

**DR. BOB DAVIDOV**

## Математическое моделирование систем управления в среде Simulink

*Цель работы:* освоение правил моделирования систем в среде Simulink

*Задачи работы:* простейшее моделирование объектов и систем управления в Simulink

*Приборы и принадлежности:* Персональный компьютер, среда МатЛАБ с пакетом Simulink.


### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

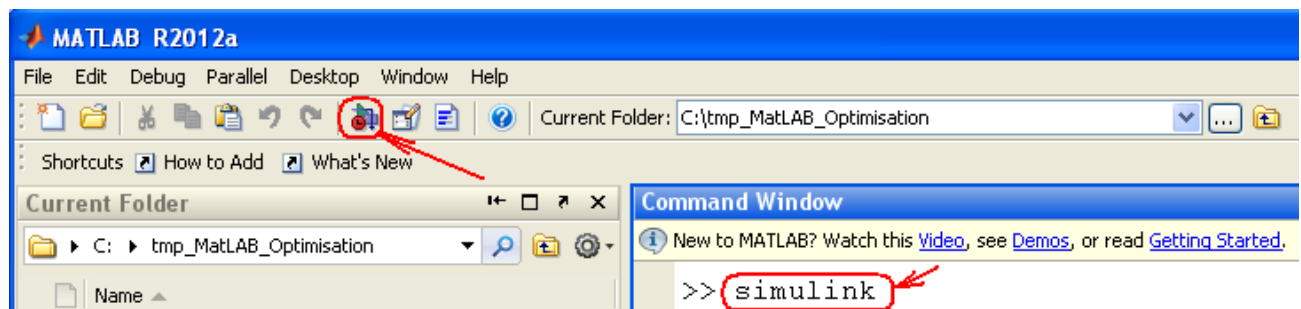
#### СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ В SIMULINK

Simulink является приложением к пакету МатЛАБ и предназначен для моделирования линейных и нелинейных, дискретных и непрерывных систем которые могут работать как в режиме вычисления так и в режиме реального времени. В Simulink реализован принцип визуального программирования в соответствии с которым вся модель строится из стандартных библиотечных блоков и блоков модернизированных или разработанных пользователем. Каждый блок реализует свою математическую функцию. Блоки имеют входы и выходы и соединяются в модели линиями связи по которым аргументы поступают на вход функций.

Кроме секций с типовыми блоками библиотека Simulink имеет дополнительные разделы с блоками для разных областей применения, например, для моделирования электро-механических устройств, каналов передачи данных, и т.д.

Многие функции (команды m-файлов) и инструменты МатЛАБ могут использоваться в среде Simulink.

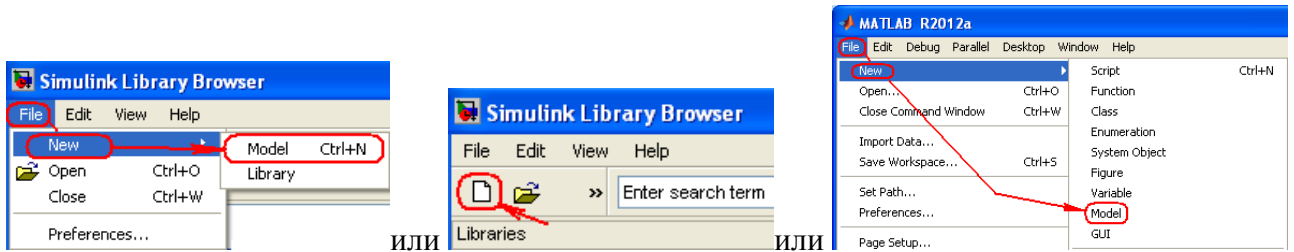
Для запуска Simulink необходимо предварительно запустить МатЛАБ, а затем нажать на кнопку  или ввести в командной строке **Simulink**:



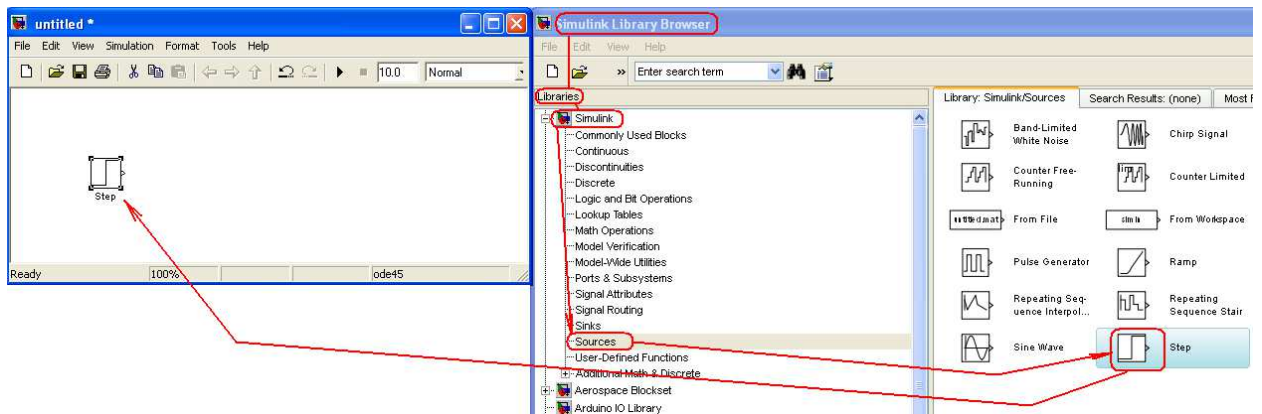
Для создания новой модели необходимо

1. открыть окно модели,
2. перенести в окно необходимые блоки из Simulink библиотеки и
3. соединить блоки линиями связи.

Окно новой модели открывается следующим образом:

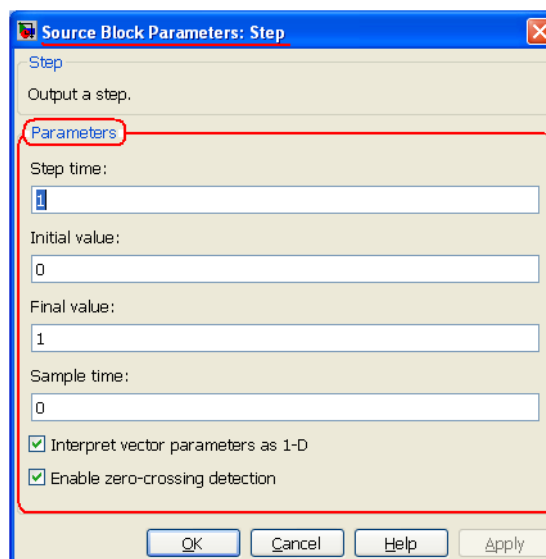


Для переноса в окно модели необходимого блока необходимо найти блок в библиотеке нажать на блок левой кнопкой мыши (ЛКМ) и перетащить блок в окно модели:



Чтобы скопировать блок (или выделенные блоки) надо перетащить его при нажатой правой кнопке мыши (ПКМ).

Для изменения параметров блока надо дважды щелкнуть на блоке и в открывшемся диалоговом окне изменить соответствующие параметры, например, параметры блока Step:



Чтобы изменить название блока надо щелкнуть по названию блока ЛКМ и отредактировать текст.

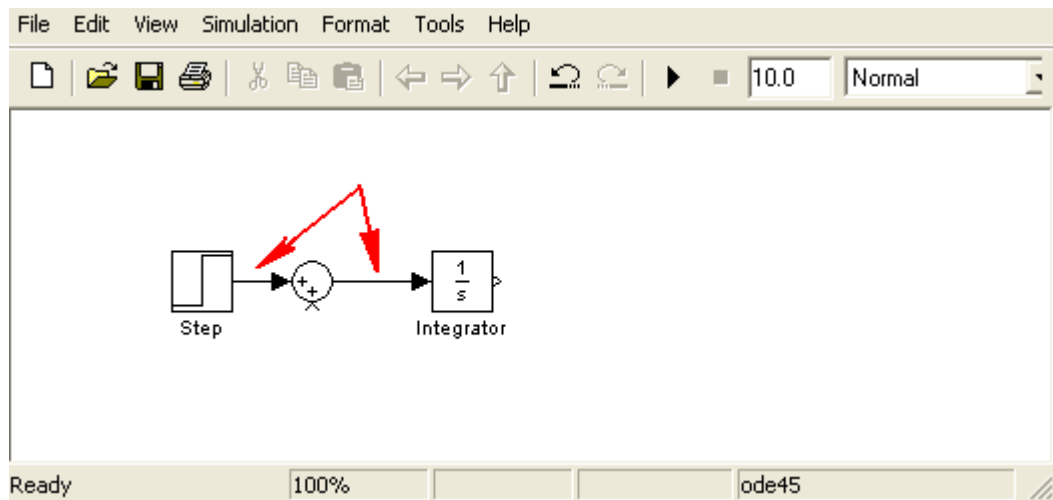
С выделенными блоками можно выполнять следующие действия

- изменить положение и размеры блока,
- изменить цвет контура и самого блока,
- изменить ориентацию блока,
- выровнять положение блоков,
- создать из нескольких блоков подгруппу (subsystem) которая отображается одним блоком.

Примечание: Команды для работы с блоками находятся в разделе **меню > Format** окна модели

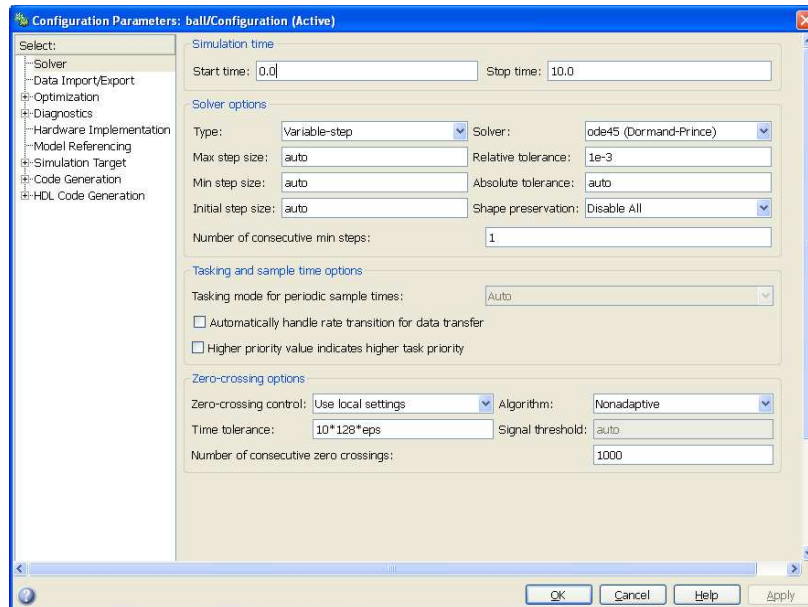
Для соединения блоков можно протянуть мышкой линию связи между нужными выходом (входом) и входом (выходом) или щелкнуть ЛКМ по блоку с нужным выходом, затем нажать на клавишу клавиатуры **Ctrl** и щелкнуть ЛКМ по блоку с нужным входом.

Чтобы подать один сигнал на два блока (сделать «развилку»), надо сначала создать одну линию обычным способом. Для создания второй линии, следует нажать ПКМ на точку предполагаемой развилки и протащить линию ко второму блоку или ЛКМ протянуть линию от входа нужного блока к точке развилки.



Для выделения объекта модели (блока или соединительной линии) надо щелкнуть по нему ЛКМ. Для удаления объекта или группы необходимо сначала их выделить щелчком или оконтуриванием, а затем удалить командой **Delete** - связанной с объектом или группой объектов.

Пользователь может подобрать оптимальные для конкретной модели численные методы и шаг интегрирования (Рис. 1).



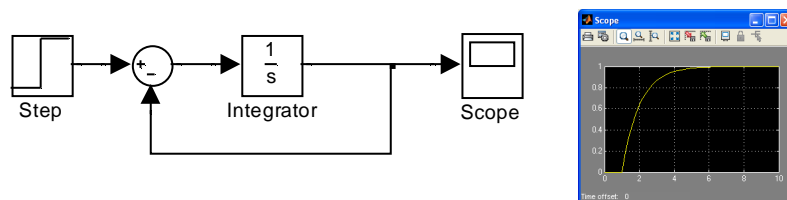
**Рис. 1.** Окно выбора параметров моделирования: шага интегрирования, метода моделирования, допусков и т.д. Путь: **меню модели > Simulation > Configuration Parameters (Ctrl+E) > Solver.**

Входные сигналы (раздел библиотеки **Sources**) и переменные состояния модели можно наблюдать в процессе моделирования при помощи блоков раздела (**Sinks**). Например, блок **Scope** в зависимости от его настроек показывает графики изменения входных сигналов как в одном окне, так и в нескольких, отображая заданное число точек. Масштабы графиков можно изменять, а их данные - сохранять в рабочей области МатЛАБ (workspace).

Время моделирования задается в окне . Для установки бесконечного времени моделирования в соответствующее окно необходимо ввести значение .

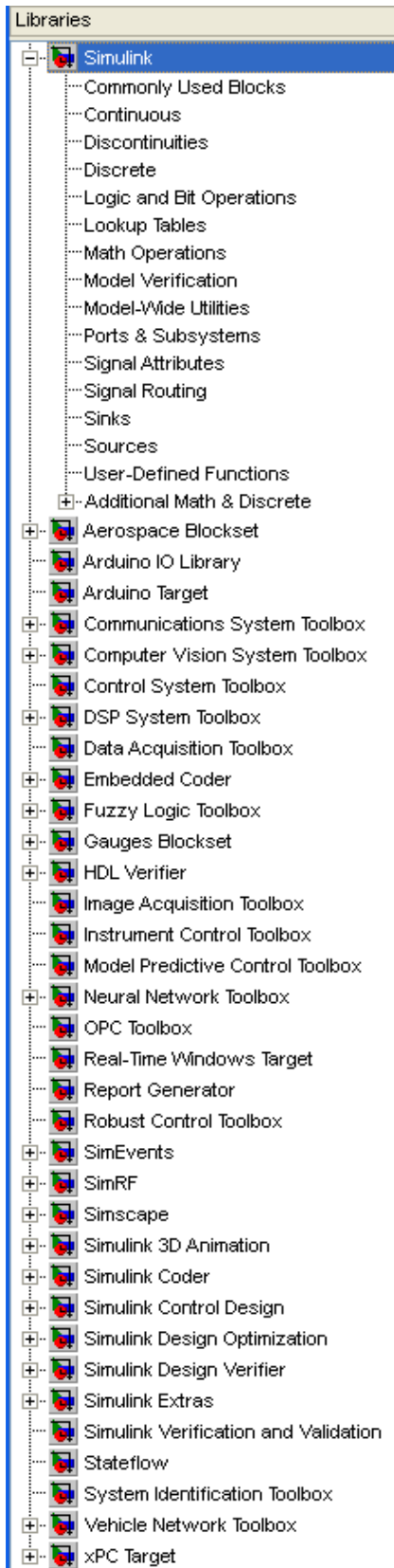
Для запуска моделирования необходимо щелкнуть по кнопке **Start simulation**  на панели инструментов окна модели. Кнопки  и  соответственно приостанавливают и останавливают моделирование.

Копирование модели в буфер обмена виде растрового рисунка выполняется командой **меню окна модели > Edit – Copy Model to Clipboard**. Предварительно лучше уменьшить размеры окна модели до минимальных, чтобы не было белых полей:



**Рис. 2.** Пример простейшей модели и ее реакция. Модель включает источник ступенчатого воздействия, сумматор, интегратор охваченный отрицательной обратной связью и осциллограф для наблюдения за реакцией системы.

Библиотека Simulink содержит следующие основные разделы:



- Commonly Used Blocks – наиболее часто используемые блоки разных разделов библиотеки (воздействия, сумматор, интегратор, усилитель, осциллограф и т.д.)
- Continuous – библиотека непрерывных элементов (интегратор, дифференциатор, линейная система ОДУ и т.д.);
- Discontinuities – нелинейные элементы (насыщение, реле, переключатель и т.д.);
- Discrete – библиотека дискретных элементов (интегратор, фильтр, задержка и т.д.);
- Logic and Bit Operations – логические операции (сравнение, сдвиг, инверсия, AND и т.д.);
- Lookup Tables – блоки задания в табличной форме функции переменных с использованием линейной интерполяции (функции одной переменной, двух переменных и т.д.);
- Math Operations – математические функции (абсолютное значение, комбинаторная логика, выделение вещественной и мнимой составляющей комплексного числа и т.д.);
- Model Verification – блоки проверки проектируемой системы на соответствие требованиям в частотной и временной областях (границы значения сигнала, ограничения по амплитуде ЛАЧХ, ограничения на отклик на единичное ступенчатое воздействие, запасы устойчивости по амплитуде и фазе и т.д.);
- Model-Wide Utilities - библиотека дополнительных утилит (описание модели, информация о типе данных используемыми блоками Simulink и т.д.);
- Ports & Subsystems блоки подсистем (порты, синхронизация подсистем, вызов функций и т.д.);
- Signal Routing – сигналы и системы (составной блок, входной сигнал, выходной сигнал, мультиплексор, демультимплексор и т.д.);
- Sinks – средства отображения (временная диаграмма, вывод результатов в файл, остановка выполнения модели и т.д.);
- Sources – источники сигналов (генератор импульсных/синусоидальных сигналов, генератор

случайных чисел, генератор пилообразных сигналов, часы и т.д.).

- User-Defined Function – функции пользователя (S-функции, m-функции, табличные функции и т.д.);
- Additional Math & Discrete – дополнительные математические и дискретные функции (задержки, инкрементирование и т.д.);

Помимо Simulink имеется целый ряд специальных библиотек для расчетов, моделирования систем, обмена данными, управления ресурсами компьютера и др. (см. рис. выше).

## ОФОРМЛЕНИЕ ГРАФИКОВ В МАТЛАБ

Для графического отображения переменных состояния Simulink модели сохраненных в рабочей области (workspace) можно использовать следующие функции МатЛАБ.

Команда, параметр	Описание
figure; figure(N рисунка: 1,2,...);	Открытие окна графика
plot(y);	Построение графика переменной y
plot(t, y);	Построение графика переменной y(t)
plot(t, y, 'xb', i, z, 'g', 'linewidth',2);	<p>Построение голубого ('b') графика y(t) из x точек и зеленого ('g') графика z(i) линией двойной толщины (, 'linewidth',2) в одной зоне окна.</p> <p>Цветовое обозначение линий графиков:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>b синий (blue)</li> <li>g зеленый (green)</li> <li>r красный (red)</li> <li>c голубой (cyan)</li> <li>m фиолетовый (magenta)</li> <li>y желтый (yellow)</li> <li>k черный (black)</li> </ul> <p>Обозначение типа линии:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- сплошная</li> <li>: точечная</li> <li>- . штрих-пунктирная</li> <li>-- штриховая</li> <li>x - обозначение точек массива</li> </ul>

	Обозначение толщины линии:  'linewidth',3  'linewidth',2
subplot(N строки, N столбца, N активного графика);	Активизация одной из зон окна для построения в ней графика
title('xxx')	xxx заголовок графика
xlabel('xxx')	xxx название оси абсцисс
ylabel('xxx')	xxx название оси ординат
legend('название1','название2','название3')	вывод типа линий графиков и их названий в отдельный список окна графиков.

Вот пример кода m-файла МатЛАБ и его график.

```

if 1
    figure
    plot(time, depth, 'b', 'linewidth',2);
    hold on
    plot(time, set_depth, 'c', 'linewidth',2);
    hold on
    plot(time, valves, 'm', 'linewidth',1);
    grid on
    legend('depth','target depth','valves');
    xlabel('Time, sec');
    ylabel('Dept [m], Target dept [m], Valves [bit] ');
    title('Depth and Valve against Time');
end

```

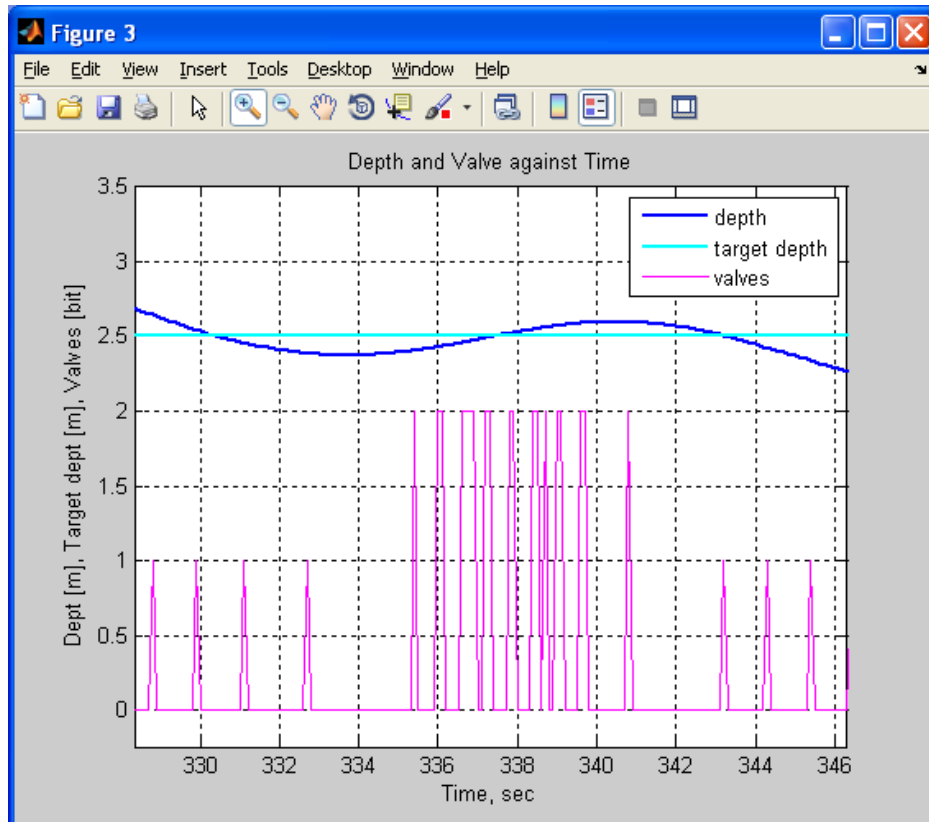


Рис. 3. Пример построения графиков средствами МатЛАБ.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

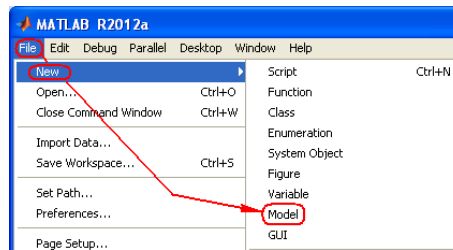
**Задание 1.** Построение зависимости выхода от входа стандартного блока библиотеки Simulink.

1. Запустите МатЛАБ
2. Настройте МатЛАБ на свой рабочий каталог, например, tmp\_Simulink.

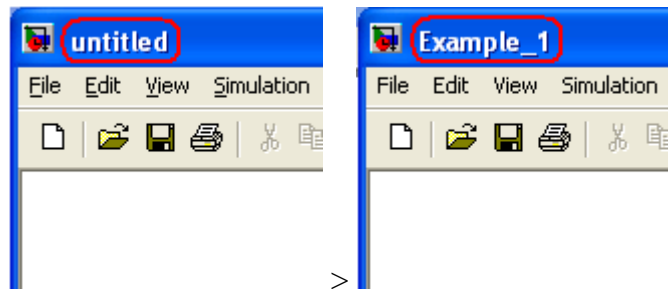





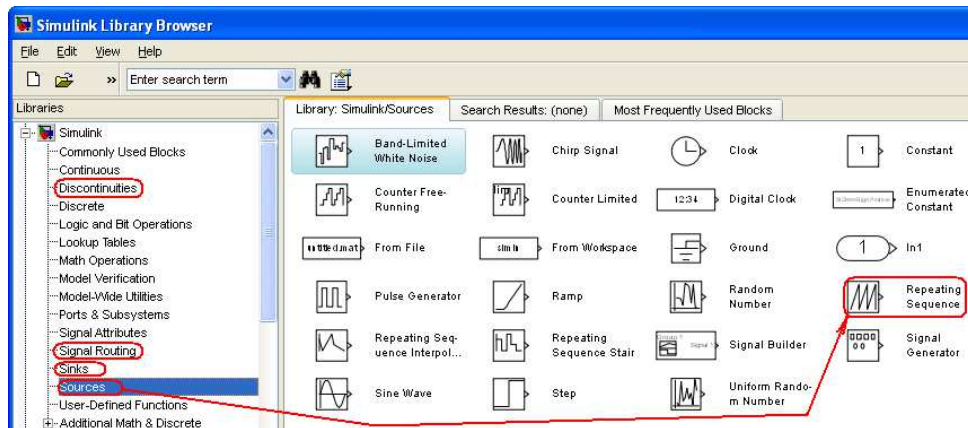
3. Откройте новое окно (файл модели) для построения модели.



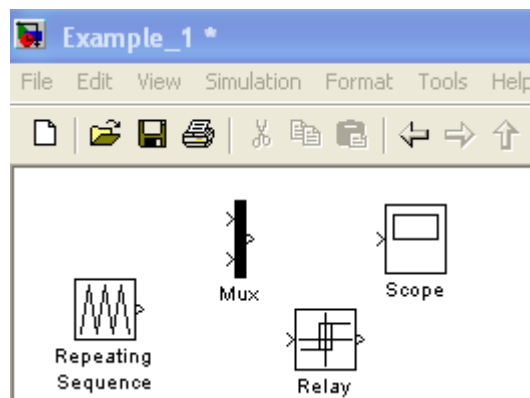
4. Командой меню > File > Save As переименуйте файл модели untitled, например, в Example\_1.



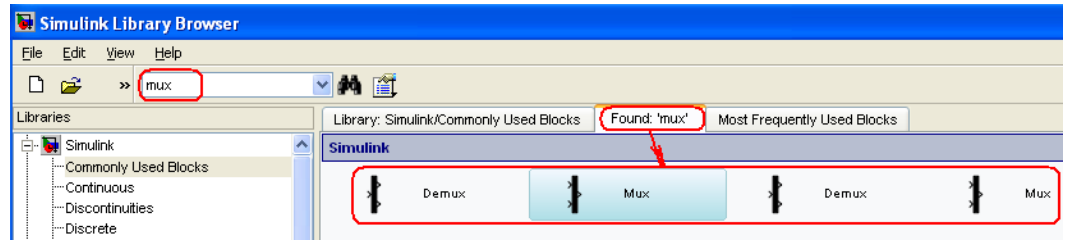
5. Клавишей  окна модели откройте библиотеку Simulink.



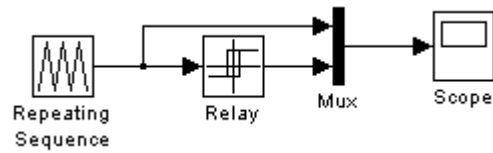
6. Перенесите из библиотеки Simulink в окно модели следующие блоки.



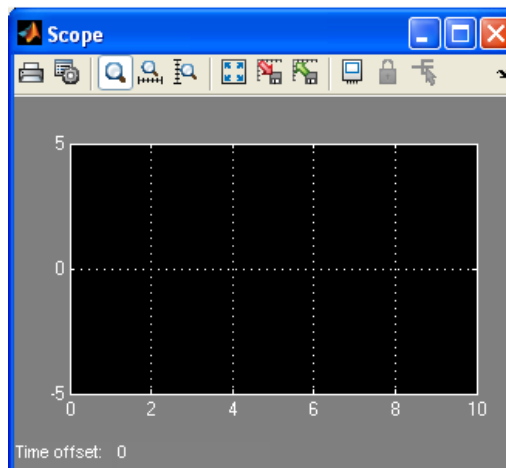
Примечание: нужный блок в библиотеке можно найти введя имя блока в окне поиска, например,



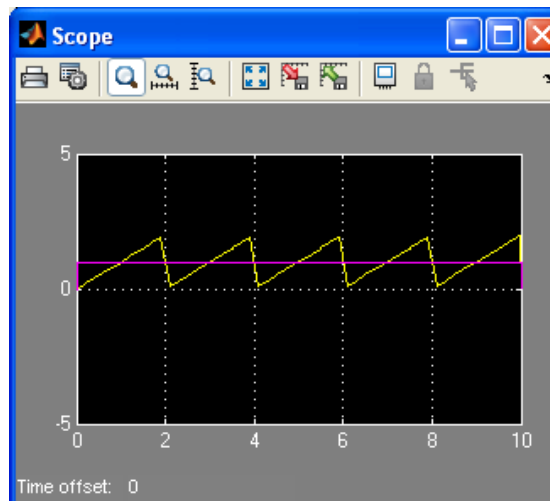
7. Соедините блоки как показано ниже.



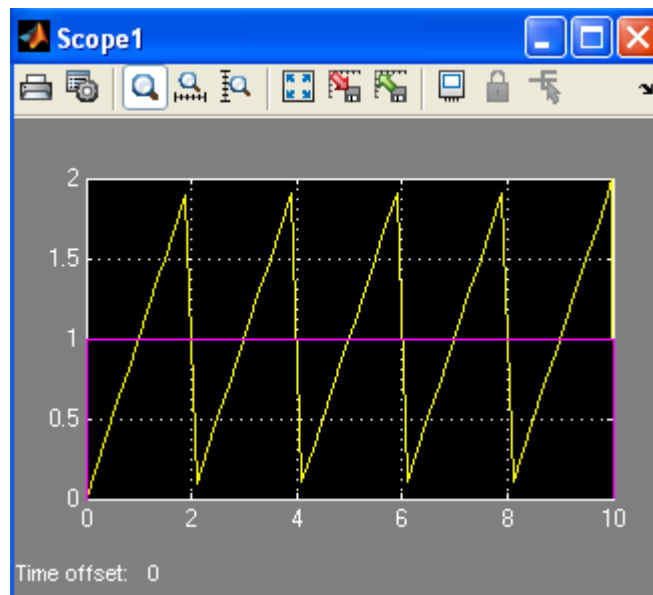
8. Откройте блок Scope



9. Запустите модель. Наблюдайте результат моделирования в окне Scope.

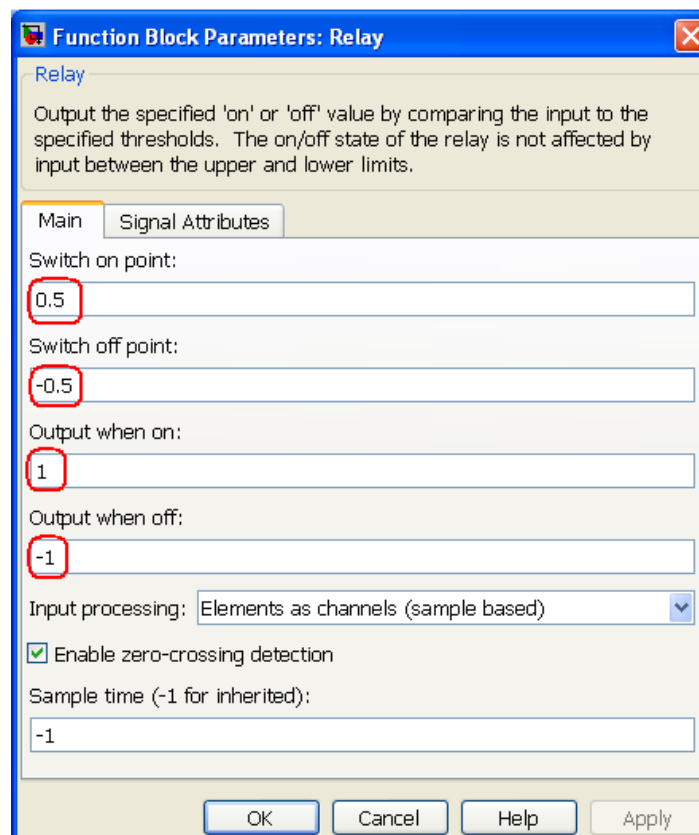


10. Командой  блока Score разместите графики во всей зоне окна.



11. Командой  блока Score зафиксируйте размеры окна для будущих графиков.

12. Открыв окно с параметрами реле установите требуемые параметры, например, как показано ниже.



Function Block Parameters: Relay

Relay

Output the specified 'on' or 'off' value by comparing the input to the specified thresholds. The on/off state of the relay is not affected by input between the upper and lower limits.

Main | Signal Attributes

Switch on point:  
0.5

Switch off point:  
-0.5

Output when on:  
1

Output when off:  
-1

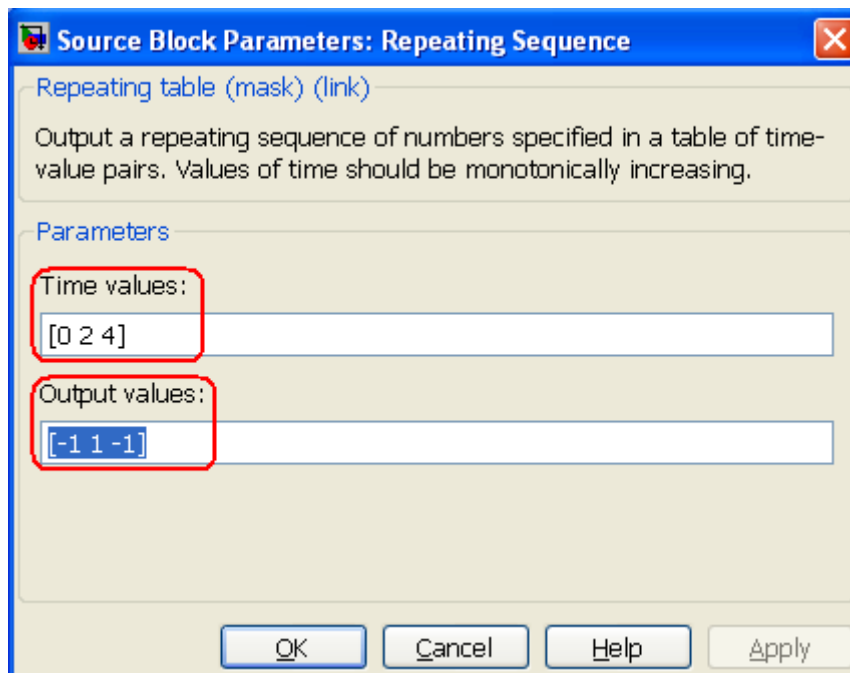
Input processing: Elements as channels (sample based)

Enable zero-crossing detection

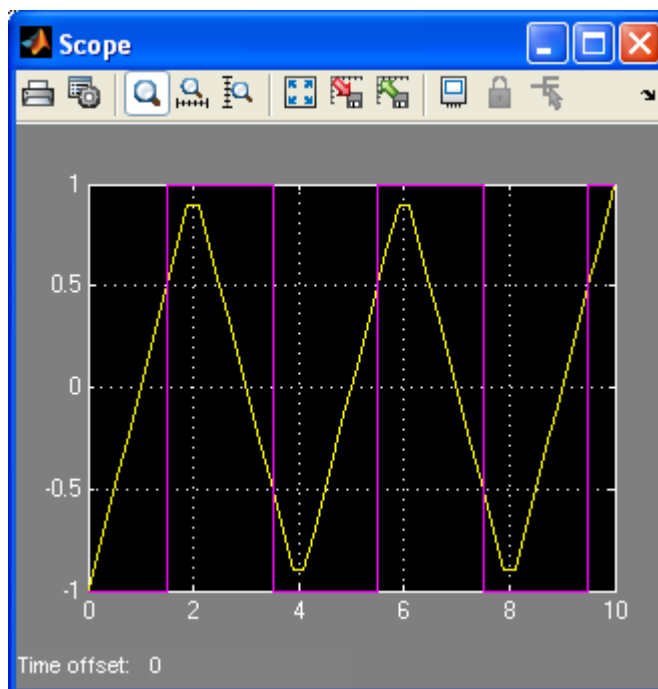
Sample time (-1 for inherited):  
-1

OK Cancel Help Apply

13. Задайте параметры выходного сигнала блока развертки (Repeating Sequence) так, чтобы он перекрывал точки переключения реле (-0.5 и 0.5).



14. Постройте графики модели.

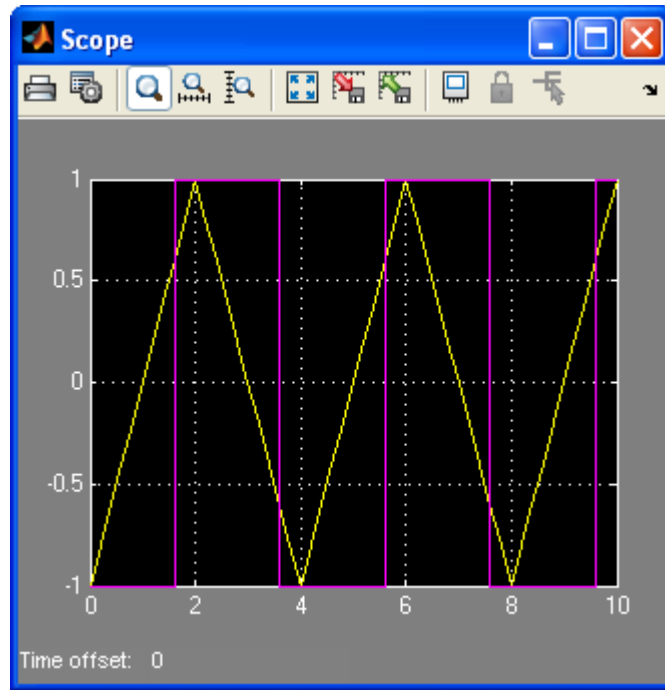


Графики показывают, что реле переключается в 1 когда входной сигнал превышает 0.5 и переключается в -1 когда входной сигнал становится меньше -0.5.

15. Для уменьшения искажений входного сигнала (пик желтого сигнала отображается полочкой) замените (в окне **меню модели > Simulation > Solver**) переменный шаг моделирования “по умолчанию” Type: **Variable-step** на постоянный :

Type: **Fixed-step**

16. Запустите модель и наблюдайте изменения на графиках сигнала реле.

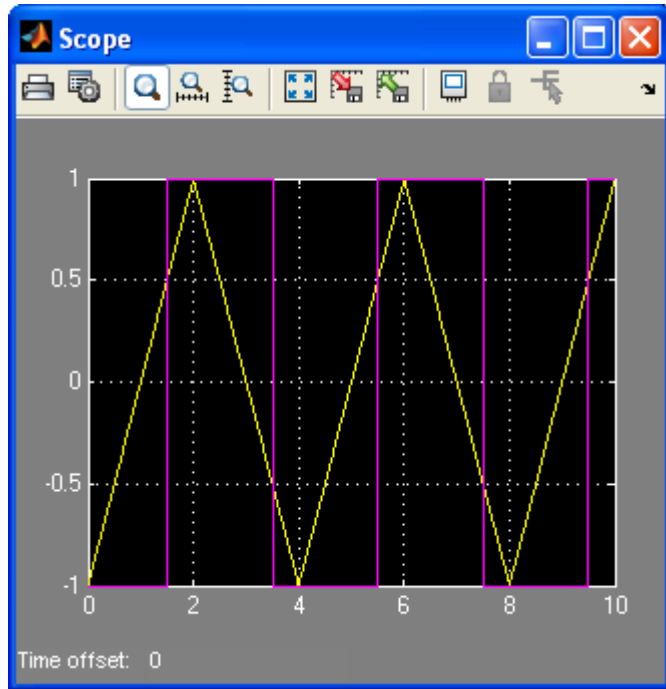


Графики показывают, что исчезло искажение пика входного сигнала, но теперь сместились точки переключения реле.

17. Для уменьшения искажений в точках переключения реле замените шаг моделирования **Fixed-step size (fundamental sample time):** **Auto** (в окне **меню модели > Simulation >**

**Solver**), например, на **0.01**

18. Постройте графики реле с новыми значениями параметров моделирования.



## Задание 2. Построение модели скачущего мяча.

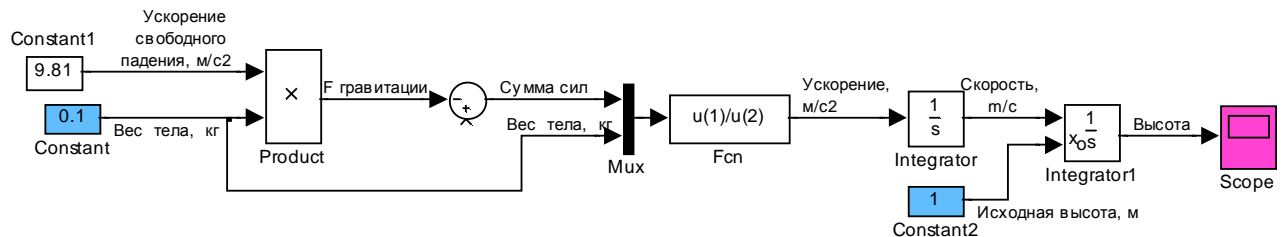
Описание процесса.

На заданной высоте, например, 1м отпускают мяч весом 100 г. который летит до поверхности, и отскакивает от нее на высоту ~80% от начальной точки. Необходимо построить модель полета и отскоков мяча и определить основные параметры модели.

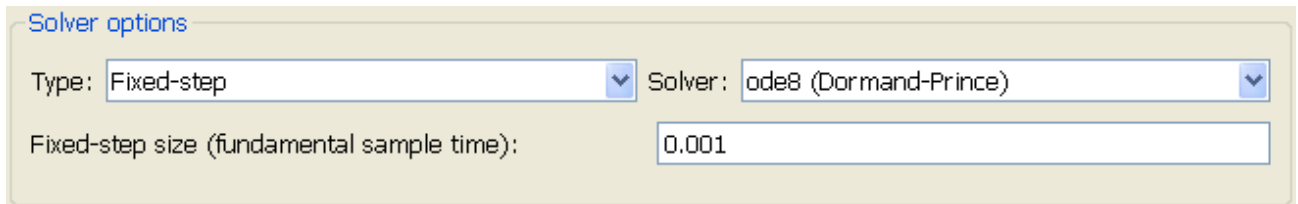
Составим список отношений которые, как нам кажется, влияют на поведение мяча.

- Сила гравитации равно произведению массы тела на ускорение свободного падения
- Ускорение тела равно отношению сил действующих на тело к массе тела
- Изменение скорости равно интегралу от ускорения.
- Изменение расстояния равно интегралу от скорости.

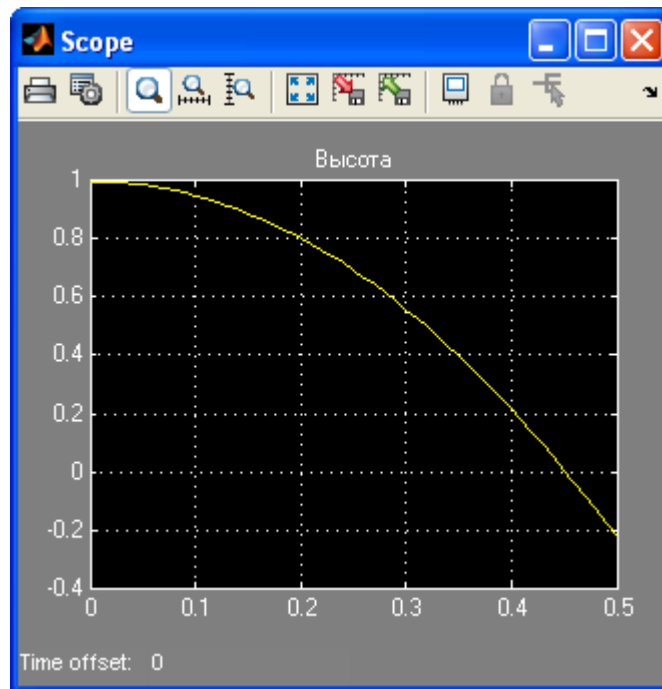
1. В новом окне наберите модель полета мяча состоящую из блоков реализующих исходные отношения.



2. Выберите следующие параметры моделирования (меню модели > Simulation > Configuration Parameters (Ctrl+E) > Solver)



3. Запустите модель. Рассмотрите полет мяча. Постройте его график.

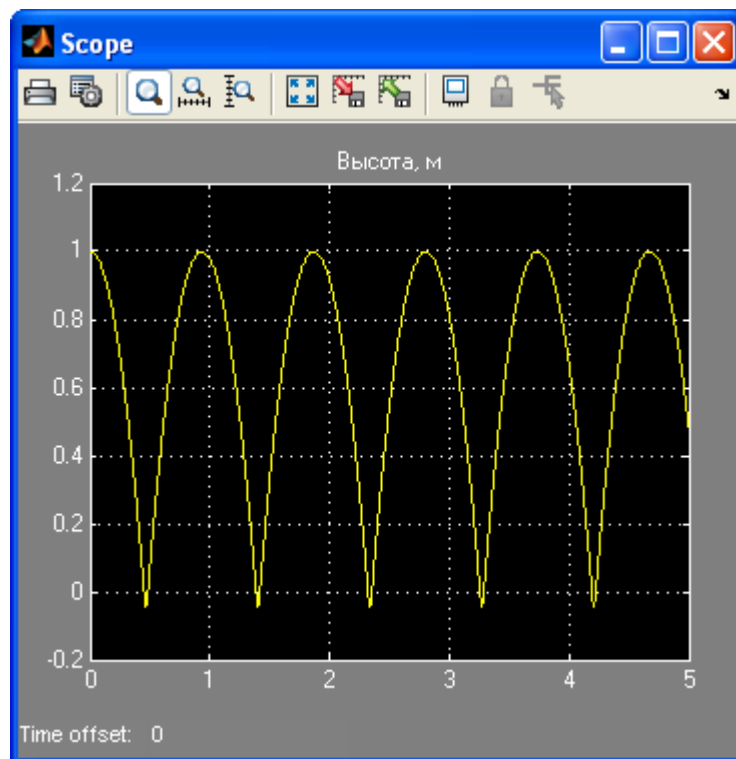
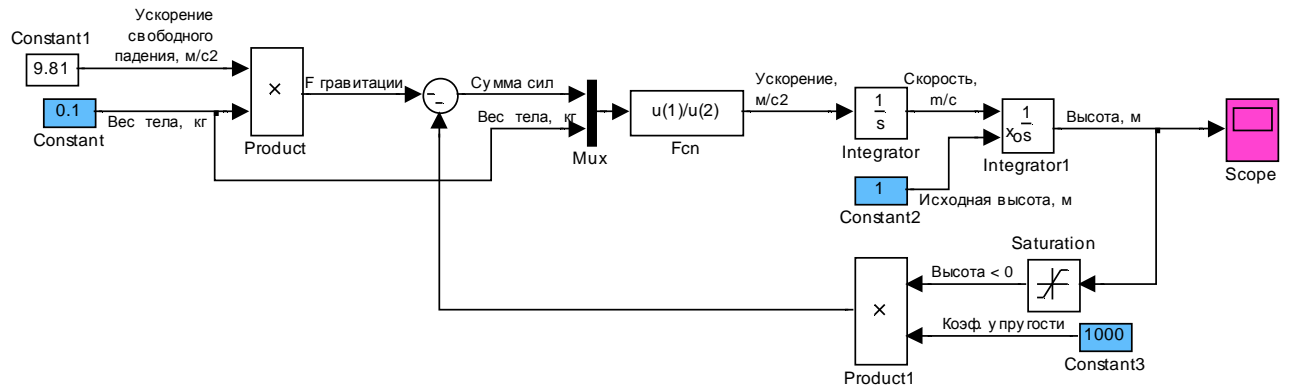


Видно, что полет до поверхности с высоты одного метра под действием гравитации занимает 0.45 секунд. Далее мяч пролетает поверхность без отскока. Необходимо включить в модель описание отскока. Добавим в список отношений новое:

- Сила сжатия тела равна произведению сжатия тела на коэффициент упругости.

Отношение начинает действовать когда мяч достиг поверхности, а высота меняет знак.

4. Дополните модель функциями описывающими отскок и проверьте работу доработанной модели. Подберите коэффициент упругости который соответствует сжатию мяча на 4.5 см.

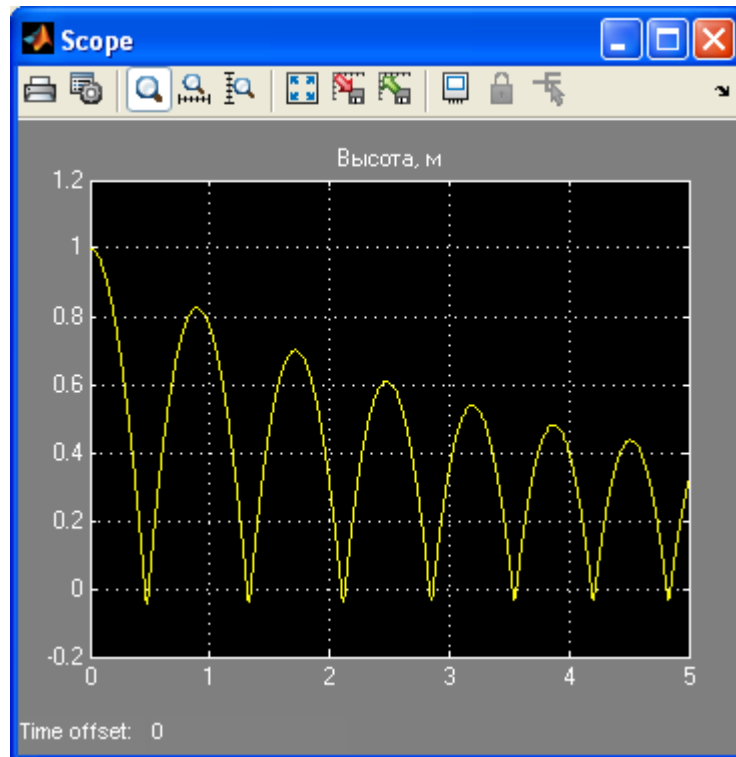
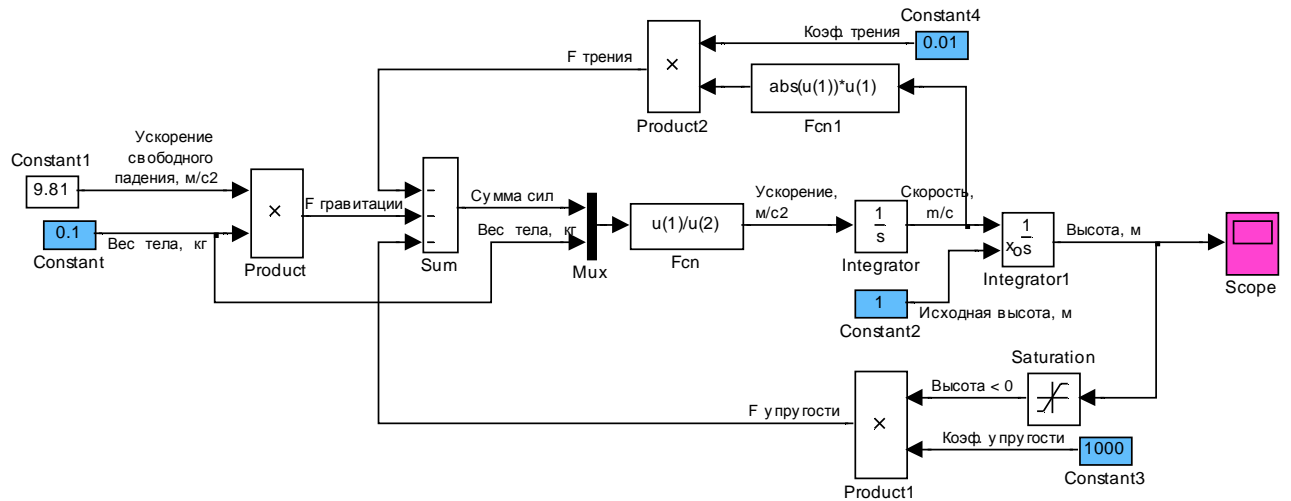


Видно, что полет с отскоками не затухает. Процесс не теряет энергию. Эта модель не соответствует часто наблюдаемым скачкам мяча. Добавим в список новое отношение:

- Сила трения мяча о воздух пропорциональна квадрату скорости мяча.

5. Дополните модель блоками описывающими трение мяча о воздух и проверьте работу доработанной модели. Подберите коэффициент трения при котором мяч взлетает на 80% исходной высоты.

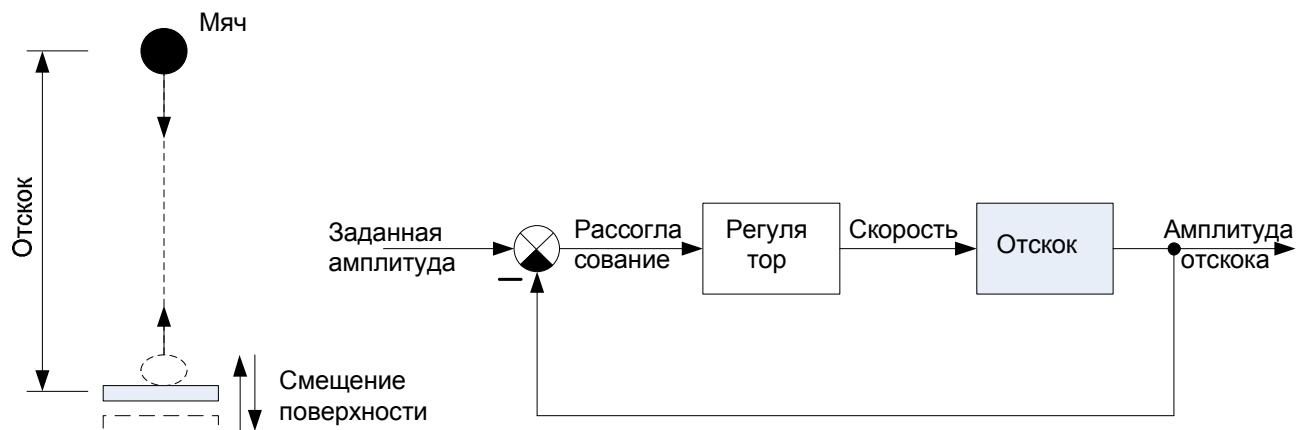




Этот полет мяча наиболее полно соответствует условиям задачи. В дальнейшем, параметры модели можно уточнять по экспериментальным данным.

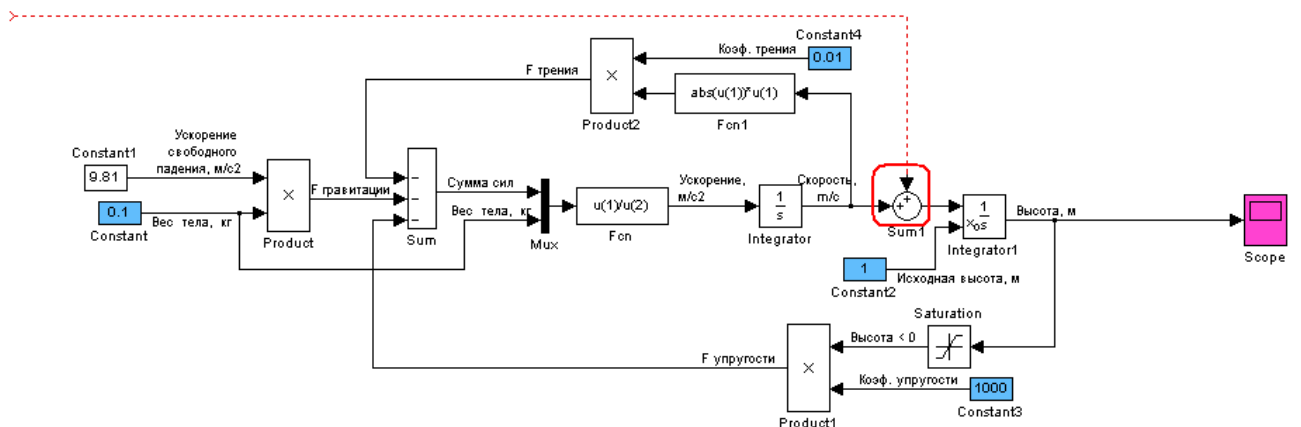
### Задание 3. Построение модели управления стабилизацией амплитуды отскока мяча.

Для поддержания заданной амплитуды отскока мяча можно организовать управление смещением поверхности отскока перпендикулярно падению мяча в зависимости от амплитуды отскока.

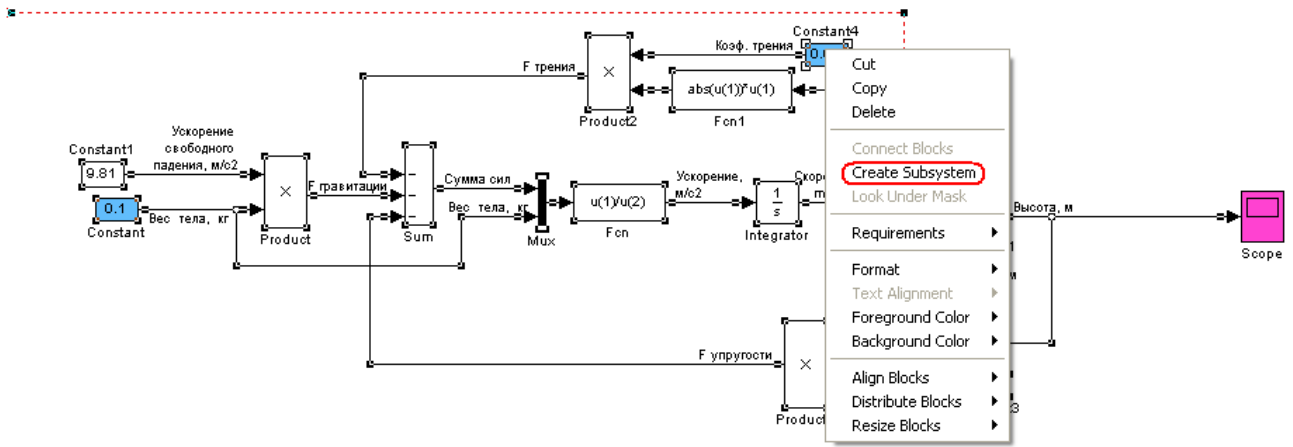


**Рис. 4.** Полет мяча с отскоком (слева) и контур управления амплитудой отскока (справа).

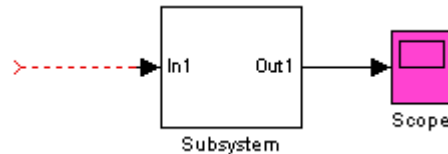
1. Сохраните модель движения мяча предыдущего задания под новым именем.
2. Включите в модель сумматор и канал дополнительной скорости:



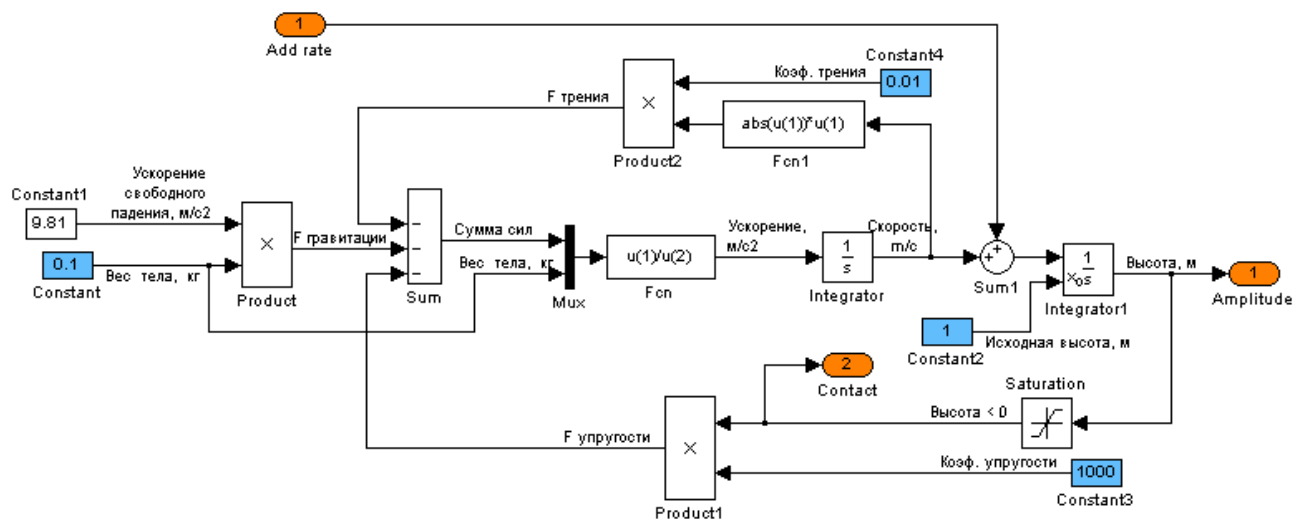
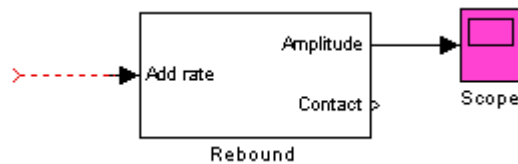
3. Выделите оконтуриванием блоки модели не включая блок Scope и канал дополнительной скорости (красная штрих-пунктирная линия) и создайте подсистему командой ПКМ **Create Subsystem**.



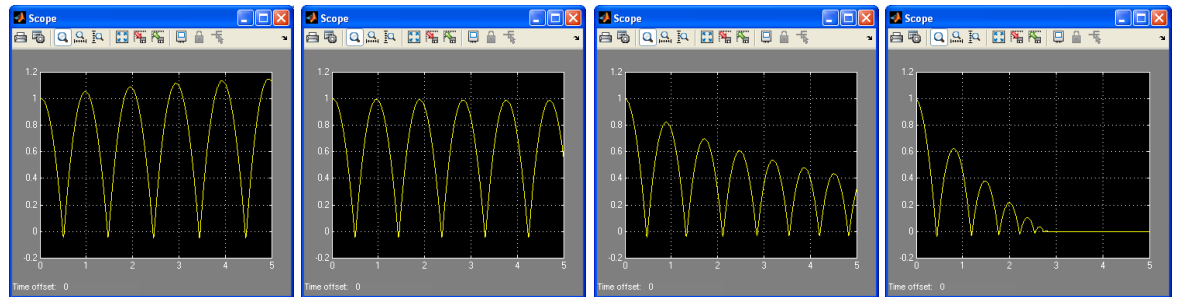
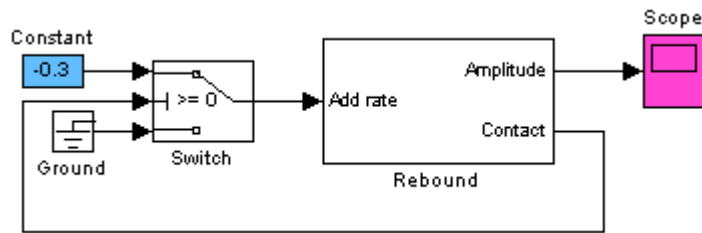
Должен получиться следующий блок подсистемы (Subsystem):



- Добавьте в подсистему порт для вывода информации о контакте мяча с поверхностью, измените названия подсистемы и портов и цветовую окраску портов.

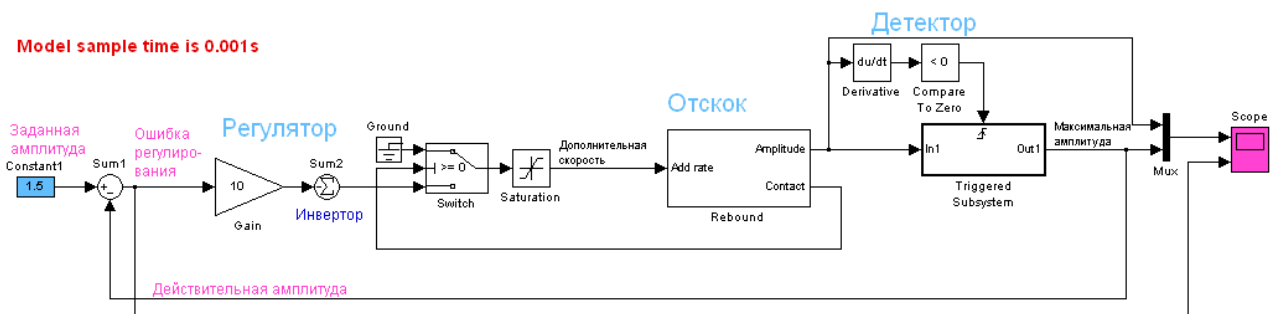


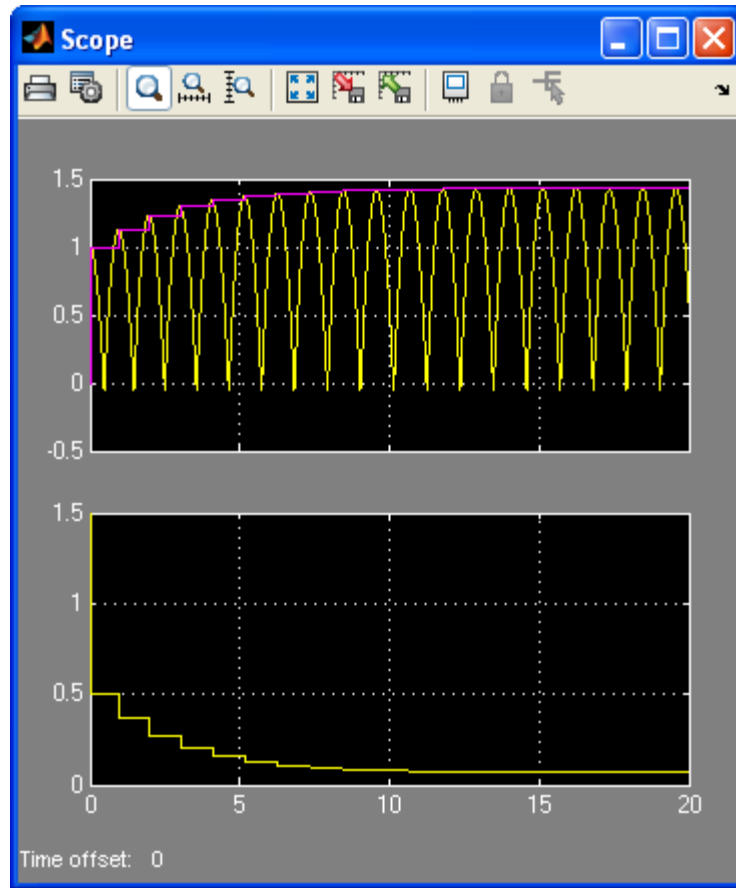
- Изменяя относительную скорость мяча во время контакта (вход Add rate подсистемы отскок (Rebound)) убедитесь, что амплитуда отскока зависит от входного воздействия подсистемы и через такое воздействие можно управлять отскоком.



**Рис. 5.** Зависимость отскока от дополнительной скорости контакта мяча при  $-0.3$ ,  $-0.23$ ,  $0$  и  $0.3$  м/сек. Через дополнительную скорость контакта мяча можно увеличивать и уменьшать амплитуду отскоков мяча.


6. Постройте контур управления и подберите структуру и коэффициенты регулятора обеспечивающего устойчивость контура управления амплитудой отскоков мяча.

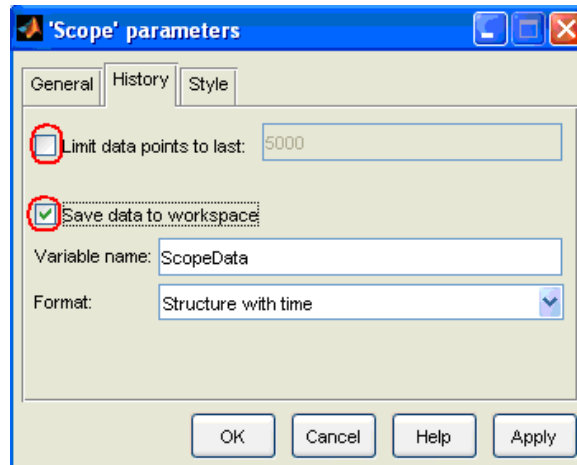




**Рис. 6.** Результат управления амплитудой отскоков мяча.

**Задание 4.** Отображение сигналов модели Simulink средствами МатЛАБ.

1. Откройте окно графика блока **Scope** модели предыдущего задания.
2. Нажатием на кнопку  меню откройте окно параметров блока Scope.
3. Установите соответствующие параметры закладки **History**:



4. Запустите модель и найдите наблюдаемые параметры (структура **ScopeData**) в рабочей



области МатЛАБ (**workspace**)

5. Сохраните данные моделирования в **mat** файле с именем, например, **ball**.


> save ('ball','ScopeData')

6. Очистите workspace: >**clear all**

7. Откройте редактор m-файла: **меню МатЛАБ > File > New > Script**

8. Создайте программу отображения данных моделирования хранящиеся в ball.mat файле.

```
filename = 'ball';
load(filename);
time = ScopeData.time;
amplitude = ScopeData.signals(1).values(:,1);
peak = ScopeData.signals(1).values(:,2);
error = ScopeData.signals(2).values;
figure
plot(time, amplitude, 'b', 'linewidth',2);
hold on
plot(time, peak, 'r', 'linewidth',2);
hold on
plot(time, error, 'm', 'linewidth',1);
grid on
legend('Height','Peak', 'Error');
xlabel('Time, sec');
ylabel('Height [m], Peak [m], Error [m]');
title('Ball control parameters against Time');
```

9. Запустите скрипт на выполнение командой . Наблюдайте построенные графики.

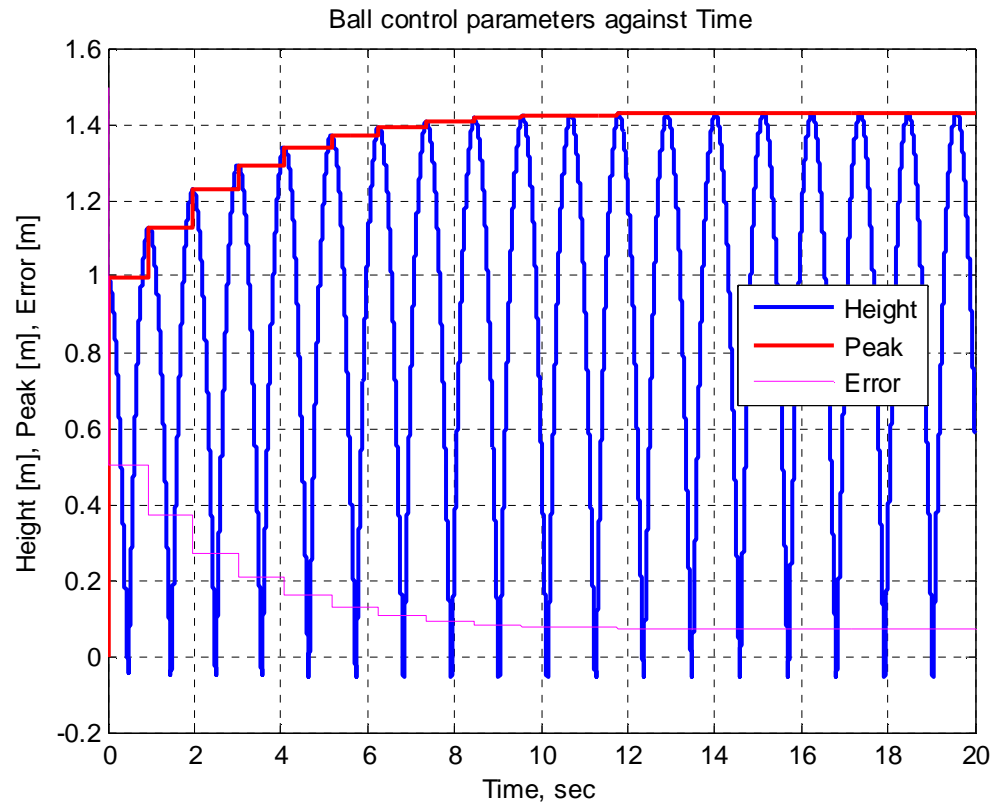


Рис. 7. Результат моделирования управления амплитудой отскока мяча.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как запустить пакет Simulink?
2. Как создать модель?
3. Как передать результаты моделирования в рабочую область МатЛАБ?
4. Как задать параметры и метод моделирования?
5. Какое расширение имеют файлы Simulink модели?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Help МатЛАБ.
2. Dr. Bob Davidov. Компьютерные технологии управления в технических системах  
<http://portalnp.ru/author/bobdavidov>