Лабораторная работа № 5
Моделирование линейных систем с использованием структурных блоков пакета Simulink

Цель работы: научиться моделировать и исследовать процессы в линейных системах при помощи S-моделей пакета Simulink.

Методические указания

Для анализа работы сложных систем (объектов) широко применяются их структурные схемы, в которых они представлены в виде блоков (звеньев) с определенными характеристиками.

Структурные схемы линейных систем состоят из типовых звеньев, в состав которых могут входить апериодические, колебательные, усилительные, интегрирующие, дифференцирующие и другие звенья.

В общем случае звену соответствует передаточная функция вида:

$$W(s) = Y(s)/X(s),$$

где $X(s), Y(s)$ – изображение соответственно входного и выходного сигналов.

В таблице 1 приведены передаточные функции основных видов звеньев.

Таблица 1 – Передаточные функции звеньев

Наименование звена	Передаточная функция
Апериодическое звено первого порядка	$W(s) = \dfrac{K}{Ts+1}$
Колебательное звено второго порядка (*корни характеристического уравнения знаменателя передаточной функции должны быть комплексными*)	$W(s) = \dfrac{K}{T_1T_2s^2 + T_2s + 1}$
Усилительное (пропорциональное) звено	$W(s) = K$
Дифференцирующее звено	$W(s) = Ts$
Интегрирующее звено	$W(s) = \dfrac{1}{Ts}$

В таблице используются следующие обозначения:

T – постоянная времени;

K – коэффициент усиления (пропорциональности);

s – оператор.

В лабораторной работе рассматривается система управления объектом по углу его поворота φ. Структурная схема системы приведена на рисунке 1.

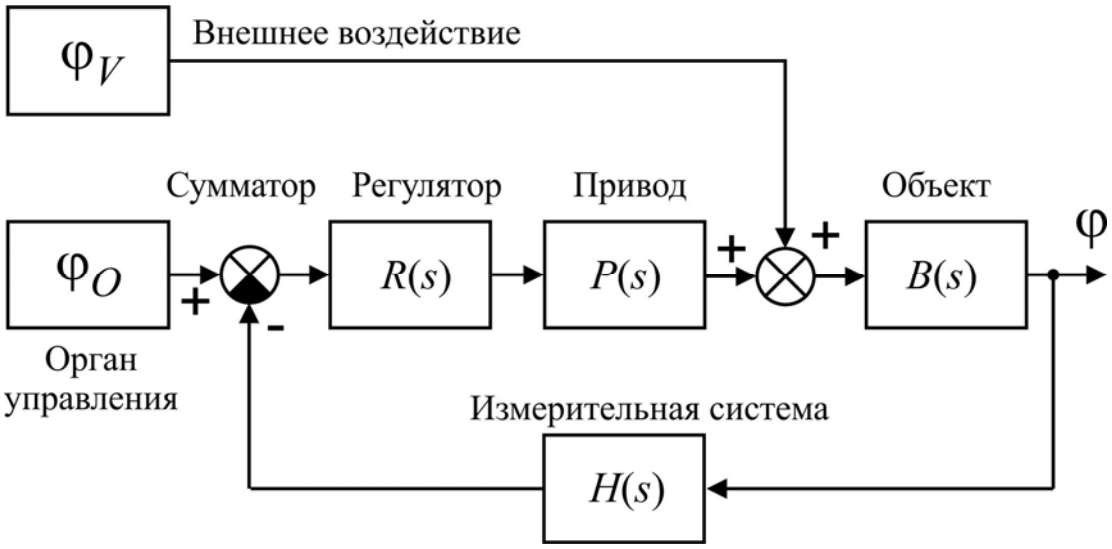


Рисунок 1

В состав системы входят: орган управления, которым задается необходимый угол поворота объекта φ_O, регулятор, привод, объект управления, измерительная система, два сумматора и блок, задающий внешнее воздействие φ_V.

Движение объекта описывается линейной математической моделью второго порядка в виде следующей передаточной функции:

$$B(s) = \frac{K}{s(T_B s + 1)},$$

где T_B – постоянная времени объекта; K – постоянный коэффициент.

Привод объекта моделируется как интегрирующее звено, охваченное единичной отрицательной обратной связью, так что его передаточная функция имеет вид:

$$P(s) = \frac{1}{T_P s + 1},$$

где T_P – постоянная времени привода.

Для измерения угла поворота объекта используется измерительная система, математическая модель которой записывается

в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией

$$H(s) = \frac{1}{T_H s + 1},$$

где T_H – постоянная времени измерительной системы.

Регуляторы применяются для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимой точности управления и качества переходного процесса.

Пропорционально-интегро-дифференцирующий (ПИД) регулятор формирует сигнал, являющийся суммой трех слагаемых, первое из которых пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе – интеграл сигнала рассогласования, третье – производная сигнала рассогласования. Если какие-то из составляющих не используются, то регулятор называют пропорционально-интегрирующим (ПИ), пропорционально-дифференцирующим (ПД), пропорциональным (П) и т.д.

Если объект не меняет структуру и свои параметры, то системы с ПИД-регуляторами обеспечивают необходимое качество регулирования при больших внешних возмущающих воздействиях и помехах.

В работе исследуются системы управления объектом с ПД- и ПИД-регуляторами.

ПИД-регулятор в общем случае имеет передаточную функцию

$$R(s) = K_P\left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right),$$

где K_P – коэффициент пропорциональности; T_I – постоянная интегрирования; T_D – постоянная дифференцирования.

В случае же применения фильтра передаточная функция равна

$$R(s) = K_P\left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{T_F s + 1}\right),$$

где T_F – постоянная фильтра ($T_F = T_D / n$, при этом, как правило, $n = 2, \ldots, 20$).

Для системы управления объектом, исследуемой в лабораторной работе, заданы следующие параметры:

– угол поворота объекта $\varphi_O = 10°$;

– угол внешнего воздействия $\varphi_V = 2°$;

– параметры объекта $T_B = 12$ с, $K = 0{,}06$;

– параметры привода $T_P = 3$ с;

– параметры измерительной системы $T_H = 5$ с;

– параметры регулятора $K_P = 0{,}5$, $T_I = 100$ с, $T_D = 1$ с, $T_F = 0{,}1$ с.

При этом данная система исследуется в 3 режимах:

– без внешнего воздействия с использованием ПД-регулятора;

– с внешним воздействием с использованием ПД-регулятора;

– с внешним воздействием с использованием ПИД-регулятора.

Рабочее задание

1 Запустить **Matlab** и **Simulink**.

2 Настроить имя директории для хранения создаваемых файлов (команда: **Home⇒Set Path⇒Add Folder**[1]), указав свою папку на диске **H:**.

3 Создать новую модель с помощью верхнего меню окна **Simulink Library Browser** (команда: **File⇒New⇒Model**).

4 Добавить в окно модели блок **Transfer Fcn** (передаточная функция) из группы **Continuous** библиотеки **Simulink**, предназначенной для получения функциональных блок-схем различных устройств.

Поместить блок в окне в соответствии со структурной схемой моделируемой системы, приведенной на рисунке 1.

5 Задать блоку **Transfer Fcn** название **Объект** (с помощью ЛКМ на имени блока).

6 Выполнить двойной щелчок ЛКМ на блоке **Объект** и задать в появившемся окне параметров коэффициенты передаточной функции

$$B(s) = \frac{0{,}06}{s(12s+1)} = \frac{0{,}06}{12s^2 + \mathrm{s}}.$$

Коэффициенты числителя (**Numerator coefficients**: **[0.06]**) и знаменателя (**Denominator coefficients: [12 1 0]**) передаточной функции вводятся в квадратных скобках через пробел в порядке уменьшения степени оператора s.

---

[1] Из-за отличий в версиях программного обеспечения **Matlab** и **Simulink** названия команд, указанных в описании к работе, и команд программы могут частично отличаться.

7 Аналогично добавить еще два блока типа **Transfer Fcn,** назовите их соответственно **Привод** и **Измерительная система** и введите их параметры.

Передаточные функции привода и измерительной системы имеют соответственно вид:

$$P(s) = \frac{1}{3s+1}; \qquad H(s) = \frac{1}{5s+1},$$

поэтому значение коэффициента числителя блока **Привод** будет равно **[1]**, а коэффициентов знаменателя – **[3 1]**; значение коэффициента числителя блока **Измерительная система** будет равно **[1]**, а коэффициентов знаменателя – **[5 1]**.

8 Развернуть блок **Измерительная система** в другую сторону.

9 Добавить из группы **Continuous** блок **PID Controller** (ПИД-регулятор). Вначале в качестве регулятора используется ПД-регулятор, поэтому в окне параметров нужно выбрать **Controller: PD** (рисунок 2).

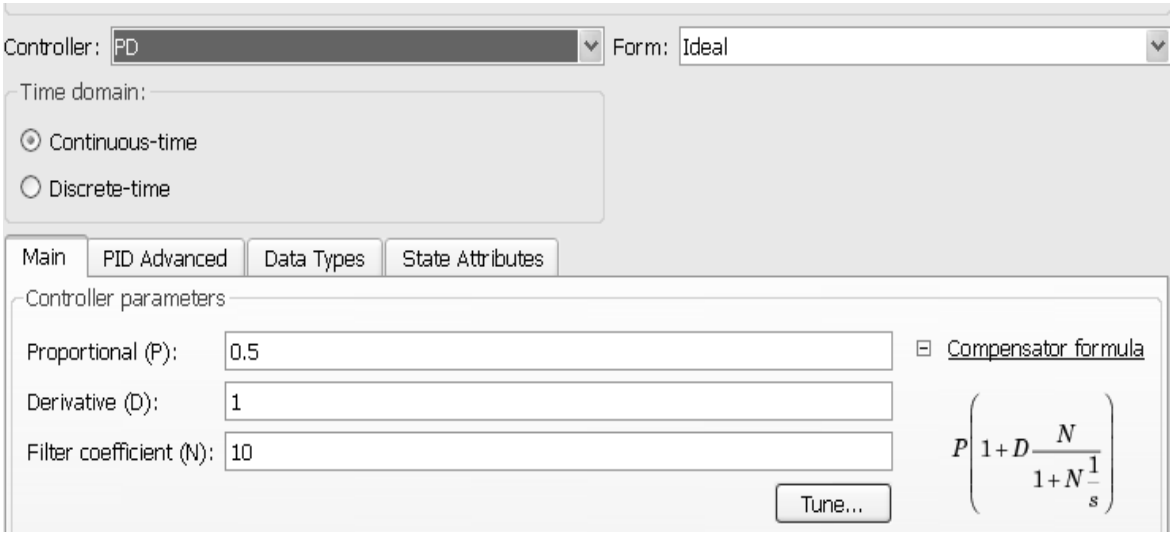


Рисунок 2

Установить **Form: Ideal** и в соответствии с видом реализуемой передаточной функции (**Compensator formula**) задать параметры регулятора ***P***, ***D***, ***N***:

$$P = K_P = 0{,}5;$$

$$D = T_D = 1;$$

$$N = 1/T_F = 10.$$

10 Перенести названия блоков снизу вверх (нажмите ПКМ на блоке и выполните команду **Rotate&Flip⇒Flip Block Name**).

11 Добавить в окно модели блок **Sum** из группы **Math Operations** и установить его слева от регулятора. Установите для нижнего входа сумматора знак минус (для отрицательной обратной связи). Для этого в окне параметров блока в поле **List of signs** ввести с клавиатуры через пробел символы: | + − (незадействованный вход, вход «плюс», вход «минус»).

12 Добавить еще один блок **Sum** и установите его между приводом и объектом. Настроить расположение входов и выхода так, чтобы первый вход был в верхней части круга (введите + + | в поле **List of signs**).

13 Добавить в окно модели блок **Step** из группы **Sources** и установите его слева от сумматора. Назвать его **Орган управления**.

В окне параметров блока установить время подачи сигнала (**0** в поле **Step time**) и величину сигнала – угла поворота объекта φ_O (**10** в поле **Final value**).

14 Скопировать блок **Орган управления**, перетащив его ПКМ. Дать ему название **Внешнее воздействие**. Установить для него величину сигнала внешнего воздействия $\varphi_V = 0$.

15 Соединить все блоки модели в соответствии с рисунком 1. Добавить в окно модели два блока **Scope** (осциллограф) из группы **Sinks** и установить их в правой части поля. Назвать их **Управление объектом** и **Поворот объекта.**

16 Подать на первый блок **Scope** сигнал с выхода второго сумматора (входной сигнал блока **Объект**), а на второй блок **Scope** – выходной сигнал блока **Объект** (рисунок 3).

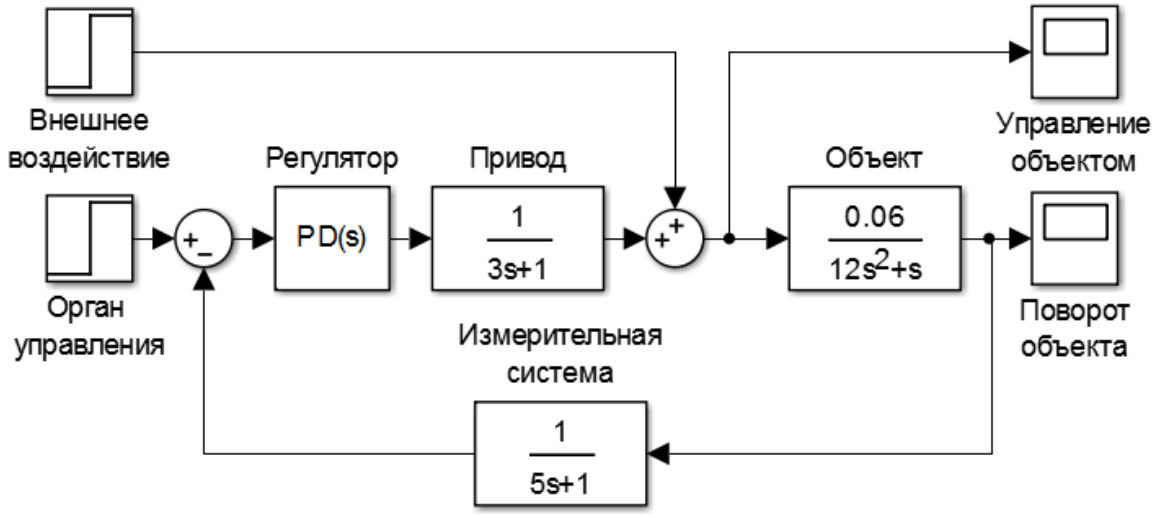


Рисунок 3

17 Уменьшить окно до минимального размера, при котором будут видны все элементы, и скопировать модель в буфер обмена (**Edit⇒Copy Current View to Clipboard⇒Metafile**).

Отчет

Вставьте в отчет по лабораторной работе полученную структурную схему модели исследуемой системы управления объектом (см. рисунок 3).

18 Установить время моделирования 300 с (**Simulation⇒ Model Configuration Parameters; Start time: 0, Stop time: 300**).

В области **Solver** выберите вариативный шаг дискретизации **Variable-step**.

19 Выполнить моделирование, для чего нажать кнопку **Run** на панели ▶ или выбрать команду **Simulation⇒Run**).

20 На рисунках 4, 5 приведены результаты моделирования, которые можно увидеть, открыв окна блоков **Scope**.

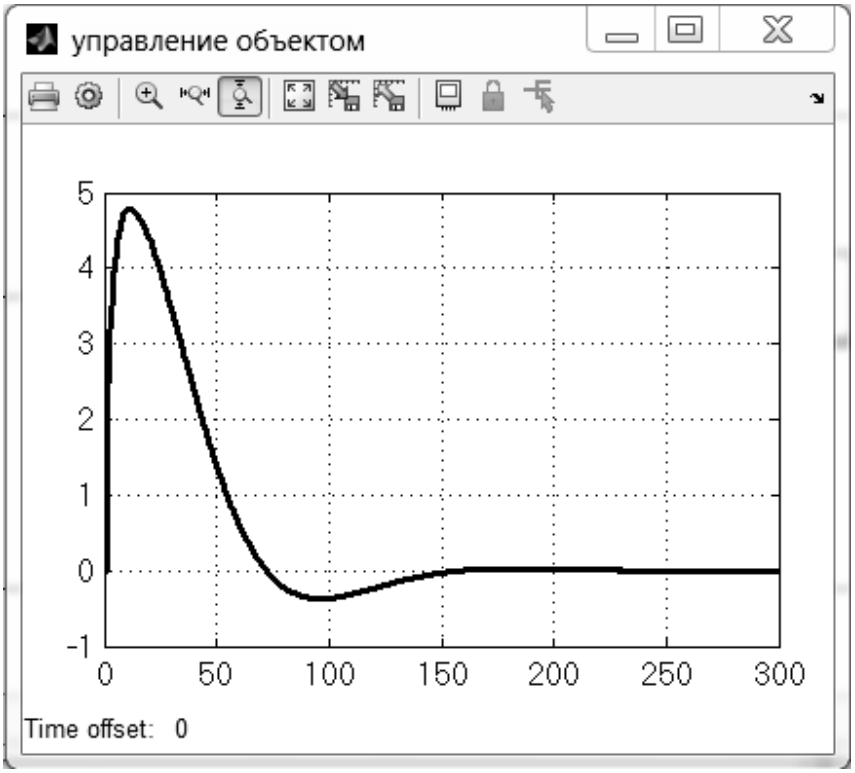


Рисунок 4

Для полного отображения кривых установить оптимальный масштаб по осям в окнах блоков (кнопка меню **Autoscale**).

Сохранить текущие настройки (кнопка меню **Save current axes settings**).

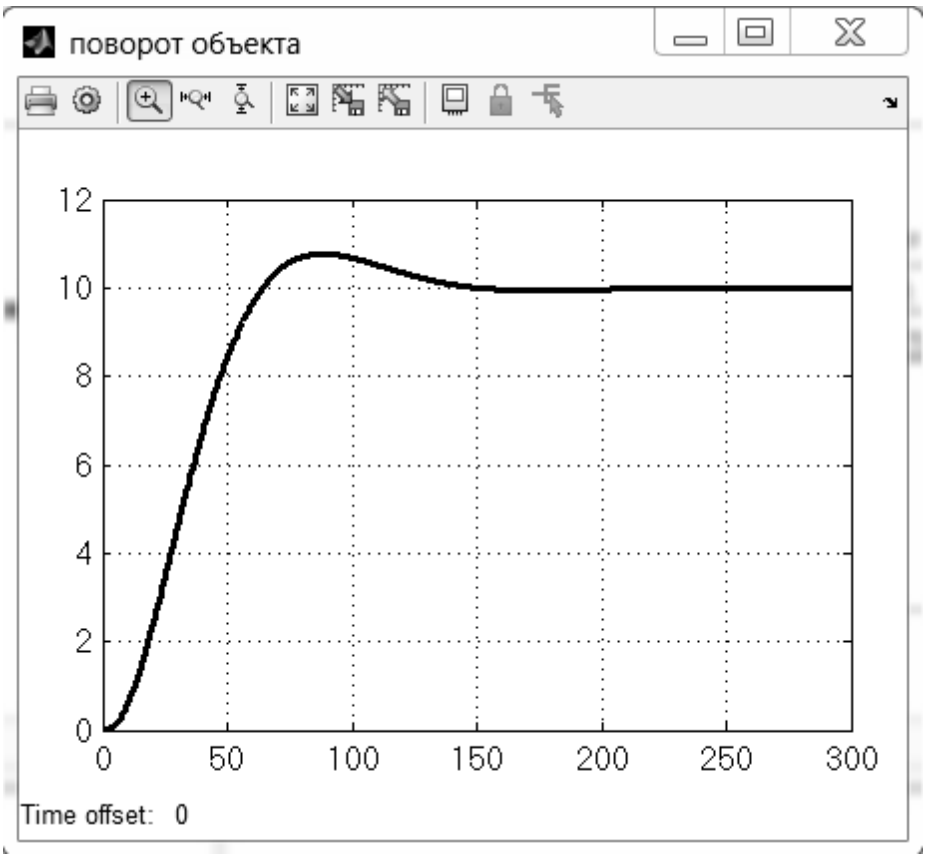


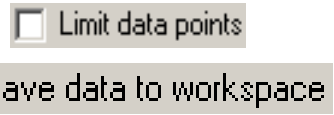
Рисунок 5

Примечание – В случае, если установленное время моделирования недостаточно, чтобы переходный процесс полностью отобразился на графиках, или оно слишком большое, то необходимо установить новое время и повторить процесс моделирования.

Из графика видно, что при отсутствии внешнего воздействия примерно через 150 с объект повернется на заданный угол в 10°.

21 Перенести результаты моделирования с обоих блоков **Scope** в рабочую область **Matlab** в виде матриц (**Array**), в которых первый столбец – время, а второй – сигнал (угол поворота).

Для этого на открытой панели блока **Scope** нажмите кнопку **Parameters** и выберите вкладку **History**. Далее установите:



Variable name: Uprav (для блока «Управление объектом») и **Povorot** (для блока «Поворот объекта»), **Format: Array** (сохранение данных в виде матрицы).

22 Сохранить полученную модель в своей папке (команда **File⇒Save**, имя файла **LabRab2**, расширение файла **.slx**).

23 Перейти в командное окно **Matlab** и создать новое окно для графика, в котором будут построены две кривые на разных осях.

```
Command Window
fx >> figure(1);
```

24 Разбить окно на две части по вертикали и сделать активным первый график.

```
Command Window
fx >> subplot(2,1,1);
```

Первое число в команде **subplot** означает количество ячеек с графиками по вертикали, второе – по горизонтали, третье – номер ячейки, которую надо сделать активной.

Примечание – При вводе этой и следующих команд окно с графиком не появляется на экране. Чтобы увидеть изменения, надо вручную сделать его активным, щелкнув мышью на соответствующей кнопке в панели задач.

25 Построить график сигнала управления объектом.

```
Command Window
fx >> plot(Uprav(:,1), Uprav(:,2));
```

В команде **plot** сначала указывают массив абсцисс, затем – массив ординат; двоеточие означает, что используются все строки.

26 Ввести заголовок графика.

```
Command Window
fx >> title('Upravlenie');
```

27 Ввести названия осей координат.

```
Command Window
   >> xlabel('Time, s');
   ylabel('\phi, deg.');
fx >>
```

Примечание – Внутри апострофов для ввода греческих букв разрешается использовать команды LaTeX. Например, **\phi** означает греческую букву φ, **\delta** – букву δ.

28 Аналогично построить во второй ячейке график изменения угла поворота объекта, используя данные из массива **Povorot**, полученного в результате моделирования.

```
Command Window
>> subplot(2,1,2);
plot(Povorot(:,1), Povorot(:,2));
title('Povorot');
xlabel('Time, s');
ylabel('\delta, deg.');
fx >>
```

Отчет

Скопировать полученный график в формируемый отчет через буфер обмена (**Edit⇒Copy Figure**) или сохранить его как рисунок для дальнейшей вставки в отчет (**File⇒Save as…**, расширение **.jpg**).

Пример графиков сигналов «Управление объектом» и «Поворот объекта» приведен на рисунке 6. Для приведенных графиков было выполнено форматирование (добавлены линии сетки, увеличена толщина линии) с помощью соответствующего окна свойств (**View⇒Property Editor**).

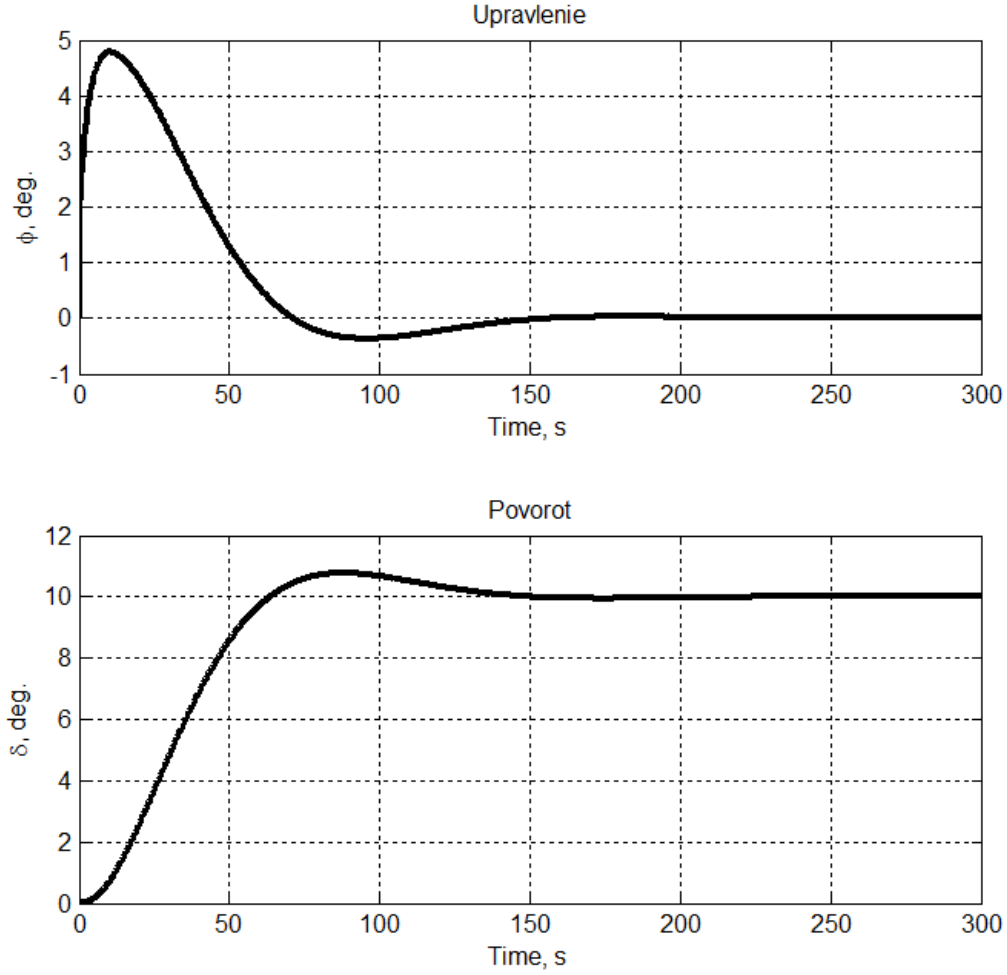


Рисунок 6

29 Далее проводится исследование системы управления объектом с внешним воздействием без изменения параметров регулятора. Для этого в окне параметров блока **Внешнее воздействие** в поле **Final value** установить величину сигнала, равную **2** (что будет соответствовать углу внешнего воздействия 2°), и выполнить моделирование.

30 Посмотреть результаты моделирования. Пример графика сигнала «Поворот объекта» приведен на рисунке 7.

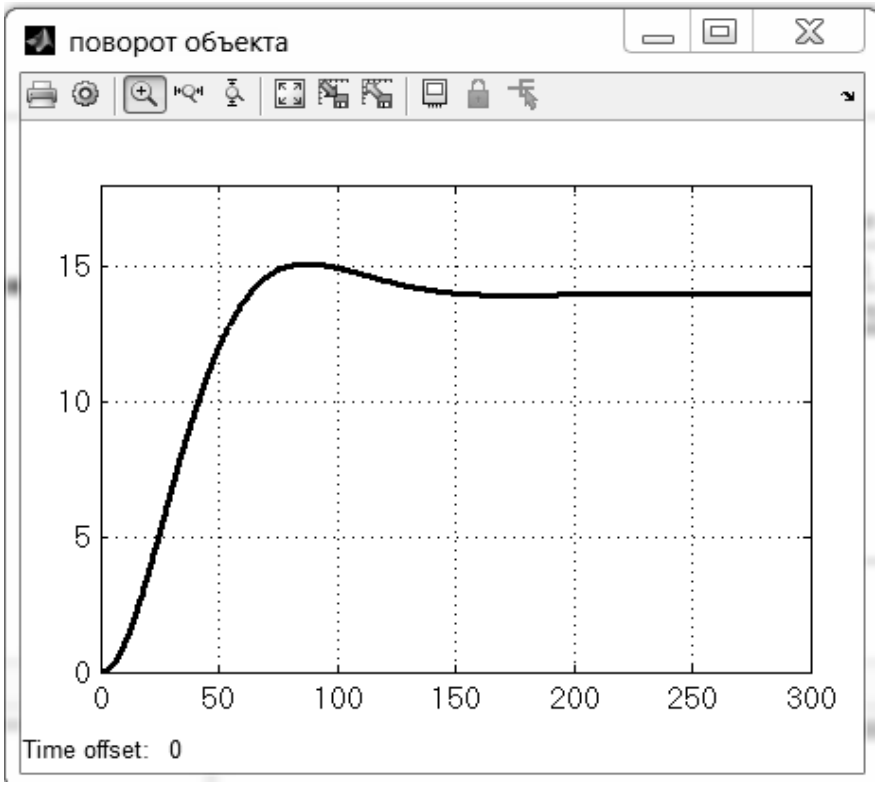


Рисунок 7

Из графика видно, что при внешнем воздействии и использовании ПД-регулятора объект не повернулся на заданный угол в 10°.

31 Перейти в командное окно **Matlab** и запомните результаты моделирования в новых массивах. Они понадобятся для того, чтобы сравнить исходный и скорректированный варианты системы.

```
>> Uprav1 = Uprav;
Povorot1 = Povorot;
>>
```

32 Чтобы регулятор компенсировал постоянную составляющую возмущения нужно добавить в него интегральный канал. Для этого в окне параметров блока **PID Controller** выбрать **Controller: PID, Form: Ideal** и установите значение параметра ***I***:

$$I = 1/T_I = 0{,}01.$$

33 Выполнить моделирование системы управления объектом с внешним воздействием при использовании ПИД-регулятора. Посмотреть результаты моделирования. Пример графика сигнала «Поворот объекта» системы с ПИД-регулятором приведен на рисунке 8.

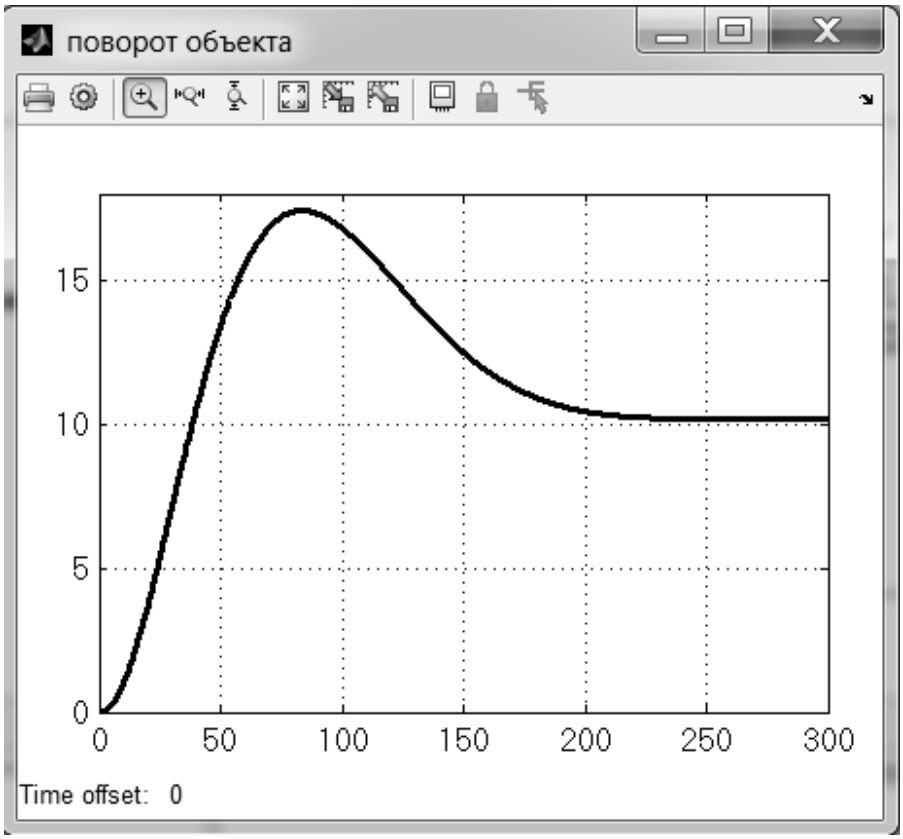


Рисунок 8

Из графика видно, что регулятор с интегральным каналом смог компенсировать постоянную составляющую внешнего воздействия и объект примерно через 230 с повернулся на заданный угол в 10°.

34 Сохранить окончательную модель системы управления объектом.

35 Перейти в командное окно **Matlab.** Построить в верхней части графика кривые сигнала управления поворотом объекта системы с ПД-регулятором и ПИД-регулятором, а в нижней части графика кривые переходных процессов угла поворота объекта.

Для этого в команде **plot** следует перечислить через запятую все пары массивов, при этом первая пара должна соответствовать первому графику.

Для различия кривых целесообразно использовать разный тип линий, задаваемых с помощью необязательных символьных переменных.

```
Command Window
>> subplot(2, 1, 1);
plot(Uprav1(:,1), Uprav1(:,2), '-',  ...
Uprav(:,1), Uprav(:,2), '--');
title('Upravlenie');
xlabel('Time, s');  ylabel('\phi, deg.');
legend('PD-Controller', 'PID-Controller');
subplot(2, 1, 2);
plot(Povorot1(:,1), Povorot1(:,2), '-',  ...
Povorot(:,1), Povorot(:,2), '--');
title('Povorot');
xlabel('Time, s');  ylabel('\delta, deg.');
legend('PD-Controller', 'PID-Controller');
fx >>
```

Три точки в конце строки означают перенос команды на следующую строку. Команда **legend** служит для вывода легенды – символьных строк, описывающих каждый из построенных графиков.

Отчет

Скопировать через буфер обмена полученный график в отчет. Пример графика модели с семейством кривых приведен на рисунке 9.

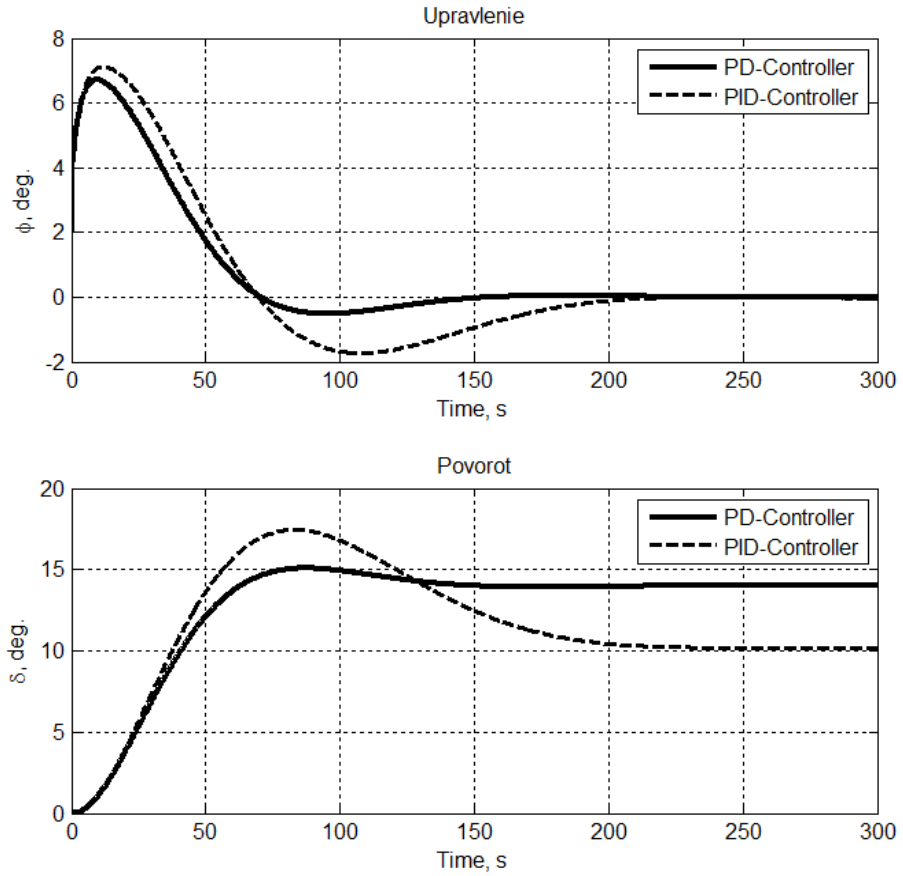


Рисунок 9

Индивидуальное задание

Используя указания, приведенные в пп. 1–35, выполнить моделирование линейной системы управления в пакете **Simulink** для значений параметров блоков, входящих в модель, приведенных в таблице 2 в зависимости от номера варианта.

Приведите в отчете по лабораторной работе:

– структурную схему исследуемой линейной системы управления объектом;

– передаточные функции блоков данной системы с параметрами в соответствии с вариантом;

– результаты моделирования и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные этапы создания модели.
2. Как пользоваться **Simulink Library Browser**?
3. Для чего предназначены блоки **Transfer Fcn, PID Controller, Step, Sum, Scope**?
4. Какие настройки имеются у блоков **Transfer Fcn, PID Controller, Step, Sum, Scope**?
5. Как скопировать изображение модели в документ Microsoft Word?
6. Какие настройки нужно задать в окне **Configuration Parameters** перед запуском модели?
7. Как передать результаты моделирования в рабочую область **Matlab**? В каком виде они передаются?
8. Какие параметры принимает команда **subplot**?
9. Как записывается команда **plot**?
10. Как построить в одном окне два разных графика?
11. Как на одном графике построить несколько кривых?
12. Что такое легенда? Как вывести легенду на график?

Таблица 2 – Параметры блоков

Номер варианта	Угол поворота объекта	Угол внешнего воздействия	Параметры объекта управления		Параметры привода	Параметры измери-тельной системы	Параметры ПИД-регулятора			
	φ_O, °	φ_V, °	T_B, с	K, °/с	T_P, с	T_H, с	K_P	T_I, с	T_D, с	T_F, с
1	5	1	2	0,040	2,1	0,5	0,8	50	1	0,12
2	6	1	3	0,042	2,3	0,6	0,8	55	1	0,1
3	7	1	4	0,044	2,6	0,7	0,8	60	1	0,085
4	8	2	5	0,046	2,9	0,8	0,75	65	1	0,07
5	9	2	6	0,048	3,2	1,0	0,75	70	2	0,23
6	10	2	7	0,050	3,5	1,3	0,75	75	2	0,2
7	11	3	8	0,052	3,8	1,6	0,7	80	2	0,17
8	12	3	9	0,054	4,1	2,0	0,7	85	2	0,14
9	13	3	10	0,056	4,4	2,3	0,7	90	3	0,37
10	14	4	11	0,058	4,7	2,6	0,65	95	3	0,3
11	15	4	12	0,060	5,0	3,0	0,65	100	3	0,25
12	16	4	13	0,062	5,3	3,3	0,65	105	4	0,5
13	17	5	14	0,064	5,6	3,6	0,6	110	4	0,4
14	18	5	15	0,066	5,9	4,0	0,6	115	4	0,3
15	19	5	16	0,068	6,2	4,3	0,6	120	5	0,6
16	20	5	17	0,070	6,5	4,6	0,55	125	5	0,5
17	21	6	18	0,072	6,8	5,0	0,55	130	5	0,4
18	22	6	19	0,074	7,1	5,3	0,55	135	6	0,75
19	23	6	20	0,076	7,4	5,6	0,5	140	6	0,6
20	24	6	21	0,078	7,7	6,0	0,5	145	6	0,5