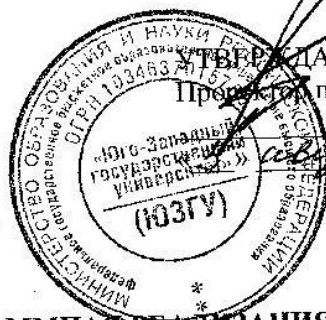


**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра механики, мехатроники и робототехники



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

2016 г.

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ  
МЕХАТРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Методические указания по выполнению практической,  
расчетно-графической и самостоятельной работы  
по дисциплине «Программное обеспечение мехатронных  
и робототехнических систем»

Курск 2016

УДК 621.(076.1)

Составители: Мальчиков А.В., Яцун С.Ф.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Е.Н. Политов

**Программная реализация системы автоматического управления мехатронного электропривода:** методические указания по выполнению практической, расчетно-графической и самостоятельной работы по дисциплине «Программное обеспечение мехатронных и робототехнических систем» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. С.Ф. Яцун, А.В. Мальчиков. – Курск, 2016. – 22 с., 13 ил. – Библиограф.: 23 с.

Изложены вопросы, связанные с проектированием дискретных регуляторов цифровых систем автоматического управления. Приведены рекомендации и порядок составления отдельных разделов расчетно-графической работы, приведен пример выполнения задания.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утверждённой учебно-методическим объединением (УМО).

Предназначены для студентов направления 15.03.06 Мехатроника и робототехника всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *6.08.16*. Формат 60x84 1/16

Усл.печ.л. *1,2* Уч.-изд.л. *1,1* Тираж 20 экз. Заказ *24*. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## Содержание

1	Цель и задачи работы	4
2	Задание	5
3	Краткая теория	6
4	Ход работы	12
4.1	<i>Описание мехатронного привода</i>	12
4.2	<i>Математическая модель объекта управления</i>	13
4.3	<i>Математическое моделирование объекта управления в Mathcad</i>	13
5	Пример выполнения	16
6	Исходные данные для выполнения работы	21
	Библиографический список	22

## 1 Цель и задачи работы

Целью работы является освоение студентами принципов построения и функционирования программного обеспечения для практической реализации системы автоматического управления мехатронного электропривода.

Данная работа выполняется в ходе практического занятия «Программная реализация цифровых регуляторов»

Выполнение работы ориентировано на формирование у студентов следующих элементов профессиональных компетенций:

ПК2 – способность разрабатывать программное обеспечение, необходимое для обработки информации и управления в мехатронных и робототехнических системах, а также для их проектирования; способностью проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных пакетов с целью исследования математических моделей мехатронных и робототехнических систем

ПК6 – способность проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных пакетов с целью исследования математических моделей мехатронных и робототехнических систем

## 2 Задание

1. Составить алгоритм программы для цифровой системы управления, реализующий следующие типы регуляторов:
  - П-регулятор;
  - ПИД-регулятор.
2. На основании полученного алгоритма, разработать программу для реализации и моделирования регулятора в среде Mathcad.
3. Провести моделирование работы системы автоматического управления, подобрать коэффициенты регулятора.
4. Сделать выводы на основе полученных результатов
5. (дополнительно) разработать функцию цифрового регулятора на языке высокого уровня

### 3 Краткая теория

Привод, включает, прежде всего, двигатель и устройство управления им. Кроме того, в состав привода могут входить различные механизмы для передачи и преобразования движения (редукторы, преобразователи вращательного движения в поступательное и наоборот), тормоз и муфта.

К приводам, применяемым в мехатронных и робототехнических системах, предъявляют весьма жесткие специфические требования. В связи с необходимостью встраивания приводов в рабочие органы роботов — в манипуляторы и системы передвижения — габариты и масса приводов должны быть минимальными.

Приводы в робототехнических системах работают в основном в неуставившихся режимах и с переменной нагрузкой. При этом переходные процессы в них должны быть практически неколебательными. Важными параметрами приводов МС являются также надежность, стоимость, удобство эксплуатации. Требования, предъявляемые к их способу управления, быстрдействию и точности, непосредственно определяются соответствующими требованиями к МС в целом.

Системы автоматического управления, включающие измерительную систему, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, цифровые регуляторы реализованные на микроконтроллерах способны обеспечивать жесткие требования к мехатронным приводам.

#### *ПИД-регулятор*

Простейшая система автоматического регулирования с обратной связью показана на рис. 1.

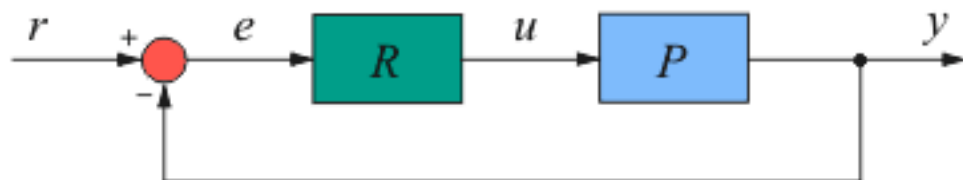


Рис. 1. Структурная схема САУ

В ней блок **R** называют регулятором (от слова Regulator), **P** — объектом регулирования (от слова Process), **r** — управляющим воз-

действием или уставкой (reference),  $e$  – сигналом рассогласования или ошибки (error),  $u$  – выходной величиной регулятора,  $y$  – регулируемой величиной.

Если выходная переменная  $u$  регулятора описывается выражением

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

где  $t$  – время;  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  – пропорциональный коэффициент (безразмерный), постоянная интегрирования (размерность времени) и постоянная дифференцирования (размерность времени) регулятора, то такой регулятор называют ПИД-регулятором.

В частном случае пропорциональная, интегральная или дифференциальная компоненты могут отсутствовать и такие упрощенные регуляторы называют П, И или ПИ регуляторами.

Следует подчеркнуть, что входом объекта управления на всех рисунках является выход регулятора, т.е. величина  $u$  имеет ту же размерность, что и рассогласование  $e$ , выходная величина  $y$  и уставка  $r$ . Т.е., если объект управляется, например, ШИМ-регулятором, током, или частотой вращения вала, во всех этих случаях управляющей величиной является  $u$ , а в модель объекта управления  $P$  следует ввести преобразователь величины  $u$  в ширину импульса ШИМ-регулятора, в ток или в частоту вращения вала соответственно. Это надо учитывать также при задании входного воздействия в экспериментах для настройки или моделирования регулятора. Таким воздействием во всех случаях должна быть величина  $u$  (выходная величина регулятора).

### ***Дискретный ПИД-регулятор***

Непрерывные переменные удобно использовать для анализа и синтеза ПИД-регуляторов. Для технического воплощения необходимо перейти к дискретной форме уравнений, поскольку основой большинства современных регуляторов является микроконтроллер, контроллер или компьютер, которые оперируют с переменными, полученными из аналоговых сигналов после их дискретизации по времени и квантования по уровню.

## Переход к конечно-разностным уравнениям

Переход к дискретным переменным в уравнениях аналогового регулятора выполняется путем замены производных и интегралов их дискретными аналогами. Если уравнение записано в операторной форме, то сначала выполняют переход из области изображений в область оригиналов. При этом оператор дифференцирования заменяют производной, оператор интегрирования – интегралом.

В ПИД-регуляторах наиболее распространенными являются простейшая аппроксимация производной конечной разностью и интеграла – конечной суммой.

Рассмотрим интегральный член ПИД-регулятора:

$$I(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Наиболее устойчивой и более распространенной формулой для численного интегрирования является формула интегрирования с правыми разностями, когда значение ошибки берется в тот же момент времени, что и вычисляемый интеграл:

$$I_i = I_{i-1} + \frac{\Delta t}{T_i} e_i$$

Рассмотрим дифференциальный член ПИД-регулятора с фильтром

Лучшими характеристиками обладает разностное уравнение, полученное при использовании правых разностей:

$$u_{Di} = \left( \frac{T_d}{T_d + N\Delta t} \right) u_{Di-1} + \frac{NT_d}{T_d + N\Delta t} (e_i - e_{i-1})$$

Здесь условие сходимости

$$\left| \frac{T_d}{T_d + N\Delta t} \right| < 1$$

выполняется для всех  $\Delta t$  и ни при каких значениях параметров не возникает колебаний. Кроме того, последняя формула позволяет "отключить" дифференциальную составляющую в ПИД регуляторе путем назначения  $T_d = 0$ .

На практике, величина шага дискретизации  $\Delta t$  выбирается как можно меньше, это улучшает качество регулирования.



Для обеспечения хорошего качества регулирования он не должен быть больше чем  $1/15 \dots 1/6$  от времени установления переходной характеристики объекта по уровню  $0,95$  или  $1/4 \dots 1/6$  от величины транспортной задержки. Однако при увеличении частоты дискретизации более чем в 2 раза по сравнению с верхней частотой спектра возмущающих сигналов (по теореме Котельникова) дальнейшего улучшения качества регулирования не происходит.

Если контроллер используется не только для регулирования, но и для аварийной сигнализации, то такт дискретизации не может быть меньше, чем допустимая задержка срабатывания сигнала аварии.

### ***Уравнение цифрового ПИД-регулятора***

Основываясь на изложенном выше, уравнение дискретного ПИД-регулятора можно записать в виде

$$u_{i+1} = Ke_i + I_i + u_{Di}$$

где  $i$  - номер временного такта. Величины  $I_i$  и  $u_{Di}$  вычисляются по ранее указанным формулам. Для начала работы алгоритма выбирают обычно  $u_{D0} = 0$ ,  $I_0 = 0$ ,  $e_0 = 0$ , однако могут быть и другие начальные условия, в зависимости от конкретной задачи регулирования.

Отметим, что алгоритм, полученный путем простой замены операторов дифференцирования и интегрирования в базовой формуле конечными разностями и конечными суммами:

$$u_{i+1} = Ke_i + \frac{1}{T_i} \sum_{k=0}^i e_k + T_d \frac{e_{i+1} - e_i}{\Delta t}$$

(здесь  $k$  - индекс суммирования отсчетов от начала процесса до текущего  $i$ -того временного такта)

обладает плохой устойчивостью и низкой точностью. Однако в простых ПИД-регуляторах чаще всего используют именно его, а недостаток точности компенсируют высоким быстродействием системы, так как с ростом частоты дискретизации различие между приведенным методом и другими, более точными методами стирается.

## *Настройка ПИД-регулятора*

Существует множество различных методов, позволяющих осуществить подбор параметров ПИД-регулятора. Некоторые основаны на численном моделировании системы автоматического управления. С этими методами вы можете ознакомиться в курсе "Теории автоматического управления". Однако, часто расчет параметров по формулам не может дать оптимальной настройки регулятора, поскольку аналитически полученные результаты основываются на сильно упрощенных моделях объекта. В частности, в них не учитывается всегда присутствующая нелинейность типа "ограничение" для управляющего воздействия. Кроме того, модели используют параметры, идентифицированные с некоторой погрешностью. Поэтому после расчета параметров регулятора желательно сделать его подстройку.

Подстройку можно выполнить на основе правил, которые используются для ручной настройки. Эти правила получены из опыта, теоретического анализа и численных экспериментов. Они сводятся к следующему:

- увеличение пропорционального коэффициента увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- с уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- уменьшение постоянной интегрирования уменьшает запас устойчивости;
- увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

Перечисленные правила применяются также для регуляторов, использующих методы экспертных систем и нечеткой логики.

Ручную настройку с помощью правил удобно выполнять с применением интерактивного программного обеспечения на компьютере, временно включенном в контур управления. Для оценки реакции системы на изменение уставки, внешние воздействия или шумы измерений подают искусственные воздействия и наблюдают реакцию на них. После выполнения настройки значения коэффициентов регулятора записывают в память ПИД-контроллера, а компьютер удаляют.

Отметим, что применение правил возможно только после предварительной настройки регулятора по формулам. Попытки настроить регулятор без начального приближенного расчета коэффициентов могут быть безуспешными. Сформулированные выше правила справедливы только в окрестности оптимальной настройки регулятора.

Для начального приближенного расчета коэффициентов можно использовать различные методы, например, широко известный метод *Зиглера–Никольса*.

### ***Метод подбора коэффициентов ПИД-регулятора Зиглера–Никольса***

Суть метода состоит в следующем:

1. Выставляем все коэффициенты ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) в ноль.
2. Начинаем постепенно увеличивать значение  $K_p$  и следим за реакцией системы. Нам нужно добиться, чтобы в системе начались устойчивые колебания (вызванные перерегулированием). Увеличиваем  $K_p$ , пока колебания системы не стабилизируются (перестанут затухать).
3. Запоминаем текущее значение  $K_p$  (обозначим его  $K_u$ ) и измеряем период колебаний системы ( $T_u$ ).
4. Теперь используем полученные значения  $K_u$  и  $T_u$  для расчета всех параметров ПИД регулятора по формулам:

$$K_p = 0.6K_u$$

$$K_i = 2K_p / T_u$$

$$K_d = K_p \cdot T_u / 8$$

Для дискретных регуляторов нужно еще учесть период дискретизации –  $T$  (умножить  $K_i$  на  $T$ , разделить  $K_d$  на  $T$ ).

## 4 Ход работы

### 4.1 Описание мехатронного привода

Исследуемый мехатронный привод (рис. 2) состоит из двигателя постоянного тока 1, редуктора 2, и стержня 3, закрепленного на выходном валу редуктора. На валу редуктора установлен также датчик угла поворота, определяющий положение вала (на рис.2 не показан).

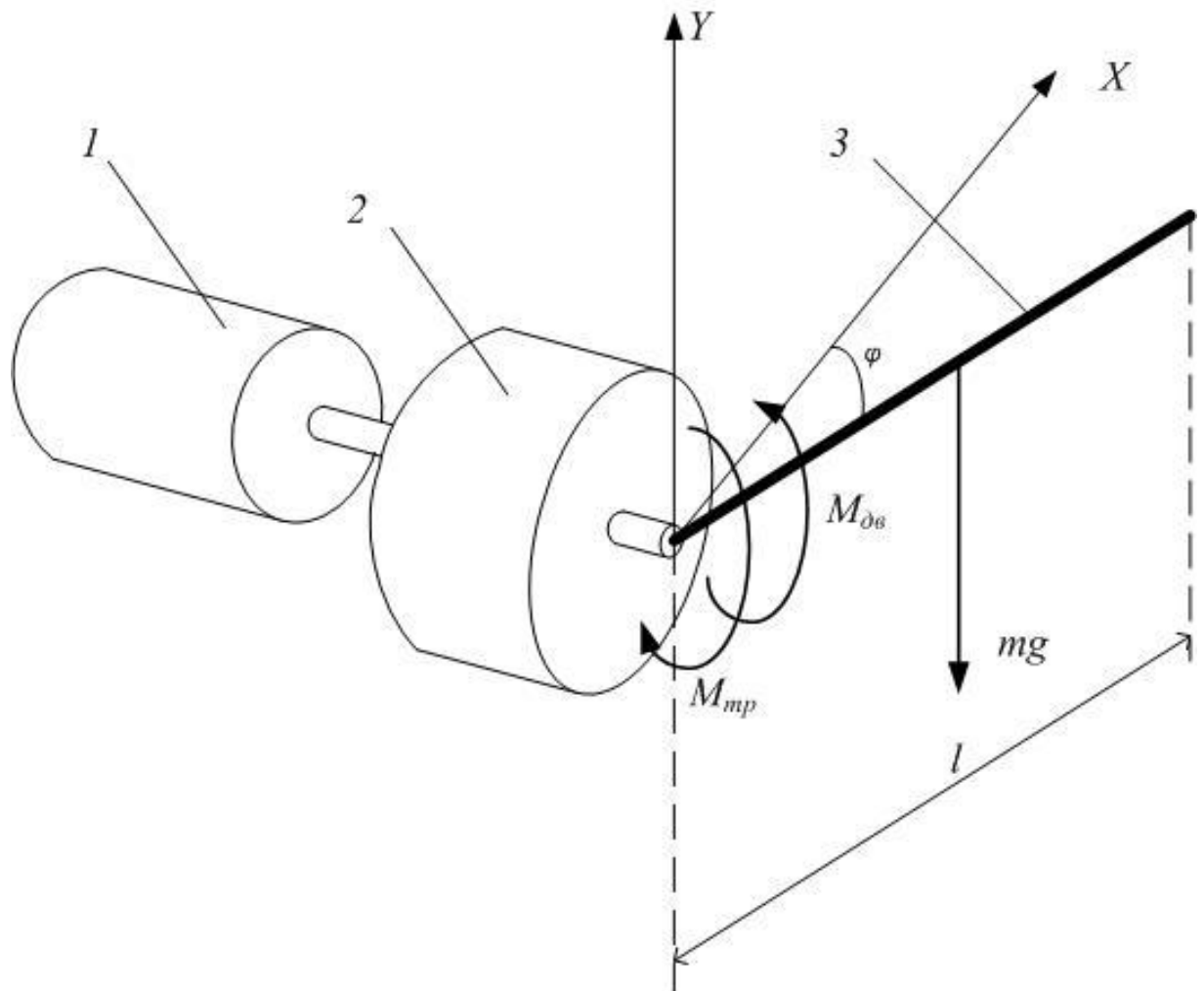


Рис. 2. Расчетная схема привода

Для моделирования дискретного регулятора необходима математическая модель объекта управления.

## 4.2 Математическая модель объекта управления

Согласно приведенной расчетной схеме (рис. 2) запишем систему математических уравнений описывающих данную систему.

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} = M_{np} - mg \cdot \cos(\varphi) - \mu \cdot \dot{\varphi} - M_{тр} \\ L \frac{di}{dt} + RI + C_E (\dot{\varphi} \cdot i) = U \\ M_{np} = C_M I \end{cases},$$

где  $J$  – момент инерции,  $C_M$  – моментный коэффициент двигателя,  $C_E$  – коэффициент пропорциональности между противо-ЭДС и скоростью вращения вала;  $I$  – ток обмотки якоря двигателя постоянного тока,  $m$  – масса звена,  $\mu$  – коэффициент силы вязкого сопротивления,  $L$  – индуктивность цепи якоря,  $R$  – активное сопротивление цепи якоря,  $M_{тр}$  – момент силы трения, определяемое как:

$$M_{тр} = \begin{cases} -M^{тр.пред} \text{sign}(\dot{\varphi}), & \text{если } \dot{\varphi} \neq 0; \\ -\sum M^{внеш}, & \text{если } \dot{\varphi} = 0 \text{ и } \left| \sum M^{внеш} \right| \leq M^{тр.пред}; \\ -M^{тр.пред} \text{sign}(\sum M^{внеш}), & \text{если } \dot{\varphi} = 0 \text{ и } \left| \sum M^{внеш} \right| > M^{тр.пред}, \end{cases}$$

где:  $M^{тр.пред}$  – предельное значение момента сил трения в шарнире (редукторе),  $\sum M^{внеш}$  – сумма внешних сил.

Моделирование ограничения мощности управляющего пита-

$$\text{ния } M_{\partial\varepsilon} = \begin{cases} M_{\partial\varepsilon} = k \cdot I & \text{если } U < U_{\max} \\ M_{\partial\varepsilon} = M_{\partial\varepsilon}^* & \text{если } U \geq U_{\max} \end{cases}$$

## 4.3 Математическое моделирование объекта управления в Mathcad

Приведем листинг программы позволяющей получить решение системы уравнений, описывающих мехатронный привод (рис. 3-6). В данном случае используется метод Вереле с фиксированным шагом интегрирования.

```

A(Time) :=
dt ← 0.0001      постоянная интегрирования
Count ←  $\frac{\text{Time}}{\text{dt}}$     подсчет количества итераций расчета
m ← 0.5          масса звена
l ← 0.2          длина звена
L ← 0.00008     индуктивность обмоток двигателя
R ← 0.3          сопротивление обмотки
g ← 9.81        ускорение свободного падения
J ←  $\frac{(m \cdot l^2)}{3}$     расчет момента инерции
red ← 20         передаточное число редуктора
Cm ← 0.03       моментная постоянная двигателя
Ce ← 0.03       электрическая постоянная двигателя
W ← 27          предельная мощность источника питания

MtrPr ← 0.01    предельный момент трения
μ ← 0.001      коэффициент момента вязкого сопротивления

fs ← 1000       частота опроса датчика положения
fc ← 200        частота обновления управляющего воздействия
φ ← 0           начальные значения: положения
dφ ← 0          скорости
ddφ ← 0         ускорения
di ← 0          производной от тока
i ← 0           тока в обмотках двигателя

```

Рис. 3. Листинг программы (часть I, инициализация)

for j ∈ 0.. Count	основной цикл моделирования привода
if mod(j, $\frac{1}{dt \cdot fc}$ ) = 0	условие вызова функции регулятора
   U ← $\bullet$	программа регулятора задающая значение управляющего напряжения
di ← $\frac{U - R \cdot i - C_e \cdot d\varphi \cdot red}{L}$	уравнение для производной от тока
i ← i + di · dt	вычисление тока в обмотках двигателя
i ← $\begin{cases} i & \text{if }  i \cdot U  < W \\ \frac{W}{U} & \text{otherwise} \end{cases}$	моделирование ограниченного источника питания
Md ← Cm · i · red	расчет крутящего момента привода
SumM ← ddφ · J - Md + m · g · cos(φ) · $\frac{1}{2}$ + μ · dφ	расчет суммы моментов внешних сил, для определения момента сил трения
if dφ = 0	
Mtr ← MtrPr · sign(SumM) if  SumM  > MtrPr	расчет момента сил трения
Mtr ← SumM otherwise	
Mtr ← MtrPr · sign(dφ) otherwise	
ddφ ← $\frac{Md - m \cdot g \cdot \cos(\varphi) \cdot \frac{1}{2} - \mu \cdot d\varphi - Mtr}{J}$	определение углового ускорения
dφ ← dφ + ddφ · dt	определение угловой скорости
φ ← φ + dφ · dt + $\frac{dd\varphi \cdot dt^2}{2}$	расчет угла поворота
B <sub>j,0</sub> ← t	Сохранение результатов моделирования в массив данных
B <sub>j,1</sub> ← φ	

В

C := A(1)                    пример вызова функции моделирования

t := C<sup><0></sup>    φ :=  $\frac{C^{<1>} \cdot 360}{2 \cdot \pi}$     пример переобозначения результатов

Рис. 4. Листинг программы (часть II, моделирование)

if $\text{mod}\left(j, \frac{1}{dt \cdot fc}\right) = 0$	
$sd\varphi \leftarrow \frac{[(\varphi_{zad} - s\varphi) - (\text{prevs}\varphi_{zad} - \text{prevs}\varphi)]}{dt \cdot fc}$	расчет дифференциальной составляющей ошибки
$i\varphi \leftarrow [(\varphi_{zad} - s\varphi) \cdot dt \cdot fc + i\varphi]$	расчет интеграла от ошибки регулирования
$\text{prevs}\varphi \leftarrow s\varphi$	
$\text{prevs}\varphi_{zad} \leftarrow \varphi_{zad}$	
$cU \leftarrow k_p \cdot (\varphi_{zad} - s\varphi) + k_d \cdot sd\varphi + k_i \cdot i\varphi$	формирование
$U \leftarrow \begin{cases} cU & \text{if }  cU  < 9 \\ 9 \cdot \text{sign}(cU) & \text{otherwise} \end{cases}$	управляющего напряжения

Рис. 5. Листинг программы (часть III, пример реализации ПИД-регулятора)

$s\varphi \leftarrow \text{round}\left(\frac{\varphi - 360}{2\pi}, 0\right)$	if $\text{mod}\left(j, \frac{1}{dt \cdot fs}\right) = 0$	Моделирование измерительной системы
--	--	-------------------------------------

Рис. 6. Листинг программы (часть IV, пример моделирования датчика угла поворота звена)

## 5 Пример выполнения

### (Вариант №0)

Составим алгоритм управляющей программы ПИД-регулятора (рис. 7).

Проведем моделирование работы системы автоматического управления. Согласно варианту определим параметры модели.

Параметры электродвигателя подберем согласно электронному каталогу (рис.8.).



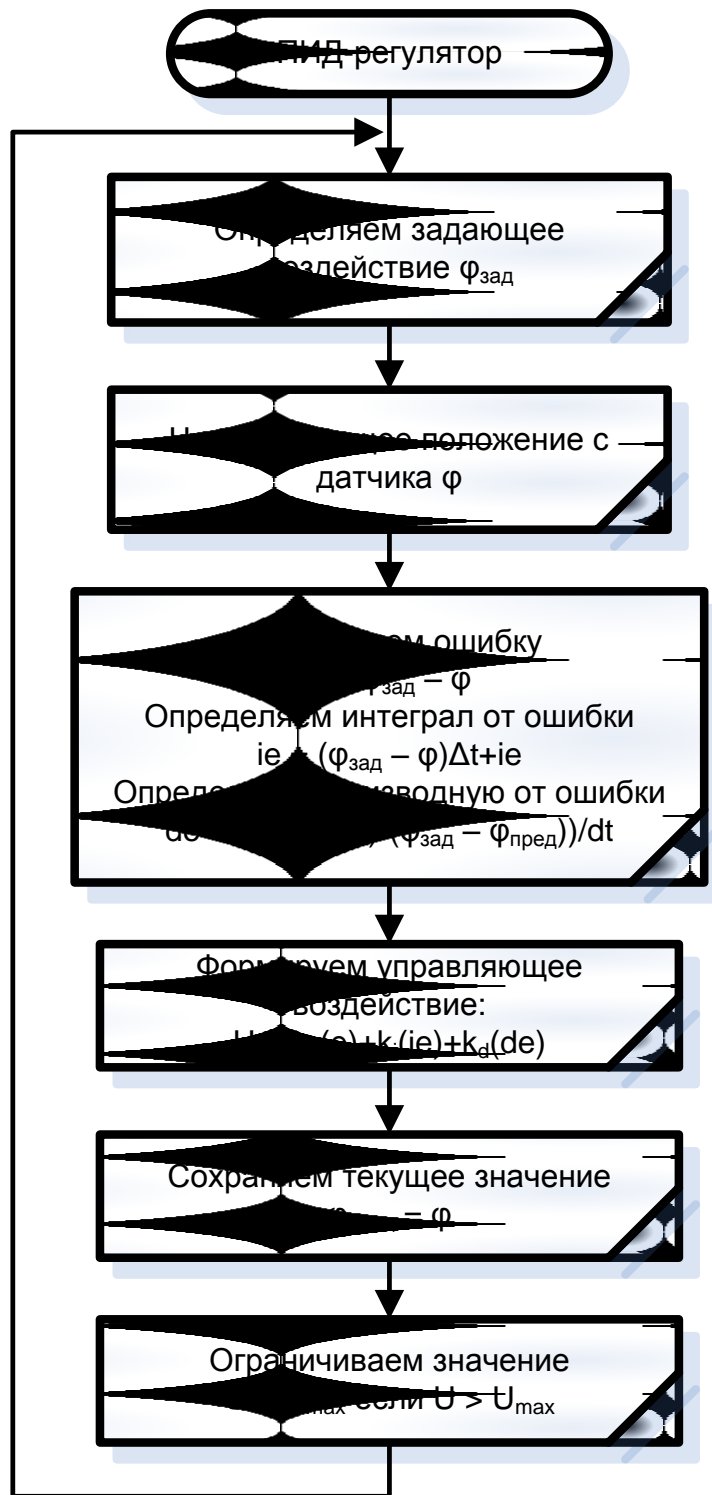
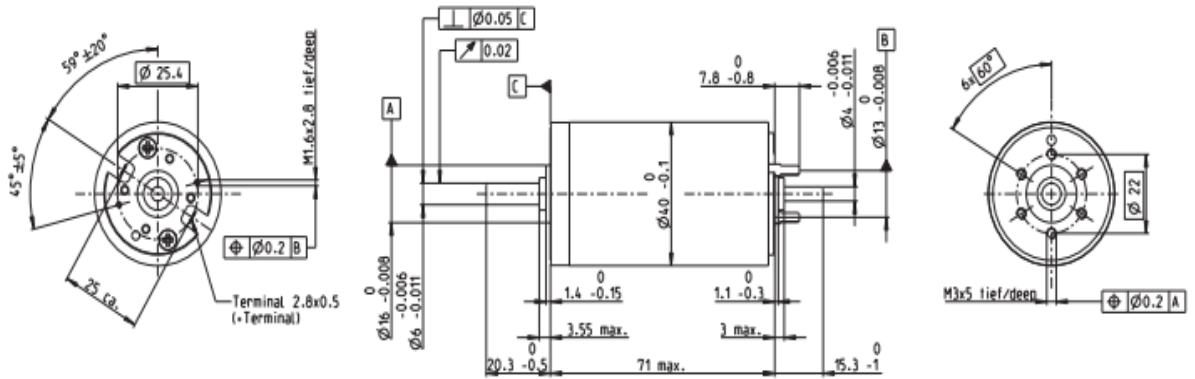


Рис. 7. Алгоритм формирования управляющего воздействия ПИД-регулятором

**RE 40** Ø40 mm, Precious Metal Brushes, 25 Watt**NEW****M 1:2**

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

**Part Numbers**

	448588	448589	448590	448591	448592	
<b>Motor Data</b>						
Values at nominal voltage						
1 Nominal voltage	V	9	18	24	42	48
2 No load speed	rpm	2850	2850	2780	2920	2690
3 No load current	mA	49.7	24.8	18.1	11	8.62
4 Nominal speed	rpm	2610	2600	2480	2640	2410
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	87.8	87.8	88.2	87.6	87.6
6 Nominal current (max. continuous current)	A	2.96	1.48	1.09	0.65	0.524
7 Stall torque	mNm	873	956	794	895	818
8 Starting current	A	29	15.9	9.66	6.53	4.81
9 Max. efficiency	%	92	92	92	92	92
Characteristics						
10 Terminal resistance	Ω	0.311	1.14	2.49	6.43	9.97
11 Terminal inductance	mH	0.0824	0.33	0.613	1.7	2.62
12 Torque constant	mNm/A	30.2	60.3	82.2	137	170
13 Speed constant	rpm/V	317	158	116	69.7	56.2
14 Speed / torque gradient	rpm/mNm	3.27	2.98	3.51	3.27	3.3
15 Mechanical time constant	ms	4.85	4.29	4.36	4.14	4.13
16 Rotor inertia	gcm <sup>2</sup>	142	137	119	121	120

Рис. 8. Технические характеристики двигателя RE40(9В)

Согласно таблице технических характеристик (рис. 8), зададимся параметрами двигателя:

$$U_{\text{НОМ}} = 9\text{В}$$

$$C_M = 0.0302$$

$$C_e = U_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{X.X}} = 9 / 298,3 = 0,03 \text{ (Врад)}$$

$$L = 0.00008 \text{ Гн}$$

$$R = 0,3 \text{ Ом}$$

**Параметры нагрузки:**

$$m = 0,5 \text{ кг}$$

$$l = 0.2 \text{ м}$$

$$\text{red} = 20$$

$$M_{\text{гр}} = 0,01 \text{ Нм}$$

$$\mu = 0,001 \text{ кг/с}$$

### Параметры САУ

Разрешение датчика =  $360^\circ$

Частота опроса датчика = 1 кГц

Частота обновления управляющей величины = 200 Гц

### Результаты моделирования

Покажем результаты моделирования ПИД – регулятора (рис. 9-14).

Коэффициенты регулятора ( $k_p = 4.8$ ,  $k_d = 0.1$ ,  $k_i = 0.00002$ ), начальное положение  $\varphi = 0$ ,  $\varphi_{зад} = 45^\circ$ .

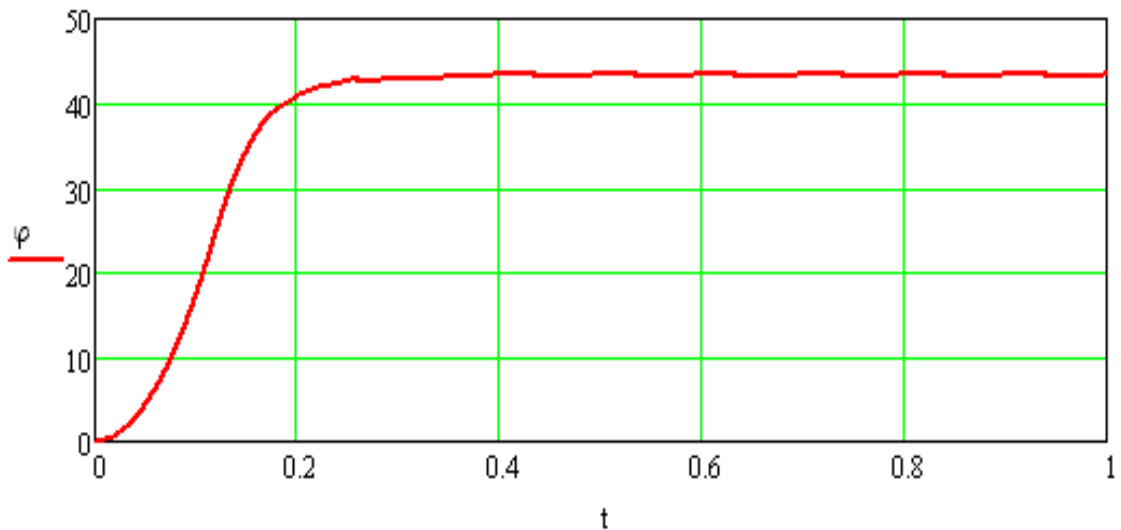


Рис. 9. График перемещения звена

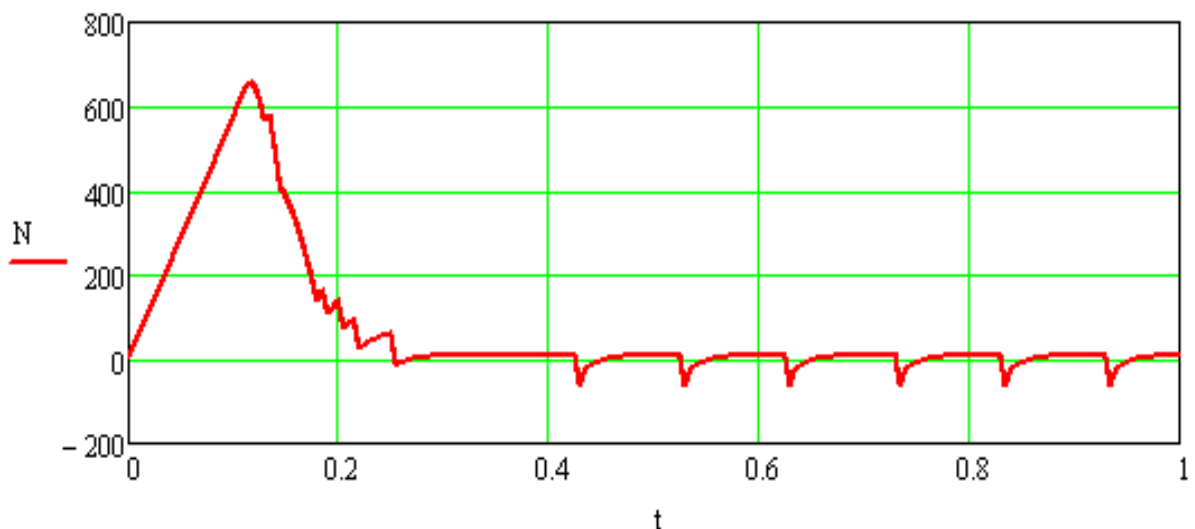


Рис. 10. График частоты вращения вала двигателя

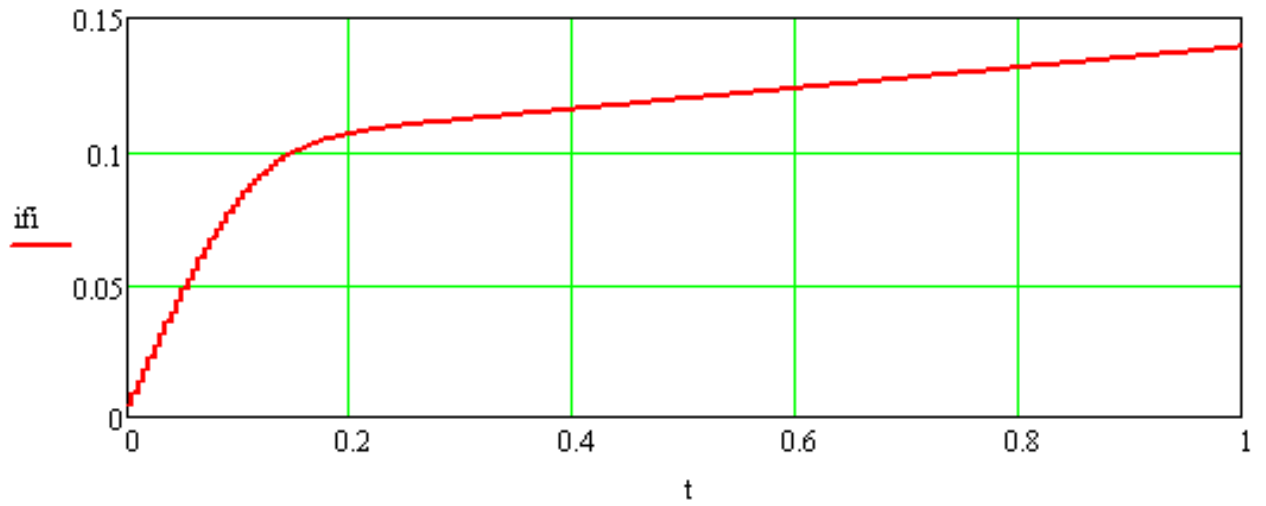


Рис. 11. График интегральной ошибки

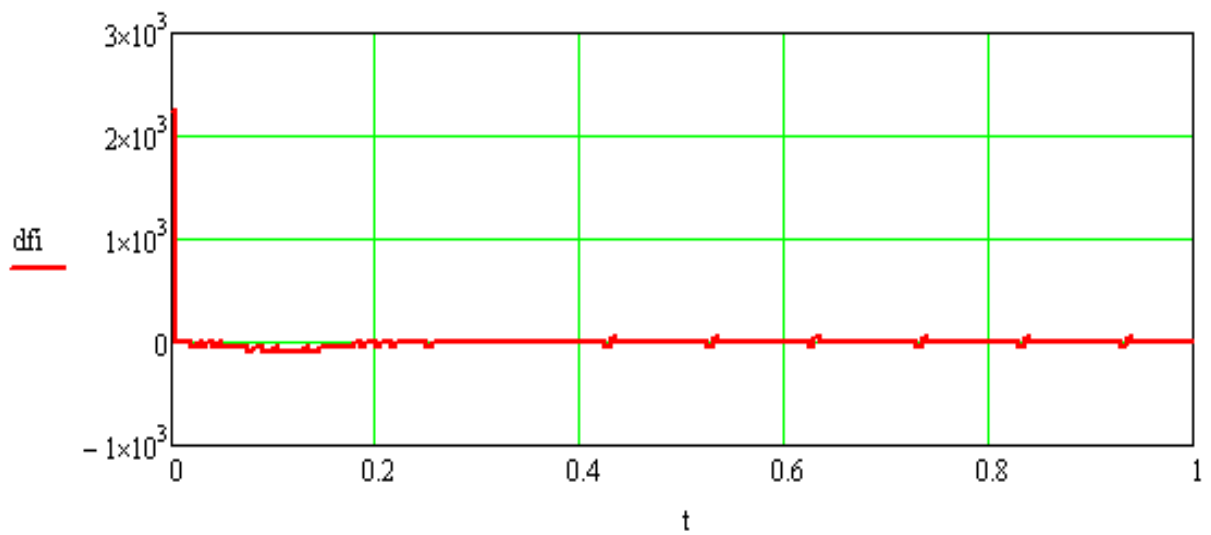


Рис. 12. График производной ошибки

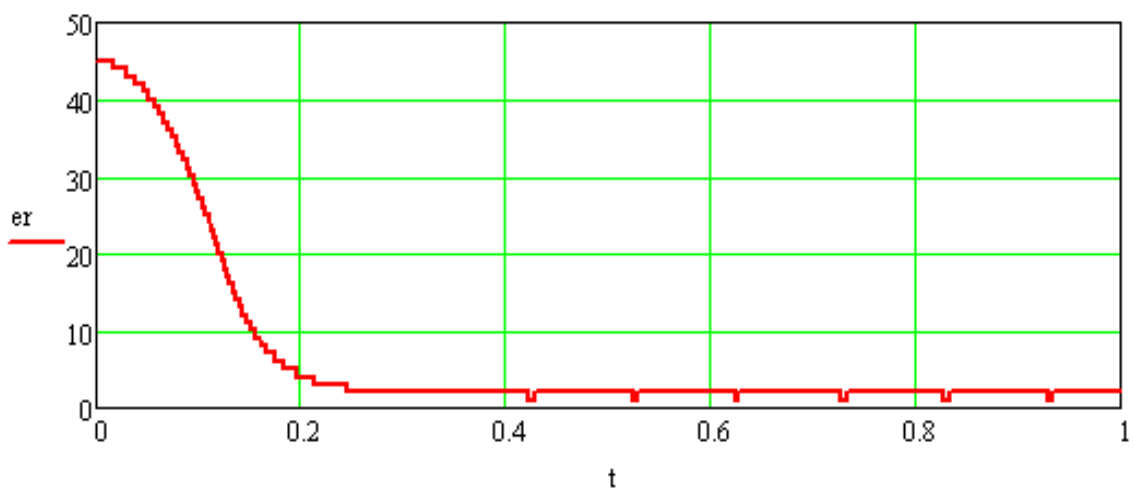


Рис. 13. График изменения ошибки

### 6 Исходные данные для выполнения работы

№ Варианта	Масса звена, кг	Длина звена, м	Момент силы трения	Модель двигателя	Перед. отнош. редуктора	Частота системы измерения	Частота САУ
0 (пример)	0,5	0,2	0,01	RE40	20	1000	200
1	0,8	0,1	0,015	RE40	20	1000	200
2	1	0,1	0,005	RE40	20	1100	300
3	1,5	0,2	0,02	RE40	30	1200	500
4	0,4	0,2	0,01	RE40	20	1000	200
5	0,8	0,2	0,015	RE40	25	1000	400
6	1	0,1	0,005	RE40	20	1100	300
7	1,5	0,1	0,02	RE40	25	1200	500
9	0,5	0,2	0,01	RE40	20	1000	200
10	0,5	0,2	0,04	RE40	20	1000	200
11	0,8	0,1	0,015	RE30	20	1000	200
12	1	0,1	0,005	RE30	20	1100	300
13	1,5	0,2	0,02	RE30	30	1200	500
14	0,4	0,2	0,01	RE30	20	1000	200
15	0,8	0,2	0,015	RE30	25	1000	400
16	1	0,1	0,005	RE30	20	1100	300
17	1,5	0,1	0,02	RE30	25	1200	500
18	0,5	0,2	0,01	RE30	20	1000	200
19	1,5	0,2	0,01	RE30	40	1000	200
20	1,8	0,1	0,015	RE30	45	1000	200

### Библиографический список

1. Astrom K.J., Hagglund T.. Advanced PID control. - ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 460 p.
2. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. - СТА, №4, 2007, с. 86 - 97, №1, 2008, с. 86-99.
3. Денисенко В.В. Разновидности ПИД-регуляторов. Автоматизация в промышленности, №6, 2007, с. 45 - 50.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: МЭИ, 2004, 400 с.
5. Calcev G., Gorez R. Iterative technique for PID controller tuning. - Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control, 1995, vol. 3, 13-15 Dec 1995, p. 3209 - 3210.
6. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984, 541 с.
7. Энциклопедия АСУ ТП, [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://bookasutp.ru>