитывать параметры объекта». Перед выполнением п.5.2.4. отключите флажок «Учитывать параметры объекта».

5.2.6. Для колебательного объекта повторите п.5.2.3. – п.5.2.5. изменяя только постоянную времени  $T$ .

Таблица 5

Показатели чувствительности замкнутой системы к неточности задания модели объекта № ...,  $T_1=...$ ,  $T_2=...$ ,  $T_3=...$ ; и объекта № ...,  $T_1=...$ ,  $\varepsilon=...$ ,

апериодический объект № ... ПИД: $K=...$ , $S_i=...$ , $S_d=...$ ;					
$\Delta T$	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20
$t_{об}, c$ (перех.)					
$t_3, c$	ПИД				
	АР				
$\beta$	ПИД				
	АР				
колебательный объект № ..., неточность $T, c$ ПИД: $K=...$ , $S_i=...$ , $S_d=...$ ;					
$t_{об}, c$ (перех.)					
$t_3, c$	ПИД				
	АР				
$\beta$	ПИД				
	АР				

5.2.7. По результатам измерений постройте совмещенные графики зависимости  $\beta$  от  $\Delta T$  для апериодического объекта со всеми регуляторами, а для колебательного объекта - совмещенные графики  $\beta$  от  $\Delta T$ .

5.2.8. По результатам работы сделайте вывод о чувствительности различных регуляторов к неточности параметров модели объекта.

### 5.3. Содержание отчета.

- 1) Определения и расчетные формулы для регуляторов различных типов;
- 2) Передаточная функция объекта  $G(s)$ , график его точной переходной характеристики.

3) Сводная таблица показателей чувствительности, совмещенные графики чувствительности замкнутой системы к неточности задания модели объекта.

4) Графики для замкнутых систем с ПИД- регулятором и AP- регулятором для "точной" модели и для максимально "неточной" модели.

#### **5.4. Контрольные вопросы**

1. Как показатели качества регулирования влияют на экономические показатели реальной САР?
2. В чем преимущества и недостатки непрерывных регуляторов для объектов с изменяющимися параметрами?
3. В чем преимущества и недостатки дискретных AP и AP+1 регуляторов для объектов с изменяющимися параметрами?
4. Как определять показатели качества регулирования из графика и из таблицы?
6. Почему вид переходной характеристики объекта не зависит от такта квантования объекта?
7. Почему необходимо в программе моделирования отключать опцию «Учитывать параметры объекта» при проверке работы AP- регулятора с изменившимся объектом ?

#### **5.5. Литература.**

1. Теория автоматического управления/ Под ред. А.А.Воронова.М.:Высшая школа , 1986.504с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир,1984, 540с.
3. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов./Под ред. Е.Г.Дудникова.- М.: Химия, 1987>368с.

## 6. Лабораторная работа № 6

### Настройка адаптивного управления.

**Цель работы:** изучить способы и процессы адаптации в цифровых системах автоматического регулирования

#### 6.1. Теоретические сведения

6.1.1. В условиях, когда невозможно оценить динамические свойства объекта непосредственно, приходится использовать настройку с обратной связью, или адаптацию по замкнутому циклу (см. рис. 6.1). При этом необходимый минимум информации об объекте (его порядок, параметры) получают путем обработки измерений входных и выходных сигналов.

6.1.2. Для оценки характеристик объекта могут применяться методы идентификации (по измерениям входа  $u(k)$  и выхода  $y(k)$ ) или определения показателей качества управления (по измерениям  $e(k)$  и  $y(k)$ ). Исходя из полученных данных производится расчет и настройка регулятора. Структурно это равносильно введению второй обратной связи и соответственно второго замкнутого контура, в котором информация циркулирует следующим образом: сигналы в контуре управления — алгоритм настройки — регулятор — сигналы в контуре управления.

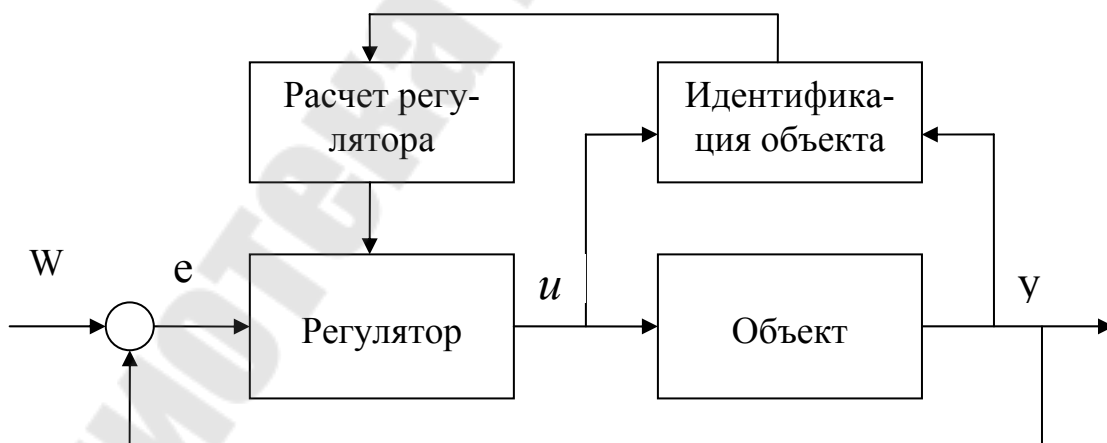


Рис. 6 Основная схема адаптивной системы с настройкой регулятора по замкнутому циклу

6.1.3. Процесс адаптации в системах управления с регуляторами этого типа проходит в три этапа:

1. **Идентификация** объекта или системы управления в целом.
2. **Расчет регулятора.**
3. **Настройка** регулятора (или изменение его структуры).

6.1.4. Модели динамических объектов определяются либо с помощью теоретических выкладок, либо путем обработки экспериментальных данных

При экспериментальном анализе (или идентификации) объектов исходной информацией для построения математических моделей служат сигналы, доступные непосредственному измерению. Входные и выходные сигналы объекта обрабатываются с использованием методов идентификации, которые позволяют описать соотношения между этими сигналами в виде некоторой математической зависимости. Полученная модель может быть непараметрической (например, переходная функция или частотная характеристика, заданные в табличной форме) или параметрической (например, системы дифференциальных или разностных уравнений, зависящих от параметров). Для построения непараметрических моделей обычно применяются методы, основанные на преобразовании Фурье или корреляционном анализе. Параметрические модели получают, с помощью статистических методов оценки параметров или методов настройки параметров по заданным частотным характеристикам или реакциям на ступенчатое воздействие. При синтезе алгоритмов для управляющих ЭВМ целесообразно пользоваться параметрическими моделями, поскольку современная теория систем в основном ориентирована на описание объектов, содержащее параметры в явной форме. Кроме того, для синтеза алгоритмов управления по параметрическим моделям могут применяться аналитические методы.

6.1.5. В основе алгоритмов обработки лежат такие известные методы идентификации, как метод наименьших квадратов, метод вспомогательных переменных, метод максимального правдоподобия, реализуемые либо в рекуррентной, либо в нерекуррентной формах. В последние годы разработке методов идентификации уделялось большое внимание. Были созданы и успешно опробованы методы, предназначенные как для работы в реальном времени, так и для обработки накопленной информации. В настоящее время с достаточно высокой точностью можно выполнять идентификацию объектов различных классов — линейных и нелинейных, в составе разомкнутых или замкнутых контуров управления, при наличии случайных возмущений и без них. Созданы пакеты прикладных программ, с помощью которых можно определять порядок моделей и величину запаздывания.

6.1.6. Задачей идентификации является экспериментальное определение характеристик динамических объектов. Оценивание параметров системы производится в рамках математической модели определенного класса. При этом различие между реальным объектом или сигналом и соответствующей математической моделью должно быть по возможности минимально. Текущей идентификацией называют процедуру определения параметров путем обработки на ЭВМ данных, которые поступают от объекта идентификации непосредственно в процессе его функционирования. Если же сигналы обрабатываются по истечении каждого такта квантования, то говорят, что обработка ведется в реальном масштабе времени.

6.1.7. В области адаптивных систем управления основное внимание уделяется методам текущей идентификации в реальном времени. Кроме того, при синтезе регуляторов главным образом используются параметрические модели объектов. Такие модели характеризуются конечным числом параметров. Для них разработаны эффективные алгоритмы расчета, требующие относительно небольших затрат вычислительных ресурсов. Эти алгоритмы могут применяться при проектировании систем управления объектами различных типов.

Для идентификации в реальном времени созданы рекуррентные методы оценивания параметров стационарных и нестационарных линейных объектов, нелинейных объектов определенного класса.

6.1.8. В данной лабораторной работе используется текущая идентификация в реальном времени рекуррентным методом оценивания параметров объекта. Для информативности процесса входной сигнал должен быть постоянно возбуждающим, например, небольшие ступенчатые изменения сигнала задания  $w(k)$ .

## 6.2. Методические указания

6.2.1. Запустите программу Alenushka, установите заданный объект, по виду переходной характеристики выберите такт квантования из ряда  $T_0=2,4,6,8,12$ с, запишите параметры его передаточной функции:  $A_1, A_2, B_1, B_2$  для тактов и параметры  $a_1, a_2, b_1, b_2$  для такта  $t_0=1$ с.

Варианты заданий.

Варианты заданий.										
Номер объекта	1	2	4	5						
<b>Вариант парам.</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
Постоянная $T_1$	11	6	18	8	21	14	22	16	15	14
Постоянная $T_2$	7	14	15	16	10	8	12	8	9	11
Пост. $T_3$ (числитель)	3	2	3	3	2	4	5	4	2	2
Пост. $T$ (колеб.)	15	6	10	12	13	10	17	18	8	14
Параметр $\varepsilon$	0,4	0,6	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,2



6.2.2. Запустите программу Идентификация и ознакомьтесь с ней.

6.2.3. В программе ИДЕНТИФИКАЦИЯ в меню МОДЕЛИ/РЕГУЛЯТОРЫ установите объект №1, регулятор AP должен быть включен.

- В меню ОСН.ПАРАМ.ОБЪЕКТА введите заданный основной такт квантования  $T_0=2,4$ с или  $6$ с, параметры  $A_1, A_2, B_1, B_2$ , заданного объекта;

- В меню ПРОМЕЖ.ПАРАМ.ОБЪЕКТА введите такт  $t_0=1$ с и параметры  $a_1, a_2, b_1, b_2$ ;

(Эти установки нужны, чтобы моделировать поведение самого объекта. Т.е. получать выход  $y(k)$ , подавая  $u(k)$ .

На реальном объекте выход  $y(k)$  измеряют.)

- В меню РЕГУЛ-Е/ГРАФИК установите  $масШ.поХ=2$  и  $уС-кор.врем=2$ .

Программа Идентификация готова определить параметры Вашего объекта и управлять им, используя апериодический регулятор, настраивающийся на эти параметры.

6.2.4. Запустите процесс [F9], и создайте возбуждающий процесс, проделав несколько малых вариаций  $+0,1/-0,1$  сигнала задания  $w(k)$  около нуля клавишами [ $\uparrow/\downarrow$ ].

Блок идентификации начинает определять параметры объекта, показывает их изменение и передает эти параметры в работающий AP- регулятор.

6.2.5. Когда изменение параметров объекта практически прекратится можно дать нормальное приращение сигнала задания  $w(k) +1,0$  или  $-1,0$  клавишами [PageUp/ PageDown]. Настроившийся AP- регулятор должен без ошибки отработать это задание. Запомните график, параметры вариаций, время первой адаптации  $T_a$  и идентифицированные параметры объекта.

6.2.6. Изменяя длительность  $\Delta t$  и амплитуду  $\Delta w(k)$  возбуждающих вариаций, выберите вариант возбуждающего процесса, дающего наименьшее время определения параметров. Запомните результаты настроенной адаптации.

6.2.7. Измените такт квантования и повторите весь процесс с целью улучшения процесса адаптации. Запомните результаты улучшенной адаптации.

Таблица 6

Результаты настройки адаптации  
Объект № ... ; T1= ... ; T2= ... ; = ...

	Объект T <sub>0</sub> =	Первая адаптация	Настроенная	Улучшенная	
				модель	Объект T <sub>0</sub> =
$\Delta w(k)$	-				--
$\Delta t, c$	-				--
Ta, c	-				--
a1					
a2					
b1					
b2					

6.2.8. На основании полученных результатов сделайте вывод о факторах, влияющих на процесс адаптации.

### 6.3. Содержание отчета.

В отчет с обычными реквизитами включите следующие данные:

- 1) Тип, номер заданного объекта, параметры его непрерывной передаточной функции, параметры дискретной передаточной функции объекта A1, A2, B1, B2.
- 2) Графики процессов адаптации и параметры дискретной передаточной функции модели объекта A1, A2, B1, B2, определенные этим процессом.
- 4) Выводы по результатам работы.

### 6.4. Контрольные вопросы

- 1) Какие модели применяются для идентификации объектов ?
- 2) Какие методы идентификации применяют основе алгоритмов обработки сигналов работающей САР ?
- 3) Каковы преимущества параметрических моделей объектов ?
- 4) Для чего применяют вариации сигнала на входе объекта?

### 6.5. Литература.

1. Теория автоматического управления/ Под ред. А.А.Воронова.М.:Высшая школа , 1986.504с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир,1984, 540с.
3. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов./Под ред. Е.Г.Дудникова.- М.: Химия, 1987>368с.
4. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина -- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит., 1991. – 432 с. ISBN 5-02-014511-4.

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

**Практическое пособие  
по выполнению лабораторных работ по курсу  
«Управление промышленными объектами»  
для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»**

Автор-составитель: **Ежов** Владимир Дмитриевич

Подписано в печать 13.03.06.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,4.

Изд. № 97.

E-mail: [ic@gstu.gomel.by](mailto:ic@gstu.gomel.by)

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на МФУ XEROX WorkCentre 35 DADF  
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.