

УДК 621.03

Ю.Н. СОКОЛОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

Рассмотрена технология компьютерного проектирования ПИД-регуляторов в составе системы угловой ориентации антенны РЛС. На основе математической модели регулятора и объекта разработана схема имитационного моделирования системы управления в среде MATLAB/Simulink (версия 7.8.0 (R2009a)). Изложена методика определения оптимальных коэффициентов ПИД-регулятора по заданным показателям качества переходного процесса при ступенчатом и линейном воздействиях. Разработана программа исследования системы и выбора коэффициентов ПИД-регулятора с помощью графического интерфейса (GUI).

**Ключевые слова:** система управление, ПИД-регулятор, имитационное моделирование, переходный процесс, передаточная функция, преобразования Лапласа.

## Введение

В различных системах автоматического управления широко используется так называемый пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. Это – системы управления движущимися объектами (самолеты, ракеты, корабли, спутники, и т.п.), сложными технологическими процессами, реверсивными исполнительными механизмами, в химической и нефтехимической промышленности для управления пневмопреобразователями, преобразователями частоты, регуляторами температуры, давления, расхода вещества и другими устройствами, рассчитанными на управление унифицированными сигналами и т.д. В настоящее время на мировом рынке предлагаются универсальные микропроцессорные регуляторы, требующие специальной настройки в составе систем управления.

ПИД-регулятор измеряет отклонение выходной величины системы от заданного значения и выдаёт управляющий сигнал, являющийся суммой трёх составляющих – пропорциональной, интегральной и дифференциальной.

Точная настройка параметров ПИД-регулятора предельно снижает колебания системы. Однако полноценное использование преимуществ ПИД-регулятора обеспечивается только при правильном расчете этих параметров с учетом особенностей характеристик управляемых объектов.

Ниже рассматриваются два способа компьютерного проектирования ПИД-регулятора на примере системы угловой ориентации антенны радиолокационной станции (РЛС). Аналогичный подход использован в работе [1] при имитационном моделировании системы оптимального управления мяг-

кой посадкой космических летательных аппаратов на безатмосферные планеты.

## 1. Передаточная функция ПИД-регулятора

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид [2, 3]:

$$W_p(s) = U(s)/E(s) = K_1 + K_2/s + K_3s, \quad (1)$$

где  $E(s) = L[e(t)]$ ,  $U(s) = L[u(t)]$  – преобразования Лапласа входного и выходного сигналов регулятора соответственно;  $K_1, K_2, K_3$  – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора.

В действительности физически реализуемый канал производной имеет передаточную функцию

$$W_d(s) = \frac{K_3s}{(1/N)s + 1}, \quad (2)$$

где  $N$  – достаточно большое число, и поэтому первое слагаемое в знаменателе незначительно и звено (2) называется реальным дифференцирующим звеном. С учетом (2) передаточную функцию (1) можно представить так:

$$\begin{aligned} W_p(s) &= K_1 + \frac{K_2}{s} + \frac{K_3s}{\frac{1}{N}s + 1} = \\ &= \frac{\left(K_1 \frac{1}{N} + K_3\right)s^2 + \left(K_1 + K_2 \frac{1}{N}\right)s + K_2}{\frac{1}{N}s^2 + s}. \end{aligned} \quad (3)$$

ПИД-регулятор применяют в системе управления тогда, когда требуется улучшить как вид пере-

ходного процесса, так и точность в установившемся режиме.

Если положить  $K_3 = 0$ , то получим пропорционально-интегральный, или *ПИ-регулятор*.

ПИ-регулятор увеличивает порядок астатизма системы на единицу и применяется для повышения точности системы в установившемся режиме. Этот регулятор имеет полюс в начале координат и нуль в точке  $-K_2 / K_1$ . Поскольку нуль расположен левее полюса, то регулятор обладает запаздыванием по фазе.

В случае, когда  $K_2 = 0$ , получим пропорционально-дифференциальный, или *ПД-регулятор*. Он имеет единственный нуль в точке  $s = -K_1 / K_3$  и, следовательно, добавляет положительный фазовый сдвиг.

Будучи регулятором с опережением по фазе, он улучшает вид переходных процессов в системе.

При  $K_2 = 0$  и  $K_3 = 0$  имеем пропорциональный, или *П-регулятор* – устройство, описываемое идеальным коэффициентом усиления  $K_1$ . Этот тип регулятора используется тогда, когда желаемых показателей качества в переходном и установившемся режимах можно достичь простой настройкой коэффициента усиления системы, не прибегая к динамическим преобразованиям сигнала.

Задача синтеза конкретной системы автоматического управления, в составе которой применяется любой из указанных регуляторов, состоит в определении коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ , удовлетворяющих заданным требованиям к качеству переходного процесса.

Структурная схема замкнутой системы с регулятором показана на рис. 1, где  $W_o(s)$  и  $H(s)$  – передаточные функции управляемого объекта (к ней обычно относят и передаточную функцию привода – исполнительный двигатель с редуктором) и измерителей выходного сигнала  $y(t)$  соответственно, которые должны быть заданы.

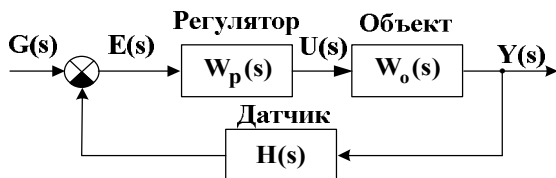


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы

Технологию компьютерного проектирования системы с ПИД-регулятором рассмотрим на примере замкнутой системы управления угловым положением антенны РЛС.

## 2. Структурная схема и передаточные функции элементов системы

В радиоастрономии и системах слежения за спутниками, в радиолокации используются антенны, работающие в микроволновом диапазоне. Функциональная схема системы управления антенной приведена на рис. 1, а ее структурная схема – на рис. 2.

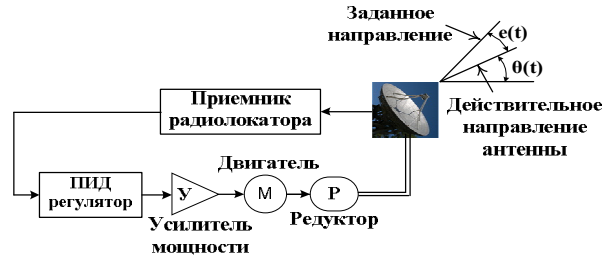


Рис. 1. Функциональная схема системы управления антенной

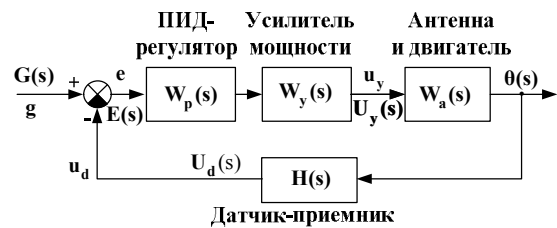


Рис. 2. Структурная схема системы управления антенной

Передаточная функция антенны и приводного двигателя может иметь вид:

$$W_a(s) = \frac{\theta(s)}{U_y(s)} = \frac{\omega_0^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2)}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – действительное угловое направление антенны;  $u_y$  – выходное напряжение усилителя (Y);  $\omega_0$  – частота собственных колебаний антенны;  $\xi$  – коэффициент затухания антенны;  $g$  – заданное (желаемое) угловое направление антенны.

Пусть, далее, усилитель мощности обладает инерционностью и имеет передаточную функцию:

$$W_y(s) = \frac{U_y(s)}{E(s)} = \frac{k_y}{\tau s + 1}, \quad (5)$$

где  $\tau$  – постоянная времени;  $k_y$  – коэффициент усиления, а датчик обратной связи – безынерционный с передаточной функцией  $H(s) = \frac{U_d(s)}{\theta(s)} = k_d$ .

Примем в дальнейшем  $H(s) = k_d = 1$ , т.е. исследуемая система имеет единичную обратную связь.

### 3. Моделирование и оптимизация системы управления антенной в Simulink

#### 3.1. Назначение блоков модели

Схема моделирования системы управления угловым положением антенны, построенная из блоков библиотеки Simulink, показана на рис. 3. Поясним кратко назначение отдельных блоков модели.

Антенна и двигатель с передаточной функцией (4) моделируются последовательным соединением блоков Transfer Fcn2 и Integrator, а усилитель У с передаточной функцией (5) моделируется блоком Transfer Fcn1. ПИД-регулятор с передаточной функцией (3) моделируется подсистемой с приближенным вычислением производной PID Controller (with Approximate Derivative), которую можно найти в разделе Simulink Extras → Additional Linear библиотеки Simulink.

Эта часть системы, охваченная единичной обратной связью, является основной. Остальные блоки модели – вспомогательные: блоки Step и Ramp задают ступенчатое воздействие с амплитудой  $g_0$  (желаемый угол поворота антенны (в градусах)) и линейно возрастающее воздействие с крутизной  $g_1$  (заданная угловая скорость поворота антенны в град/с) соответственно; ручной переключатель Manual Switch1 предназначен для переключения системы с одного вида задающего воздействия на другой в зависимости от поставленной задачи эксперимента (двойным щелчком по блоку); ручной переключатель Manual Switch2 позволяет провести сравнительное исследование работы системы с ПИД-регулятором и без него; блоки D2R и R2D преобразуют градусы в радианы и соответственно обратно; регистратор Display фиксирует установившееся значение ошибки системы (в градусах); блок To Workspace служит для регистрации (в виде графика) желаемого  $g$  и действительного  $\theta$  углов поворота антенны (обязательной настройкой параметров этого блока является: Save format: Structure With Time); блок Signal Constraint (находится в разделе Simulink Response Optimization библиотеки Simulink) предназначен для оптимизации системы (для определения значений коэффициентов ПИД-регулятора, обеспечивающих заданные требования к качеству переходного процесса); блок Gain с коэффициентом усиления  $1/g_0$  является нормирующим для блока Signal Constraint (преобразует выходной сигнал к единичному установившемуся значению при любом заданном значении  $g_0$ ).

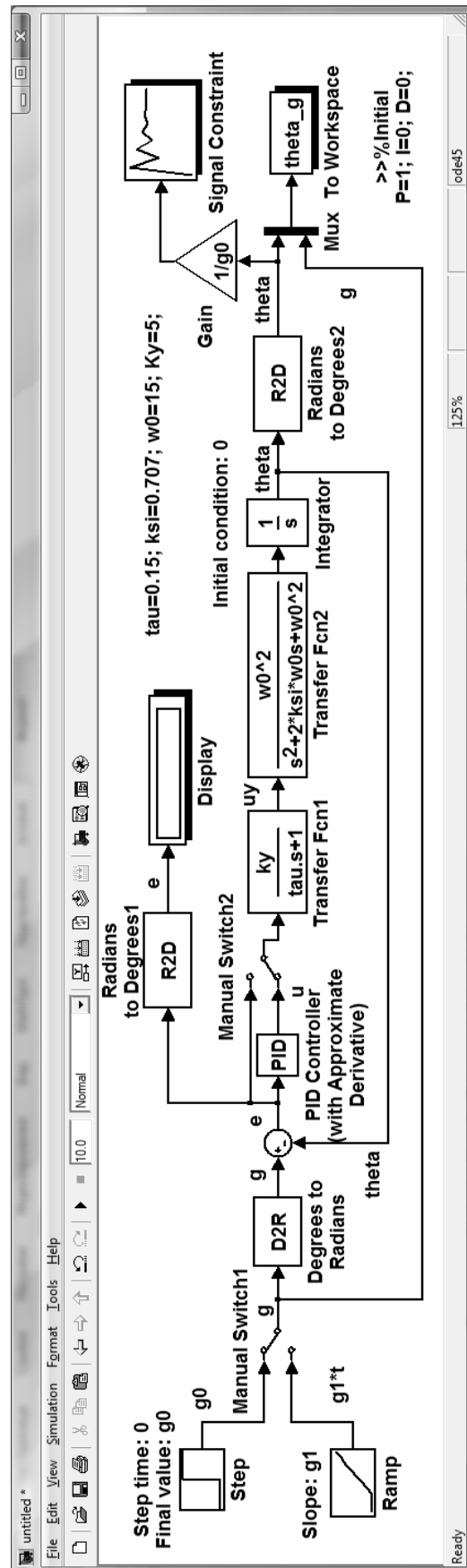


Рис. 3. Схема моделирования системы управления антенной

### 3.2. Ввод параметров модели

Параметры модели  $g_0$ ,  $g_1$ ,  $ky$ ,  $\tau$ ,  $w_0$ ,  $ksi$  вводятся в окнах параметров соответствующих блоков в символьном виде, а их числовые значения задаются в окне свойств модели (Model Properties). Окно свойств модели открывается в такой последовательности: File → Model Properties → Callbacks. В левой вкладке (Model callbacks) открывшегося окна выбирается InitFcn, а затем в правой вкладке (Model initialization function) вводятся необходимые числовые значения.

Для конкретности исследуем систему с параметрами:  $\tau = 0,15$  с,  $\omega_0 = 15$  1/с,  $\xi = 0,707$ . Во вкладке Model initialization function вводим:

**tau=0.15; w0=15; ksi=0.707;**

Далее в левой вкладке Model callbacks окна Model Properties выбираем StopFcn, а затем в правой вкладке (Simulation stop function) вводим команду построения графиков заданного  $g$  и действительного  $\theta$  углов поворота антенны:

```
plot(theta_g,time,theta_g.signals.values)
xlabel('t'),ylabel('theta, g')
grid on
hold on
```

Команда hold on потребуется для сохранения кривых в одном графическом окне при различных параметрах модели.

### 3.3. Подсистема PID Controller

В демаскированном виде (щелчок правой клавишей мыши по блоку PID → Look Under Mask) схема ПИД-регулятора показана на рис. 4.

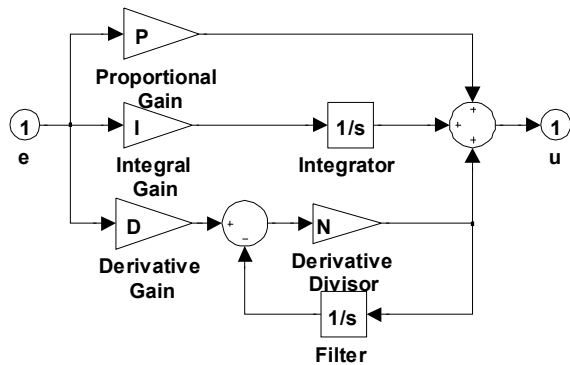


Рис. 4. Схема моделирования ПИД-регулятора

Согласно принятым в разд. 1 обозначениям коэффициентов ПИД-регулятора им соответствуют:  $P = K_1$ ,  $I = K_2$  и  $D = K_3$ . Легко убедиться, что канал производной в схеме рис. 5 имеет передаточную функцию вида (2), где, как указано выше,  $N$  – большое число (в параметрах блока PID Controller (with Approximate Derivative) задано по умолчанию:  $N = 100$ ).

### 3.4. Задачи моделирования

Предположим, что система должна следить за положением спутника, вращающегося с постоянной угловой скоростью, равной  $g_1 = 0,01$  град/с, а установившаяся ошибка по скорости  $e\_steady$  не превышала бы  $0,002^\circ$ .

Пусть также требуется, чтобы при ступенчатом входном воздействии перерегулирование не превышало 10%, время нарастания переходной функции было равно 0,4 с, а время переходного процесса по критерию 5 % было не более 0,8 с.

Определим прежде, каким должен быть коэффициент усиления усилителя в системе с пропорциональным регулятором (блок PID в схеме рис. 4 отключен), чтобы первое требование удовлетворялось. Ответ можно получить с помощью теоремы о конечном значении оригинала:

$$e_{уст} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s\Phi_{ег}(s)G(s) = 0,002^\circ,$$

где  $\Phi_{ег}(s) = \frac{E(s)}{G(s)} = \frac{1}{1 + W_y(s)W_a(s)}$  – передаточная

функция ошибки замкнутой системы по задающему воздействию.

Подставив в выражение предела передаточные функции (4), (5) и изображение линейно возрастающего воздействия  $G(s) = g_1/s^2$ , найдем необходимое значение коэффициента усиления, используя программу:

```
>> syms s ksi w0 ky tau g1
Wa= w0^2/(s*(s^2+2*ksi*w0*s+w0^2)); % антенна
Wy=ky/(tau*s+1); % усилитель
PhiE_G=1/(1+Wy* Wa); % передаточная функция
%ошибки замкнутой системы
% по задающему воздействию
%установившейся ошибка:
e_steady=limit(s* PhiE_G*g1/s^2, s, 0)
e_steady =
g1/ky
```

```
>>%отсюда находим, подставив числа:
g1=0.01; e_steady=0.002;
ky=g1/ e_steady
ky =
5
```

Достоверность полученного результата можно подтвердить моделированием. Для этого во вкладку Model initialization function добавим вычисленное значение коэффициента усиления  $ky = 5$  и значение крутизны линейного воздействия  $g_1 = 0.01$ . В командном окне (!) необходимо ввести какие-либо (произвольные) числовые значения коэффициентов ПИД-регулятора (несмотря на то, что он отключен и в данном эксперименте не используется), например,

>>P=1; I=0; D=0;

в противном случае модель не запустится.

Установить ключ Manual Switch1 в нижнее положение и запустить модель. В результате откроется окно с графиками (рис. 5) задающего линейного воздействия и выходного сигнала (угла поворота антенны). На экране дисплея (Display) увидим значение установившейся скоростной ошибки, равное 0.001999, которое соответствует заданному.

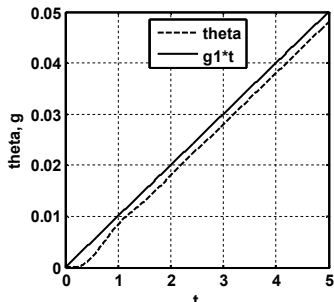


Рис. 5. Реакция системы на линейное воздействие

Проверим, как при найденном коэффициенте усиления система реагирует на ступенчатое воздействие при отсутствии ПИД-регулятора. Удовлетворяет ли она требованию к качеству переходного процесса? Например, пусть требуется изменить угловое положение антенны на 10°. Установим ключ Manual Switch1 в верхнее положение, а во вкладку Model initialization function добавим амплитудное значение ступенчатого сигнала  $g_0 = 10$  и запустим модель. В результате откроется окно с графиками (рис. 6) задающего ступенчатого воздействия и выходного сигнала (угла поворота антенны).

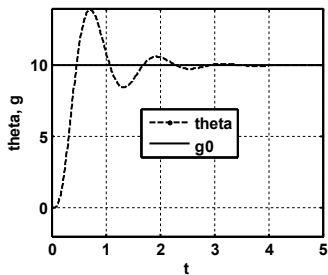


Рис. 6. Реакция системы на ступенчатое воздействие

Очевидно, что система с П-регулятором ни по быстродействию, ни по перерегулированию не удовлетворяет заданным требованиям к качеству переходного процесса. Поэтому для ее улучшения используем ПИД-регулятор.

### 3.5. Проектирование ПИД-регулятора

Цель проектирования ПИД-регулятора состоит в определении таких его коэффициентов, при которых удовлетворяются заданные требования к каче-

ству переходного процесса. Методика решения задачи состоит в следующем.

Включим ПИД-регулятор в систему, установив ключ Manual Switch2 в нижнее положение. Ключ Manual Switch1 остается в верхнем положении, т.е. на вход системы подаем ступенчатое воздействие. Учтем, что начальная итерация коэффициентов регулятора уже введена в командном окне (P=1; I=0; D=0).

Двойным щелчком по блоку Signal Constraint открываем окно Block Parameters Signal Constraint, в меню которого выбираем: Goals → Desired Response → открывается окно Desired Response, в котором активируем команду Specify step response characteristics и установим заданные показатели качества переходного процесса (рис. 7).

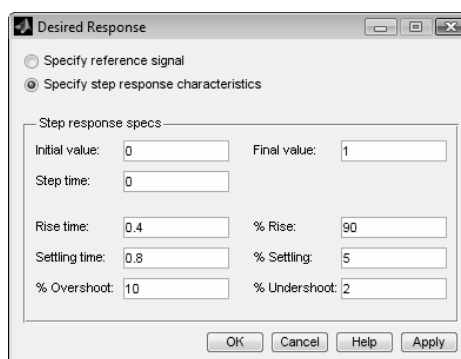


Рис. 7. Окно установки показателей качества

Заддим настраиваемые параметры регулятора, выбрав в меню окна Block Parameters Signal Constraint: Optimization → Tuned Parameters... . Открывается окно, в котором после активации кнопки Add всплывает окно Add Parameters со всеми параметрами системы. В этом окне, удерживая клавишу Ctrl, активируем щелчком мыши настраиваемые параметры регулятора: P, I, D. После щелчка по кнопке ОК в окне Add Parameters эти параметры отобразятся в левой вкладке окна Tuned Parameters, как показано на рис. 8. Далее щелкнуть ОК в окне Tuned Parameters. Приложение Signal Constraint готово к работе.

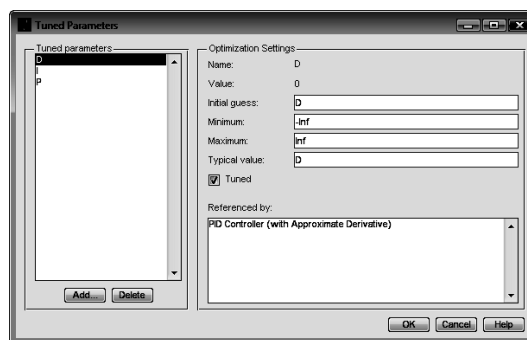


Рис. 8. Окно установки настраиваемых параметров

Модель запускается из меню окна Block Parameters Signal Constraint щелчком по кнопке ▶ Start optimization. Результат представлен на рис. 9.

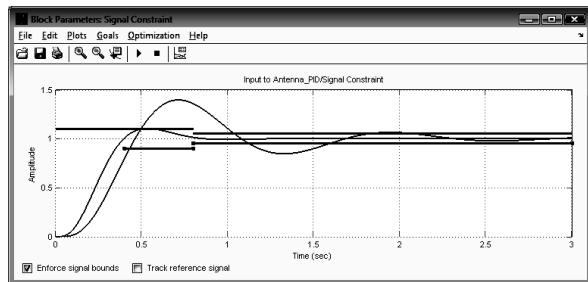


Рис. 9. Результат оптимизации

Как видим, переходная функция (нижняя кривая на рис. 9) удовлетворяет заданным требованиям к качеству. Одновременно открывается окно Optimization Progress с вычисленными значениями коэффициентов ПИД-регулятора (рис. 10).

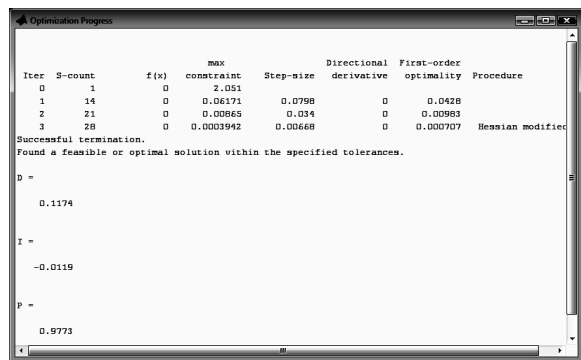


Рис. 10. Результат вычисления коэффициентов

Вычисленными коэффициентами являются:  $K_1 = P = 0,9773$ ;  $K_2 = I = -0,0119$ ;  $K_3 = D = 0,1174$ .

Очевидно, что в рассматриваемом случае интегральная составляющая регулятора оказывает не существенное влияние на переходную функцию.

Отметим, что такую же переходную функцию (удовлетворяющую тем же требованиям к качеству) получим и при иных начальных значениях коэффициентов регулятора, например, при  $P=1$ ;  $I=1$ ;  $D=1$ . Однако вычисленные коэффициенты будут иметь иные числовые значения, увеличится количество итераций, а поведение переходной функции в пределах желаемых ограничений может несколько отличаться.

В заключение проверим, удовлетворяет ли система с таким регулятором первому требованию – установившейся ошибке по скорости не более  $0,002^\circ$ . Для этого установим ключ Manual Switch1 в нижнее положение и запустим модель с ПИД-регулятором. Получим такой же график, как и на

рис. 5, а на экране дисплея на пятой секунде увидим значение установившейся скоростной ошибки, равное  $0.002164$ , т. е. практически требуемое.

Таким образом, задача синтеза оптимального ПИД-регулятора решена.

#### 4. Настройка коэффициентов ПИД-регулятора в среде GUI

При проектировании ПИД-регулятора возникает необходимость исследования влияния его коэффициентов на переходные процессы (или выбор коэффициентов по желаемому виду переходной функции), что требует многократного запуска модели при других (измененных) коэффициентах и постоянном редактировании свойств модели. При этом важен механизм управления коэффициентами, который бы обеспечивал удобный интерфейс между программой и пользователем. Эти и другие трудности можно преодолеть с помощью графического интерфейса пользователя (GUI – Graphical User Interface), который входит в состав MATLAB для создания графических приложений.

Работа в этой среде достаточно проста – элементы управления (кнопки, раскрывающиеся списки и т.д.) размещаются при помощи мыши, а затем программируются события, которые возникают при обращении пользователя к данным элементам управления. При решении этих задач пользователю GUI не нужно создавать полные М-файлы. Часто он может даже не знать всех деталей автоматически открывающегося в GUI М-файла. Пользователь GUI лишь редактирует его, дополняя функциями конкретно решаемой задачи. Подчеркнем, что программы открываются и дополняются только в М-файле, а не набираются в командном окне MATLAB.

Приложение GUI может состоять как из одного основного окна, так и нескольких окон и осуществлять вывод графической и текстовой информации в основное окно приложения и в отдельные окна. Ряд функций MATLAB предназначен для создания стандартных диалоговых окон открытия и сохранения файла, печати, выбора шрифта, окна для ввода данных и др.

Что необходимо знать для создания приложений с графическим интерфейсом? Во-первых, как программируются файл-функции с подфункциями, файл-функции с переменным числом входных и выходных аргументов. Во-вторых, требуется иметь представление об иерархической структуре и свойствах графических объектов, уметь обращаться с указателями на них. Разумеется, не должна вызывать затруднения работа с числовыми массивами, строками, структурами, ячейками и массивами

строк, структур и ячеек, а также использование конструкций встроенного языка программирования.

При создании приложений с графическим интерфейсом будут также полезны следующие разделы справочной системы MATLAB:

– "MATLAB: Creating Graphical User Interfaces";

– "MATLAB: Functions – Categorical List: Creating Graphical User Interfaces";

– "MATLAB: Handle Graphics Property Browser" (справочник свойств графических объектов);

– в справочной системе MATLAB в разделе "Demo" есть 10-ти минутная демонстрация создания приложения с графическим интерфейсом в среде GUIDE.

Создадим графический интерфейс для настройки параметров ПИД-регулятора замкнутой системы радиолокационного сопровождения.

Сначала откроем диалоговое окно в среде визуального программирования GUIDE (Graphical User Interface Design Environment – средства проектирования графического интерфейса пользователя), выполнив команду

`>> guide`

или цепочку команд главного меню MATLAB: File (файл) → New (новый) → GUI (графический интерфейс). На экране появляется стартовая заставка конструктора графического интерфейса – диалоговое окно с именем GUIDE Quick Start (быстрый старт).

Две странички, присутствующие на стартовой заставке, позволяют начать проектирование нового интерфейса (вкладка – Create New GUI (создать новый интерфейс)) или воспользоваться ранее созданным интерфейсом (вкладка – Open Existing GUI (открыть существующий интерфейс)).

Для создания конкретного приложения элементы GUI перетаскиваются из панели инструментов в окно приложения (так же, как это делается в Simulink). После добавления элемента интерфейса необходимо задать его тег (имя), который будет идентифицировать данный объект среди всех остальных объектов, и присвоить имя каждому элементу.

В создаваемом приложении GUI понадобится три слайдера для установки числовых значений коэффициентов регулятора K1, K2 и K3, шесть элементов Edit Text для задания предельных значений этих коэффициентов (Max и Min), три текстовых элемента Static Text для вывода текущих (Current) значений коэффициентов и девять текстовых элементов для соответствующих надписей.

Предельные значения коэффициентов регулятора могут быть установлены экспериментально.

Здесь они выбраны с учетом полученных значений в разд. 3 (на основании предыдущего опыта).

Для отображения имен элементов панели инструментов в окне заготовки приложения (см. колонку слева на рис. 11) следует выполнить в меню этого окна: File → Preferences... → Show names in component palettey.

Заготовка приложения GUI с элементами интерфейса, добавленными из панели инструментов, примет вид, показанный на рис. 11.

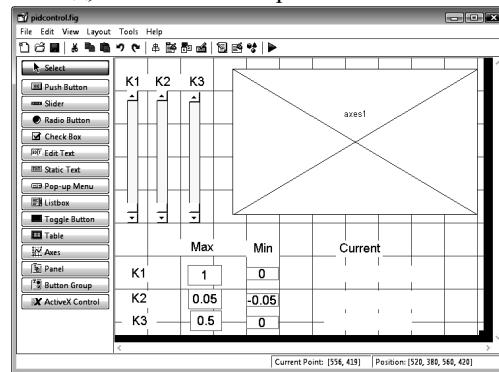


Рис. 11. Окно заготовки приложения GUI

Перед программированием события сохраним приложение. Приложение, созданное в среде визуального программирования GUIDE MATLAB, сохраняется по умолчанию в двух файлах:

1) файл с расширением fig – графическое окно, содержащее добавленные на форму элементы интерфейса;

2) файл с расширением m – генерируемая в среде GUIDE файл-функция, открывающая окно и содержащая подфункции для обработки событий элементов интерфейса, которые возникают, например, при нажатии на кнопку пользователем. Заготовки этих подфункций и комментарии к ним создаются автоматически.

Для сохранения выберем в меню File (рис. 11) пункт Save as. При этом открывается диалоговое окно сохранения файла, в котором выберем папку или создадим новую и зададим имя файла pidcontrol. После сохранения приложения автоматически открываются файлы pidcontrol.fig (диалоговое графическое окно с размещенными на нем элементами управления) и в редакторе М-файлов – файл pidcontrol.m с множеством комментариев, в который необходимо добавить функции решаемой задачи и три команды обращения к слайдерам. Опуская автоматически созданные части М-файла, укажем лишь те его фрагменты (и их место), которые создаются и вставляются в М-файл пользователем.

За строкой

**% End initialization code - DO NOT EDIT**

следует основная часть команд решаемой задачи:

```

% Функции решаемой задачи
function mySliderCallback(hObject, eventdata, handles)
% задание функции
% и преобразование строк в числовые значения:
max1=str2double(get(handles.edit1, 'String')); % максимум K1
max2=str2double(get(handles.edit2, 'String')); % максимум K2
max3=str2double(get(handles.edit3, 'String')); % максимум K3
min1=str2double(get(handles.edit4, 'String')); % минимум K1
min2=str2double(get(handles.edit5, 'String')); % минимум K2
min3=str2double(get(handles.edit6, 'String')); % минимум K3

c1=get(handles.slider1, 'Value'); %вызов значений K1
c2=get(handles.slider2, 'Value'); % вызов значений K2
c3=get(handles.slider3, 'Value'); % вызов значений K3

cur1=min1+(max1-min1)*c1; % вычисление текущего
%значения коэффициента K1,
%установленного слайдером slider1
cur2=min2+(max2-min2)*c2; % вычисление текущего
%значения коэффициента K2,
%установленного слайдером slider2
cur3=min3+(max3-min3)*c3; % вычисление текущего
%значения коэффициента K3,
%установленного слайдером slider3

set(handles.text10, 'String', cur1); % установка текущего
%значения K1
set(handles.text11, 'String', cur2); % установка текущего
%значения K2
set(handles.text12, 'String', cur3); % установка текущего
%значения K3

axes(handles.axes1); % обращение к графику
cla; % очистка текущего графика
hold on; % наложение нескольких графиков в одном окне
grid on % нанесение сетки

K1=cur1;% присвоение коэффициенту K1 выбранного
%слайдером значения
K2=cur2;% присвоение коэффициенту K2 выбранного
%слайдером значения
K3=cur3;% присвоение коэффициенту K3 выбранного
%слайдером значения

tau=0.15; ksi=0.707; w0=15; ky=5; % параметры системы
Wa=tf([w0^2],[1 2*ksi*w0 w0^2 0]); % объект
Wy=tf([ky],[tau 1]); % усилитель
N=100;
Wp=tf([K1/N+K3 K1+K2/N K2],[1/N 1 0]);% регулятор
W1=series(Wy,Wa); % передаточная функция усилителя
%и объекта
W=series(Wp,W1); % передаточная функция
%разомкнутой системы
sys=feedback(W,1); % передаточная функция
%замкнутой системы
t=5; % время моделирования
step(sys,t) %переходная функция
grid on
xlabel('t');
ylabel('h');
% Окончание функций решаемой задачи

```

Далее созданный М-файл необходимо дополнить (вставить) функциями обращения к слайдерам. Независимо от количества слайдеров и их тегов эта функция имеет один и тот же вид для каждого слайдера:

```

mySliderCallback(hObject, eventdata, handles);
% обращение к слайдеру slider1
mySliderCallback(hObject, eventdata, handles);
% обращение к слайдеру slider2
:

```

Обратим внимание, что в аргументах этой функции вообще не указывается тэг слайдера. Однако место этой функции в М-файле строго определено: она должна следовать непосредственно за автоматически созданными командами:

```

function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
function slider2_Callback(hObject, eventdata, handles)
:

```

Теперь приложение GUI полностью готово к работе и его можно запустить кнопкой Run pidcontrol.m в меню окна редактора Editor или аналогичной кнопкой Run Figure в меню окна заготовки приложения pidcontrol.fig (рис. 11). Открывается диалоговое окно, показанное на рис. 12.

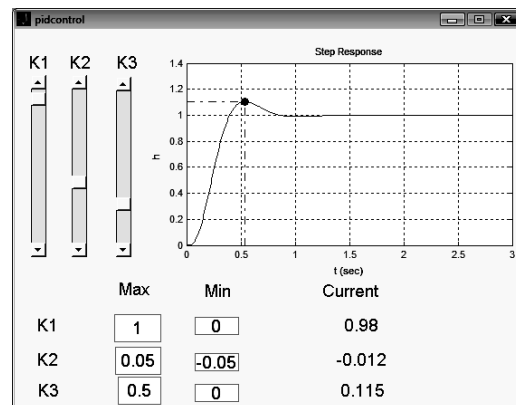


Рис. 12. Диалоговое окно интерфейса

Разработанный интерфейс позволяет перемещением в диалоговом окне движков слайдеров определить (по появляющемуся виду переходных процессов) коэффициенты любого типа регуляторов: П, И, Д, ПИ, ПД, ИД или ПИД. На рис. 12 в качестве примера показана переходная функция с установкой слайдеров в положения, соответствующие оптимальным коэффициентам ПИД-регулятора, полученным в разд. 3. Как видим, переходные функции на рис. 9 (оптимизированная) и рис. 12 одинаковы.

Исключив в М-файле команду очистки текущего графика **cla** (поставив перед ней символ комментария, т. е. %), можно получить семейство переходных процессов для любого множества параметров регулятора, что может оказаться удобным при выборе процесса с желаемыми показателями качества.

Графики в диалоговом окне можно редактировать, вызвав редактор свойств (Property Editor). Для этого необходимо правой клавишей мыши щелкнуть по графику и во всплывающей вкладке выбрать Properties... . Открывается окно Property Editor, в котором можно задать (или изменить) названия графика и осей (Labels), пределы по осям координат (Limits), размер и стиль шрифтов (Style). Если во всплывающей вкладке выбрать Characteristics, то



открывшаяся новая вкладка (Peak Response, Settling Time, Rise Time, Steady State) позволяет отметить на каждом графике переходной функции (точками) основные качественные характеристики: максимальное значение амплитуды (Peak Amplitude), перерегулирование (Overshoot %), установившееся значение (Final Value), время нарастания (Rise Time).

Графический интерфейс позволяет вносить изменения в М-файл и в окно приложения. Например, если необходимо установить новые предельные значения коэффициентов регулятора, то это можно сделать в окне заготовки приложения и в диалоговом окне интерфейса. Как отмечалось, окно заготовки приложения можно открыть из главного окна MATLAB в такой последовательности: File → New → GUI → Open Existing GUI → выбрать строку с именем приложения pidcontrol. В открывшемся окне, выделяя необходимые элементы и используя инспектор свойств (двойной щелчок по элементу), можно задавать любые желаемые свойства.

### Заключение

Предложенная схема моделирования и программа настройки коэффициентов регулятора в графическом интерфейсе позволяют оперативно рассчитать коэффициенты для любого объекта и любого

типа регулятора, удаляя или комбинируя необходимые каналы в ПИД-регуляторе. Для нового объекта достаточно заменить блоки соответствующих передаточных функций в схеме моделирования системы (рис. 3) и ввести необходимые параметры в окне свойств модели (Model Properties), а в М-файле графического интерфейса заменить выделенный заливкой текст новым. Остальная часть схемы и М-файла не изменится.

### Литература

1. Соколов Ю.Н. Компьютерные технологии в задачах оптимального управления мягкой посадкой космических аппаратов на безатмосферные планеты / Ю.Н. Соколов // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2009. – №2 (36). – С. 109-119.
2. Филлипс Ч. Системы управления с обратной связью: пер. с англ. / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М.: Лаб. базовых знаний, 2001. – 615 с.
3. Соколов Ю.Н. Компьютерный анализ и проектирование систем управления. Ч. 1. Непрерывные системы: учеб. пособие. – В 5 ч. / Ю.Н. Соколов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 260 с.
4. Персональный сайт Соколова Ю.Н. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к сайту: <http://www.sokolov.5u.com>.

Поступила в редакцию 27.01.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой авиационных приборов и измерений Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ

*Ю.М. Соколов*

Розглянута технологія комп'ютерного проектування ПІД-регуляторів у складі системи кутової орієнтації антени РЛС. На підставі математичної моделі регулятора і об'єкта розроблено схему імітаційного моделювання системи управління в середовищі MATLAB/Simulink (версія 7.6.0 (R2008a)). Викладена методика визначення оптимальних коефіцієнтів ПІД-регулятора за заданими показниками якості перехідного процесу при ступеневому та лінійному впливах. Розроблено програму дослідження системи і вибору коефіцієнтів ПІД-регулятора за допомогою графічного інтерфейсу.

**Ключові слова:** система управління, ПІД-регулятор, імітаційне моделювання, перехідний процес, передаточна функція, перетворення Лапласа.

### COMPUTER DESIGN OF PID-CONTROLLERS

*Y.N. Sokolov*

The computer design technology of the PID-controllers of the RLS antenna angular orientation system is considered. On the base of the mathematical model of the controller and object the simulation model of the control system in the MATLAB/Simulink (version 7.6.0 (R2008a)) environment is constructed. The technique of the PID-controller optimal parameters determination according to given response performances is developed. The research program of the system and PID-controller parameters estimation by means of graphical interface is stated.

**Key words:** control system, PID-controller, simulation, time response, transfer function, Laplace transform.

**Соколов Юрий Николаевич** – канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина, e-mail: sokolovkhai@gmail.com.