

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

«Моделирование систем с нелинейными блоками в MatLab»

1. Цель работы: Познакомиться с работой нелинейных элементов, входящих в состав систем управления, промоделировать работу элементов в среде Simulink математического пакета MatLab.

2. Теоретическая часть.

Первым приближением описания системы автоматического управления является линейная математическая модель, которая обычно строится в виде системы линейных дифференциальных или разностных уравнений. Решение таких уравнений зачастую может быть получено в аналитическом виде, что облегчает анализ системы управления и синтез регулятора.

Многие системы управления содержат, однако, нелинейные звенья. В этом случае *применение линейной теории приводит к неточным или принципиально неверным результатам*. В нелинейных системах обнаруживаются типы движений (например, автоколебания), которые не могут быть описаны в рамках линейной теории.

Для исследования нелинейных систем может применяться линеаризация или методы анализа нелинейных систем.

В данной работе рассматривается работа основных типов нелинейностей, реализуемых в среде Simulink математического пакета MatLab.

3. Обзор работы нелинейных блоков в среде Simulink

Все рассматриваемые в данном разделе элементы представлены в виде отдельных блоков в библиотеке Discontinuities в среде Simulink.

3.1. Блок ограничения Saturation

Назначение: Выполняет ограничение величины сигнала.

Параметры:

1. **Upper limit** - Верхний порог ограничения.
2. **Lower limit** - Нижний порог ограничения.
3. **Treat as gain when linearizing (флажок)** - Трактовать как усилитель с коэффициентом передачи равным 1 при линеаризации.

Выходной сигнал блока равен входному если его величина не выходит за порог ограничения. По достижении входным сигналом уровня ограничения выходной сигнал блока перестает изменяться и остается равным порогу. На рис. 7.1 показан пример использования блока для ограничения синусоидального сигнала. На рисунке приводятся временные диаграммы сигналов и зависимость выходного сигнала блока от входного.

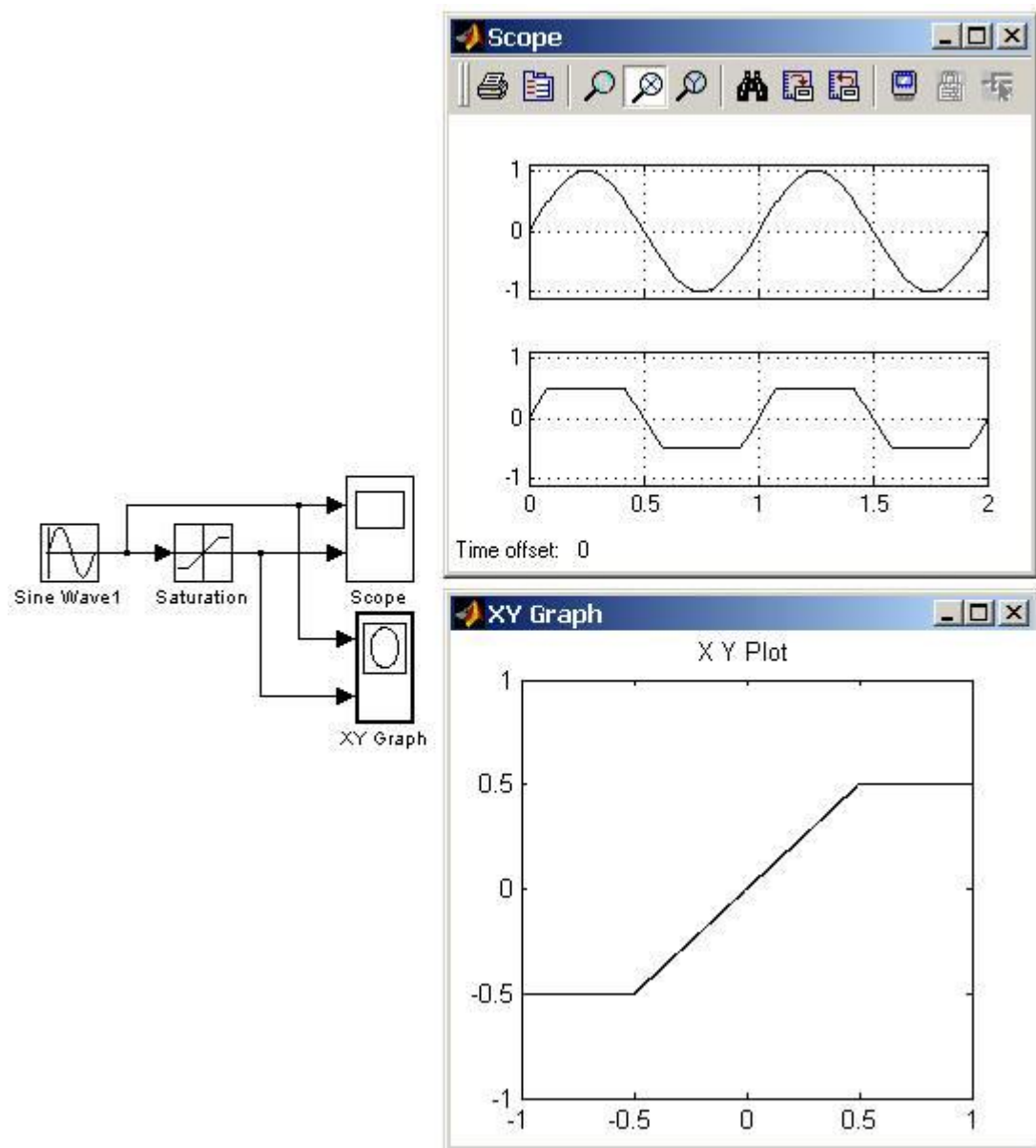


Рис. 7.1. Пример использования блока **Saturation**

3.2. Блок с зоной нечувствительности **Dead Zone**

Назначение: Реализует нелинейную зависимость типа "зона нечувствительности".

Параметры:

1. **Start of dead zone** - Начало зоны нечувствительности (нижний порог).
2. **End of dead zone** - Конец зоны нечувствительности (верхний порог).
3. **Saturate on integer overflow (флажок)** - Подавлять переполнение целого. При установленном флажке ограничение сигналов целого типа выполняется корректно.
4. **Treat as gain when linearizing (флажок)** - Трактовать как усилитель с коэффициентом передачи равным 1 при линеаризации.

Выходной сигнал блока вычисляется в соответствии со следующим алгоритмом:

- Если величина входного сигнала находится в пределах зоны нечувствительности, то выходной сигнал блока равен нулю.

- Если входной сигнал больше или равен верхнему входному порогу зоны нечувствительности, то выходной сигнал равен входному минус величина порога.
- Если входной сигнал меньше или равен нижнему входному порогу зоны нечувствительности, то выходной сигнал равен входному минус величина порога.

На рис. 7.2 показан пример использования блока **Dead Zone**

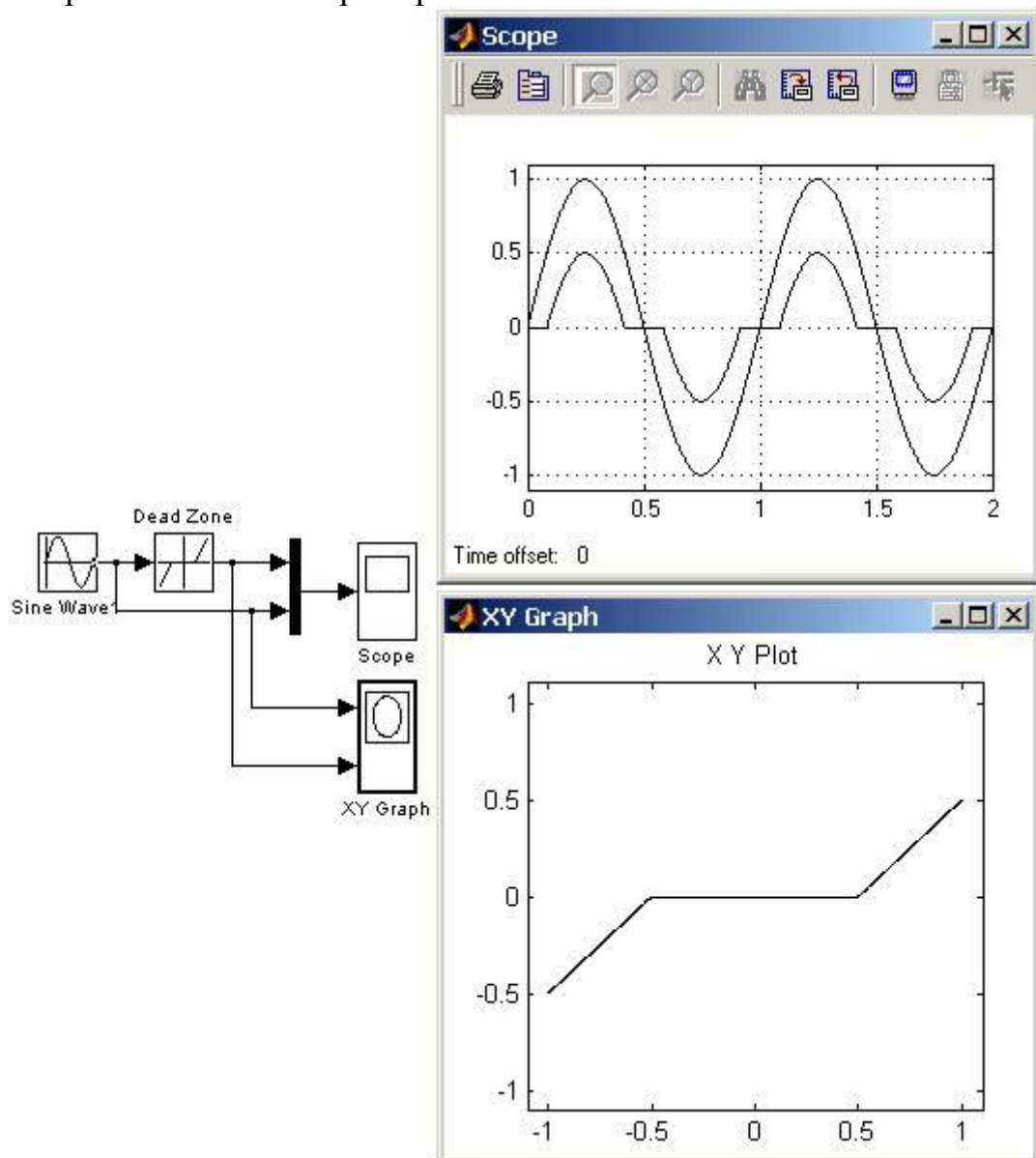


Рис. 7.2. Пример использования блока **Dead Zone**

3.3. Релейный блок Relay

Назначение: Реализует релейную нелинейность.

Параметры:

1. **Switch on point** - Порог включения. Значение, при котором происходит включение реле.
2. **Switch off point** - Порог выключения. Значение, при котором происходит выключение реле.

3. **Output when on** - Величина выходного сигнала во включенном состоянии.
4. **Output when off** - Величина выходного сигнала в выключенном состоянии.

Выходной сигнал блока может принимать два значения. Одно из них соответствует включенному состоянию реле, второе - выключенному. Переход из одного состояния в другое происходит скачком при достижении входным сигналом порога включения или выключения реле. В том случае если пороги включения и выключения реле имеют разные значения, то блок реализует релейную характеристику с гистерезисом. При этом значение порога включения должно быть больше, чем значение порога выключения.

На рис. 7.3 показан пример использования блока Relay. На временных диаграммах видно, что включение реле происходит при достижении входным сигналом величины 0.5, а выключение при - 0.5.

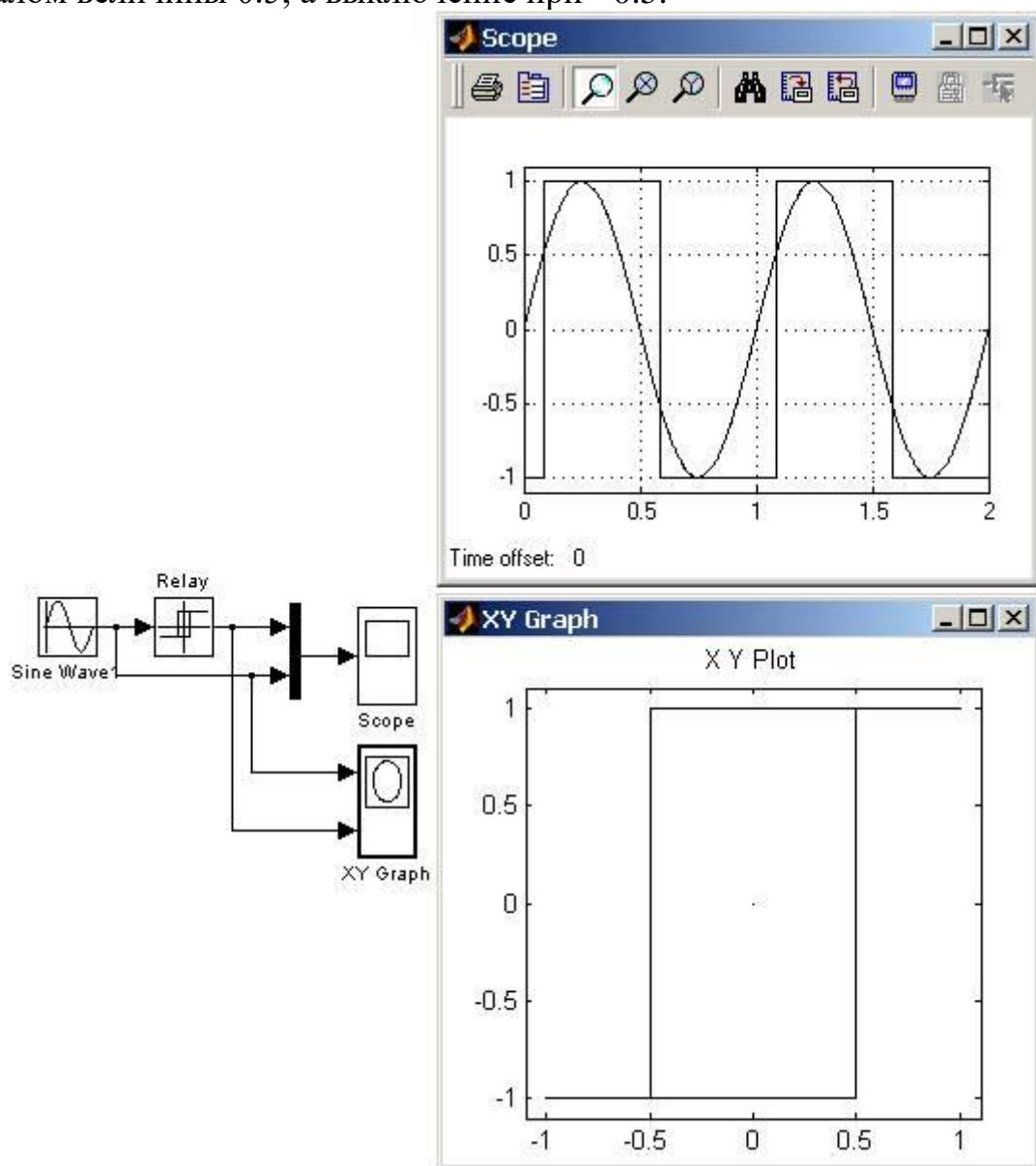


Рис. 7.3. Пример использования блока **Relay**

3.4. Блок ограничения скорости изменения сигнала Rate Limiter

Назначение: Блок обеспечивает ограничение скорости изменения сигнала (первой производной).

Параметры:

1. **Rising slew rate** - Уровень ограничения скорости при увеличении сигнала.
2. **Falling slew rate** - Уровень ограничения скорости при уменьшении сигнала.

Вычисление производной сигнала выполняется по выражению:

$$rate = \frac{y_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}},$$

где y_i – значение входного сигнала на текущем шаге,

t_i – значение модельного времени на текущем шаге,

x_{i-1} – значение выходного сигнала на предыдущем шаге,

t_{i-1} – значение модельного времени на предыдущем шаге.

Вычисленное значение производной сравнивается со значениями уровней ограничения скорости Rising slew rate и Falling slew rate. Если значение производной больше, чем значение параметра Rising slew rate, то выходной сигнал блока вычисляется по выражению:

$$x_i = \Delta t \cdot R + x_{i-1},$$

где R – уровень ограничения скорости при увеличении сигнала.

Если значение производной меньше, чем значение параметра Falling slew rate, то выходной сигнал блока вычисляется по выражению:

$$x_i = \Delta t \cdot F + x_{i-1},$$

где F – уровень ограничения скорости при уменьшении сигнала.

Если значение производной лежит в пределах между нижним и верхним уровнями ограничения, то выходной сигнал блока равен входному:

$$x_i = y_i.$$

На рис. 7.4 показан пример использования блока Rate Limiter, при подаче на его вход прямоугольного периодического сигнала.

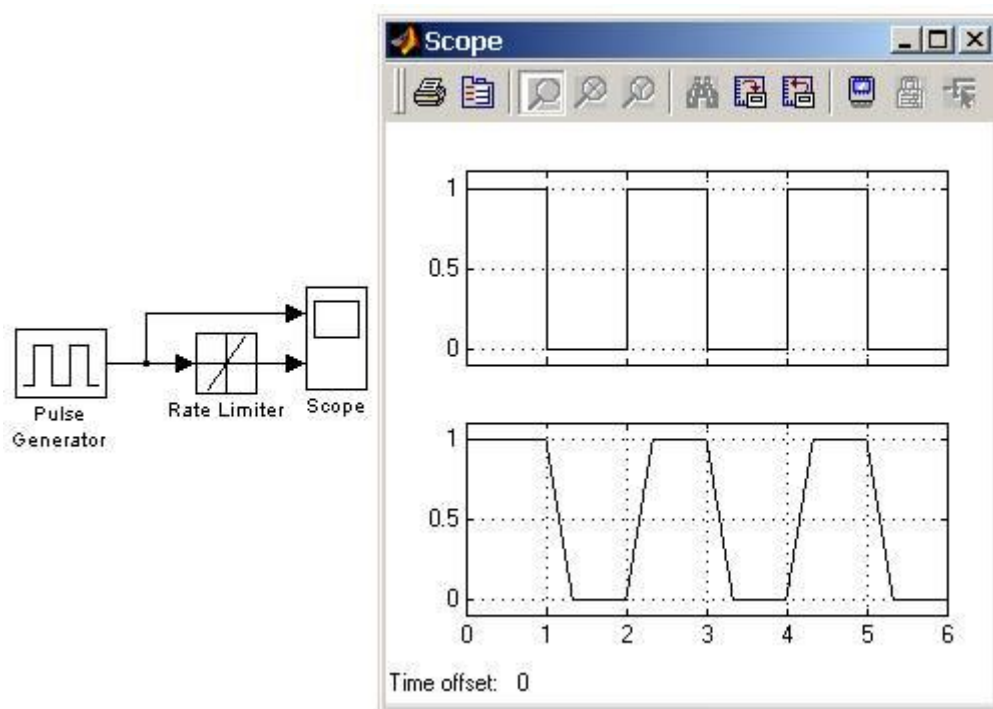


Рис. 7.4. Пример использования блока **Rate Limiter**

3.5. Блок квантования по уровню **Quantizer**

Назначение: Блок обеспечивает квантование входного сигнала с одинаковым шагом по уровню.

Параметры:

Quantization interval - шаг квантования по уровню.

На рис. 7.5 показан пример использования блока **Quantizer**, выполняющего квантование по уровню синусоидального сигнала. Шаг квантования задан равным 0.5.

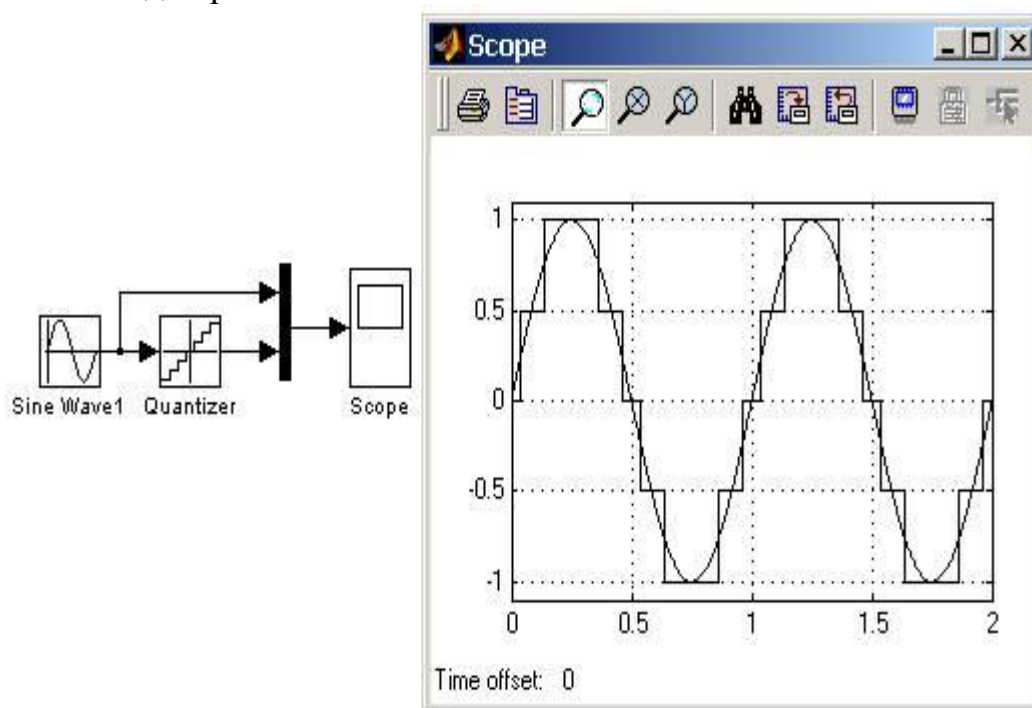


Рис. 7.5. Пример использования блока **Quantizer**

3.6. Блок многовходового переключателя **Multiport Switch**

Назначение: Выполняет переключение входных сигналов по сигналу управления, задающему номер активного входного порта.

Параметры:

Number of inputs – Количество входов.

Блок многовходового переключателя **Multiport Switch**, пропускает на выход сигнал с того входного порта, номер которого равен текущему значению управляющего сигнала. Если управляющий сигнал не является сигналом целого типа, то блок **Multiport Switch** производит отбрасывание дробной части числа, при этом в командном окне **Matlab** появляется предупреждающее сообщение.

На рис. 7.6 показан пример работы блока **Multiport Switch**. Управляющий сигнал переключателя имеет три уровня и формируется с помощью блоков **Constant**, **Step**, **Step1** и **Sum**. На выход блока **Multiport Switch**, в зависимости от уровня входного сигнала, проходят гармонические сигналы, имеющие разные частоты.

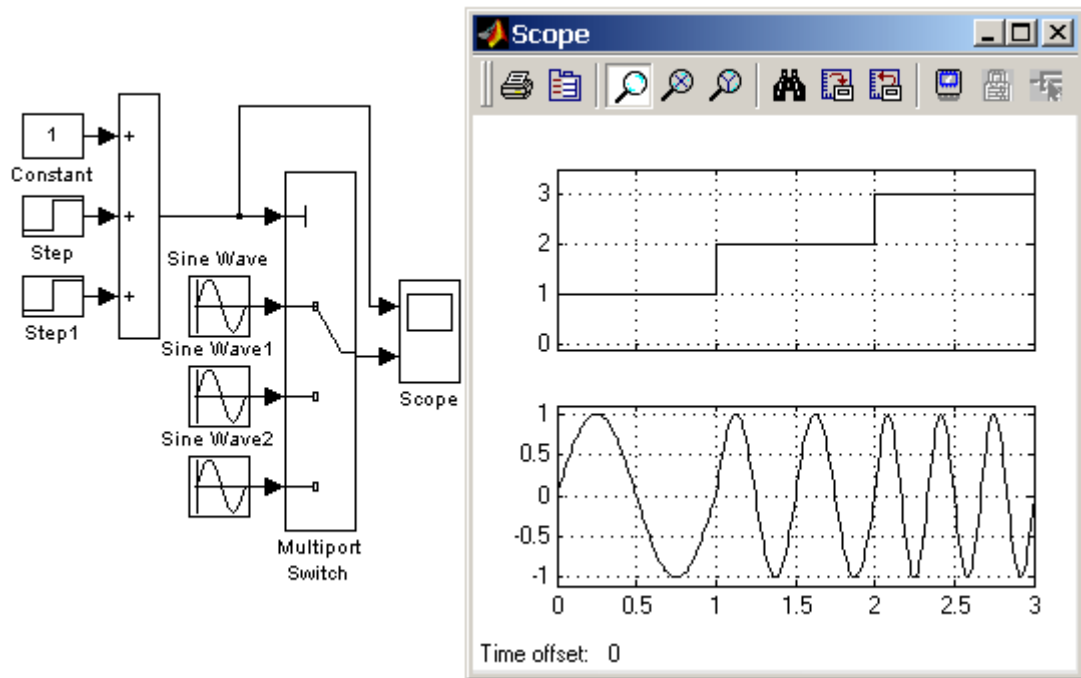


Рис. 7.6. Применение переключателя **Multiport Switch**

Количество входов блока **Multiport Switch** можно задать равным 1. В этом случае на вход блока необходимо подать векторный сигнал, а сам блок будет пропускать на выход тот элемент вектора, номер которого совпадает с уровнем управляющего сигнала.

На рис. 7.7 показан пример использования блока **Multiport Switch** при векторном сигнале. Временные диаграммы работы для данного примера совпадают с рассмотренными в предыдущем примере.

Также среди нелинейных элементов имеются нелинейности типа люфт, сухое/вязкое трение, ручной переключатель и другие.

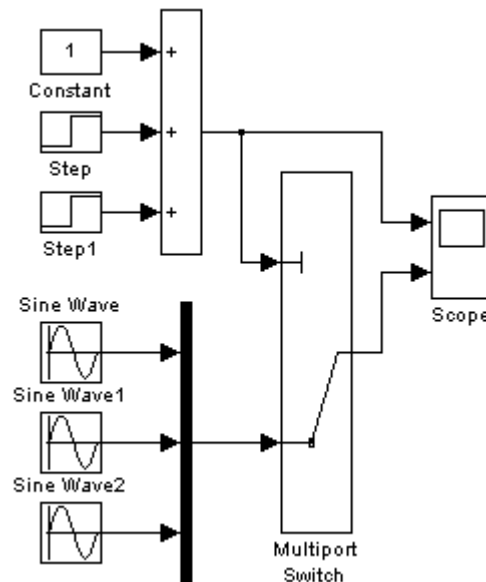


Рис. 7.7. Применение переключателя **Multiport Switch** при векторном входном сигнале

4. Ход выполнения работы

4.1. Для схемы моделирования системы, представленной на рис. 7.8 записать выражение передаточной функции разомкнутой системы, определить коэффициенты числителя и знаменателя.

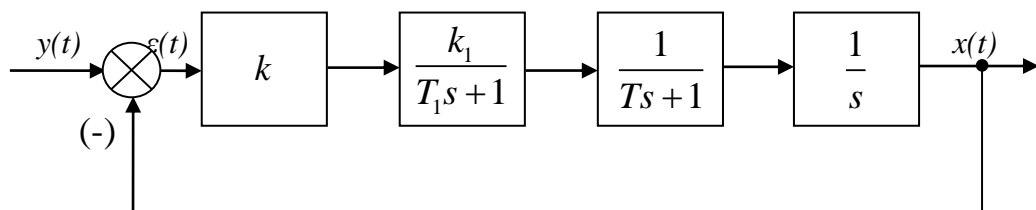


Рис. 7.8. Структурная схема линейной системы автоматического управления

В системе на рис. 7.8 передаточная функция системы в прямой цепи определяется, как произведение передаточных функций последовательно соединенных звеньев

$$W_{\Pi}(s) = k \cdot \frac{k_1}{T_1 s + 1} \cdot \frac{1}{T s + 1} \cdot \frac{1}{s} = \frac{k \cdot k_1}{T_1 \cdot T \cdot s^3 + (T_1 + T)s^2 + s}.$$

Передаточная функция системы, замкнутой отрицательной единичной обратной связью, определяется по следующему выражению

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{W_{\Pi}(s)}{1 + W_{\Pi}(s) \cdot 1} = \frac{\frac{k \cdot k_1}{T_1 \cdot T \cdot s^3 + (T_1 + T)s^2 + s}}{1 + \frac{k \cdot k_1}{T_1 \cdot T \cdot s^3 + (T_1 + T)s^2 + s}} = \\ &= \frac{k \cdot k_1}{T_1 \cdot T \cdot s^3 + (T_1 + T)s^2 + s + k \cdot k_1}. \end{aligned}$$

4.2. Установите значение постоянной времени T , равное 0,5. Установите значение коэффициента усиления k , равное 1. Значения коэффициентов T_1 и k_1 выбрать из таблиц 7.1 и 7.2 соответственно по вариантам заданий.

Таблица 7.1.

Варианты задания

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T_1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T_1	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
№	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
T_1	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4

Таблица 7.2.

Варианты задания

Группа	ИУ8-41	ИУ8-42	ИУ8-43	ИУ8-44	ИУ8-45	ИУ8Ц-61
k_1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7

4.3. Запустить среду моделирования Simulink, для этого в командном окне Matlab ввести команду
`simulink`

Дождаться загрузки среды моделирования. Создать новую модель, выбрав команду меню File -> New -> Model.

4.4. Собрать структурную схему контура линейной непрерывной системы, как показано на рис. 7.9. В апериодическое звено подставить значения коэффициентов в соответствии с заданием по вариантам. Схему скопировать в отчет (Edit -> Copy Current View to Clipboard -> Metafile).

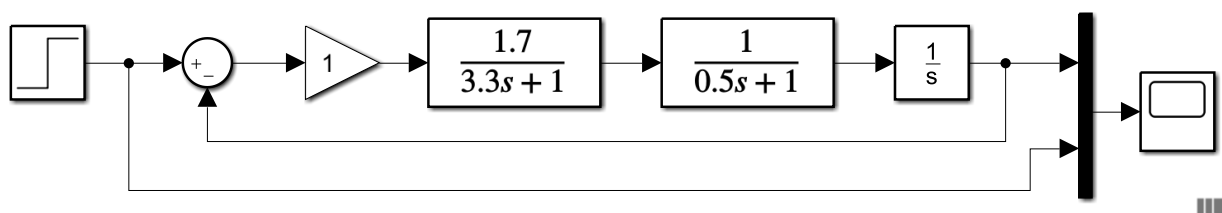


Рис. 7.9. Схема линейной непрерывной системы

Двойным щелчком открыть блок Step и изменить параметр Step Time на 0, чтобы единичная ступенчатая функция начиналась в 0 секунд.

Для моделирования работы системы нажать на кнопку Run на панели инструментов (треугольник на зеленом круге).

Двойным щелчком открыть осциллограф Scope и нажать кнопку Autoscale на панели инструментов для автоматического масштабирования графика.

Если переходной процесс еще не устанавливается, увеличить время моделирования, для этого на панели инструментов модели увеличить время моделирования (с 10.0 на, например, 40.0). Подобрать время моделирования

таким образом, чтобы колебания устанавливались. Затем произвести новое моделирование, открыть осциллограф и произвести автомасштабирование.

Настроить цвета графика для удобства копирования в отчет аналогично настройкам в лабораторной работе № 6. Для этого на панели инструментов рисунка нажать кнопку стрелку рядом с кнопкой Parameters (кнопка с иконкой в виде шестеренки). Перейти во вкладку Style. Выбрать цвет рисунка (Figure color) белый, цвет фона рисунка (Axes background color) белый и цвет самих осей (Ticks, labels and grid colors) черный. Для линии № 1 на графике выбрать толщину 2.0 и цвет синий, для линии № 2 на графике выбрать толщину 2.0 и цвет зеленый. Применить изменения. В результате должен получиться переходной процесс и ступенчатый сигнал, подобные представленным на рис. 7.10. График скопировать в отчет (File -> Copy to Clipboard).

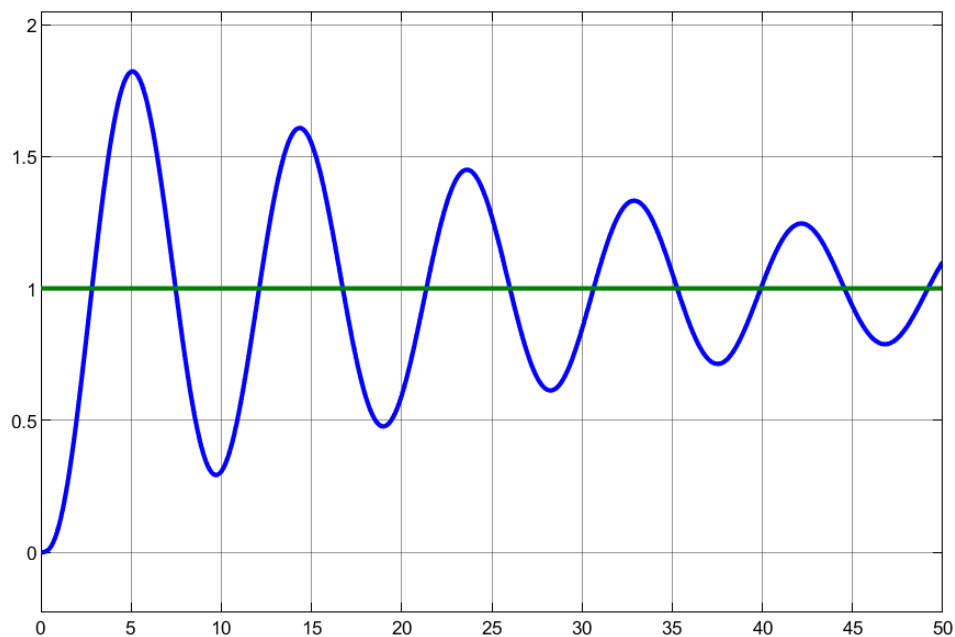


Рис. 7.10. Переходной процесс линейной непрерывной системы

4.5. Добавить к схеме нелинейный блок типа ограничение (Saturation) и блок XYGraph из библиотеки Sinks, а также два блока Constant из библиотеки Commonly Used Blocks, как показано на рис. 7.11. Открыть двойным щелчком блок Saturation, установить значения ограничений верхнего порога Upper limit 1.1 и нижнего порога Lower limit 0.9. Значения констант задать, равными значениям пороговых ограничений.

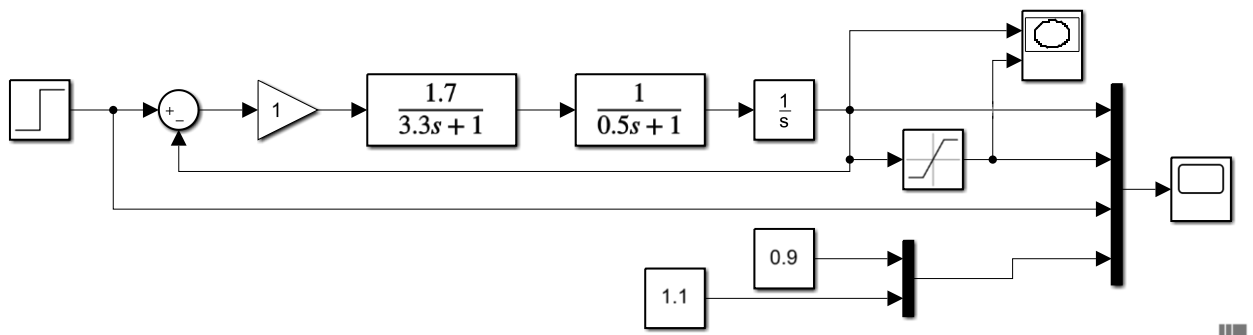


Рис. 7.11. Схема с нелинейным элементом типа ограничение

Открыть двойным щелчком блок XYGraph, установить значения x-max и y-max, равные 2. Промоделировать работу системы. Настроить цвет третьей линии на графике зеленым и толщину линии 2, настроить цвет второй линии на графике красным и толщину линии 2, для четвертой и пятой линии задать цвет черный, тип линии – штриховой, толщину, равной 0,75.

Схему скопировать в отчет.

В результате моделирования должен получиться график, аналогичный представленному на рис. 7.12. Нелинейный сигнал повторяет непрерывный сигнал в диапазоне между пороговыми значениями ограничений.

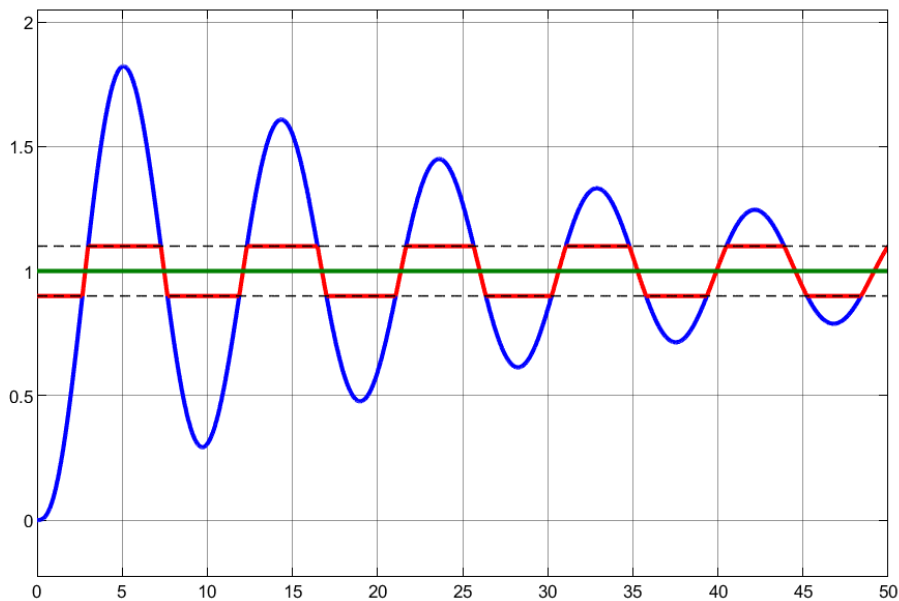


Рис. 7.12. Результаты работы схемы с нелинейным элементом типа ограничение

В окне XYGraph построена характеристика работы нелинейного блока типа ограничение, как показано на рис. 7.13. Скопировать ее в отчет.

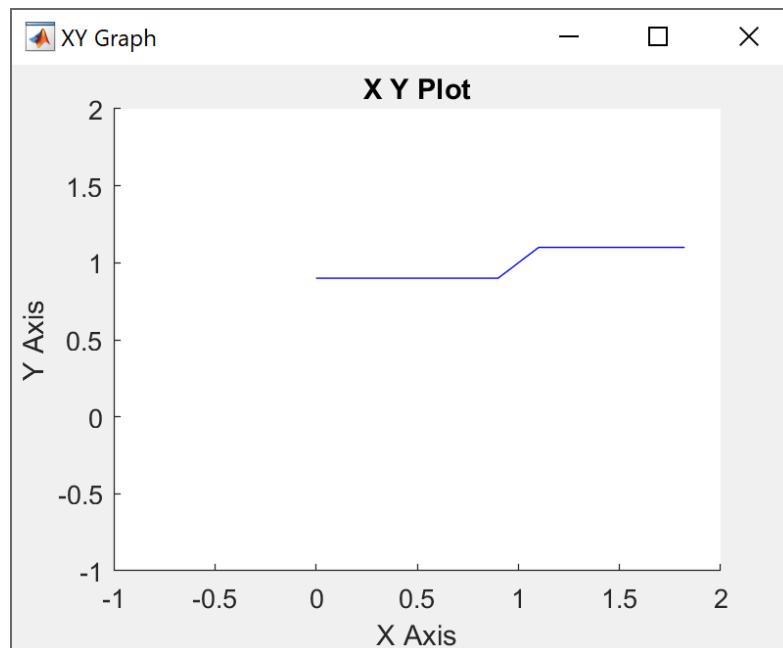


Рис. 7.13. Фазовый портрет работы нелинейного блока типа ограничение

4.6. Заменить на схеме нелинейный блок типа ограничение (Saturation) на блок типа зона нечувствительности (Dead zone), как показано на рис. 7.14.

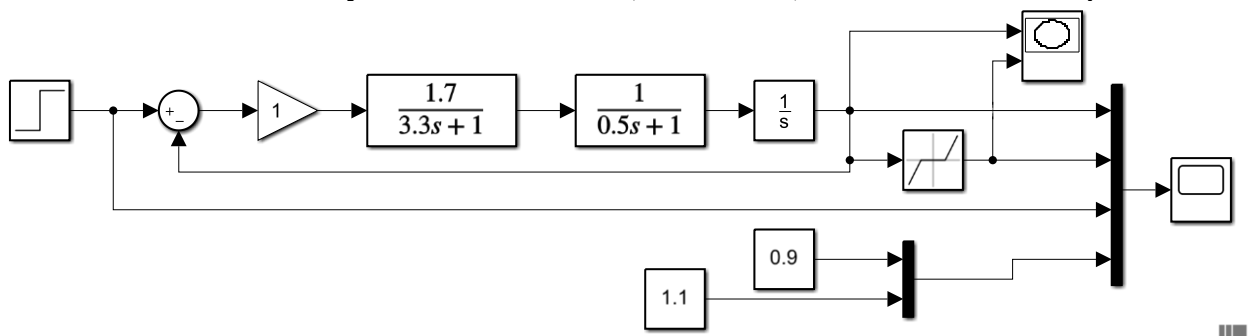


Рис. 7.14. Схема с элементом типа зона нечувствительности

Открыть двойным щелчком блок Dead Zone, установить значения ограничений Start of Dead Zone 0.9 и End of Dead Zone 1.1.

Схему скопировать в отчет.

Промоделировать работу системы. В результате должен получиться график, аналогичный представленному на рис. 7.15. Нелинейный сигнал внутри зоны нечувствительности для системы не существует, внутри нее сигнал равен нулю. Сигнал выше зоны откладывается выше нуля, ниже зоны – ниже.

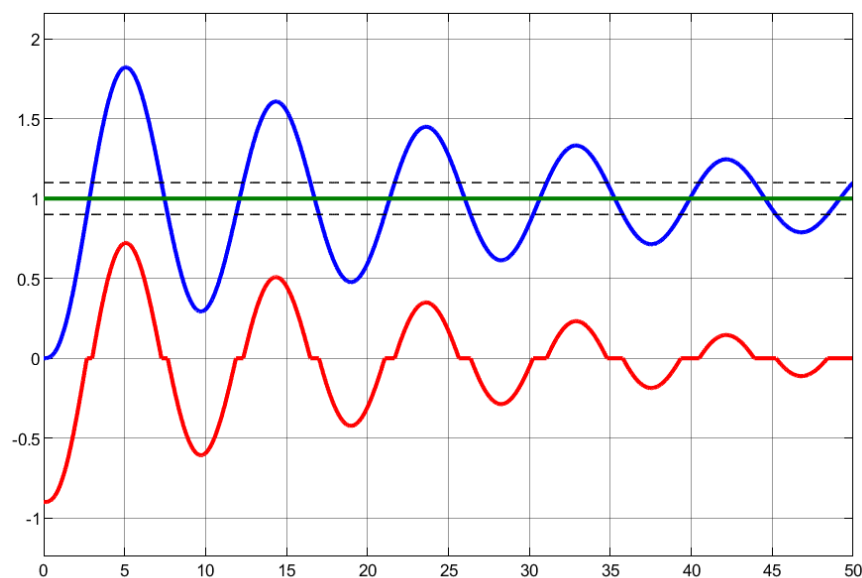


Рис. 7.15. Результаты работы схемы с нелинейностью типа зона нечувствительности

В окне XYGraph построена характеристика работы нелинейного блока типа зона нечувствительности, как показано на рис. 7.16. Скопировать ее в отчет.

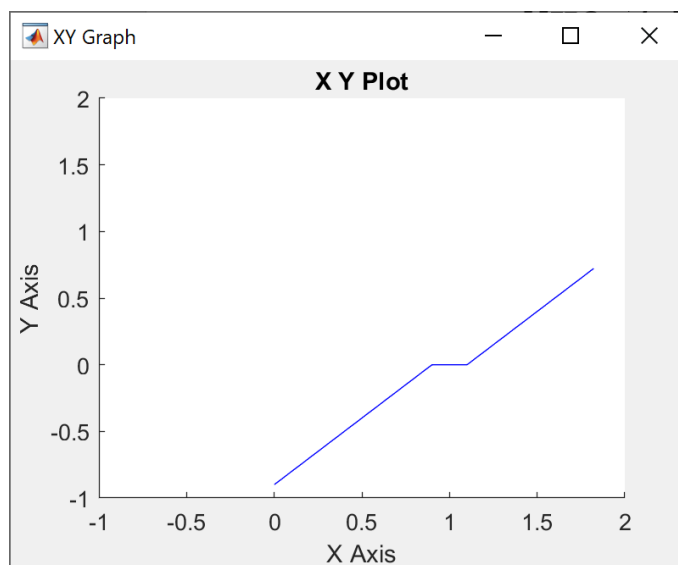


Рис. 7.16. Фазовый портрет работы нелинейного блока типа зона нечувствительности

4.7. Заменить на схеме нелинейный блок типа зона нечувствительности (Dead zone) на блок реле (Relay), как показано на рис. 7.17.

Открыть двойным щелчком блок Relay, установить значения ограничений Switch on point (порог включения) 1.1, Switch off point (порог выключения) 0.9, Output when on (Значение на выходе реле во включенном состоянии) 1.5, Output when off (Значение на выходе реле в выключенном состоянии) -0.5. Добавить значения констант, соответствующих включенному и выключенному состояниям релейного элемента.

Схему скопировать в отчет.

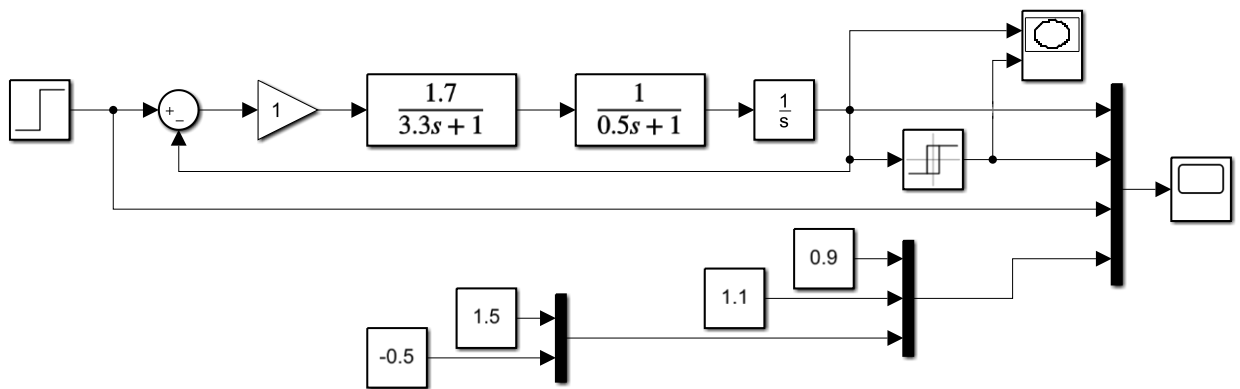


Рис. 7.17. Схема с нелинейным элементом типа реле

Промоделировать работу системы. В результате должен получиться график, аналогичный представленному на рис. 7.18. Реле переключается во включенное состояние, как только непрерывный сигнал достигает порога включения и, наоборот, переключается в выключенное состояние, как только достигает порога выключения.

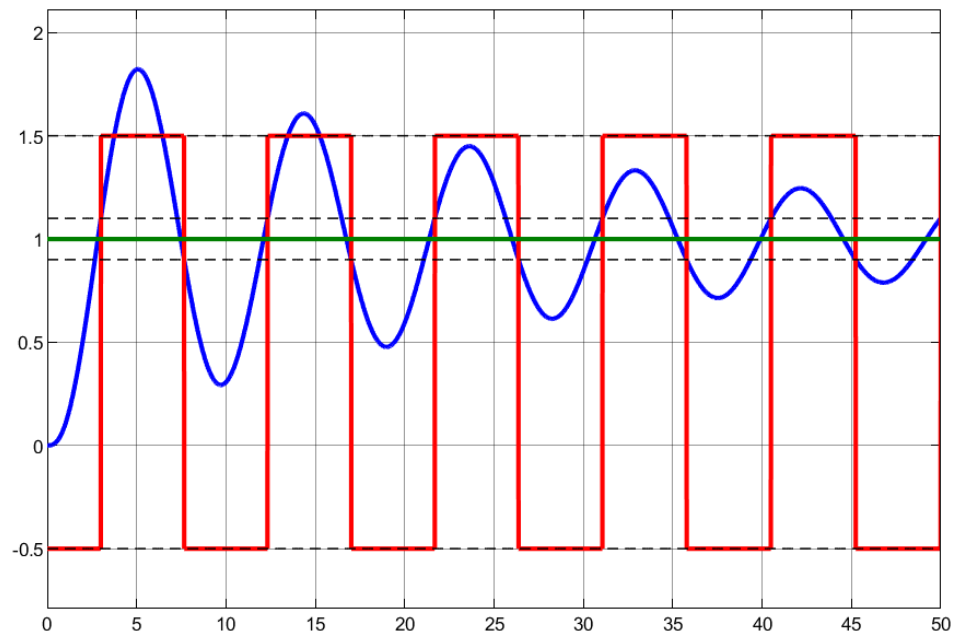


Рис. 7.18. Результаты работы схемы с релейным элементом

В окне XYGraph построена характеристика работы нелинейного блока типа реле, как показано на рис. 7.19. Скопировать ее в отчет.

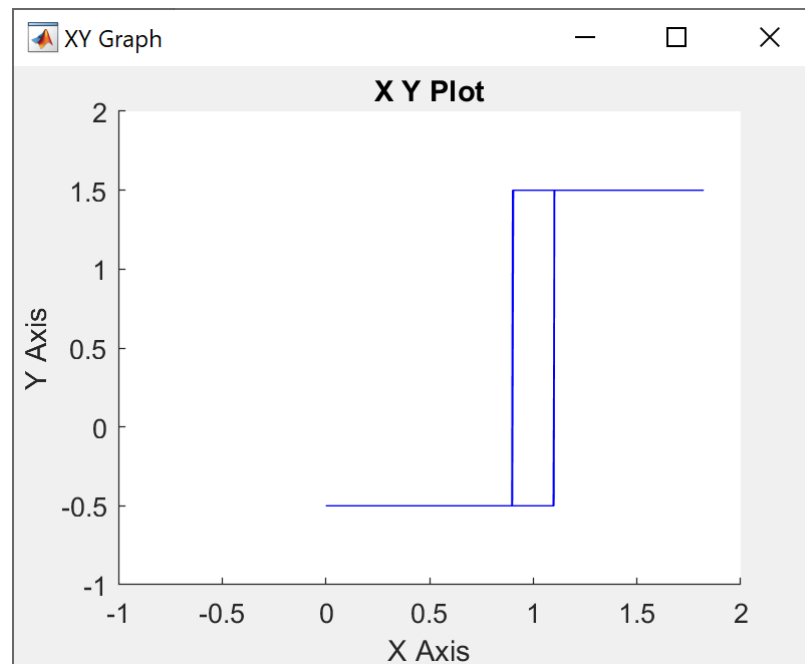


Рис. 7.19. Фазовый портрет работы нелинейного блока типа реле

4.8. Заменить на схеме нелинейный блок типа реле (Relay) на блок типа ограничение скорости (Rate Limiter), как показано на рис. 7.20. Открыть двойным щелчком блок Rate Limiter, установить значения ограничений Rising slew rate (порог скорости роста) 0.3, Falling slew rate (порог скорости убывания) -0.15. Добавить в схему два блока Ramp из библиотеки Sources, установить соответствующие значения углов наклона.

Схему скопировать в отчет.

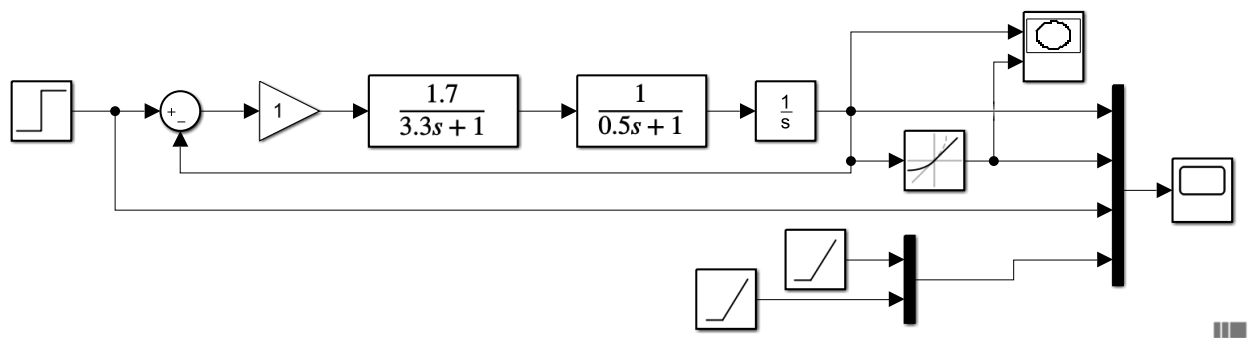


Рис. 7.20. Схема с элементом типа ограничение скорости

Промоделировать работу системы. В результате должен получиться график, аналогичный представленному на рис. 7.21. Воспользоваться масштабированием рисунка при необходимости. При достижении порога скорости роста или убывания сигнала на входе блока сигнал на выходе него движется по ограничению.

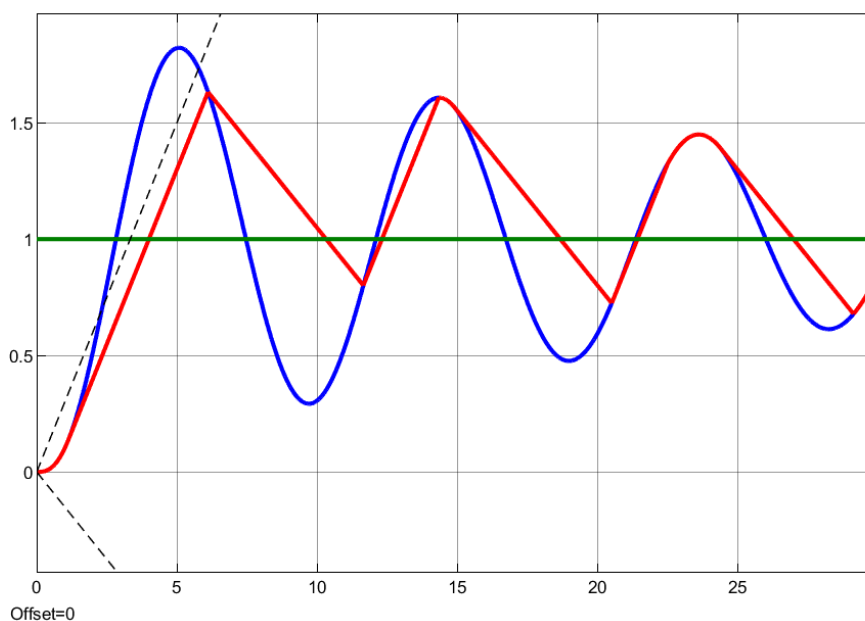


Рис. 7.21. Результаты работы схемы с нелинейным элементом типа ограничения скорости

В окне XYGraph построена характеристика работы нелинейного блока типа ограничение скорости, как показано на рис. 7.22. Скопировать ее в отчет.

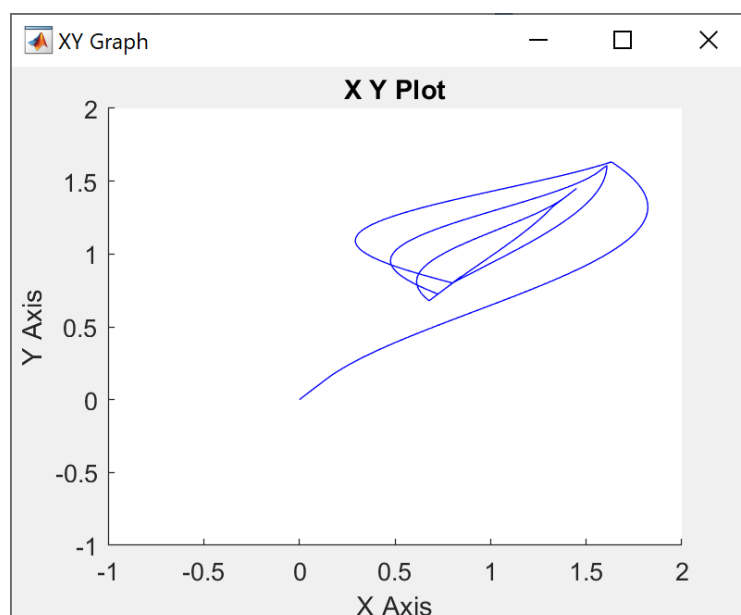


Рис. 7.22. Фазовый портрет работы нелинейного блока типа ограничение скорости

4.9. Заменить на схеме нелинейный блок типа ограничение скорости (Rate Limiter) на блок квантования по уровню сигнала (Quantizer), как показано на рис. 7.23. Удалить на схеме лишние элементы. Открыть двойным щелчком блок Quantizer, установить значения ограничений Quantization interval (шаг квантования сигнала) 0.2.

Схему скопировать в отчет.

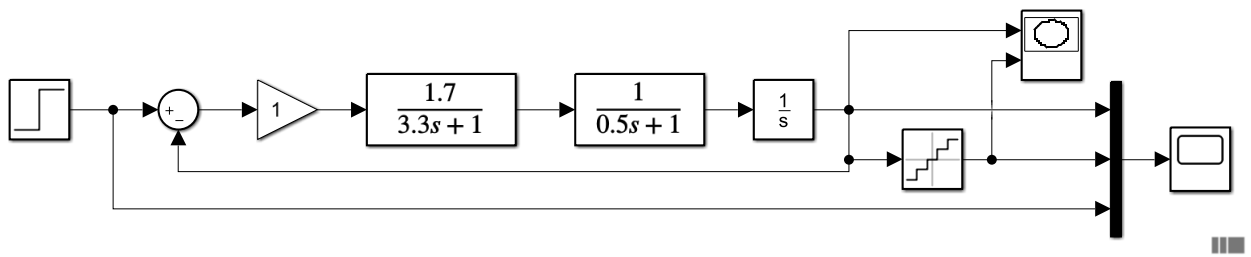


Рис. 7.23. Схема с нелинейным элементом типа квантование по уровню

Промоделировать работу системы. В результате должен получиться график, аналогичный представленному на рис. 7.24. При достижении непрерывным сигналом порога следующего уровня сигнал на выходе блока переходит на новый уровень.

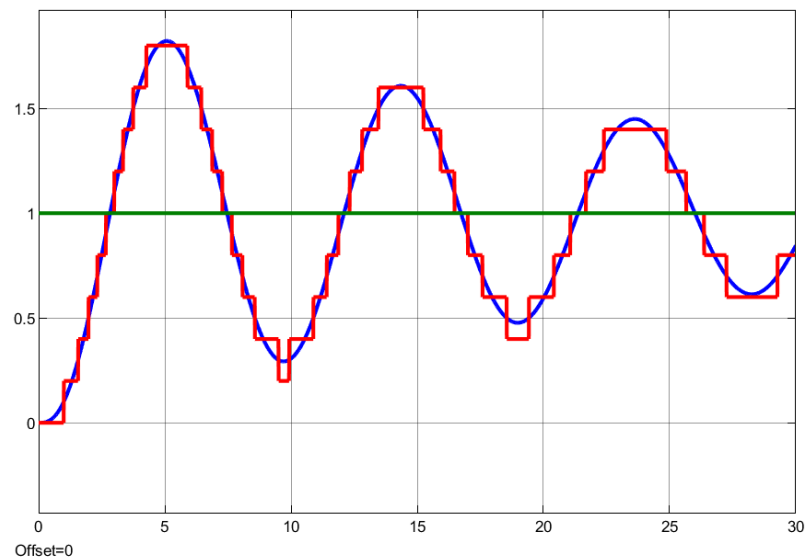


Рис. 7.24. Результаты работы схемы с нелинейным элементом типа квантование сигнала по уровню

В окне XYGraph построена характеристика работы нелинейного блока типа ограничение скорости, как показано на рис. 7.25. Скопировать ее в отчет.

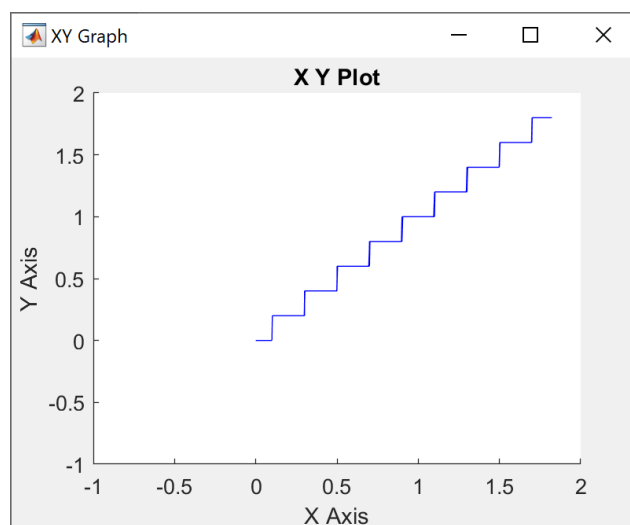


Рис. 7.25. Фазовый портрет работы нелинейного блока типа квантование сигнала по уровню

4.10. Собрать схему, как показано на рис. 7.26. Для этого использовать блоки Saturation (Upper Limit 1.1, Lower Limit 0.9), Dead Zone (Start of Dead Zone 0.9, End of Dead Zone 1.1) и Quantizer (Quantization interval 0.2) из библиотеки Discontinuities. Добавить сумматор, в настройках добавить новый знак + для подключения нового входа. Добавить осциллограф Scope. В трех новых блоках Step, выделенных красным цветом, задать время Step time, равным 0, 10 и 20 секунд соответственно. Добавить блок Multiport Switch (многопортовый переключатель) из библиотеки Signal Routing. Верхний порт используется в качестве управляющего входа. При подаче на управляющий порт уровня сигнала, равного 1, подключается вход №1, уровня 2 – вход №2, уровня 3 – вход №3, к которым подключены соответствующие типы нелинейностей.

Схему скопировать в отчет.

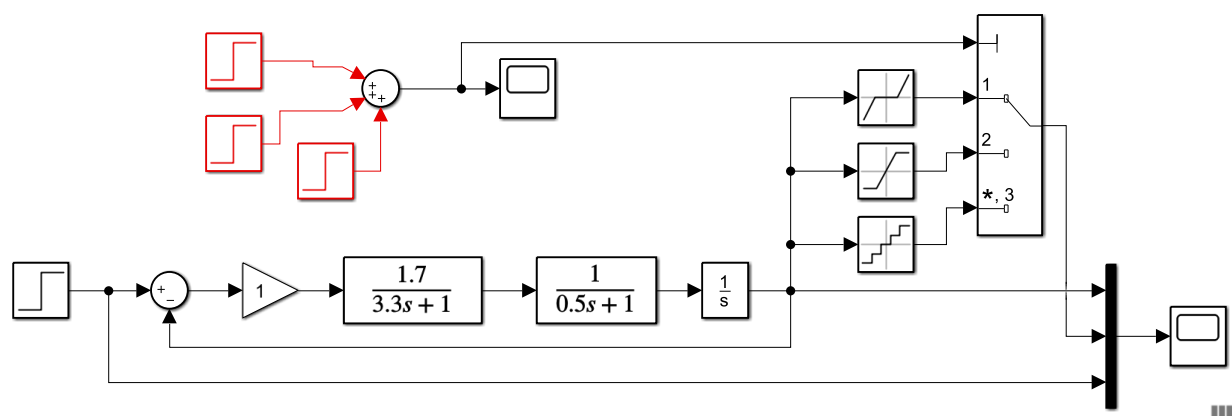


Рис. 7.26. Схема системы с тремя типами нелинейностей, с переключением типа нелинейности по времени

Промоделировать работу системы. В результате должен получиться график, аналогичный представленному на рис. 7.27. Скопировать его в отчет.

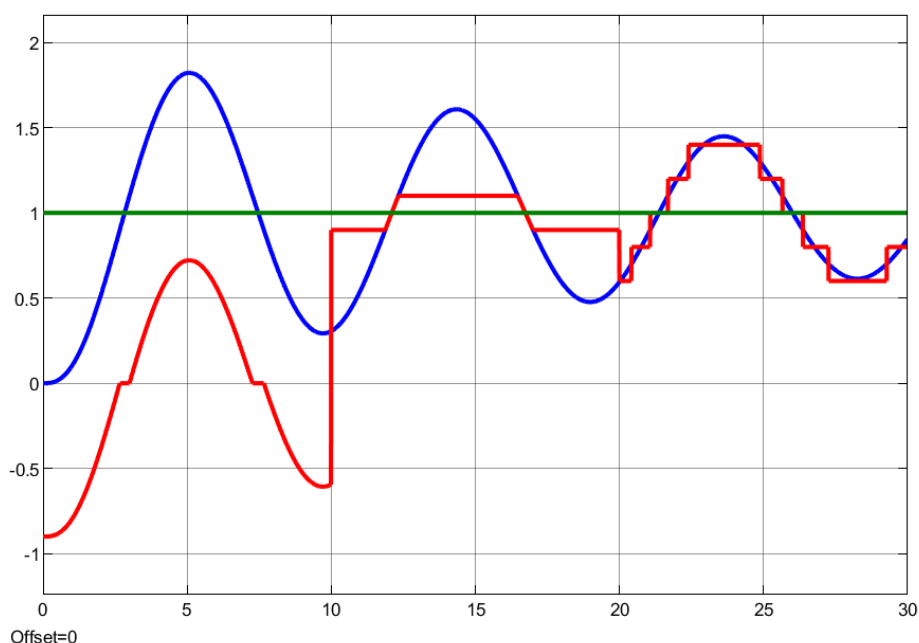


Рис. 7.27. Результат работы нелинейной системы на рис. 7.30

На рисунке 7.28 показан управляющий сигнал, переключающий порты многовходового переключателя и коммутирующего входы с различными нелинейностями. Скопировать его в отчет.

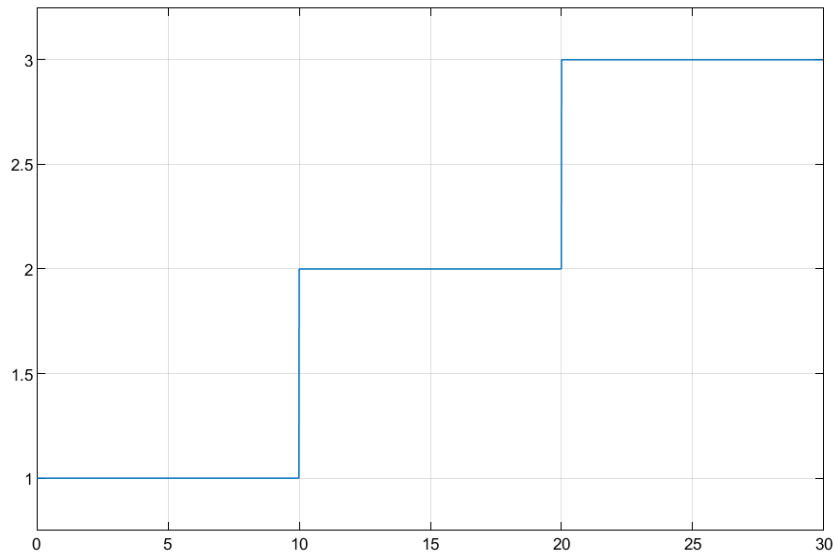


Рис. 7.28. Управляющий сигнал

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие разделы:

5.1. Цель работы.

5.2. Исходные данные.

5.3. Порядок выполнения работы.

5.4. Результаты работы. Этот раздел должен содержать описание схемы, значения ограничений и результаты моделирования рассмотренных в лабораторной работе нелинейных элементов.

5.5. Выводы.

5.6. Использованная литература.