

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное**  
**образовательное учреждение высшего образования**  
**«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

---

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB-SIMULINK**

*Методические указания  
к лабораторным работам*

**ПЕНЗА 2017**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пензенский государственный университет» (ПГУ)

---

---

# Моделирование в среде MATLAB-Simulink

*Методические указания  
к лабораторным работам*

Составители:

А. И. Герасимов, В. В. Рееда, О. Н. Рееда

Пенза  
Издательство ПГУ  
2017

УДК 001.8 (083.95)

М74

**Р е ц е н з е н т**

доктор технических наук, профессор,  
академик Российской метрологической академии,  
исполняющий обязанности директора  
Государственного регионального центра  
стандартизации, метрологии и испытаний в Пензенской области

*А. А. Данилов*

**М74**      **Моделирование в среде MATLAB-Simulink** : метод. указания к лабораторным работам / сост.: А. И. Герасимов, В. В. Регода, О. Н. Регода. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. – 104 с.

Рассмотрены основные приемы работы с программным модулем Simulink – главным пакетом расширений MATLAB, который позволяет выполнять визуальное блочное моделирование динамических систем. Основное внимание уделено изучению раздела библиотеки SimPowerSystems, который содержит набор визуальных объектов для имитационного моделирования типовых электроэнергетических и электротехнических устройств. Представлены описания лабораторных работ по моделированию линейных систем управления, по расчету и моделированию трехфазных цепей, переходных процессов в линейных электрических цепях первого и второго порядка. Приводится задание на проектную работу по расчету и моделированию параметров компенсатора трехфазной электрической цепи для улучшения коэффициента мощности. Все описания снабжены методическими указаниями, содержащими необходимый теоретический материал по соответствующей тематике и списком контрольных вопросов.

Издание подготовлено на кафедрах «Электроэнергетика и электротехника» и «Информационно-измерительная техника» Пензенского государственного университета и предназначено для лабораторных и индивидуальных занятий обучающимся по направлениям подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 12.03.01 «Приборостроение».

**УДК 001.8 (083.95)**

© Пензенский государственный университет, 2017

## Содержание

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1. Визуальное моделирование динамических систем в среде MATLAB-Simulink .....	6
Лабораторная работа № 2. Моделирование линейных систем с использованием структурных блоков пакета Simulink .....	33
Лабораторная работа № 3. Расчет и моделирование трехфазной электрической цепи при соединении фаз приемника по схеме звезда в системе MATLAB-Simulink .....	48
Лабораторная работа № 4. Расчет и моделирование трехфазной электрической цепи при соединении фаз приемника по схеме треугольник в системе MATLAB-Simulink .....	63
Лабораторная работа № 5. Моделирование переходных процессов в линейных электрических цепях .....	73
Задание на проектную работу. Расчет и моделирование в системе MATLAB-Simulink параметров компенсатора трехфазной электрической цепи для улучшения коэффициента мощности .....	95
Библиографический список.....	98
Приложение .....	99

## Введение

Цель данных методических указаний – научить студентов использовать современный программный продукт пакет Simulink, который является приложением к пакету MATLAB. Пакет Simulink может использоваться для расчетов, функционального и имитационного моделирования различных систем при выполнении лабораторных работ, курсовых работ, курсовых проектов, выпускных квалификационных работ и при проведении научных исследований. Используя принцип визуального программирования, пакет Simulink позволяет создавать модели из стандартных блоков, помещенных в различных библиотеках, а также выполнять различные расчеты.

При моделировании пользователь имеет возможность выбирать метод решения дифференциальных уравнений, способ изменения времени моделирования (с фиксированным или переменным шагом), а также следить за процессами, которые происходят в системе. Результаты моделирования могут выводиться в различные приемники в виде числовых значений, графиков или таблиц.

Пакет Simulink [1–2] включает в себя полный комплекс библиотек блоков, необходимых для создания функциональных моделей систем управления и связи, цифровых, электротехнических и энергетических устройств и т.д. При этом он позволяет изменять библиотечные блоки, а также создавать собственные.

Библиотека SimPowerSystems включает в себя модели для имитационного моделирования пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и т.д. Она позволяет имитировать работу устройств во временной области, а также выполнять для них различные виды анализа (рассчитать установившийся режим работы системы на переменном токе, выполнить гармонический анализ токов и напряжений, рассчитать импеданс для участка цепи, получить частотные характеристики, проанализировать устойчивость и т.д.).

При моделировании сложных электротехнических систем можно сочетать имитационные блоки SimPowerSystems и обычные блоки Simulink, что существенно упрощает всю модель.

В данных методических указаниях описывается версия MATLAB R2013a, интерфейс которой содержит *окно редактирования* и *интерфейсную ленту*, на *вкладках* которой сгруппированы связанные команды. При описании ряда команд в скобках указывается альтернативный путь доступа к ним для интерфейса с меню, используемого в ранее созданных версиях пакета.

# Лабораторная работа № 1

## Визуальное моделирование динамических систем в среде MATLAB-Simulink

**Цель работы:** изучение интерфейса и основных возможностей программного модуля Simulink и знакомство с разделами библиотеки SimPowerSystems, предназначенными для моделирования электроэнергетических объектов.

### Рабочее задание

MATLAB позволяет проводить в диалоговом режиме визуальные исследования во времени (визуальное программирование) характеристик различных систем, с помощью программного модуля **Simulink**. При этом модель исследуемой системы представляется в виде структурной модели и сохраняется в файле с расширением **.slx** (для более ранних версий MATLAB – с расширением **.mdl**).

Модели создаются по технологии Drag-and-Drop (перетяни и оставь) из отдельных блоков (модулей). Сами модули хранятся в библиотеках программного модуля **Simulink**, которые имеют иерархическую структуру и могут расширяться пользователем за счет разработки собственных блоков. При этом в зависимости от особенностей имитации процессов различают S-модели и P-модели. В S-моделях входные и выходные величины не имеют физического содержания, а линии соединения переносят некоторый информационный сигнал. P-модели имитируют процессы в электрических цепях.

Для наблюдения моделируемых процессов используются специальные блоки («обзорные окна»), входящие в состав библиотек **Simulink**.

1 Запустить программу MATLAB и с помощью команды **Home⇒New⇒Simulink Model** (для версии с меню – это команда **File⇒New⇒Model**) открыть новое пустое окно **untitled** (рисунок 1), в котором будет осуществляться сборка S-модели.

Выбрать в открывшемся окне команду **File⇒Save As...** и сохранить файл под именем **model\_1** на диске в своей папке.

2 С помощью кнопки  (для версии с меню – это кнопка ) открыть окно библиотеки **Simulink Library Browser** (рисунок 2), в левой части которого представлен перечень **Simulink**-библиотек, входящих в состав установленной конфигурации программного модуля **Simulink**. В правой части окна на закладке

**Library: Simulink** в зависимости от выбранной библиотеки помещаются соответствующие пиктограммы ее разделов.

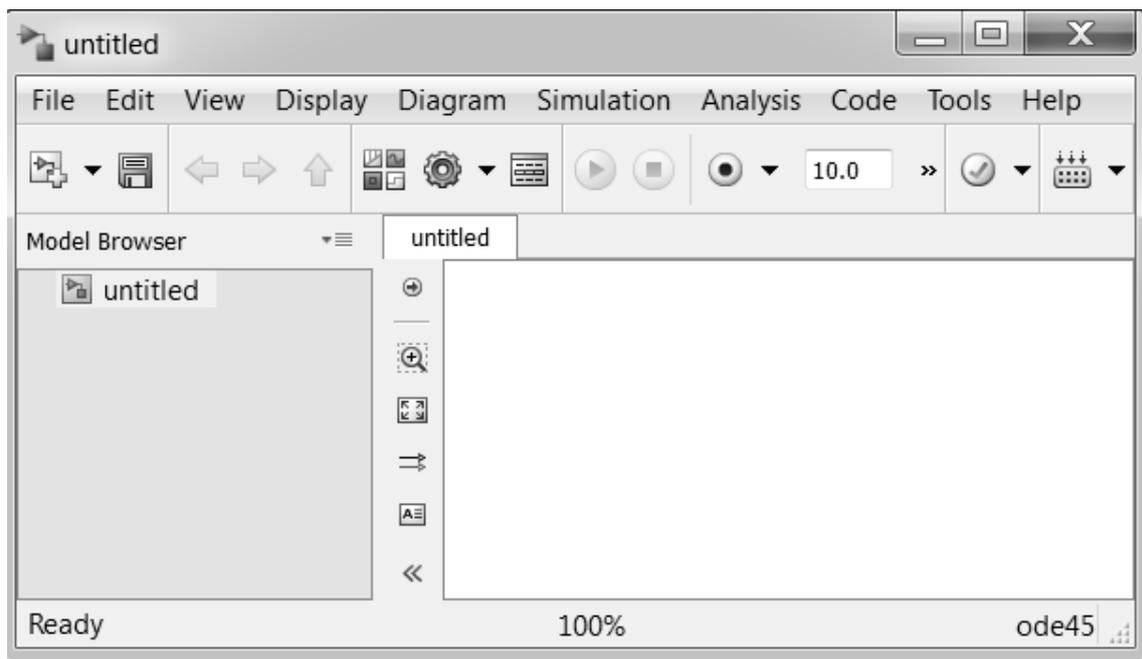


Рисунок 1

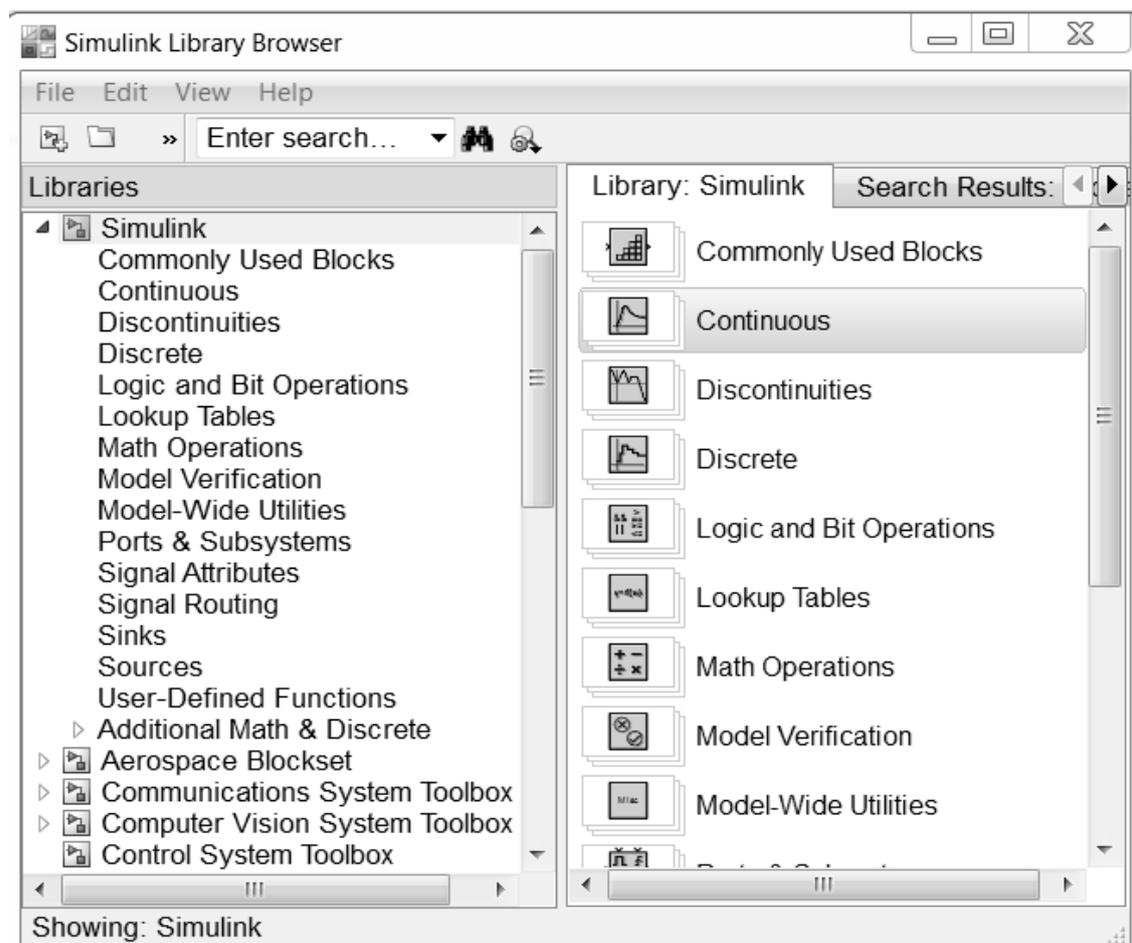


Рисунок 2

3 Ознакомьтесь с основными блоками раздела **Sinks** (Приемники) библиотеки **Simulink**. На рисунке 3 показаны блоки раздела **Sinks**, которые используются как обзорные окна при моделировании. Они позволяют управлять процессом моделирования, обеспечивают сохранение промежуточных и исходных результатов моделирования. Блоки раздела **Sinks** имеют только входы и не имеют выходов.

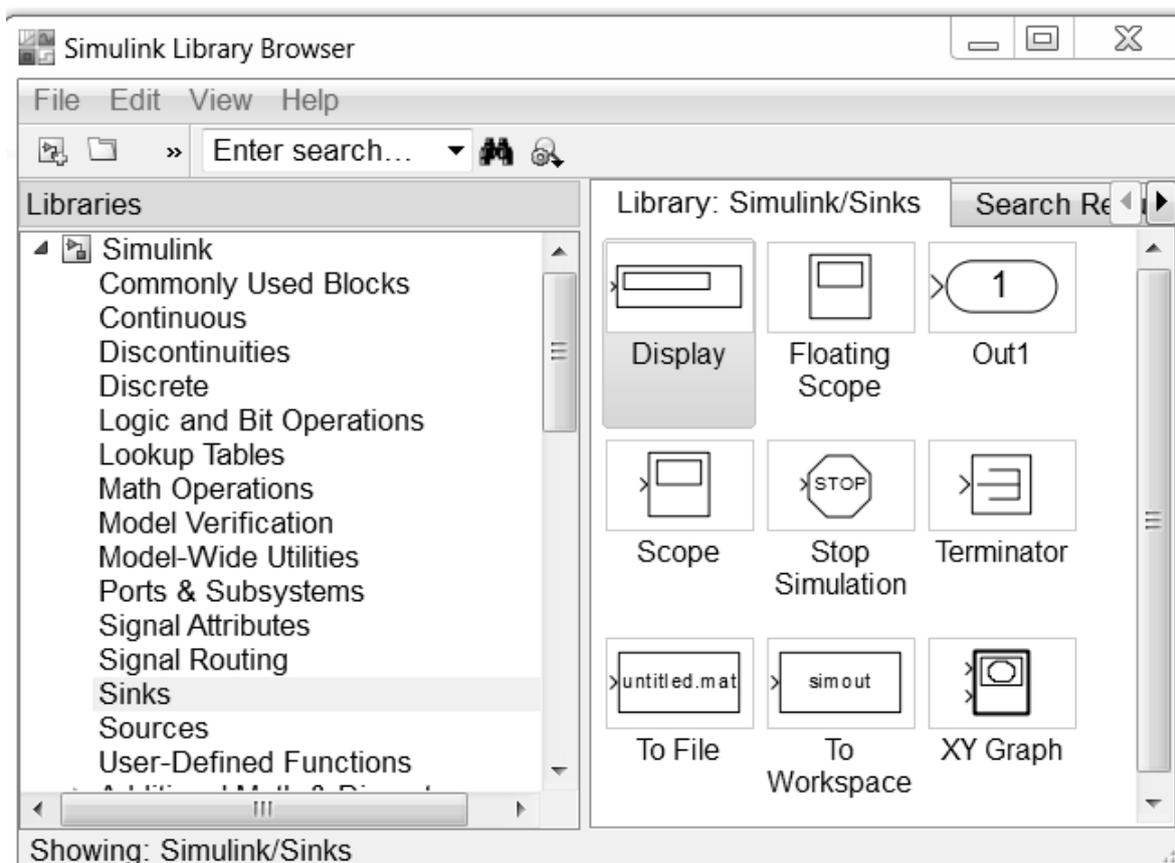


Рисунок 3

В данной лабораторной работе в качестве обзорных окон при моделировании используются следующие блоки раздела **Sinks**:

- блок **Scope** с одним входом – выводит в графическое окно график зависимости от времени подаваемой на его вход величины;
- блок **Display** с одним входом – предназначен для отображения численных значений входной величины.

4 Ознакомьтесь с основными блоками раздела **Sources** (Источники) библиотеки **Simulink** (рисунок 4), которые предназначены для формирования входных сигналов и обеспечивают работу S-модели в целом или отдельных ее частей при моделировании. Они имеют по одному выходу, но не имеют входов. Блоки-источники могут настраиваться пользователем.

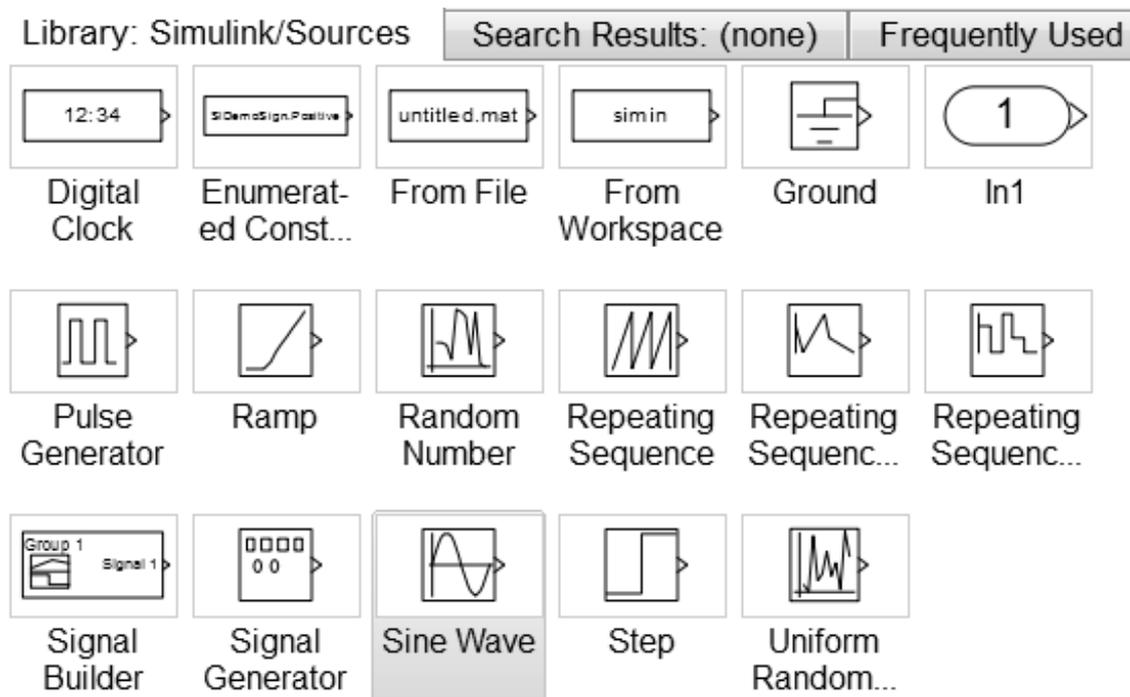


Рисунок 4

В данной лабораторной работе будут использоваться следующие блоки-источники:

- **Sine Wave** – генерирует непрерывный гармонический сигнал;
- **Signal Generator** – создает непрерывный колебательный сигнал одной из форм: синусоидальной, прямоугольной, треугольной или случайной;
- **Pulse Generator** – генерирует непрерывный прямоугольный сигнал;
- **Constant** – генерирует сигнал, постоянный по времени.

5 Построить блок-схему S-модели, содержащей следующие блоки библиотеки **Simulink: Sine Wave** из раздела **Sources**, дифференцирующий блок **Derivative** из раздела **Continuous** и **Scope** из раздела **Sinks** (рисунок 5).

Добавить блок можно с помощью команды **Add to (Имя модели)** контекстного меню, вызываемого нажатием правой кнопки мыши (ПКМ), или перетаскиванием блока между открытыми окнами при нажатой левой кнопки мыши (ЛКМ).

Если требуется развернуть блок, то нужно выделить блок, нажать ПКМ и выбрать в появившемся контекстном меню команду **Rotate&Flip**, которая имеет несколько вариантов исполнения:

- **Clockwise** – разворот блока на  $90^\circ$  по часовой стрелке (Ctrl+R);
- **Counterclockwise** – разворот блока на  $90^\circ$  против часовой стрелки (Ctrl+Shift+R);

- **Flip Block** – разворот блока в другую сторону (Ctrl+I);
- **Flip Block Name** – перенос надписи с другой стороны блока.

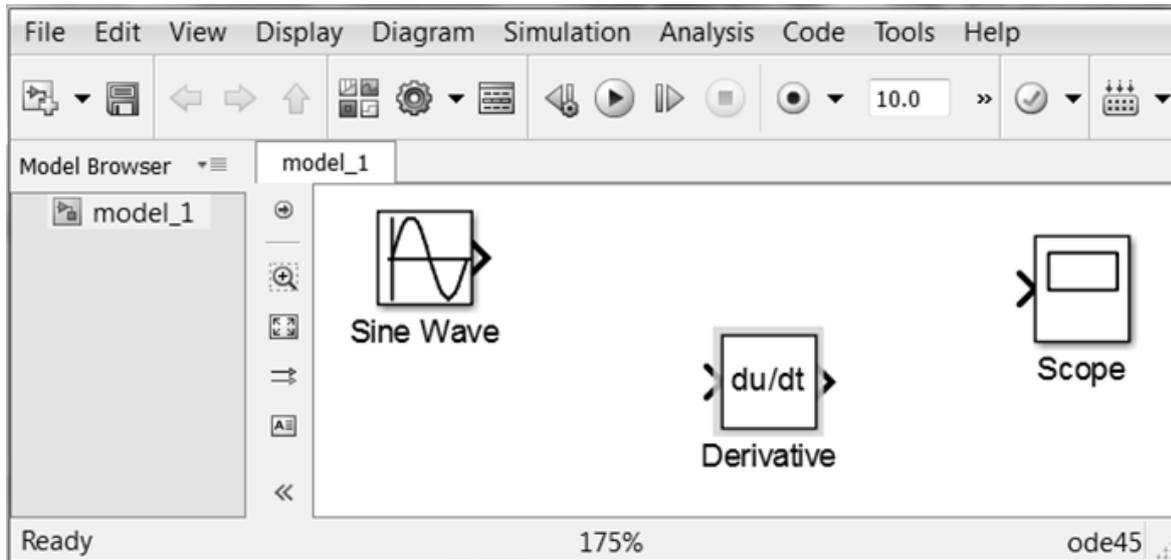


Рисунок 5

Для соединения между блоками нужно нажать ЛКМ на блоке-источнике и, удерживая кнопку **Ctrl**, нажать ЛКМ на блоке-приемнике или протащить нажатую ЛКМ от выхода одного блока к входу другого.

5.1 Выполнить двойной щелчок по блоку **Sine Wave** и установить в появившемся окне свойств следующие значения:

- амплитуда гармонического сигнала **Amplitude** – **5**;
- смещение или постоянная составляющая **Bias** – **0**;
- частота колебаний  $\omega$ , рад/с **Frequens (rad/sec)** – **1**;
- начальная фаза, рад **Phase** – **0**.

Так как моделируется непрерывная система, то установим значение шага модельного времени **Sample time** – **0**. При моделировании дискретных систем **Sample time** > **0**. При **Sample time** = **-1** значение шага модельного времени устанавливается таким же, как в предыдущем блоке. Все остальные установки в окне свойств блока **Sine Wave** оставить без изменения.

5.2 Выполнить двойной щелчок по блоку **Scope**. В результате откроется окно **Scope**, для настройки свойств которого необходимо нажать на его панели инструментов кнопку . В результате откроется диалоговое окно '**Scope**' parameters (рисунок 6), на вкладке **General** которого необходимо задать следующие значения параметров:

- количество графических полей **Number of axes**: – **2**;

- верхняя граница модельного времени, откладываемого по оси абсцисс **Time range:** –  $2\pi$  (определим исходя из заданного значения угловой частоты блока **Sine Wave**  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T = 1$  рад/с, что соответствует периоду гармонического сигнала в секундах  $T = 2\pi/\omega = 2\pi/1 = 2\pi$ );
- подписи для всех осей **Tick labels:** – **all**.

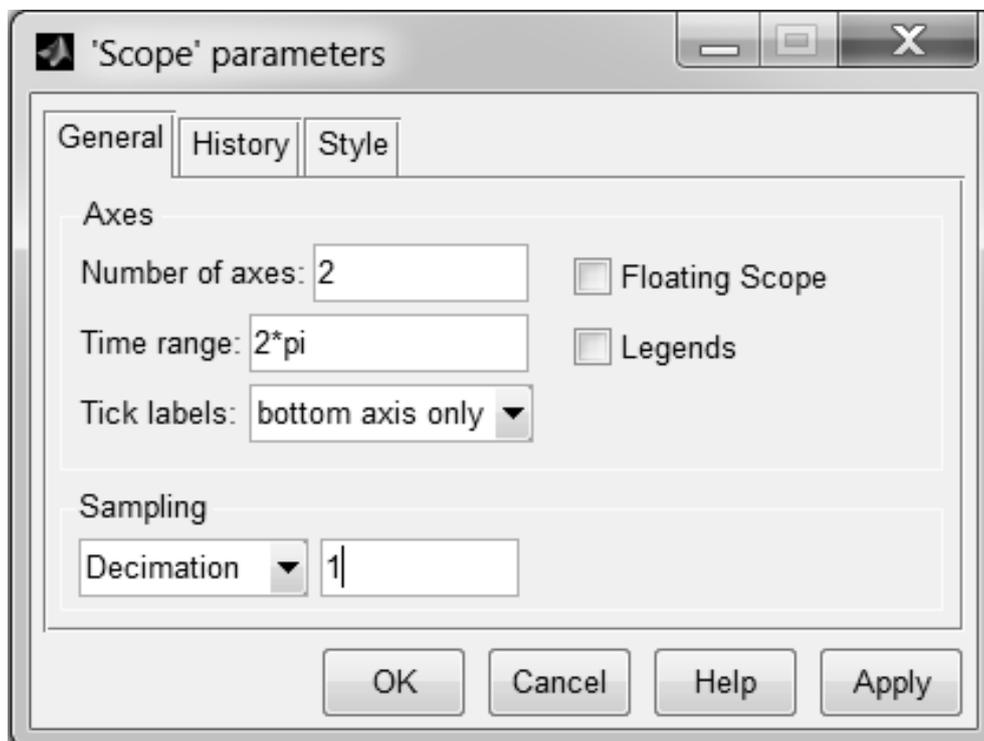


Рисунок 6

Следует иметь в виду, что если размер заданного интервала моделирования  $T_m$  будет установлен больше значения **Time range**, то в окне **Scope** будет отображен только график, соответствующий последнему отрезку времени, равному  $T_m - n \cdot \text{Time range}$ , где  $n$  – целое число.

Выбрать в окне **'Scope' parameters** из списка **Sampling** (Дискретизация) значение **Decimation** (Прореживание) и задать в соседнем правом окне значение «1», обозначающее количество интервалов дискретизации, через которые полученные данные моделирования будут использоваться для построения графиков. Если в списке **Sampling** выбрать значение **Sample time**, то в соседнем правом окне необходимо указать промежуток времени, кратный интервалу дискретизации, через который полученные данные моделирования будут использоваться для построения графиков.

Команды на вкладке **History** в окне **'Scope' parameters** (рисунок 7) позволяют задать максимальное количество элементов мас-

сива данных, используемых для построения графиков. Данные, которые используются для построения графика в окне **Scope**, можно записать в рабочее пространство MATLAB, если установить флажок **Save data to workspace**. При этом в поле **Variable name** (Имя переменной) можно изменить имя переменной, а в поле **Format** (формат) выбрать один из трех форматов записи данных: **Array** (Массив, матрица), **Structure** (Структура) или **Structure with time** (Структура с временем).

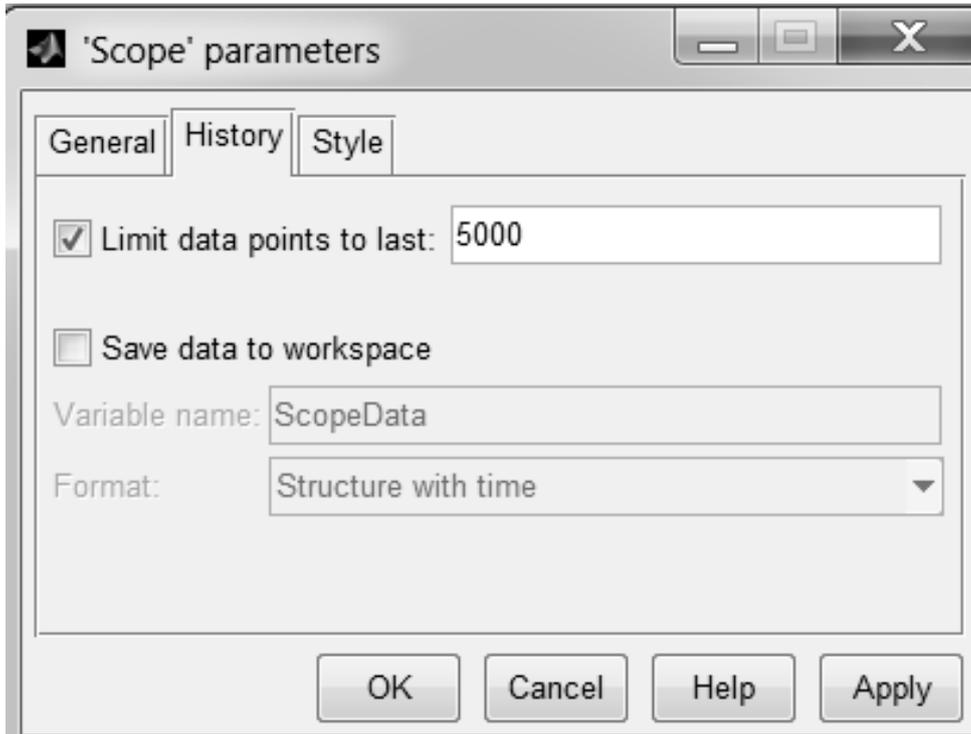


Рисунок 7

Команды на вкладке **Style** в окне **'Scope' parameters** (рисунок 8) позволяют задать цвет для фигуры, фона и осей, тип, толщину и цвет линии, тип маркера в точках дискретизации, используемых для построения графиков в окне **Scope**.

Установить белый цвет фигуры **Figure color:** и фона **Axes color:**, а цвет осей – черным. Задать в области **Line:** для обеих линий толщину **2** и черный цвет.

5.3 Соединить блоки между собой в соответствии с рисунком 9. Для этого установить указатель мыши в области выходного порта блока **Sine Wave** (при этом указатель принимает вид крестика) и, удерживая нажатой ЛКМ, переместить указатель к верхнему входному порту блока **Scope**. После отпускания кнопки мыши появится линия связи со стрелкой на конце, указывающей направление передачи сигнала. Нижний входной порт блока **Scope** соеди-

нить с выходным портом блока **Derivative**. Входной порт блока **Derivative** направить на нужное место первой линии связи при нажатой ЛКМ и отпустить. В результате на линии связи появится узел в виде точки.

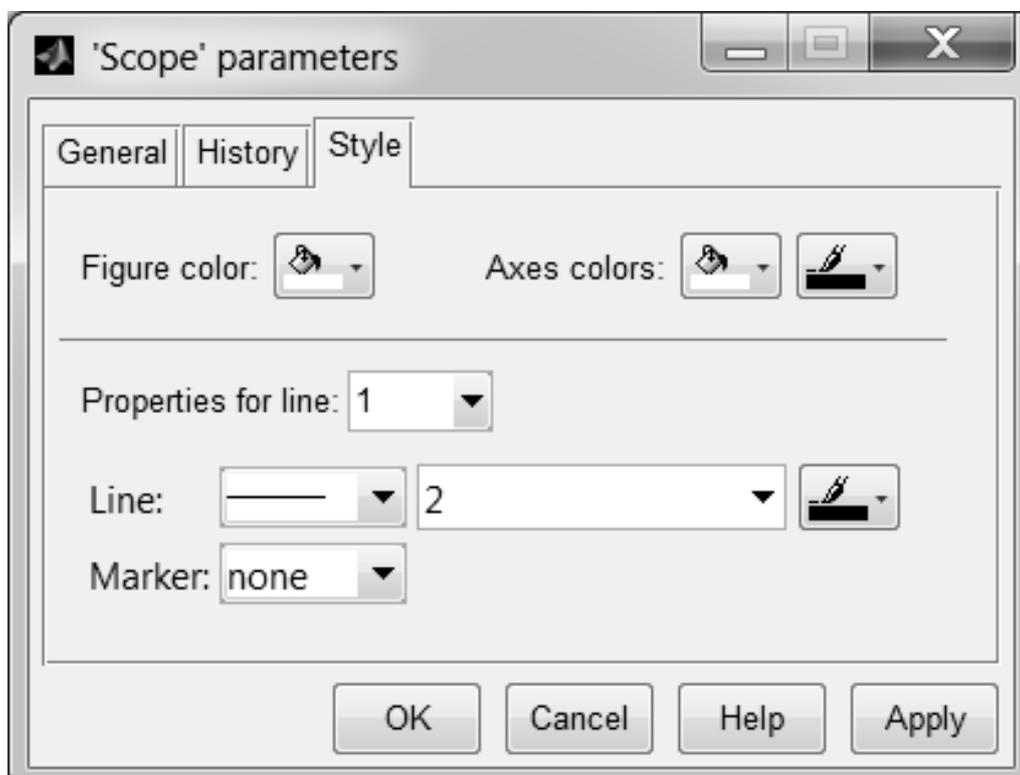


Рисунок 8

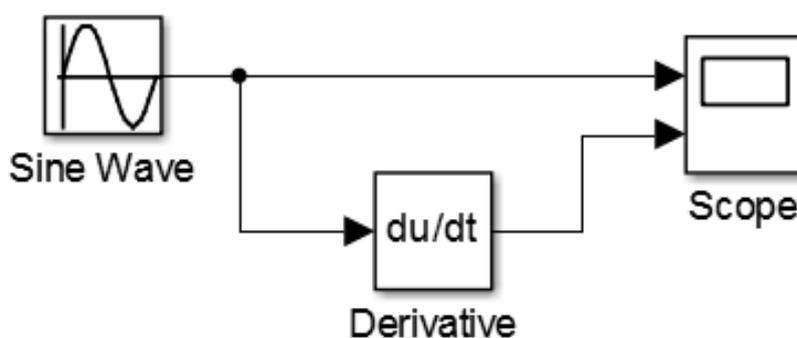


Рисунок 9

5.4 Перед запуском полученной блок-схемы на моделирование сначала необходимо установить требуемые параметры моделирования, выбрав команду **Simulation**⇒**Model Configuration Parameters**

или нажав на панели инструментов клавишу . В результате откроется окно настройки параметров, группа **Solver** которого показана на рисунке 10.

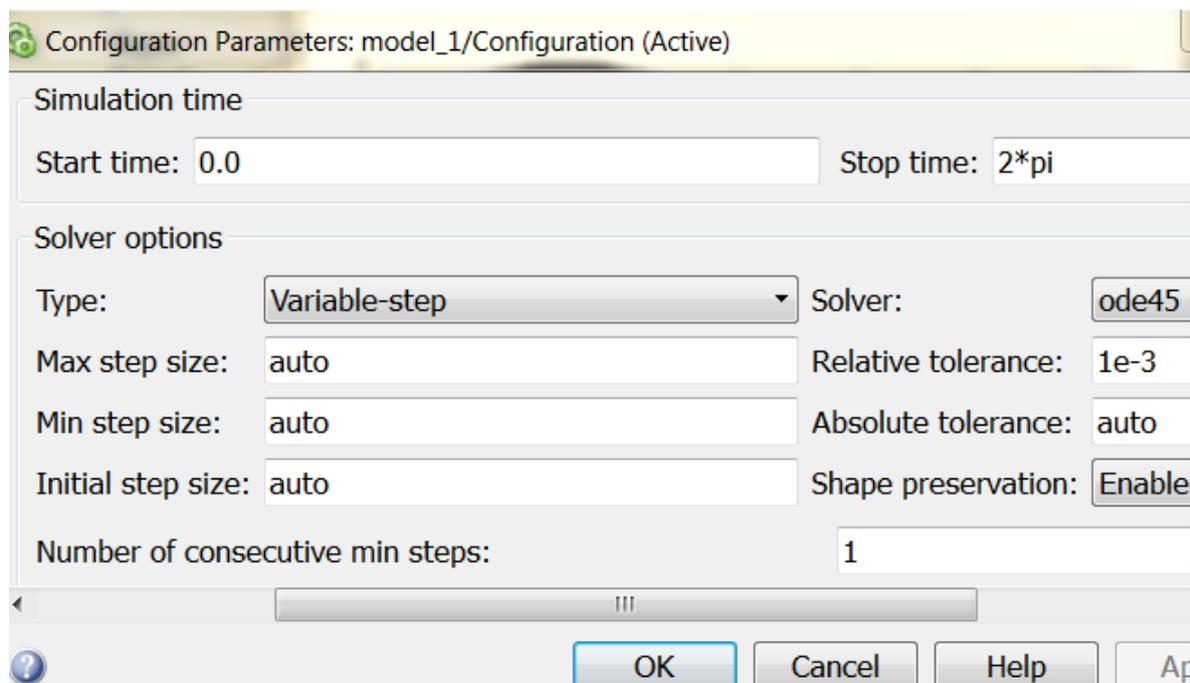


Рисунок 10

Задать в области **Simulation time** значения начального времени моделирования **Start time: 0.0** и конечного времени моделирования **Stop time: 2\*pi**. Величина конечного времени выбрана из условия проведения моделирования в течение одного периода гармонического сигнала, частота которого в рассматриваемом случае равна 1 рад/с. Однако следует иметь в виду, что текущее физическое время и время моделирования не являются одинаковыми понятиями. Время моделирования зависит от сложности модели, метода решения и быстродействия компьютера.

Выбор метода моделирования и его параметров осуществляется в области **Solver options**.

Опция **Type:** задает тип решения:

- с переменным шагом (**Variable-step**), который рекомендуется при расчете непрерывных систем;
- с фиксированным шагом (**Fixed-step**), который рекомендуется при расчете дискретных систем.

Лучшие результаты чаще всего дает решение с переменным шагом, так как при увеличении скорости изменения результатов в процессе решения автоматически уменьшается шаг и наоборот [1]. Кроме того, программа с переменным шагом в отличие от программы с постоянным шагом выполняет контроль ошибок моделирования и определение пересечения нуля.

Опция **Solver:** задает несколько вариантов методов моделирования. Первый вариант (**discrete**) используется для расчета дис-

кретных систем. Остальные методы используются для расчета непрерывных систем. При моделировании с переменным шагом по умолчанию устанавливается метод общего назначения **ode45** (одношаговый явный метод Рунге – Кутты 4-го и 5-го порядков точности).

Выбрать способ моделирования **Variable-step**. При этом системой по умолчанию устанавливаются значения **auto**:

– для максимального шага расчета, который определяется как

$$\text{Max step size} = (\text{StopTime} - \text{StartTime})/50;$$

– минимального шага расчета **Min step size**;

– начального значения шага моделирования **Initial step size**.

Для выбранного на рисунке 10 диапазона при моделировании с переменным шагом моделирования максимальный шаг расчета в секундах равен  $(2\pi - 0)/50 = \pi/25 \approx 0,126$ .

5.5 Начать моделирование с помощью команды **Simulation**⇒

**Run** . На рисунке 11 представлены результаты моделирования, показывающие гармонические сигналы на входе и на выходе дифференцирующего блока **Derivative**.

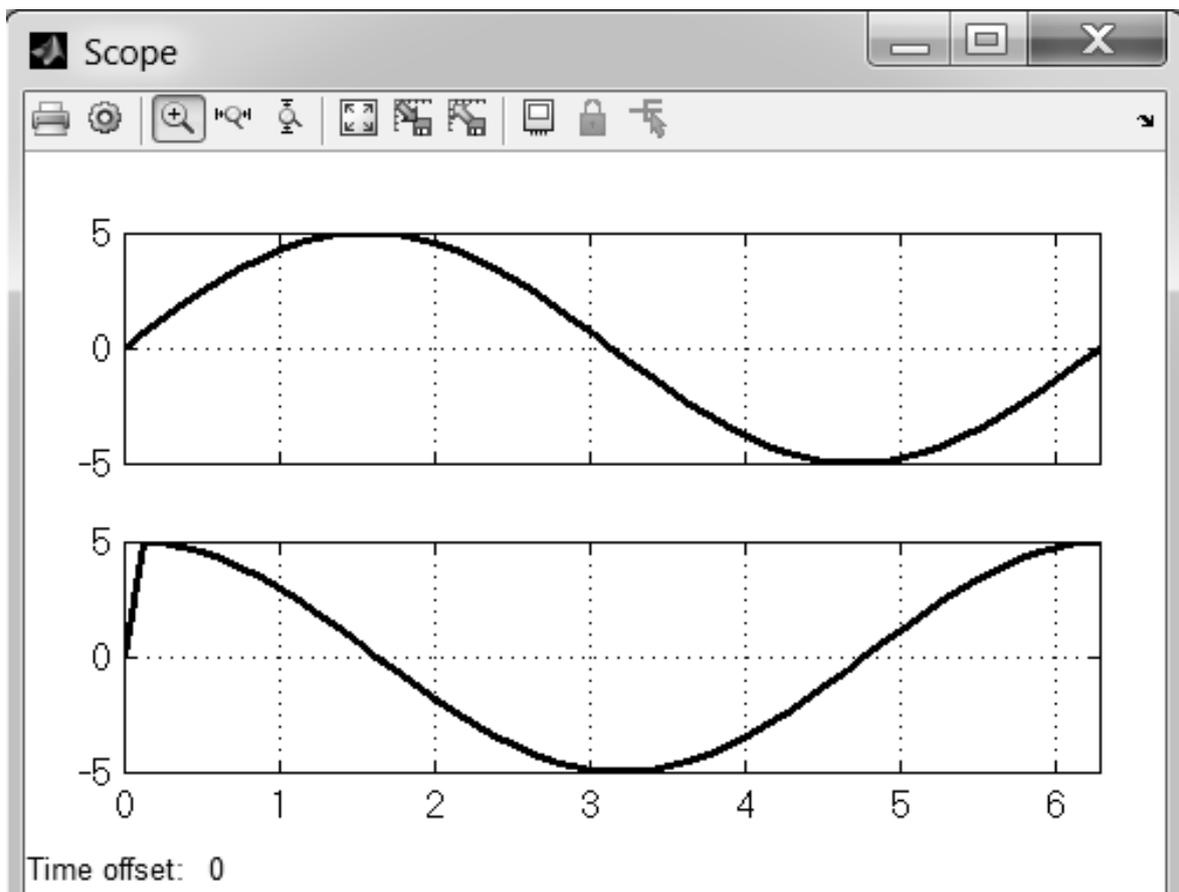


Рисунок 11

Из графиков видно, что для обоих сигналов амплитуда равна 5, период синусоидального сигнала в секундах равен  $T = 2\pi \approx 6,28$ , что соответствует частоте синусоидального сигнала в герцах равной  $f = 1/T = 1/(2\pi)$  и угловой частоте в радианах в секунду  $\omega = 2\pi f = 1$ . Синусоидальный сигнал  $\sin(t)$  на входе дифференцирующего блока преобразуется на его выходе в сигнал  $\cos(t)$ , так как дифференциал от синуса равен косинусу.

5.6 Установить в диалоговом окне **'Scope' parameters:** на закладке **Style** тип маркера **Marker:** в точках дискретизации, используемого для построения графика в окне **Scope**, в виде круга.

Начать моделирование с помощью команды **Simulation**  $\Rightarrow$  **Run**. На рисунке 12 представлены результаты моделирования. Расстояние между двумя соседними маркерами соответствует интервалу дискретизации, через который полученные данные моделирования используются для построения графиков.

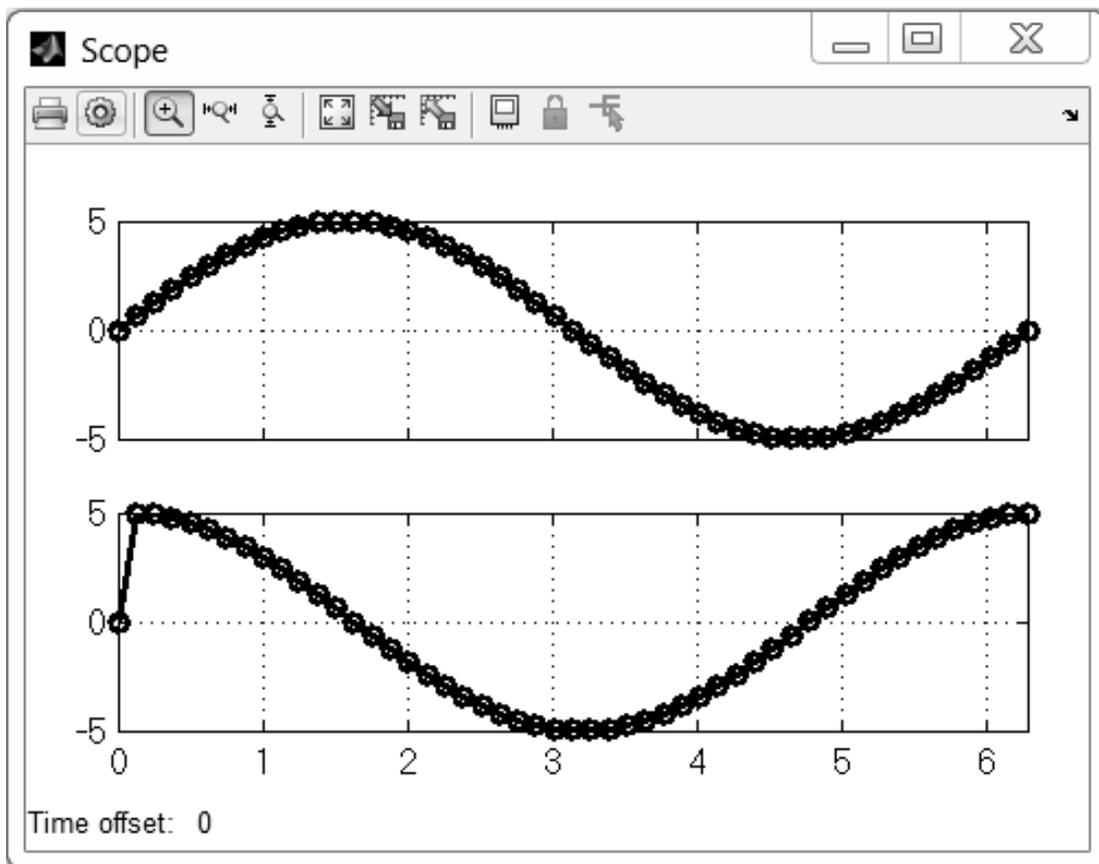


Рисунок 12

5.7 Установить в диалоговом окне **'Scope' parameters:** на закладке **General** для списка **Sampling** значение **Decimation**, равным «5», что соответствует шагу дискретизации для построения графика, равному  $5\pi/25 = \pi/5 \approx 0,63$ .

Начать моделирование с помощью команды **Simulation**⇒**Run**. На рисунке 13 представлены результаты моделирования. Расстояние между двумя соседними маркерами соответствует интервалу дискретизации, примерно равному **0,63**.

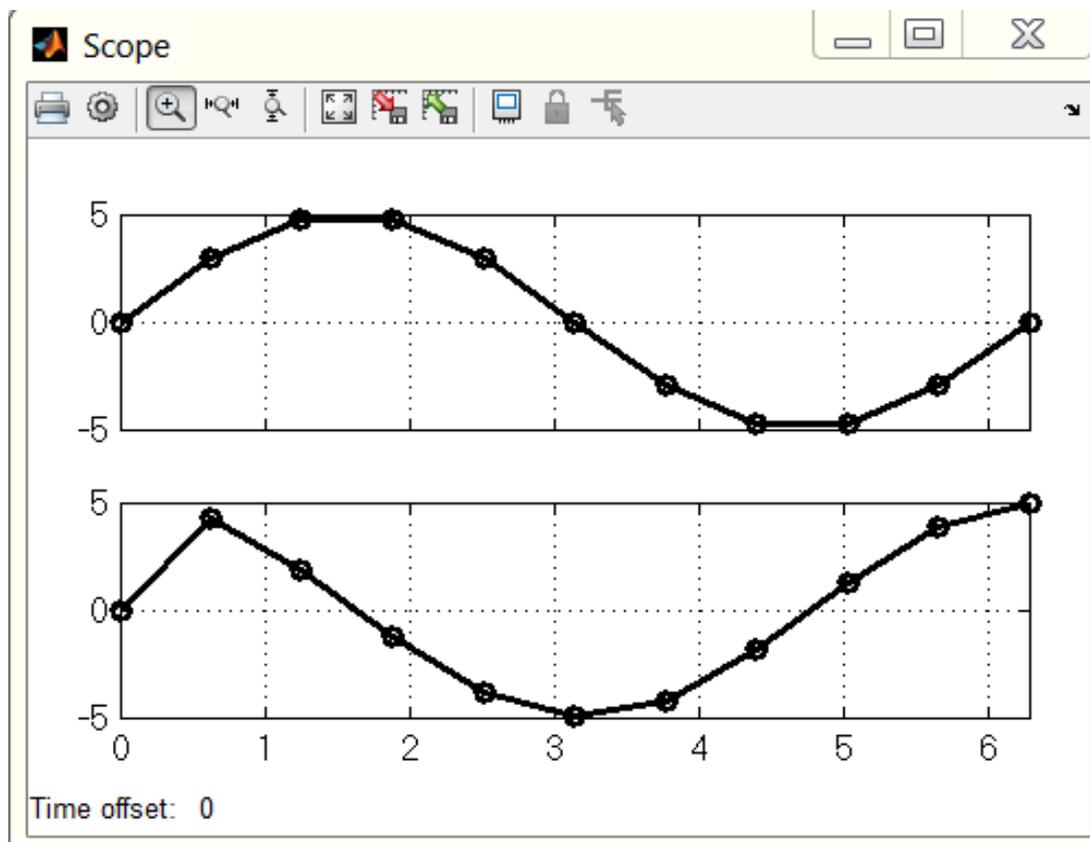


Рисунок 13

*Отчет*

5.8 Смоделировать схему, приведенную на рисунке 9, установив для нее частоту колебаний (в радианах в секунду) и амплитуду, равные номеру варианта.

Подобрать параметры моделирования таким образом, чтобы на графике в блоке **Scope** отображался один период. Включить в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с моделью и окна параметров входящих в нее блоков. Представить результаты моделирования в обзорном окне блока **Scope** для значения его параметра **Decimation**, равного 1 и 5. Провести анализ полученных графиков зависимостей и сделать выводы.

6 Построить блок-схему S-модели, содержащей следующие блоки библиотеки **Simulink: Pulse Generator** из раздела **Sources**, интегрирующий блок **Integrator** из раздела **Continuous**, блок **Mux** из раздела **Commonly Used Blocks** и **Scope** из раздела **Sinks** (рисунок 14).

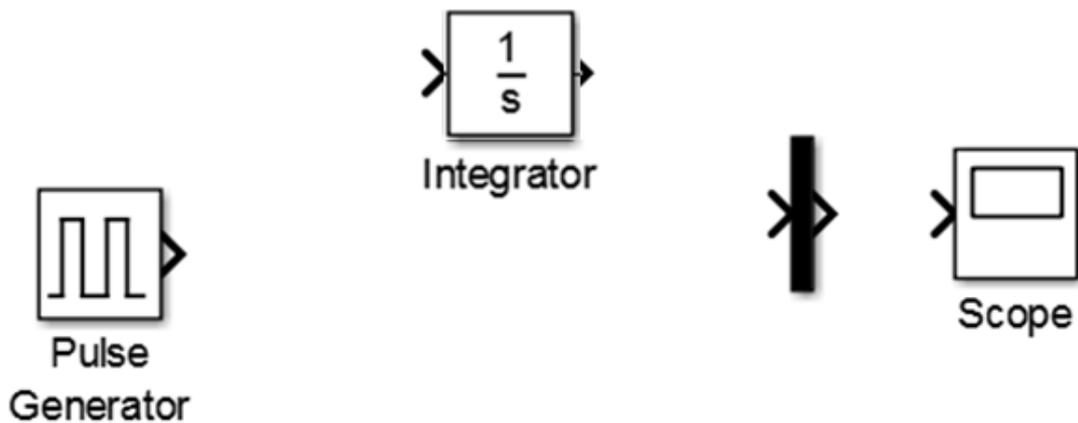


Рисунок 14

6.1 Выполнить двойной щелчок по блоку **Pulse Generator** и установить в появившемся окне следующие значения параметров:

- тип импульсов (**Pulse type:**) – непрерывный импульс, аргумент время (**Time based**);
- время (**Time(t):**) – **Use simulation time**;
- амплитуда (**Amplitude**) – **1**;
- период в секундах (**Period**) – **2**;
- ширина импульса в процентах от периода (**Pulse width**) – **50**;
- величина задержки первого импульса относительно  $t = 0$  (**Phase delay**) – **0**.

6.2 Выполнить двойной щелчок по блоку **Integrator** и установить в появившемся окне следующие значения:

- источник начального значения выходного сигнала (**Initial condition source:**) – внутренний (**Internal**);
- начальное значение выходного сигнала (**Initial condition:**) – **0**;
- верхний уровень ограничения выходного сигнала (**Upper saturation limit**) – **inf** (бесконечность);
- нижний уровень ограничения выходного сигнала (**Lower saturation limit:**) – **-inf** (минус бесконечность).

6.3 Выполнить двойной щелчок по блоку мультиплексор (смеситель) **Mux**, предназначенному для объединения входных сигналов в вектор, и установить в появившемся окне следующие значения:

- количество входов (**Number of Inputs:**) – **2**;
- способ отображения (**Display option:**) – **bar** (вертикальный узкий прямоугольник черного цвета).

6.4 Соединить блоки в соответствии с рисунком 15.

6.5 Выполнить двойной щелчок по блоку **Scope** и установить на вкладке **Style** окна '**Scope**' parameters белый цвет фигуры **Figure color:** и фона **Axes color:**, а цвет осей – черным.

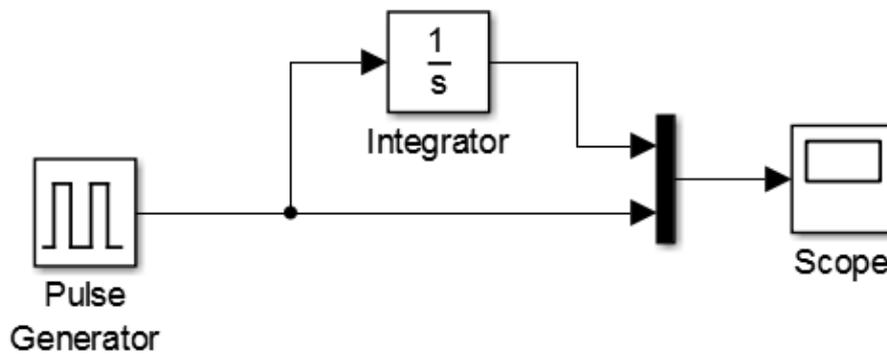


Рисунок 15

Задать в области **Line:** для первой линии тип линии – сплошная, толщину – **2**, цвет – черный, тип маркера **Marker** в точках дискретизации – в виде круга.

Задать в области **Line:** для второй линии тип линии – пунктирная, толщину – **2**, цвет – черный, тип маркера **Marker** в точках дискретизации – **none**.

Для информативности на вкладке **General** в окне '**Scope**' **parameters** необходимо установить флажок **Legends**.

6.6 Перед выполнением моделирования сначала необходимо установить требуемые параметры моделирования, выбрав команду **Simulation**⇒**Model Configuration Parameters**.

Задать в области **Simulation time** окна настройки параметров:

– значения начального времени моделирования **Start time: 0.0** и конечного времени моделирования **Stop time: 10** (величина конечного времени выбрана из условия проведения моделирования в течение пяти периодов гармонического сигнала);

– тип решения (**Type:**) **Fixed-step** (решение с фиксированным шагом);

– метод моделирования (**Solver:**) **ode1** (метод Эйлера);

– значение фиксированного шага **Fixed-step size** – **0.5**, что соответствует 21 точке моделирования.

6.7 Начать моделирование с помощью команды **Simulation**⇒**Run**. На рисунке 16 представлены результаты моделирования. Выходной векторный сигнал мультиплексора **Mux** поступает на вход блока **Scope**, в результате на его экране строятся два графика: сплошная линия соответствует выходному сигналу блока **Integrator**, а пунктирная линия соответствует выходному сигналу блока **Pulse Generator**.

Нажать на среднюю кнопку  на панели инструментов окна **Scope**, которая позволяет автоматически устанавливать оптимальный масштаб осей. При этом результаты моделирования преобразуются к виду, представленному на рисунке 17.

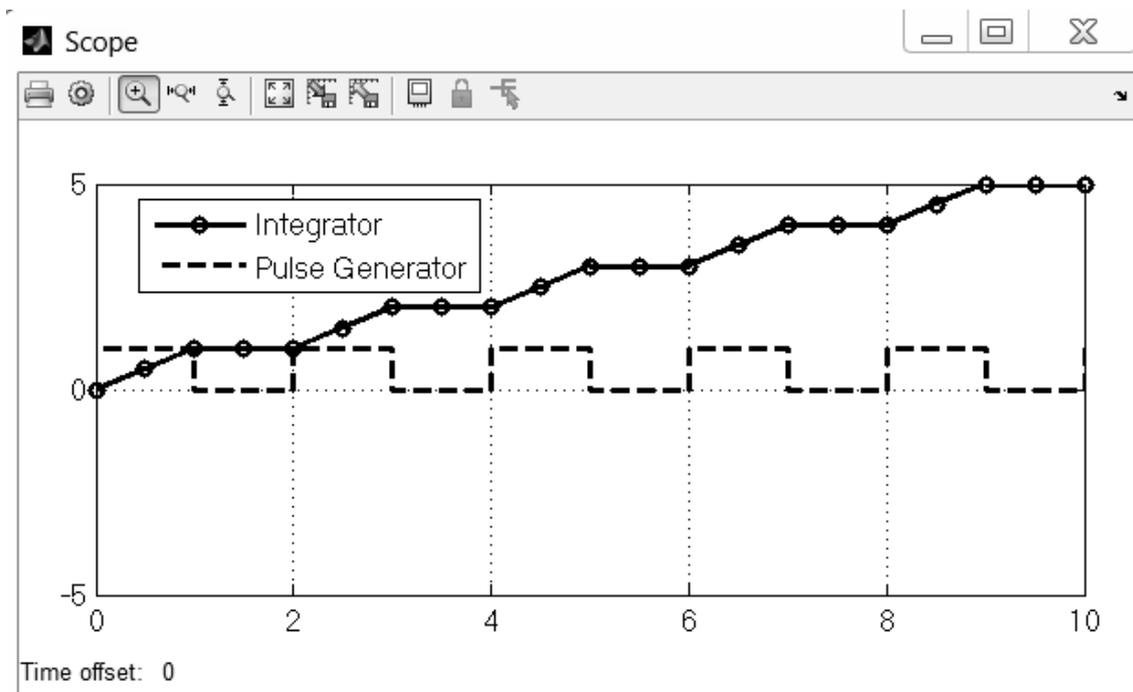


Рисунок 16

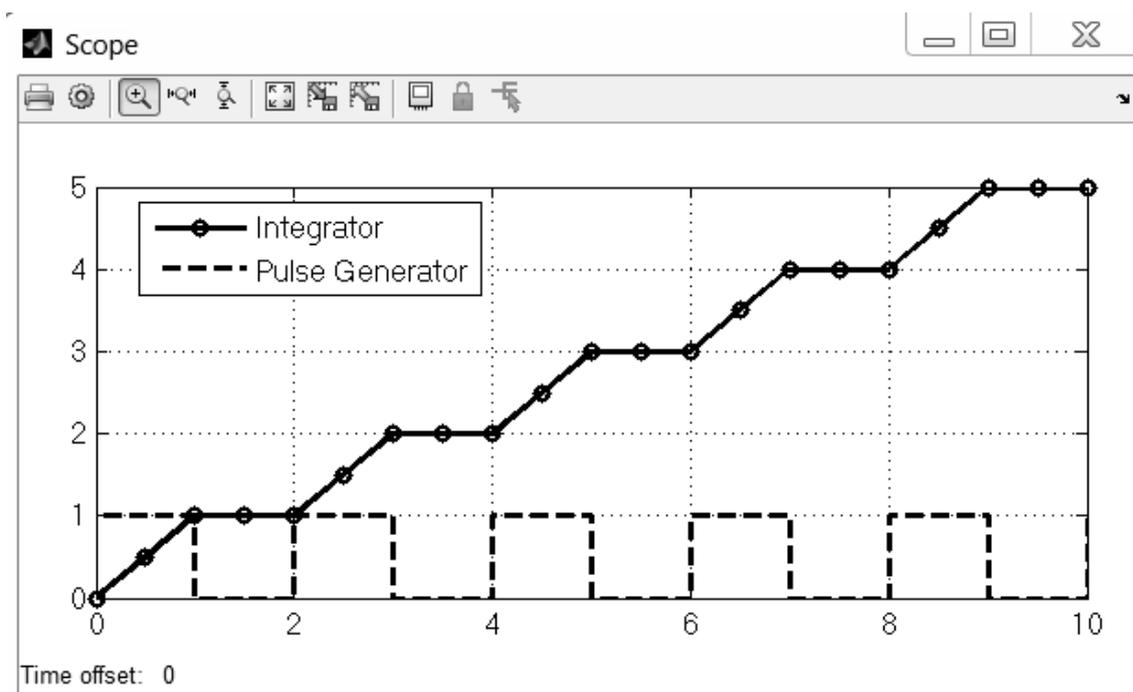


Рисунок 17

*Отчет*

6.8 Смоделировать схему, приведенную на рисунке 15, установив для нее амплитуду и период прямоугольных импульсов (в секундах), равные номеру варианта.

Подобрать параметры моделирования таким образом, чтобы на графике в блоке **Scope** отображалось пять периодов. Включить в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с моде-

лю и окна параметров входящих в нее блоков. Представить результаты моделирования в обзорном окне блока **Scope** для значения его параметра **Decimation**, равного 1. Провести анализ полученных графиков зависимостей и сделать выводы.

7 Построить блок-схему S-модели, содержащей следующие блоки библиотеки **Simulink: Signal Generator** и **Constant** из раздела **Sources**; блок усилителя **Gain**, блок суммирования **Sum** и блок мультиплексора **Mux** из раздела **Commonly Used Blocks**; блок **Abs** из раздела **Math Operations**; блок **Scope** из раздела **Sinks** (рисунок 18).

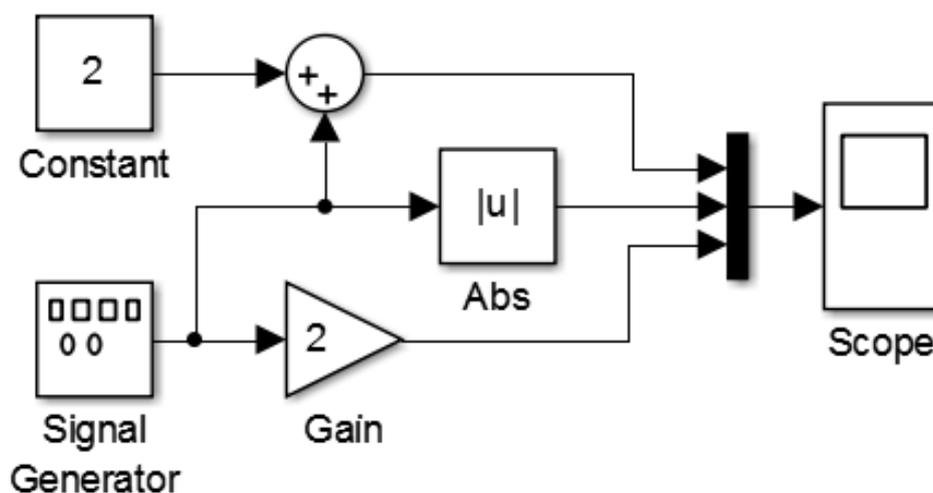


Рисунок 18

7.1 Выполнить двойной щелчок по блоку **Constant** и установить в появившемся окне значение постоянного выходного сигнала (**Constant value:**), равное «2».

7.2 Выполнить двойной щелчок по блоку **Signal Generator** и установить в появившемся окне следующие значения:

- форма волны (**Wave form:**) – **sine**;
- время (**Time(t):**) – **Use simulation time**;
- амплитуда гармонического сигнала (**Amplitude:**) – **1**;
- частота колебаний (**Frequency:**) – **1**;
- единица измерения частоты (**Units:**), герц – **Hertz**.

7.3 Выполнить двойной щелчок по блоку усилителя **Gain** и установить в появившемся окне значение коэффициента усиления (**Gain:**), равное «2».

7.4 Значения параметров блока **Abs**, который вычисляет абсолютное значение входного сигнала, и блока суммирования **Sum** оставить по умолчанию.

**Примечание** – По умолчанию форма блока **Sum** в виде круга, сверху, слева и снизу которого расположены суммирующие входы,

а справа выход. Другие настройки блока **Sum** можно задать в окне его свойств. Параметр **List of signs** (лист сигналов) определяет количество входов сумматора (в зависимости от количества символов) и их действие. При этом функциональные значения символов следующие:

- | – вход блока не задействован;
- + – прямой вход (сигнал суммируется);
- – инверсный вход (сигнал вычитается).

По умолчанию через пробел установлены следующие символы:

| + +.

7.5 Выполнить двойной щелчок по блоку мультиплексор **Mux** и установить в появившемся окне количество входов (**Number of inputs:**), равное «3».

7.6 Перед выполнением расчета установить параметры моделирования с помощью команды **Simulation**⇒**Model Cofiguration Parameters**.

Задать в области **Simulation time** окна настройки параметров:

- значения начального времени моделирования **Start time: 0.0** и конечного времени моделирования **Stop time: 2** (величина конечного времени выбрана из условия проведения моделирования в течение двух периодов гармонического сигнала);

- тип решения (**Type:**) **Fixed-step** (решение с фиксированным шагом);

- метод моделирования (**Solver:**) **ode1** (метод Эйлера);

- значение фиксированного шага **Fixed-step size – 0,02**, что соответствует 100 точкам моделирования.

7.7 Запустить программу на моделирование. На рисунке 19 представлены результаты моделирования блока **Scope**.

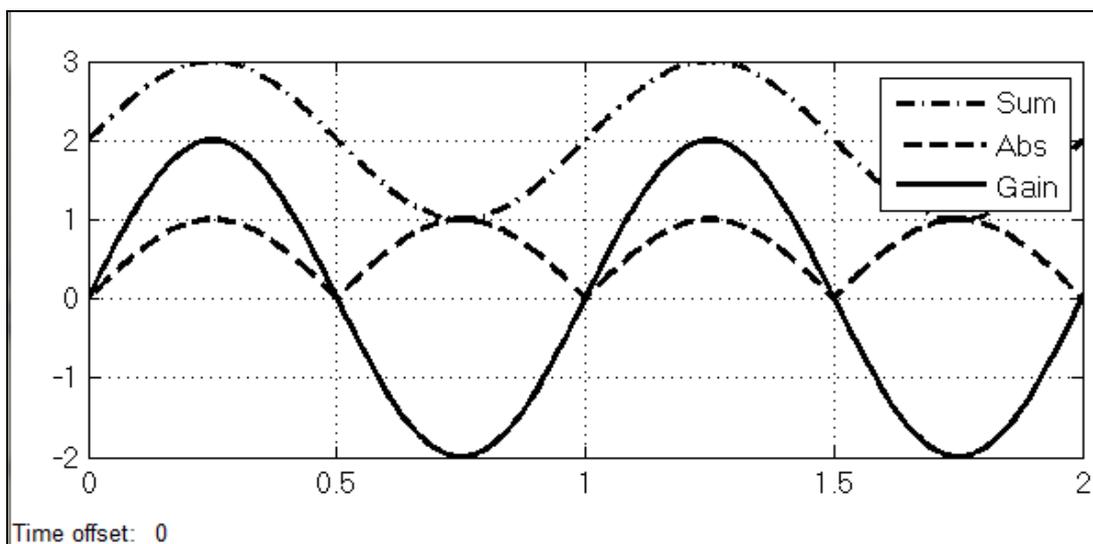


Рисунок 19

Выходной векторный сигнал блока мультиплексора **Mux** поступает на вход блока **Scope**. В результате на его экране в одних осях строятся три графика:

- штрих-пунктирная линия соответствует выходному сигналу блока суммирования **Sum**, равному  $1\sin(2\cdot\pi\cdot 1\cdot t) + 2$ ;
- пунктирная линия соответствует выходному сигналу блока **Abs**, равному  $|1\sin(2\cdot\pi\cdot 1\cdot t)|$ ;
- сплошная линия соответствует выходному сигналу блока усилителя **Gain** (коэффициент усиления которого равен «2»), равному  $2\sin(2\cdot\pi\cdot 1\cdot t)$ .

Отчет

7.8 Смоделировать схему, приведенную на рисунке 18, установив для нее частоту колебаний (в герцах) и амплитуду гармонического сигнала, равные номеру варианта.

Подобрать параметры моделирования таким образом, чтобы на графике в блоке **Scope** отображалось два периода. Включить в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с моделью и окна параметров входящих в нее блоков. Представить результаты моделирования в обзорном окне блока **Scope** для значения его параметра **Decimation**, равного 1. Провести анализ полученных графиков зависимостей и сделать выводы.

8 Ознакомиться с разделом библиотеки **SimPowerSystems** (рисунок 20), которая представляет собой набор визуальных объектов, для имитационного моделирования типовых электротехнических устройств (устройств силовой электроэнергетики, таких как электрические двигатели, генераторы, трансформаторы, преобразователи, а также линии электропередач, элементы силовой электроники и т.д.). При этом имеется возможность сочетать в одной модели как имитационные, так и структурные блоки.

Элементы из раздела **Electrical Sources** библиотеки **SimPowerSystems** (рисунок 21) включают в себя различные источники энергии, такие как:

- **DC Voltage Source** и **AC Voltage Source** – идеальный источник постоянного и переменного напряжения;
- **AC Current Source** – идеальный источник переменного тока;
- **3 Phase Source** – трехфазный источник напряжения;

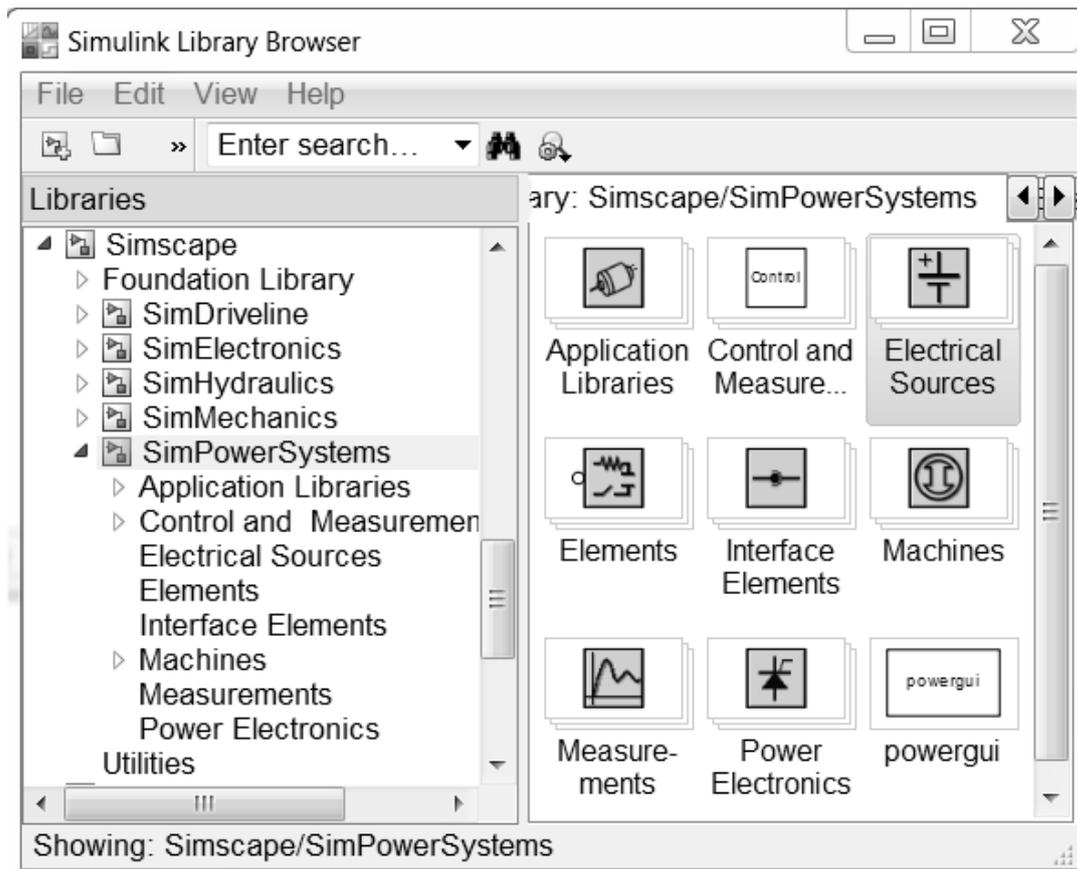


Рисунок 20

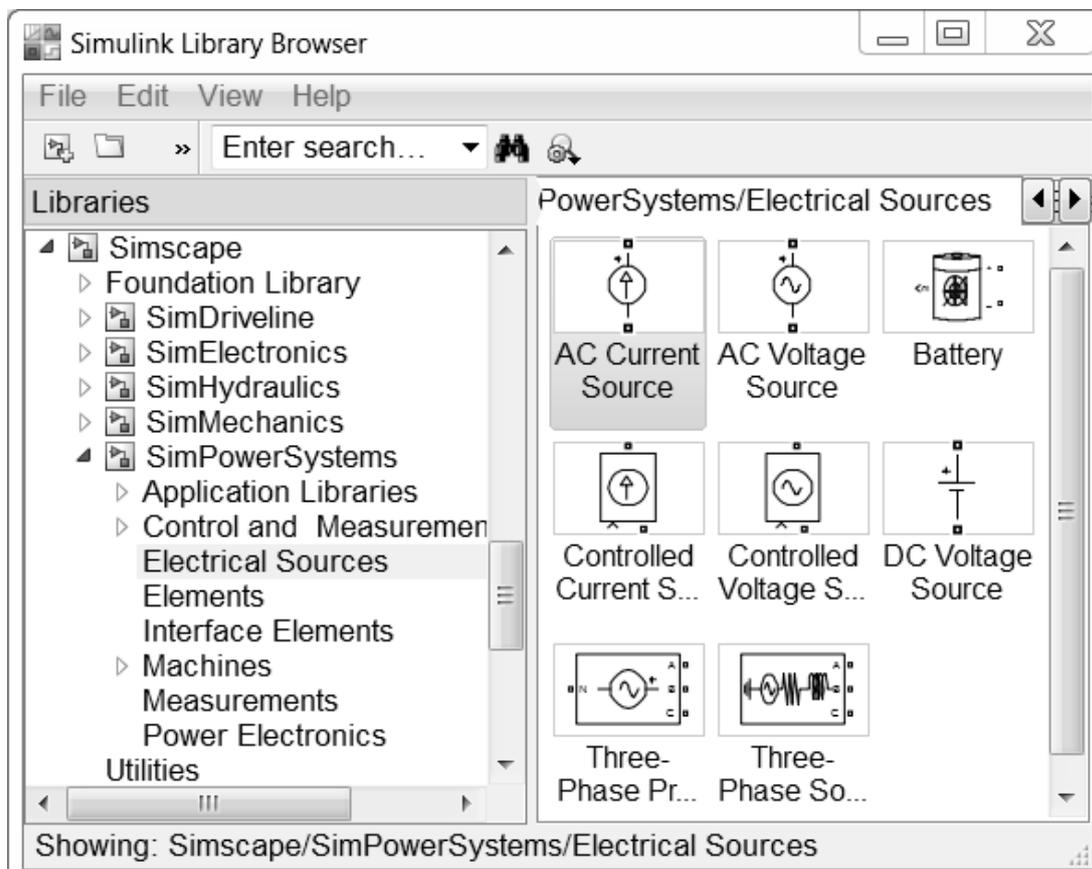


Рисунок 21

– элементы из раздела **Elements** библиотеки **SimPowerSystems** (рисунок 22), включающие в себя различные электротехнические элементы;

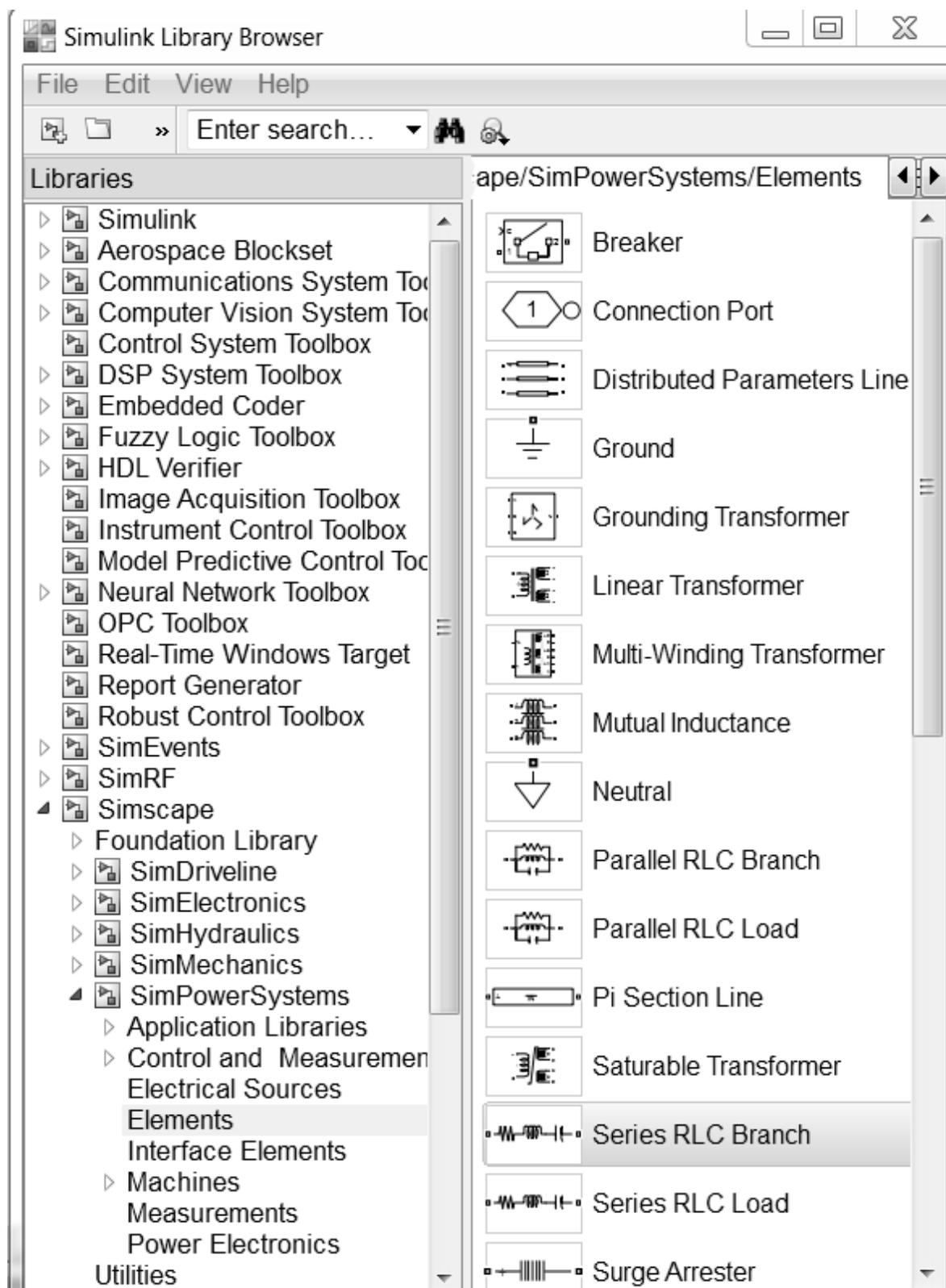


Рисунок 22

– блоки **Series RLC Branch** и **Parallel RLC Branch** – последовательная и параллельная RLC цепь, параметры которой задаются через сопротивление в омах, индуктивность в генри и емкость в фарадах;

– блоки **Series RLC Load** и **Parallel RLC Load** – последовательная и параллельная RLC нагрузка, параметры которой задаются через мощность цепи при номинальном напряжении и частоте.

Кроме того, в библиотеку входят аналогичные трехфазные элементы, а также взаимные индуктивности, различные линии электропередач и трансформаторы, заземление, нейтраль и т.д.

Обратите внимание, что модели в **SimPowerSystems** (P-модели с p- входами и p- выходами) имитируют процессы в электрических цепях и позволяют выполнять моделирование на принципиальном уровне. Они отличаются от S-моделей (с m- входами и с m- выходами) из других библиотек Simulink, в которых входные и выходные величины не имеют физического содержания, а линии соединения переносят некоторый информационный сигнал. С помощью S-блоков создаются модели на функциональном уровне.

Поэтому P-блоки не могут непосредственно подключаться к S-блокам. Для связи P-блоков с S-блоками используются лишь отдельные блоки библиотеки **SimPowerSystems**:

– в разделе **Measurements** (рисунок 23) размещаются блоки-измерители, имеющие p-входы и m-выходы (амперметры **Current Measurement**, вольтметры **Voltage Measurement** и т.д.). Эти блоки имеют p-входы для подключения измерителя к электрической цепи, а также по одному m-выходу (в блоке амперметра он обозначен «i», а в блоке вольтметра – «v»);

– в разделе **Electrical Sources** размещаются блоки источников электрических сигналов, имеющие m-входы и p-выходы/входы.

Другие блоки, предназначенные для преобразования, в данной работе не используются.

Кроме того, для работы **SimPowerSystems**-модели необходим блок **Powergui**, который размещается в разделе библиотеки **SimPowerSystems** (см. рисунок 20). Блок **Powergui** помещается в модель в любое место и не подключается к другим элементам. Он позволяет задать начальные значения переменных модели, выполнить расчет установившегося режима, осуществить инициализацию схемы, содержащей электрические машины, найти полное сопротивление (импеданс) цепи и т.д.

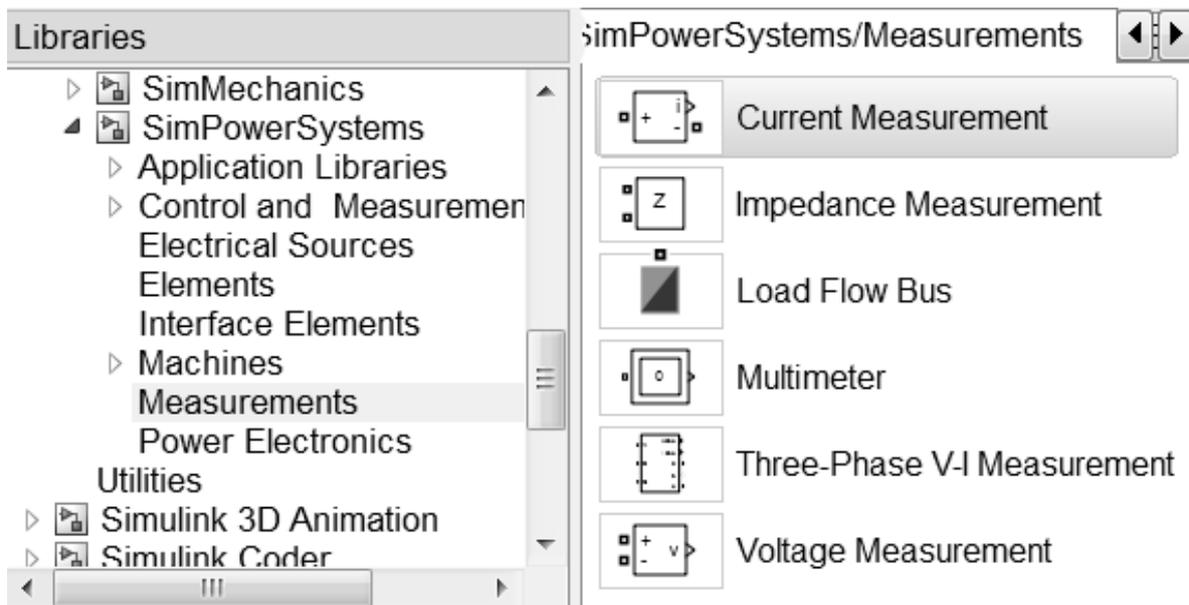


Рисунок 23

8.1 Создать модель одноконтурной RLC-цепи (рисунок 24) с источником синусоидального напряжения **AC Voltage Source**.

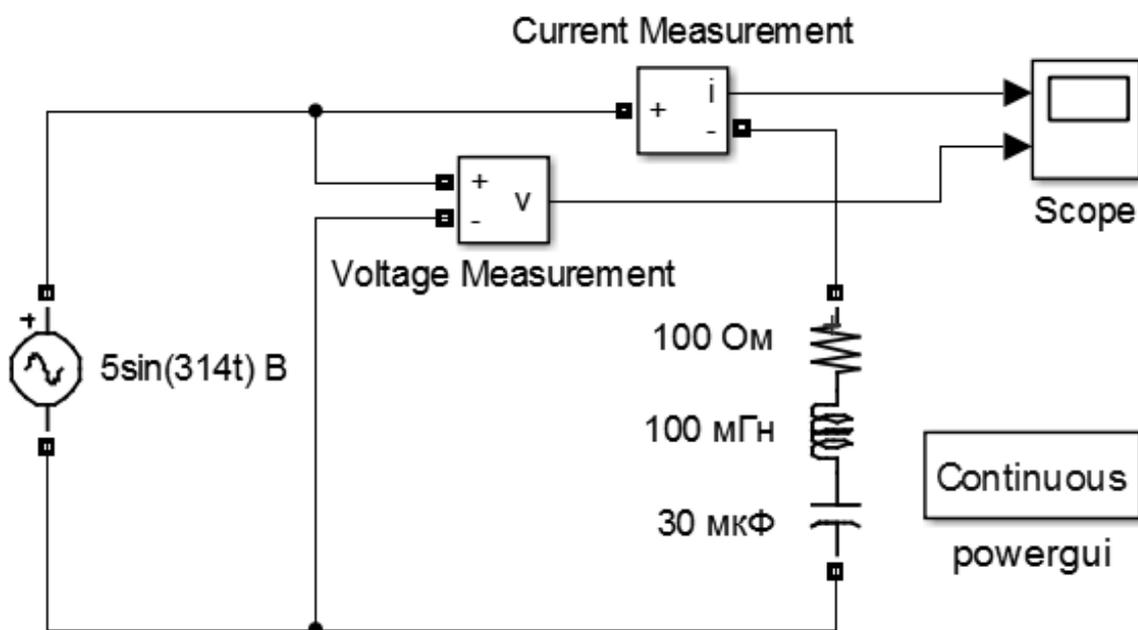


Рисунок 24

В качестве RLC-цепи использовать блок **Series RLC Branch**, представляющий собой последовательное соединение сопротивления, индуктивности и емкости, которым можно задать любые, в том числе нулевые и бесконечно большие, значения параметров (системная константа **inf**). Отредактируйте обозначения элементов на схеме в соответствии с рисунком 24, выполнив щелчок ЛКМ по текстовой надписи элемента.

Задать для блоков **AC Voltage Source** и **Series RLC Branch** значения параметров, указанные в соответствующем окне параметров (рисунки 25–26).

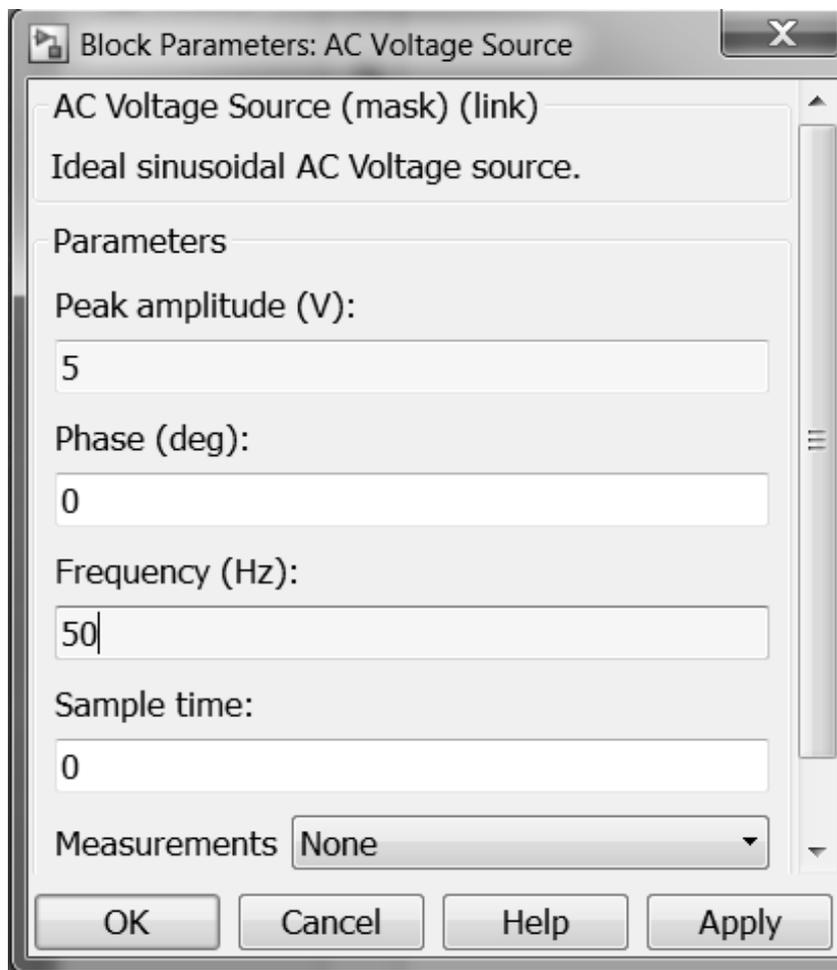


Рисунок 25

Для получения графиков зависимости тока в этой цепи и входного напряжения, а также для измерения сдвига по фазе между входным напряжением и током, используем двухканальный блок **Scope**, на входы которого подаются сигналы с m-выходов амперметра и вольтметра: блоки **Current Measurement** и **Voltage Measurement** соответственно.

8.2 Установить требуемые параметры моделирования с помощью команды **Simulation**⇒**Model Configuration Parameters**⇒**Solve**. Задать в области **Simulation time** значения начального времени моделирования (**Start time:**), равное «0» и конечного времени моделирования (**Stop time:**), равное «0.02». Выбрать в области **Solver options** (Параметры расчета) равномерный шаг дискретизации **Fixed step** и тип графика моделируемого процесса **ode1 (Euler)**.

Задать в области **Fixed step size** значение шага дискретизации равным «**0.0001**», что соответствует выбору 200 точек дискретизации.

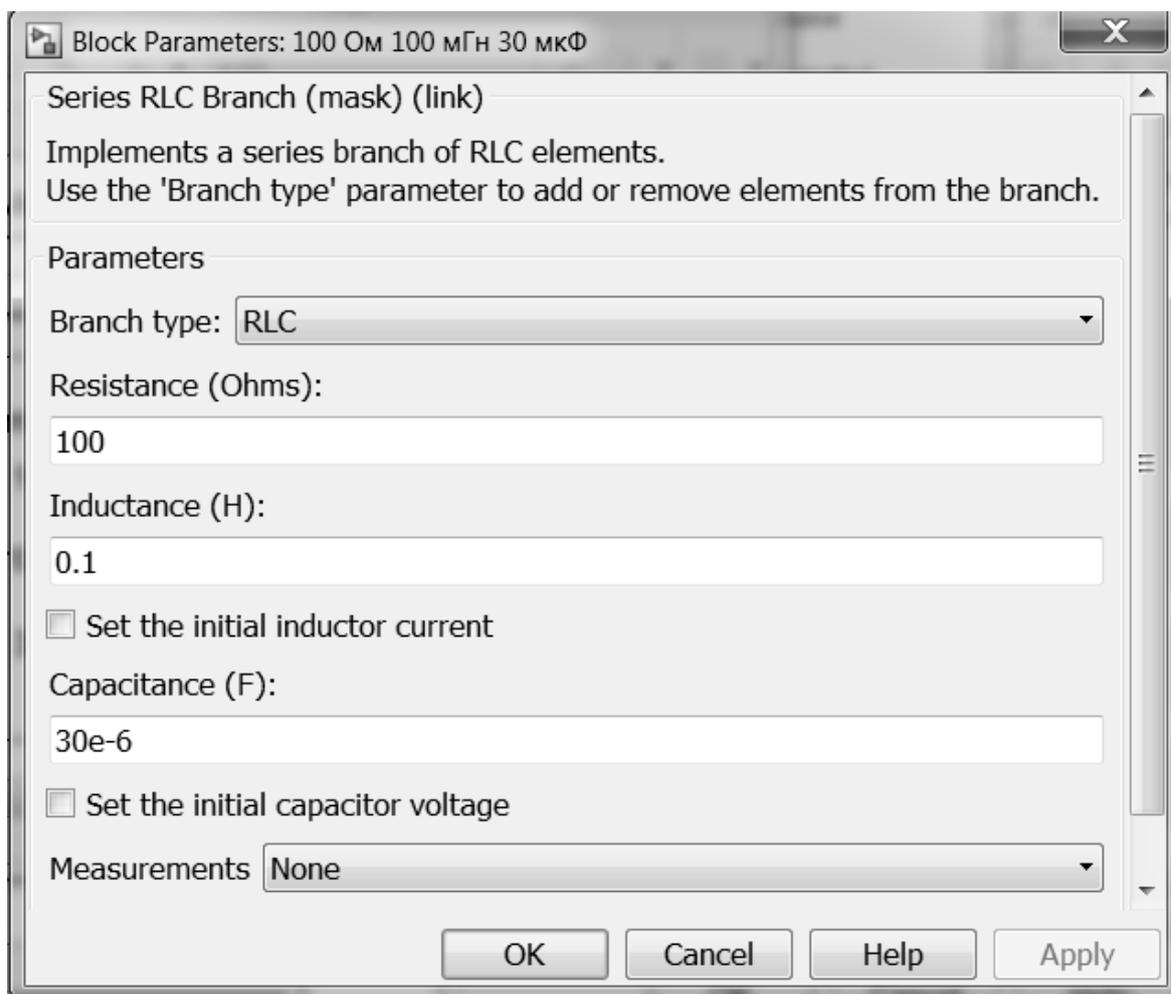


Рисунок 26

8.3 Начать моделирование с помощью команды **Run**, а затем дважды щелкнуть на изображении блока **Scope**. В результате на экране появится новое окно **Scope** с изображениями графиков изменения во времени тока и напряжения.

Установить оптимальный масштаб осей в окне **Scope** и проанализировать полученное в нем изображение (рисунок 27).

Из верхнего графика видно, что амплитудное значение тока в цепи примерно равно 40 мА. Из нижнего графика видно, что амплитудное значение входного напряжения в цепи равно 5 В.

Сдвиг по фазе между напряжением и током равен примерно  $35^\circ$  с минусом, что соответствует резистивно-емкостному характеру сопротивления цепи.

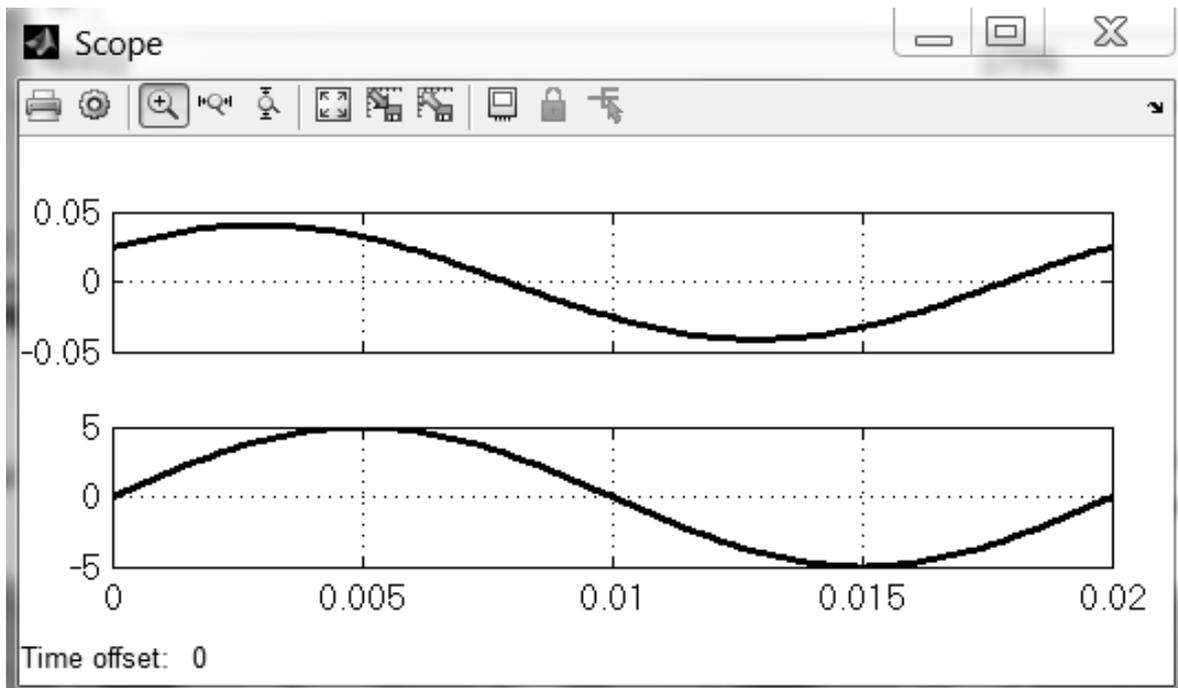


Рисунок 27

*Отчет*

8.4 Смоделировать схему, приведенную на рисунке 24, установив в ней значения амплитуды и частоты колебаний (в герцах) для источника синусоидального напряжения, равные номеру варианта.

Подобрать параметры моделирования таким образом, чтобы на графике в блоке **Scope** отображался один период колебаний гармонического сигнала. Включить в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с моделью и окна параметров входящих в нее блоков. Представить результаты моделирования в обзорном окне блока **Scope** для значения его параметра **Decimation**, равного 1. Провести анализ полученных графиков зависимостей и сделать выводы.

*Отчет*

8.5 Смоделировать схему, приведенную на рисунке 28, установив в ней значения амплитуды и частоты колебаний (в герцах), равные номеру варианта.

Подобрать параметры моделирования таким образом, чтобы на графиках в блоке **Scope** отображался один периода колебаний.

Блок **Fourier** находится в разделе **Control and Measurements Library** ⇒ **Measurements** библиотеки **SimPowerSystems** (рисунок 29).

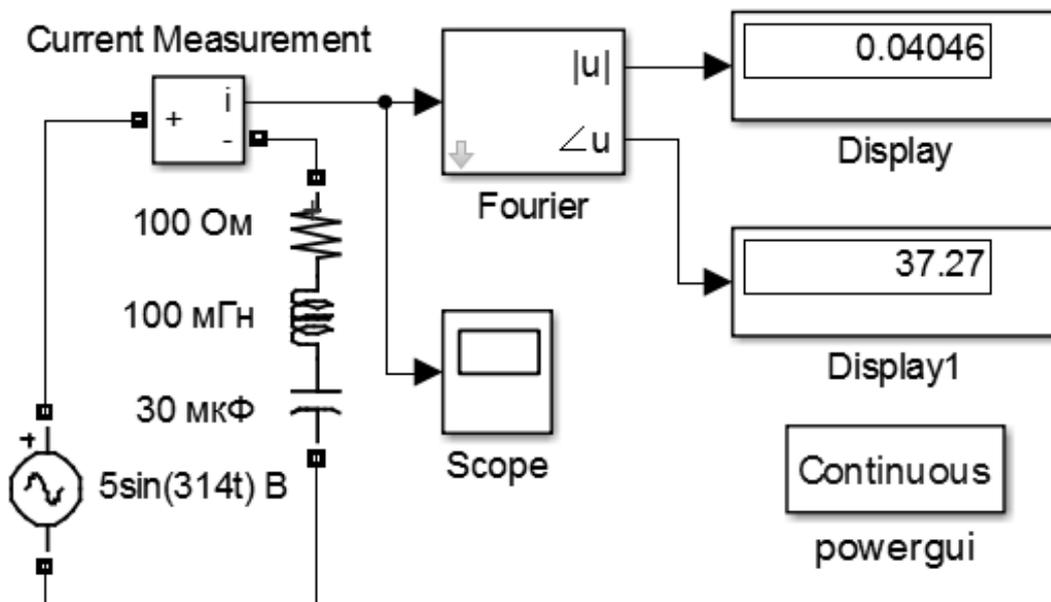


Рисунок 28

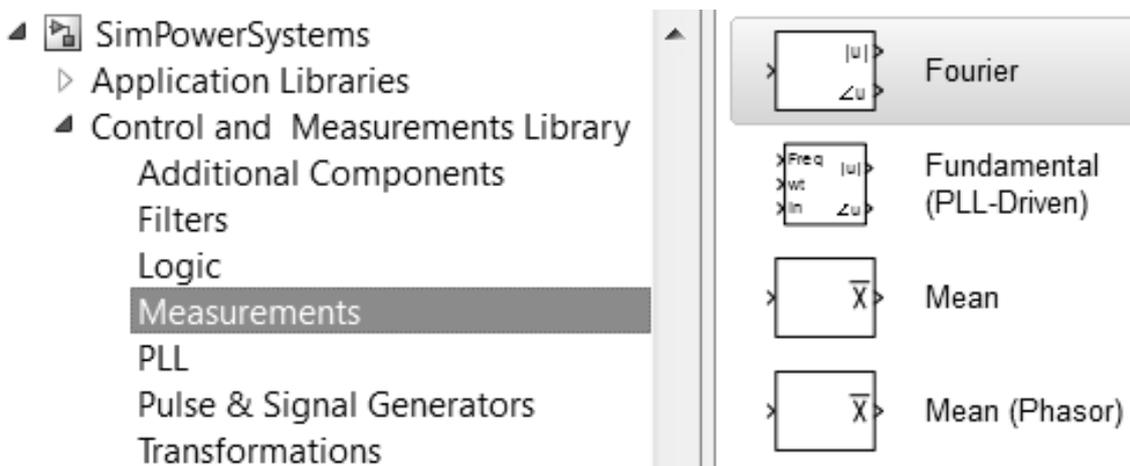


Рисунок 29

Задать в окне свойств блока **Fourier** значение частоты колебаний в герцах (**Fundamental frequency (Hz):**), равное номеру варианта, и номер гармоники (**Harmonic n (0=DC, 1=fundamental):**), равный «1».

Задать в окне свойств блоков **Display** и **Display1** формат вывода «**short**».

Включите в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с моделью и результатами моделирования на экране блоков **Display** и **Display1**, окна параметров входящих в модель блоков, а также обзорное окно блока **Scope**. Проведите анализ полученного графика зависимости и показаний блоков **Display** и **Display1**. Сделайте выводы.

## Контрольные вопросы

1. Что такое **Simulink Library Browser**?
2. Каким образом строятся блок-схемы в программном модуле **Simulink**?
3. Как в модель добавить новый блок? Как скопировать блок в окне модели?
4. Как соединить блоки между собой?
5. Как сделать, чтобы один и тот же сигнал поступал на несколько блоков?
6. Как удалить блок или связь между блоками?
7. Каким образом можно поворачивать блоки?
8. Какие настройки имеются у обзорного окна **Scope** и блока **Display**?
9. Какие настройки имеются у блоков-источников **Constant**, **Sine Wave**, **Signal Generator** и **Pulse Generator**?
10. Для чего предназначены блоки **Integrator**, **Derivative**, **Gain**, **Sum**, **Abs** и **Mux**?
11. Какие настройки необходимо задать в окне **Configuration Parameters** перед запуском модели?
12. Из каких соображений выбирается время моделирования?
13. Как выбирается значение шага при выборе моделирования с фиксированным шагом?
14. Чему равно максимальное значение шага при выборе моделирования с переменным шагом?
15. Чем отличаются Р-модели из раздела **SimPowerSystems** от обычных S-моделей **Simulink** и каким образом осуществляется связь между ними?
16. Как настраиваются параметры блоков **Series RLC Branch** и **AC Voltage Source** и какие значения они могут принимать?
17. Для чего предназначены блоки из раздела **Measurements**?
18. Каково назначение блока **Powergui**?
19. Какие настройки имеются у блока **Fourier**?

## Лабораторная работа № 2

# 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	$W(s) = \frac{K}{Ts + 1}$
Колебательное звено второго порядка (корни характеристического уравнения знаменателя передаточной функции должны быть комплексными)	$W(s) = \frac{K}{T_1 T_2 s^2 + T_2 s + 1}$
Усилительное (пропорциональное) звено	$W(s) = K$
Дифференцирующее звено	$W(s) = Ts$
Интегрирующее звено	$W(s) = \frac{1}{Ts}$

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  $\varphi$ . Структурная схема системы приведена на рисунке 1.

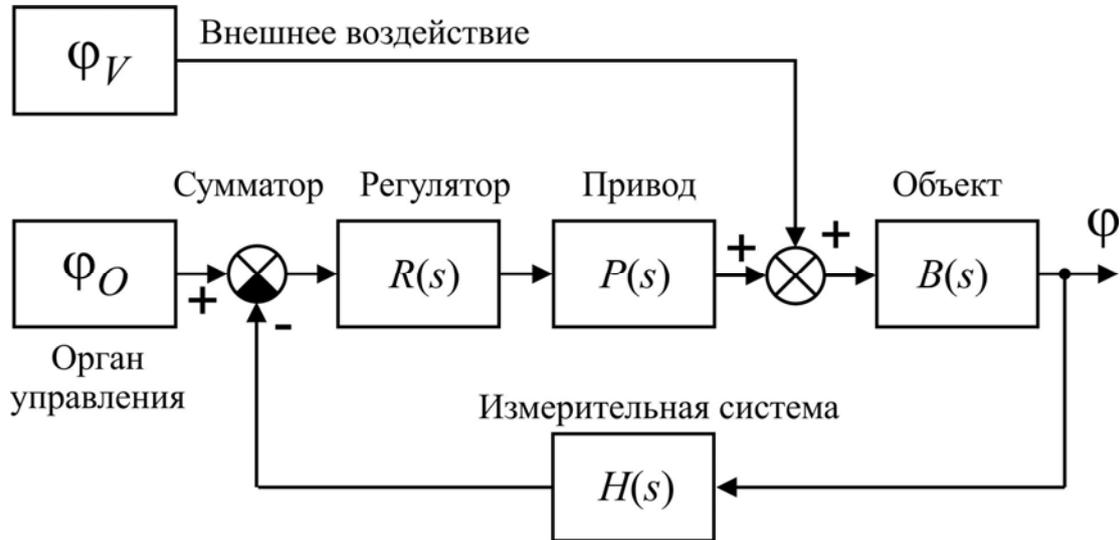


Рисунок 1

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

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,  $n = 2, \dots, 20$ ).

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

– угол поворота объекта  $\varphi_O = 10^\circ$ ;

- угол внешнего воздействия  $\varphi_U = 2^\circ$ ;
- 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**<sup>1</sup>), 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

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

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  $s$ .

---

<sup>1</sup> 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:

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

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).

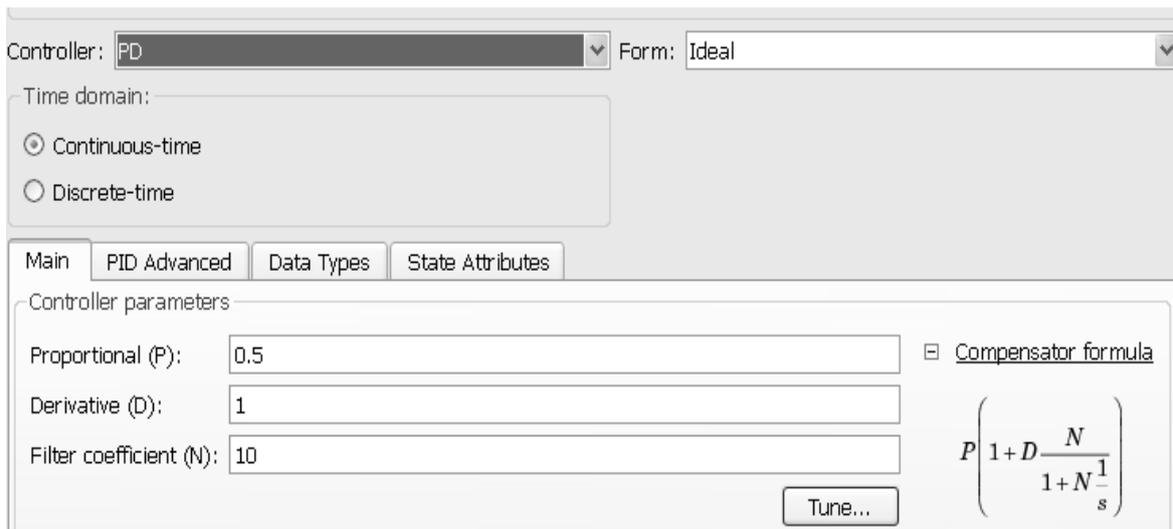


Рисунок 2

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  $\varphi_0$  (**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  $\varphi_U = 0$ .

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).

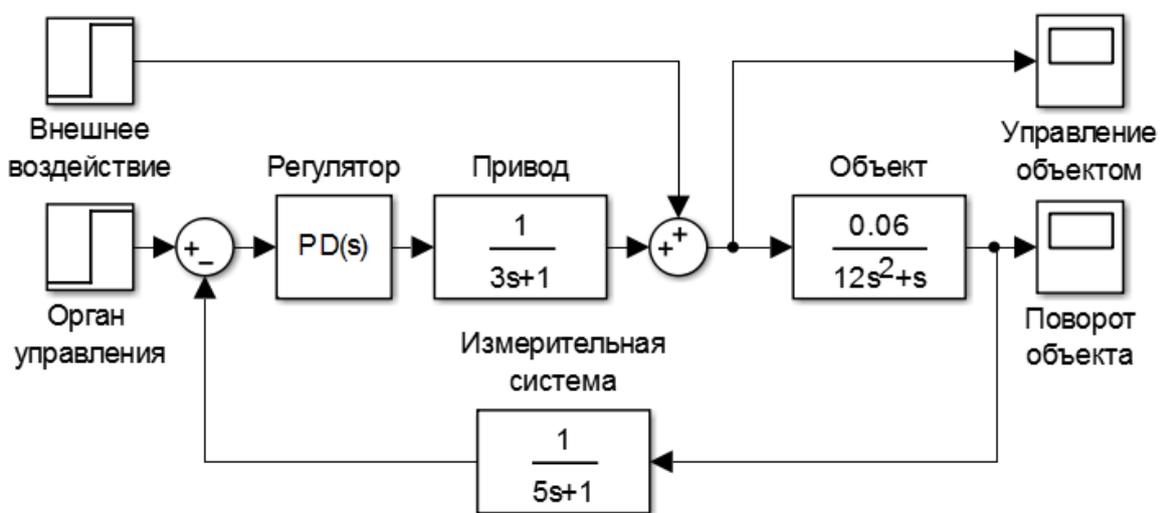


Рисунок 3

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**.

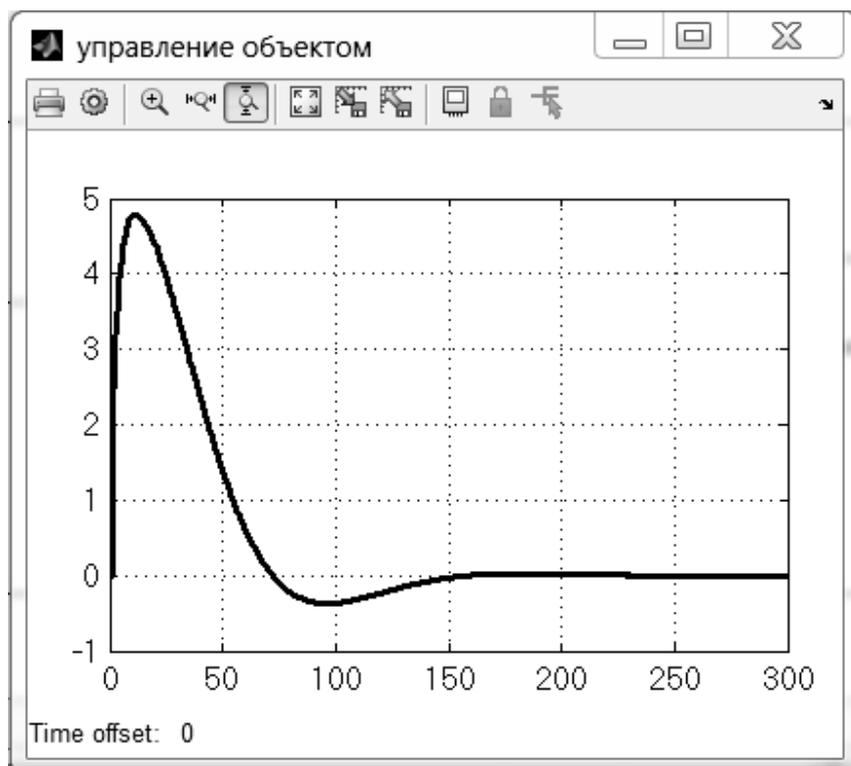


Рисунок 4

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

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

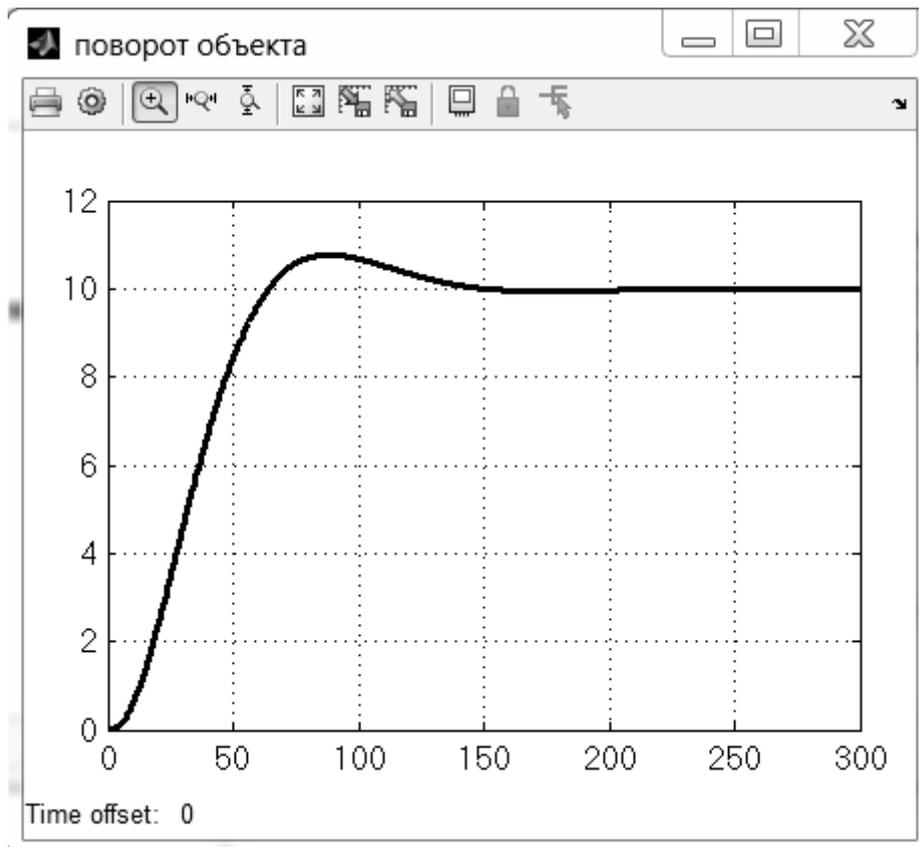


Рисунок 5

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  $10^\circ$ .

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:

Limit data points

Save data to workspace

**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  $\varphi$ , **\delta** – букву  $\delta$ .

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**).

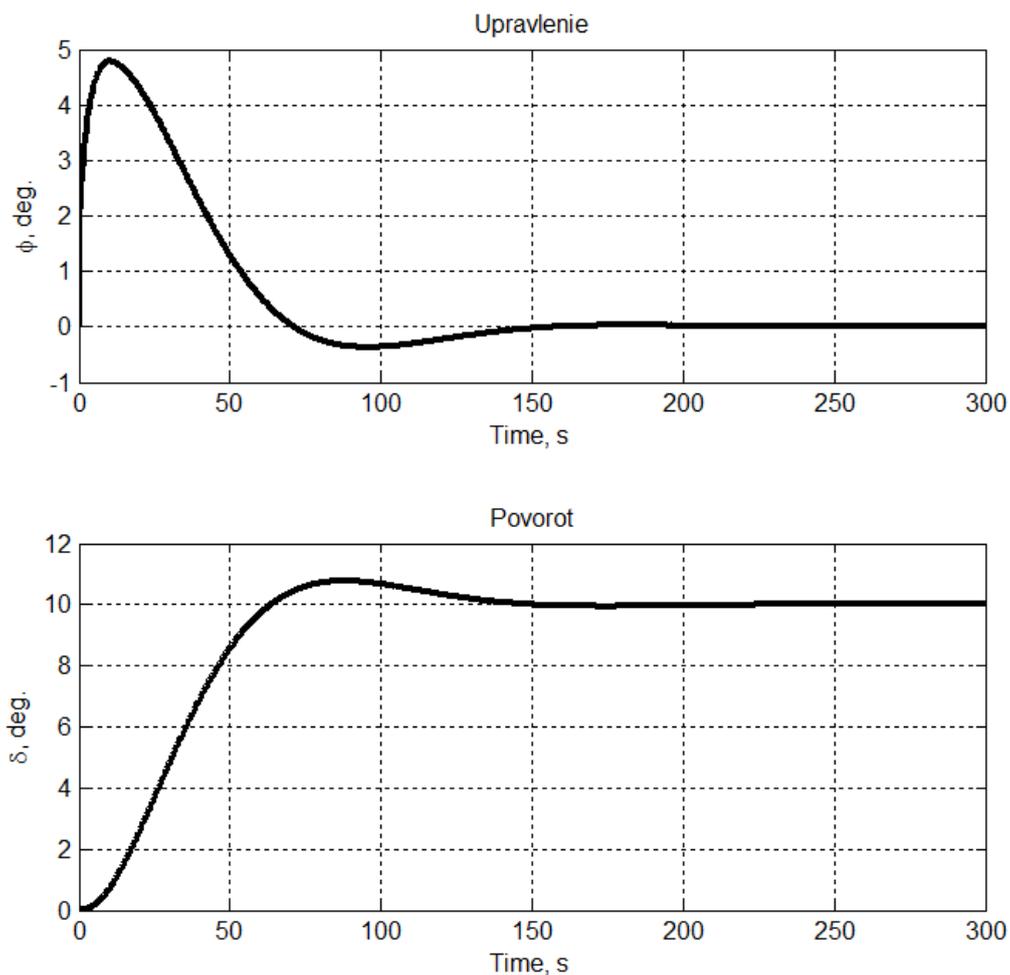


Рисунок 6

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  $2^\circ$ ), и выполнить моделирование.

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

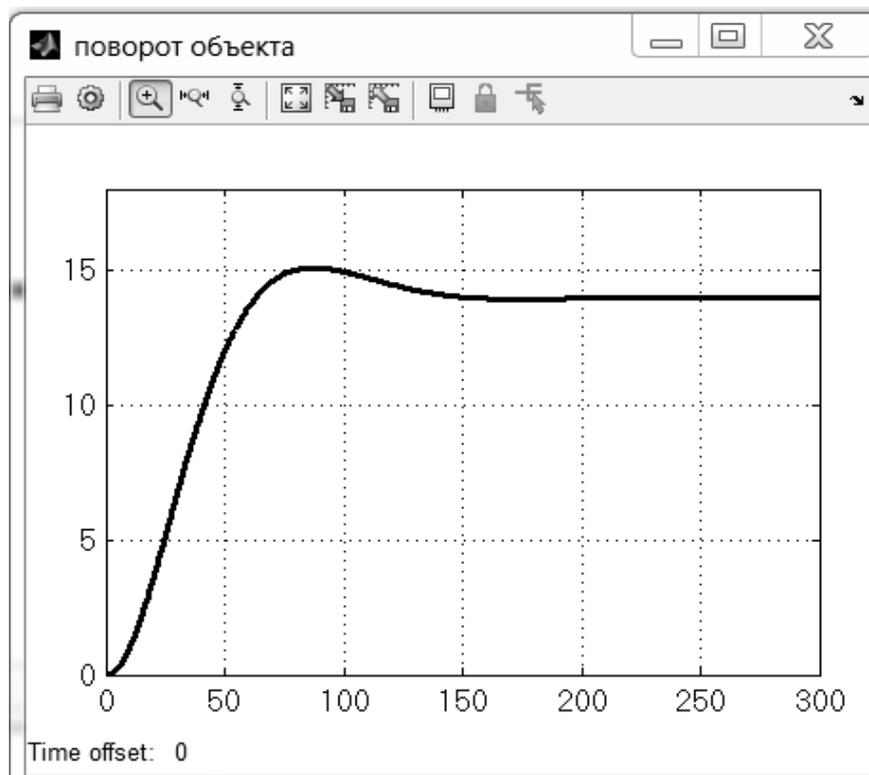


Рисунок 7

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

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;  
fx >>
```

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.

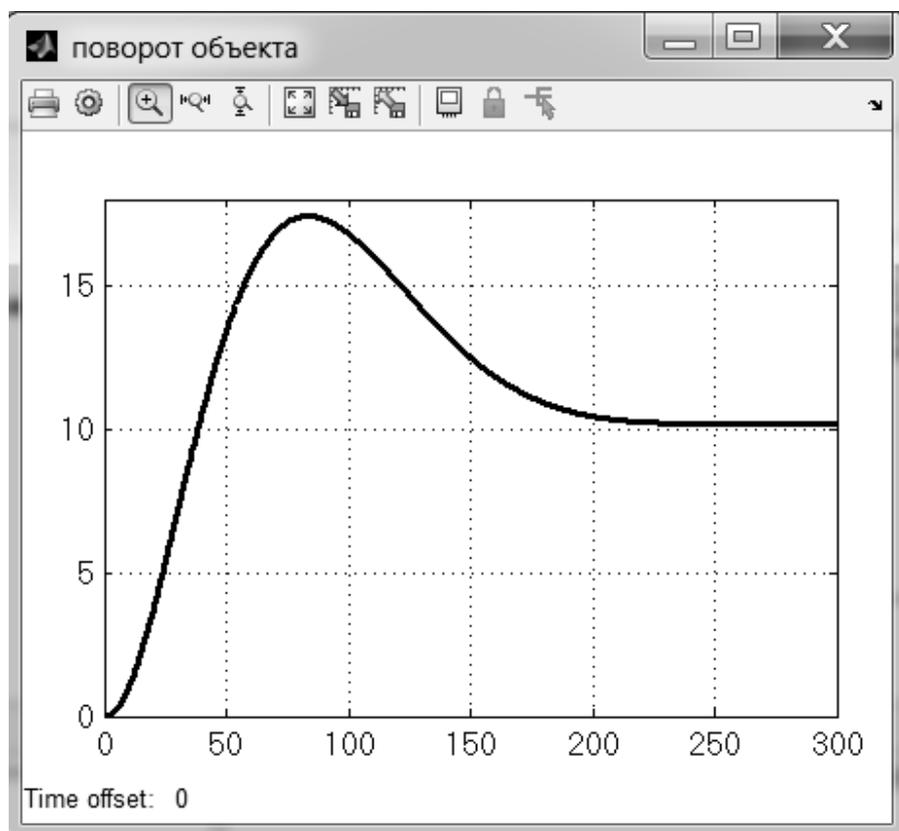


Рисунок 8

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  $10^\circ$ .

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.

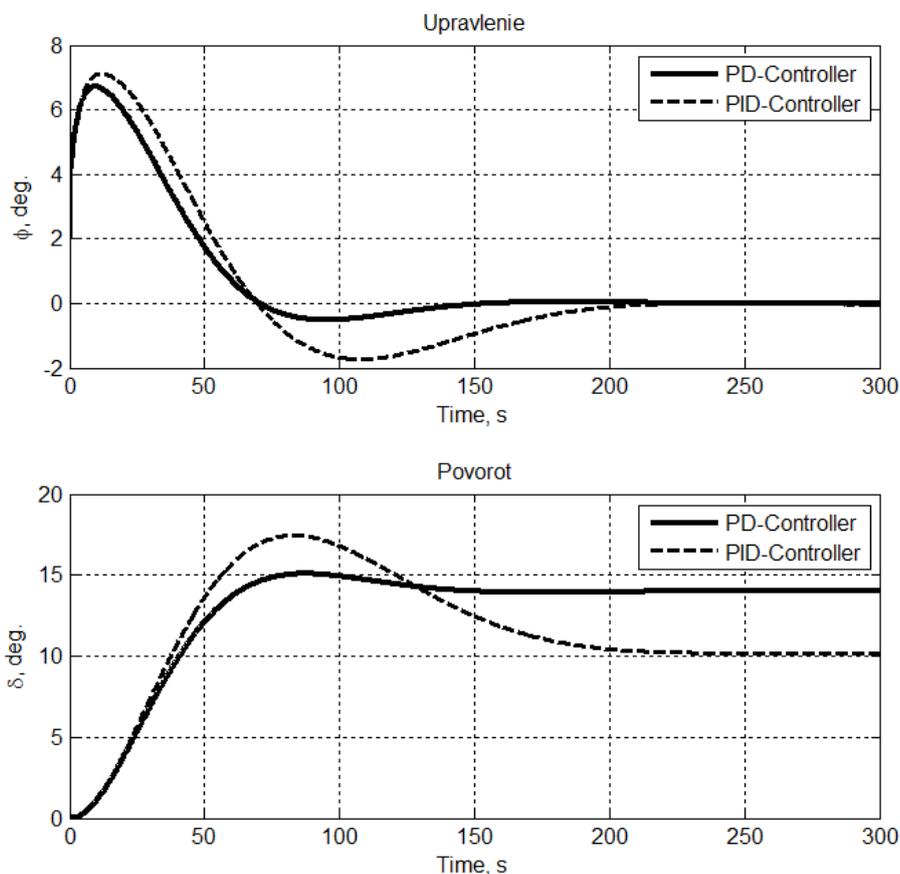


Рисунок 9

## 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			
			$T_B, c$	$K, \text{ }^\circ/c$			$T_P, c$	$T_H, c$	$K_P$	$T_I, c$
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

# Лабораторная работа № 3

## Расчет и моделирование трехфазной электрической цепи при соединении фаз приемника по схеме звезда в системе MATLAB-Simulink

**Цель работы:** исследование трехфазной цепи по схеме звезда при различных режимах ее работы в среде MATLAB-Simulink.

### Методические указания

Современные сети промышленного электроснабжения являются в основном трехфазными. Источником энергии в трехфазной цепи является генератор с симметричной трехфазной обмоткой, в каждой фазе которого индуцируются электродвижущие силы (ЭДС), имеющие одинаковые амплитуды, сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . Такая система ЭДС называется симметричной. Комплексы действующих значений ЭДС представляются выражениями:

$$\underline{E}_A = E, \quad \underline{E}_B = E \cdot e^{-j120^\circ}, \quad \underline{E}_C = E \cdot e^{j120^\circ}.$$

В симметричных трехфазных цепях по схеме звезда (рисунок 1), когда комплексы фазных сопротивлений нагрузки равны ( $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}e^{j\varphi}$ ), достаточно провести расчет одной фазы по формуле

$$I_\Phi = U_\Phi / Z_\Phi.$$

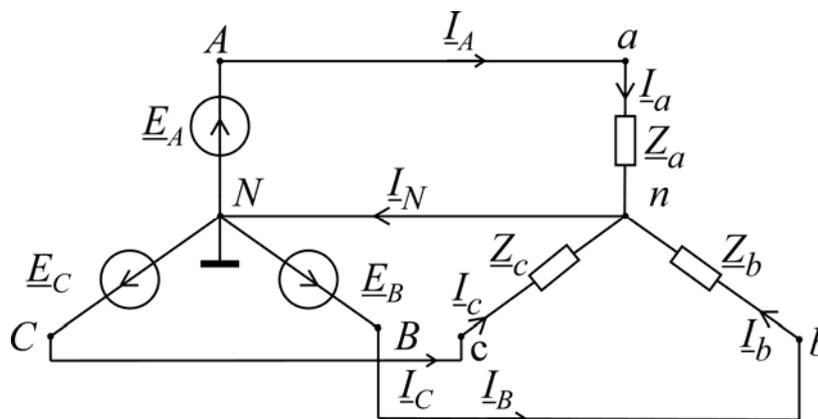


Рисунок 1

Токи и напряжения в других фазах находят из условия симметрии. Так, если в результате расчета определили  $\underline{I}_a = I_a e^{-j\varphi}$ ,

$\underline{I}_b = I_b e^{-j(120^\circ + \varphi)}$ , а  $\underline{I}_c = I_c e^{j(120^\circ - \varphi)}$ , то ток в нейтральном проводе равен

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0.$$

На рисунке 2 изображена векторная диаграмма напряжений для рассматриваемой цепи, из которой следует, что для симметричной нагрузки справедливо следующее соотношение между линейными и фазными напряжениями  $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$ .

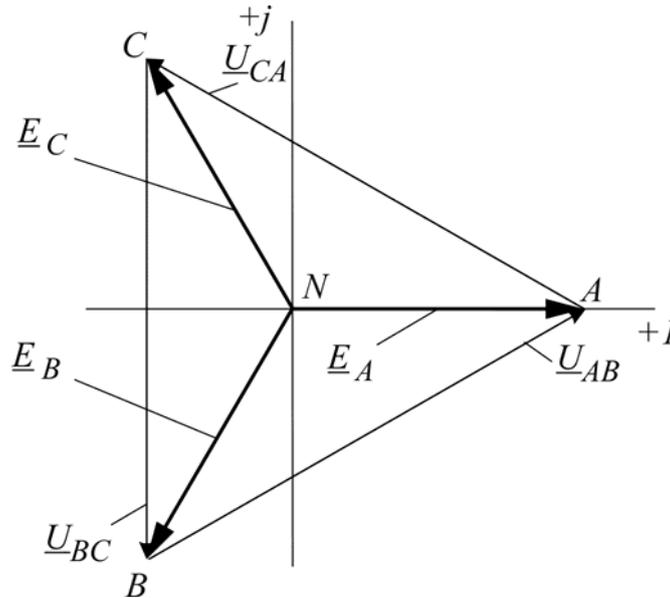


Рисунок 2

В случае несимметричной нагрузки ( $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$ ) возникает смещение потенциала нейтрали  $\varphi_n$  приемника относительно потенциала нейтрали  $\varphi_N$  источника, которое может быть определено по методу двух узлов:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{E}_a \underline{Y}_a + \underline{E}_b \underline{Y}_b + \underline{E}_c \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N},$$

где  $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, \underline{Y}_N$  – комплексные проводимости фаз приемника и нулевого провода.

Фазные напряжения приемника и токи в фазах приемника (они же и линейные токи) равны, соответственно:

$$\begin{cases} \underline{U}_a = \underline{E}_A - \underline{U}_{nN} \\ \underline{U}_b = \underline{E}_B - \underline{U}_{nN} \\ \underline{U}_c = \underline{E}_C - \underline{U}_{nN} \end{cases}, \quad \begin{cases} \underline{I}_a = (\underline{E}_A - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_a \\ \underline{I}_b = (\underline{E}_B - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_b \\ \underline{I}_c = (\underline{E}_C - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_c \end{cases}.$$

Один из возможных вариантов векторно-топографической диаграммы для несимметричной нагрузки представлен на рисунке 3.

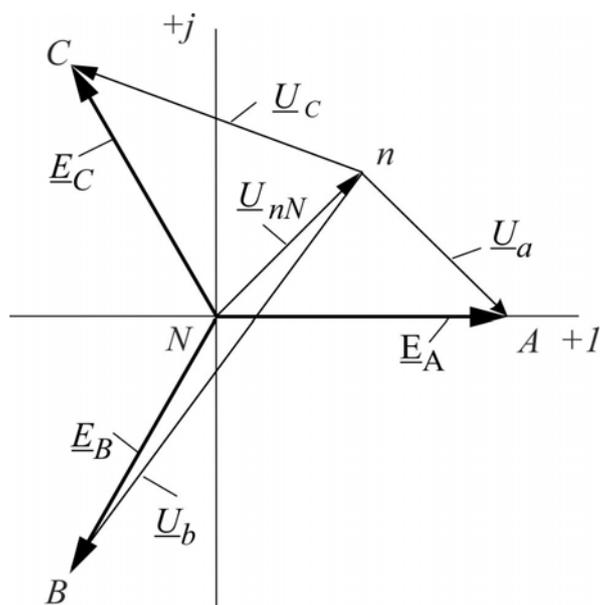


Рисунок 3

Построение следует начать с равностороннего треугольника линейных напряжений. Положение точки  $n$  определяет вектор напряжения смещения нейтрали  $\underline{U}_{nN}$ . В случае несимметричной нагрузки векторы фазных напряжений начинаются не из точки  $N$ , а из точки  $n$ . Из векторной диаграммы видно, что при наличии напряжения смещения нуля  $\underline{U}_{nN}$  возникает перекося фазных напряжений по модулю и по фазе.

Активная мощность, потребляемая трехфазной цепью, равна сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = P_a + P_b + P_c = I_a^2 R_a + I_b^2 R_b + I_c^2 R_c.$$

### Рабочее задание

1 Рассчитать трехфазную электрическую цепь по схеме звезда (рисунок 1) при симметричной и несимметричной нагрузке с нейтральным проводом ( $Y_{nN} = \infty$ ) и без него ( $Y_{nN} = 0$ ), используя рабочее пространство MATLAB. Установить следующие значения параметров в режиме симметричной нагрузки: фазные сопротивления  $R_\phi$  в омах равны номеру варианта  $N$  плюс 30; линейные напряжения равны 380 В с частотой  $f = 50$  Гц. Значения параметров в режиме несимметричной нагрузки в зависимости от номера варианта установить в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Значение параметров

Номер варианта	Элементы в фазе			$R'$ , Ом	Значения емкости конденсатора $C$ , мкФ	Обрыв в фазе
	$A$	$B$	$C$			
1	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}$	30	20	$A$
2	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	40	15	$B$
3	$R_{\phi}$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R'$	50	10	$C$
4	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}$	60	5	$A$
5	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	70	20	$B$
6	$R_{\phi}$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	30	15	$C$
7	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	40	10	$A$
8		$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}, R'$	50	5	$B$
9	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R'$	60	20	$C$
10	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	70	15	$A$
11	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}, C$	30	10	$B$
12	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	40	5	$C$
13	$R_{\phi}, R', C$	$R_{\phi}, R', C$	$R_{\phi}$	50	20	$A$
14	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R', C$	$R_{\phi}, R', C$	60	15	$B$
15	$R_{\phi}, R', C$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R', C$	70	10	$C$
16	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}, R', C$	$R_{\phi}$	30	5	$A$
17	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}, R', C$	40	20	$B$
18	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R', C$	50	15	$C$
19	$R_{\phi}, R', C$	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	60	10	$A$
20	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R', C$	$R_{\phi}, C$	70	5	$B$

Результаты расчета для симметричной и несимметричной нагрузки занести в таблицы 2 и 3.

Таблица 2 – Симметричная нагрузка

Способ определения	$U_L$ , В	$U_a$ , В	$U_b$ , В	$U_c$ , В	$U_{nN}$ , В	$I_a$ , А	$I_b$ , А	$I_c$ , А	$I_{nN}$ , А	$P$ , Вт
$Y_{nN} = \infty$										
Расчет										
Моделирование										
$Y_{nN} = 0$										
Расчет										
Моделирование										

Таблица 3 – Несимметричная нагрузка

Способ определения	$U_{л,}$ В	$U_{a,}$ В	$U_{b,}$ В	$U_{c,}$ В	$U_{nN,}$ В	$I_{a,}$ А	$I_{b,}$ А	$I_{c,}$ А	$I_{nN,}$ А	$P,$ Вт
$Y_{nN} = \infty$										
Расчет										
Моделирование										
$Y_{nN} = 0$										
Расчет										
Моделирование										

По результатам расчета построить векторные диаграммы для токов и напряжений, используя функцию MATLAB **compass (VR,VI)**. Проверить по полученным диаграммам выполнение законов Кирхгофа и сделать выводы.

Обратить внимание на сумму фазных токов при симметричной и несимметричной нагрузке, а также на напряжение смещения нуля  $U_{nN}$  для случая несимметричной нагрузки без нейтрального провода. Сделать выводы.

Проверить выполнение условия  $U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}$  для симметричной и несимметричной нагрузок. Сделать выводы.

2 Используя рабочее пространство MATLAB рассчитать трехфазную электрическую цепь по схеме звезда при несимметричной нагрузке без нейтрального провода в режиме обрыва одной из фаз в соответствии с таблицей 1. Полученные значения занести в таблицу 4.

Таблица 4 – Несимметричная нагрузка без нейтрального провода и обрыв в фазе

Способ определения	$U_{a,}$ В	$U_{b,}$ В	$U_{c,}$ В	$I_{a,}$ А	$I_{b,}$ А	$I_{c,}$ А	$P,$ Вт
Расчет							
Моделирование							

По результатам расчета построить векторные диаграммы напряжений, используя функцию MATLAB **compass (VR,VI)**. Проверить по полученным диаграммам выполнение законов Кирхгофа и сделать выводы.

3 Смоделировать в системе **Simulink** заданную электрическую цепь для симметричной нагрузки с нейтральным проводом, используя виртуальные блоки пакета **SimPower System** (рисунок 4).

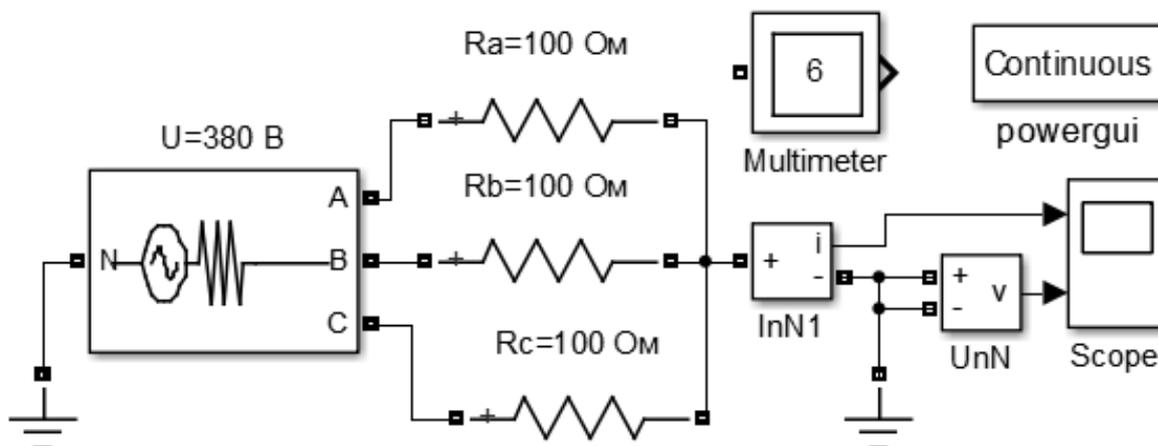


Рисунок 4

Выбрать блок трехфазного генератора **Three-Phase Source** (раздел **Electrical Sourcer** библиотеки **SimPower System**).

Добавить в схему два блока «Земля»  $\perp$ , а в качестве фазных сопротивлений используйте блоки **Series RLC Branch** (раздел **Elements** библиотеки **SimPower System**).

Для измерения токов и напряжений добавить в схему амперметр **Current Measurement**, вольтметр **Voltage Measurement** и мультиметр **Multimeter** (раздел **Measurements** библиотеки **SimPower System**), а также обзорное окно **Scope** (раздел **Sinks** библиотеки **Simulink**).

С помощью соответствующих текстовых полей отредактировать имена блоков в соответствии с вариантом задания (см. рисунок 4).

Добавить в схему блок **Powergui**.

4 Задать для трехфазного генератора значения параметров, указанные на рисунке 5.

Параметр **Phase-to-phase rms voltage (V)** задает действующее значение линейного напряжения.

Параметр **Internal connection (Y<sub>n</sub>)** задает способ соединения фаз источника по схеме звезда с нулевым проводом.

Параметр **Source resistance (Ohms)** задает собственное сопротивление источника в омах.

Параметр **Source inductance (H)** задает собственную индуктивность источника в генриях.

5 Установить в окне **Block Parameters** (рисунок 6) заданное в соответствии с вариантом значение сопротивления для фазного сопротивления. Задать в списке **Measurements** (Измеряемые переменные) (рисунок 6) значение параметра **Branch voltage and current**, что позволяет передать в блок **Multimeter** переменные, временные диаграммы для которых можно увидеть после запуска процесса моделирования в окне **Simulation result for: Multimeter**. Отображаемым сигналам в блоке **Multimeter** присваиваются метки: **Ib** – ток цепи, **Ub** – напряжение цепи.

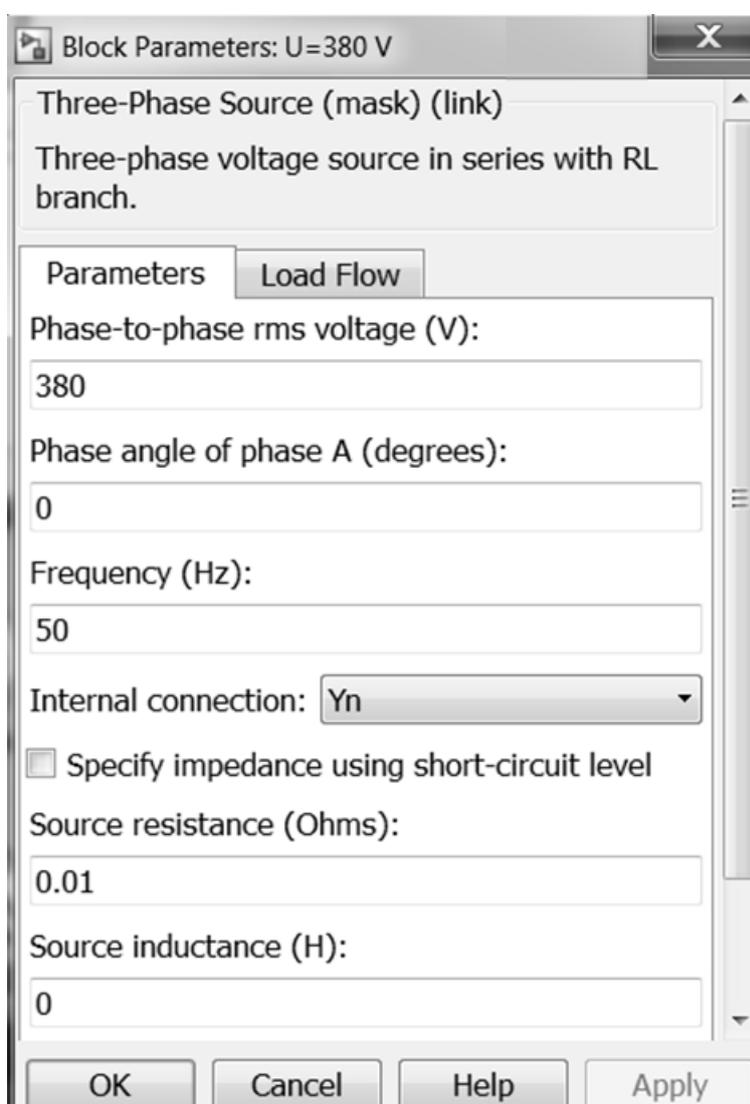


Рисунок 5

6 Выполнить двойной щелчок по блоку **Multimeter**. В результате откроется окно (рисунок 7), в котором можно задать выводимые

мые временные диаграммы и порядок их вывода в окне **Simulation result for: Multimeter**.

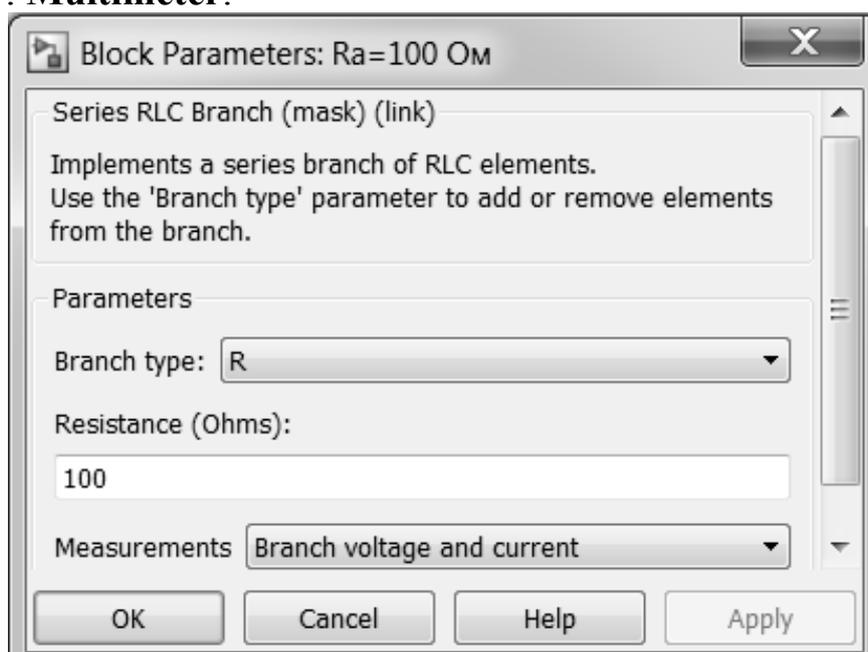


Рисунок 6

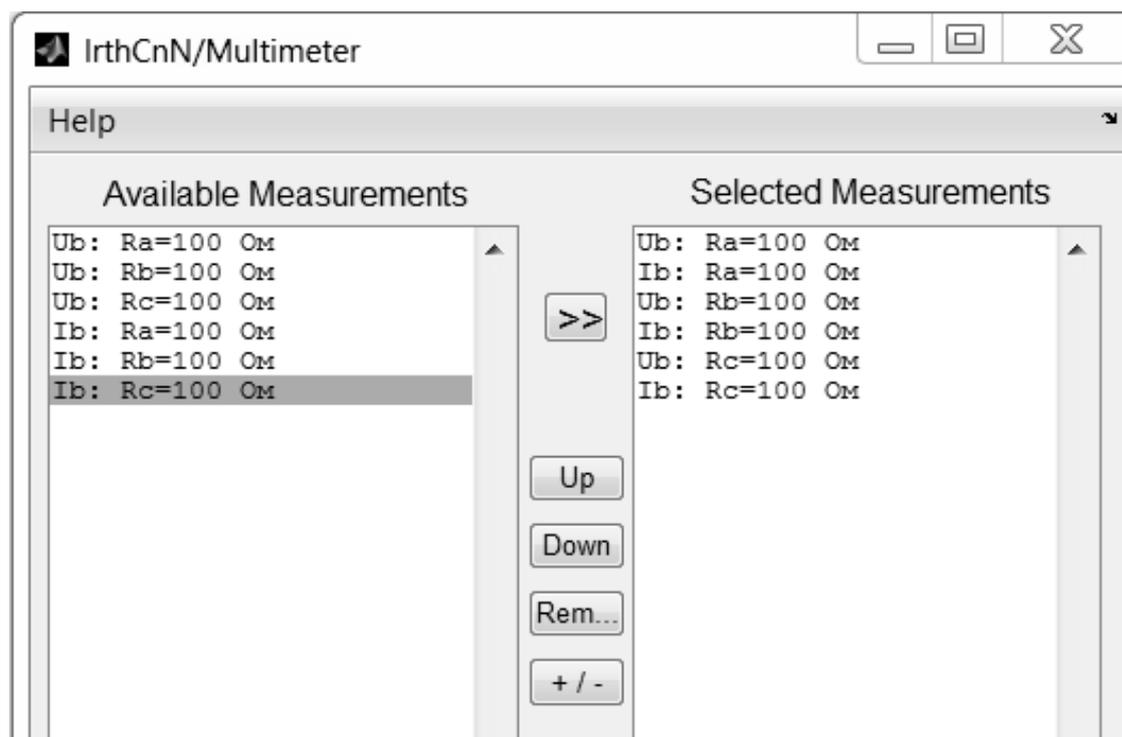


Рисунок 7

В окне **Available Measurements** блока **Multimeter** отображаются доступные для измерения переменные (токи и напряжения), для которых установлен параметр **Measurements**, отличный от **None**.

В окне **Selected Measurements** блока **Multimeter** отображаются измеряемые переменные, которые будут передаваться на выход блока **Multimeter**.

Включить в список измеряемых переменных все доступные для измерения переменные, используя следующие кнопки:

[>>] – добавить выделенную переменную в список измеряемых;

[Up] – передвинуть вверх выделенную переменную в списке;

[Down] – передвинуть вниз выделенную переменную в списке;

[Remove] – удалить выделенную переменную из списка;

[+ / -] – изменить знак выделенной переменной.

Установить флажок **Plot selected measurements** для вывода соответствующих временных диаграмм.

Закрывать окно, нажав клавишу **Close**.

7 Установить параметры моделирования с помощью команды **Simulation**⇒**Model Cofiguration Parameters...**⇒**Solve**.

Задайте в области **Simulation time** значения начального (**Start time:**) и конечного (**Stop time:**) времени в соответствии с рисунком 8.

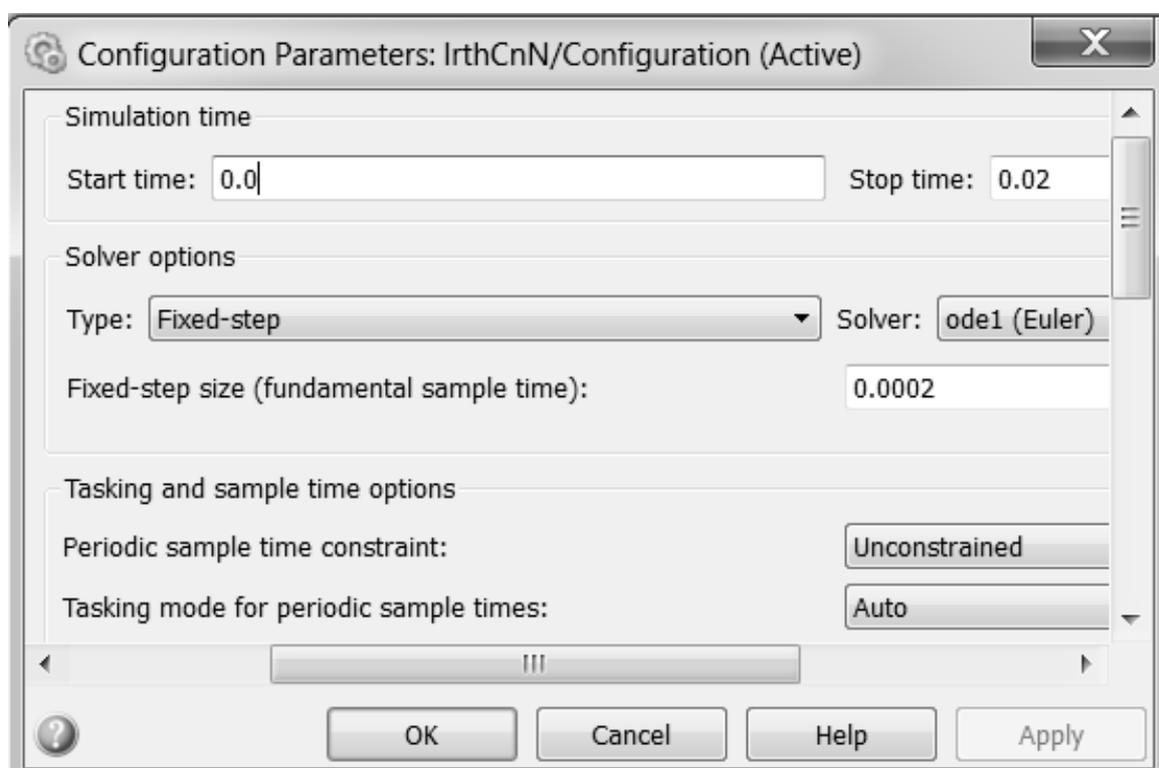


Рисунок 8

В области **Solver options** (см. рисунок 8) выбрать равномерный шаг дискретизации **Fixed step** и тип графика моделируемого процесса

**ode1 (Euler).** Задать в области **Fixed step size** значение шага дискретизации, равное «**0.0002**».

8 Начать моделирование с помощью команды  (**Simulation**⇒**Run**). В результате откроется окно **Simulation result for: Multimeter** (рисунок 9) с временными диаграммами напряжений и токов для каждой из фаз. С помощью инструмента **Data Cursor**  (рисунок 9) измерить амплитудные значения фазных напряжений и токов, пересчитать для них соответствующие действующие значения и занести в таблицу 2 ( $Y_{nN} = \infty$ ). Сравнить их с соответствующими расчетными значениями. Сделать выводы.

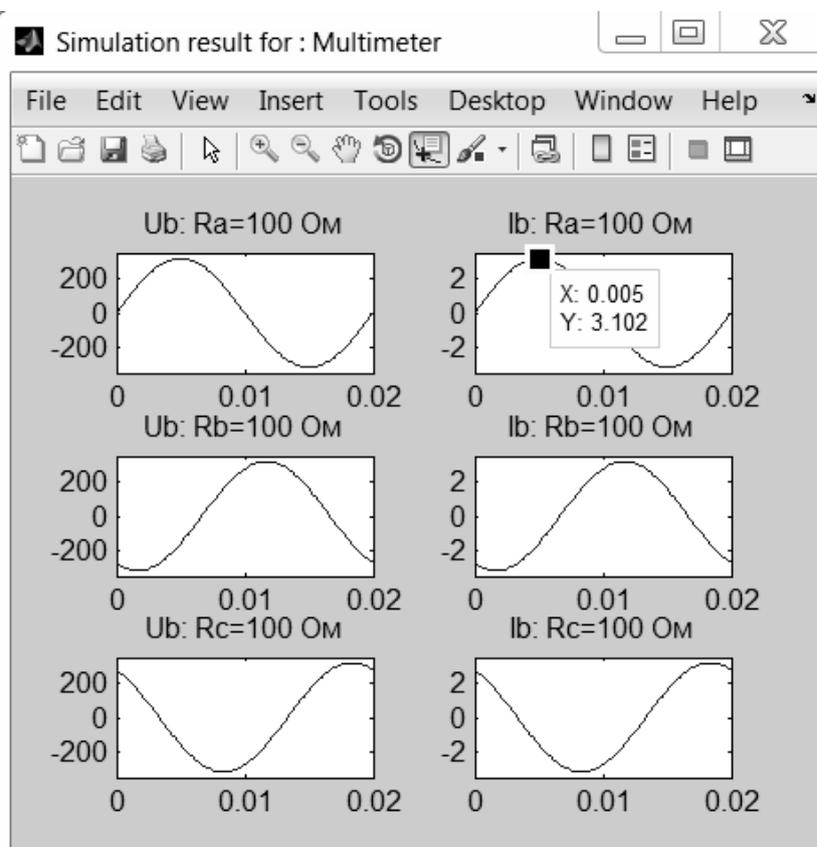


Рисунок 9

9 Развернуть обзорное окно **Scope** (рисунок 10), в первом графическом поле которого отображается временная диаграмма для тока в нейтральном проводе  $i_{nN}(t)$ , а во втором – временная диаграмма для напряжения на нейтральном проводе  $u_{nN}(t)$ . Оценить действующие значения тока  $I_{nN}$  (в амперах, с точностью два знака после запятой) и напряжения  $U_{nN}$  (в вольтах, с точностью один знак после запятой) в нейтральном проводе и занести их в таблицу 2

( $Y_{nN} = \infty$ ). Сравнить их с соответствующими расчетными значениями и сделать выводы.

10 Рассчитать по результатам моделирования значение активной мощности, потребляемой цепью, и занести в таблицу 2.

11 Удалить линию, соединяющую входы вольтметра, которая моделирует нейтральный провод  $n-N$  на рисунке 4, и повторить для полученной схемы (рисунок 11) пп. 8–10.

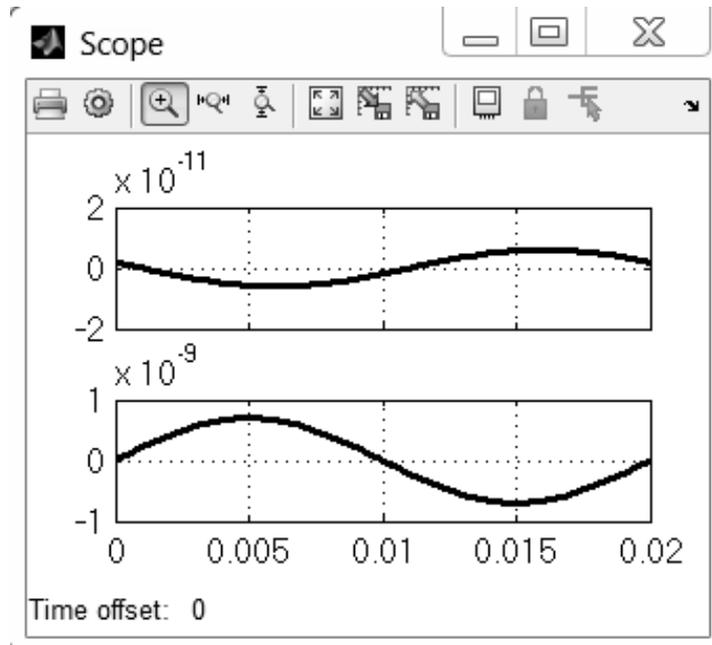


Рисунок 10

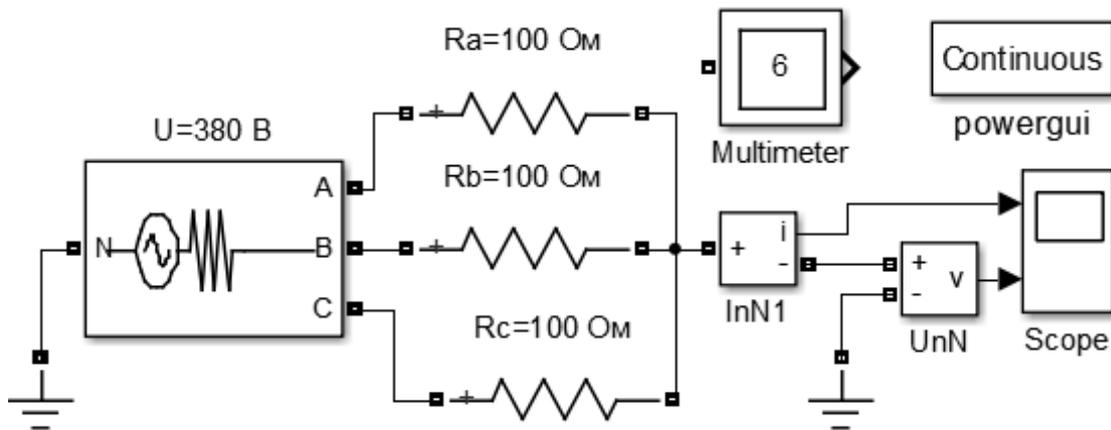


Рисунок 11

Полученные результаты измерения занести в таблицу 2 для  $Y_{nN} = 0$  и сравнить их с соответствующими расчетными значениями из таблицы 2. Сделать выводы.

12 Смоделировать в системе Simulink заданную электрическую цепь для несимметричной нагрузки с нейтральным проводом, используя виртуальные блоки пакета **SimPower System** (рису-

нок 12). С помощью соответствующих текстовых полей отредактируйте имена блоков в соответствии с вариантом задания.

Задать требуемые значения фазных сопротивлений цепи в блоках **Series RLC Branch** и выбрать для них значение параметра **Branch voltage and current** из списка **Measurements**.

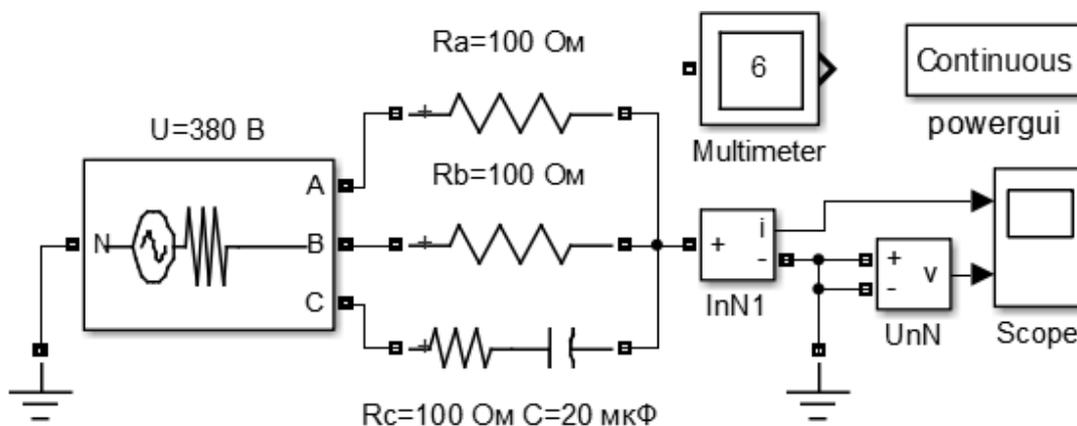


Рисунок 12

13 Используя графический интерфейс пользователя (GUI), рассчитать установившийся режим для схемы (рисунок 10), выполнив двойной щелчок по блоку **Powergui**, и в появившемся окне (рисунок 13) нажать кнопку **Steady-State Voltages and Currents** (Установившийся режим).

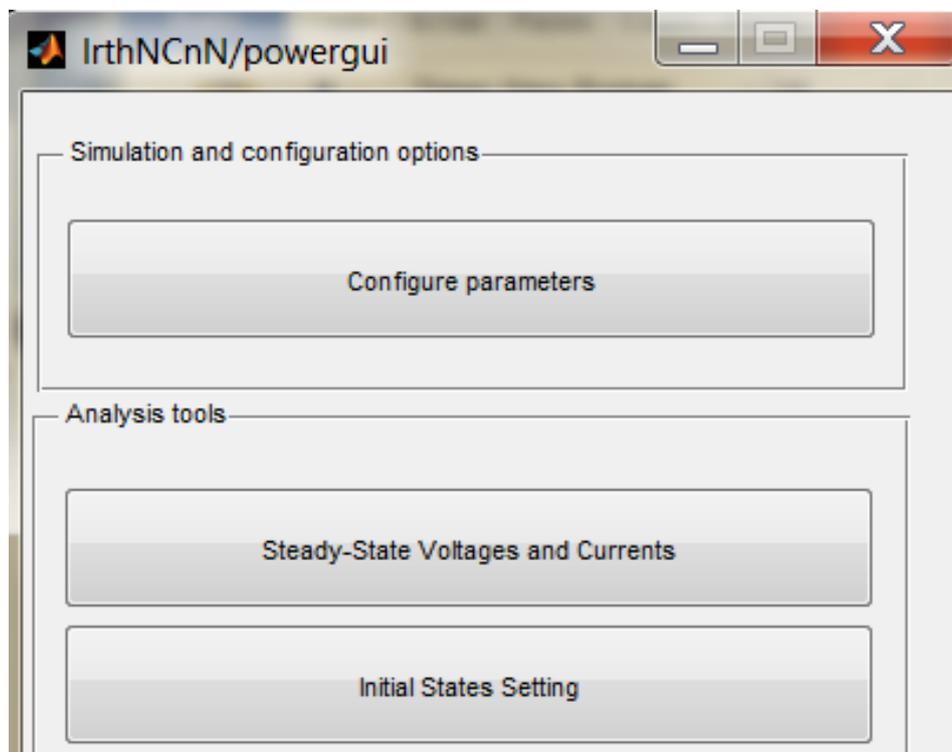


Рисунок 13

В результате откроется окно **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool** (рисунок 14), в правой части которого необходимо выбрать:

- вид системы измерения **Units** – **RMS values** (действующие значения);
- задать значение частоты источников **Frequency** – **50 Гц**;
- выбрать отображаемые переменные **Display: States** (переменные состояния (токи через индуктивности и напряжения на конденсаторах)) и **Measurement** (измеряемые переменные);
- задать требуемый формат вывода результата измерения **Format:** и **Ordering:**.

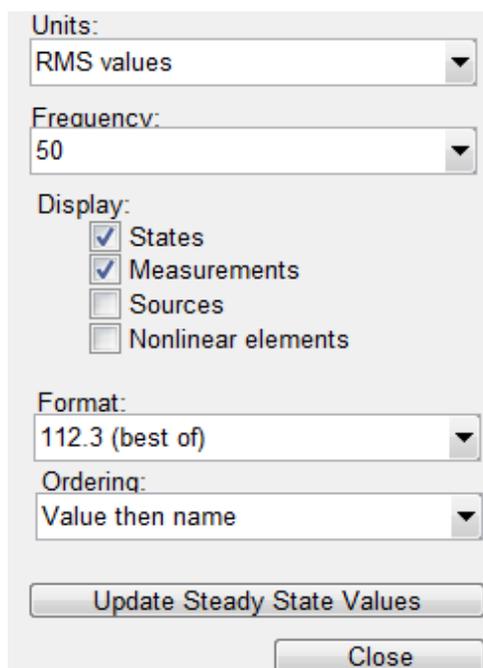


Рисунок 14

В левой части окна **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool** (рисунок 15) выводятся результаты моделирования в виде модулей и аргументов действующих значений соответствующих токов и напряжений.

Занести полученные в результате моделирования модули соответствующих токов и напряжений в таблицу 3 ( $Y_{nN} = \infty$ ) и сравнить их с соответствующими расчетными значениями. Сделать выводы.

14 Удалить линию, соединяющую входы вольтметра, которая моделирует нейтральный провод  $n-N$  на рисунке 12, и повторить для полученной схемы п. 13. Занести полученные в результате моделирования модули соответствующих токов и напряжений в таблицу 3 ( $Y_{nN} = 0$ ) и сравнить их с соответствующими расчетными значениями. Сделать выводы.

STATES:			
185.8 Vrms	87.86 °	---	'Uc_Rc=100 Ом C=20 мкФ'
MEASUREMENTS:			
0 Vrms	0.00 °	---	U_UnN
1.857 Arms	-92.14 °	---	I_InN1
219.4 Vrms	0.00 °	---	Ub: Ra=100 Ом
219.4 Vrms	-120.00 °	---	Ub: Rb=100 Ом
219.4 Vrms	120.00 °	---	Ub: Rc=100 Ом C=20 мкФ
2.194 Arms	0.00 °	---	Ib: Ra=100 Ом
2.194 Arms	-120.00 °	---	Ib: Rb=100 Ом
1.167 Arms	177.86 °	---	Ib: Rc=100 Ом C=20 мкФ

Рисунок 15

15 Смоделировать в системе Simulink заданную электрическую цепь по схеме звезда при несимметричной нагрузке без нейтрального провода в режиме обрыва фазы А (рисунок 16).

Обратить внимание на то, что выходы «+» вольтметров **Ub** и **Uc** должны быть подключены со стороны трехфазного генератора.

Используя графический интерфейс пользователя (GUI), рассчитать установившийся режим для схемы (рисунок 16).

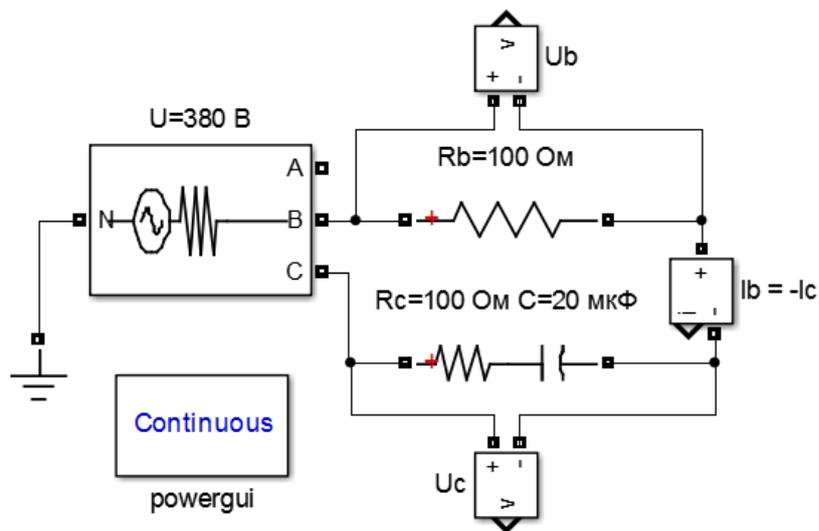


Рисунок 16

Полученные в результате моделирования действующие значения токов и напряжений занести в таблицу 4 и сравнить их с соответствующими расчетными значениями и сделать выводы.

Отчет

Составить отчет по лабораторной работе, включив в него титульный лист, результаты расчета в MATLAB, а также все схемы для моделирования в **Simulink**, окна свойств для всех использованных блоков, таблицы с результатами расчета и моделирования.

## Контрольные вопросы

1. Каким образом можно вывести требуемые результаты расчета в Command Window в системе MATLAB?
2. Каким образом можно построить векторную диаграмму в системе MATLAB?
3. Чем отличаются Р-модели из раздела SimPowerSystems от S-моделей Simulink и как осуществляется связь между ними?
4. Какие настройки нужно задать в окне **Configuration Parameters** перед запуском модели?
5. Какие настройки можно задать для блока **Series RLC Branch**?
6. Какие настройки можно задать для блока **Three-Phase Source**?
7. Какую информацию можно получить с помощью блока **Multimeter** и какие настройки у него есть?
8. Каким образом можно использовать графический интерфейс пользователя (**GUI**) для расчета электрических цепей в установленном режиме?

# Лабораторная работа № 4

## Расчет и моделирование трехфазной электрической цепи при соединении фаз приемника по схеме треугольник в системе MATLAB-Simulink

**Цель работы:** исследование трехфазной цепи по схеме треугольник при различных режимах ее работы в среде MATLAB-Simulink.

### Методические указания

При соединении приемников трехфазной цепи по схеме треугольник (рисунок 1) все три фазы приемника с фазными сопротивлениями  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  и  $Z_{ca}$  включаются непосредственно между линейными проводами трехфазной цепи. Линейные напряжения в трехфазном генераторе по схеме звезда можно найти как:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{E}_A - \underline{E}_B = E \sqrt{3} e^{j30^\circ}; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{E}_B - \underline{E}_C = E \sqrt{3} e^{-j90^\circ}; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{E}_C - \underline{E}_A = E \sqrt{3} e^{j150^\circ}. \end{aligned}$$

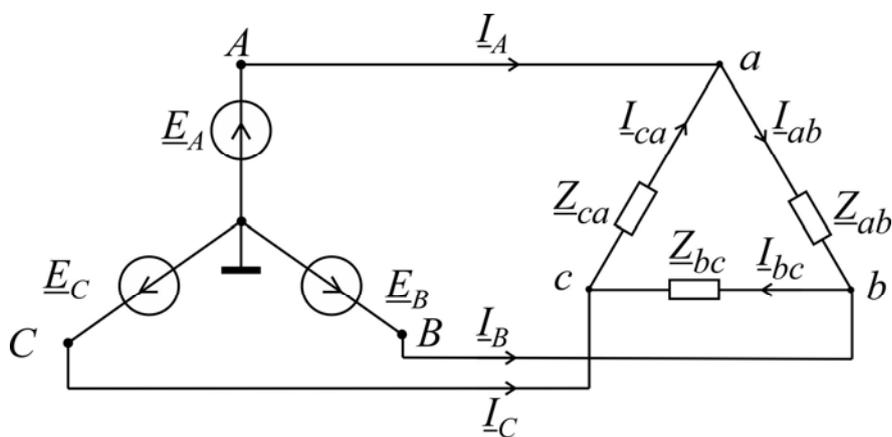


Рисунок 1

Если пренебречь сопротивлениями линейных проводов, то фазные напряжения приемника равны соответствующим линейным напряжениям источника питания. Вместе с тем в отличие от соединения звездой фазные и линейные токи не равны между собой.

Фазные токи могут быть найдены по закону Ома как:

$$\underline{I}_{ab} = \underline{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}, \quad \underline{I}_{bc} = \underline{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}, \quad \underline{I}_{ca} = \underline{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}.$$

Линейные токи определяются по фазным токам из уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для узлов  $a$ ,  $b$  и  $c$ :

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

При симметричной нагрузке ( $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$ ) фазные токи равны по величине, и углы сдвига фаз токов по отношению к соответствующим фазным напряжениям одинаковы. Таким образом, для симметричной нагрузки расчет токов по модулю производится только для одной фазы по формуле:

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi}.$$

На рисунке 2 приведена векторная диаграмма для симметричной индуктивной нагрузки по схеме соединения треугольник. На векторной диаграмме сдвиг по фазе между фазными напряжениями и токами  $\varphi = 90^\circ$ .

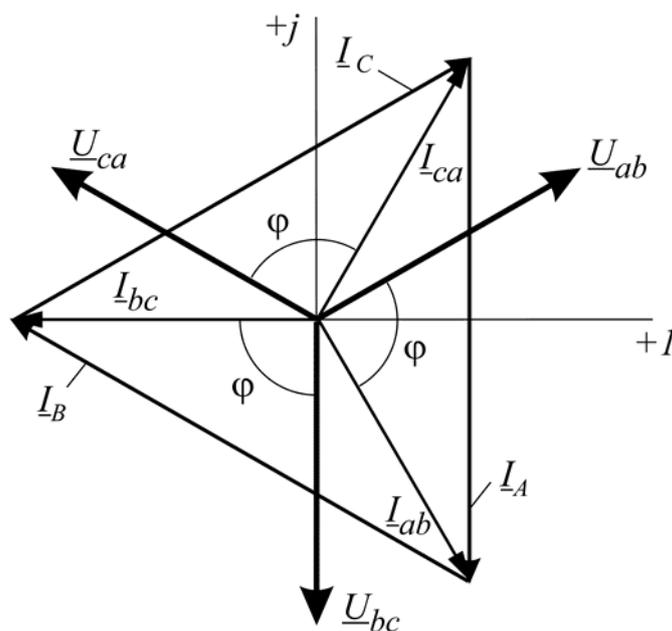


Рисунок 2

Из векторной диаграммы следует следующее соотношение между линейными  $I_L$  и фазными токами:  $I_L = \sqrt{3} I_\phi$ .

### Рабочее задание

1 Используя рабочее пространство MATLAB, рассчитать трехфазную электрическую цепь по схеме треугольник (см. рисунок 1). Установить следующие значения параметров в режиме симметричной нагрузки: фазные сопротивления  $R_\phi$  в омах равны номеру варианта  $N$  плюс 100; фазные (линейные) напряжения 127 В

с частотой  $f = 50$  Гц. Значения параметров в режиме несимметричной нагрузки установить в зависимости от номера варианта в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Значение параметров

Номер варианта	Элементы в фазе			$R',$ Ом	Емкость конденсатора $C,$ мкФ	Обрыв линейного провода	Холостой ход в фазе
	$ab$	$bc$	$ca$				
1	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}$	30	20	$aA$	
2	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	40	15		$ab$
3	$R_{\phi}$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R'$	50	10	$bB$	
4	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}$	60	5		$ca$
5	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	70	20	$cC$	
6	$R_{\phi}$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	30	15		$bc$
7	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	40	10	$aA$	
8	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}, R'$	50	5		$ab$
9	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R'$	60	20	$bB$	
10	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	70	15		$ca$
11	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R'$	30	10	$cC$	
12	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	40	5		$bc$
13	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}, R'$	50	20	$aA$	
14	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	60	15		$ab$
15	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}, C$	70	10	$bB$	
16	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	30	5		$ca$
17	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}, C$	40	20	$cC$	
18	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	50	15		$bc$
19	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	$R_{\phi}, C$	60	10	$aA$	
20	$R_{\phi}, C$	$R_{\phi}, R'$	$R_{\phi}$	70	5		$ab$

Результаты расчета для симметричной и несимметричной нагрузок занести в таблицы 2, 3.

Таблица 2 – Симметричная нагрузка

Способ определения	$U_{ab},$	$U_{bc},$	$U_{ca},$	$I_{ab},$	$I_{bc},$	$I_{ca},$	$I_A,$	$I_B,$	$I_C,$	$P_{ab},$	$P_{bc},$	$P_{ca},$
	В	В	В	А	А	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт
Расчет												
Моделирование												

Таблица 3 – Несимметричная нагрузка

Способ определения	$U_{ab},$	$U_{bc},$	$U_{ca},$	$I_{ab},$	$I_{bc},$	$I_{ca},$	$I_A,$	$I_B,$	$I_C,$	$P_{ab},$	$P_{bc},$	$P_{ca},$
	В	В	В	А	А	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт
Расчет												
Моделирование												

По результатам расчета построить векторные диаграммы для токов и напряжений, используя функцию MATLAB **compass (VR, VI)**. Проверить по полученным диаграммам выполнение законов Кирхгофа и сделать выводы.

Проверить выполнение условия  $I_{л} = \sqrt{3} I_{\phi}$  для симметричной и несимметричной нагрузок. Сделать выводы.

2 Используя рабочее пространство MATLAB, рассчитать трехфазную электрическую цепь по схеме треугольник при несимметричной нагрузке в режиме обрыва линейного провода или холостого хода в фазе в зависимости от варианта в соответствии с таблицей 1. Полученные значения занести в таблицу 4.

Таблица 4 – Аварийный режим

Способ определения	$U_{ab}$ , В	$U_{bc}$ , В	$U_{ca}$ , В	$I_{ab}$ , А	$I_{bc}$ , А	$I_{ca}$ , А	$I_A$ , А	$I_B$ , А	$I_C$ , А	$P_{ab}$ , Вт	$P_{bc}$ , Вт	$P_{ca}$ , Вт
Расчет												
Моделирование												

По результатам расчета построить векторные диаграммы напряжений, используя функцию MATLAB **compass (VR,VI)**. Проверить по полученным диаграммам выполнение законов Кирхгофа и сделать выводы.

3 Смоделировать в системе **Simulink** заданную электрическую цепь для симметричной нагрузки, используя виртуальные блоки пакета **SimPowerSystem** (рисунок 3).

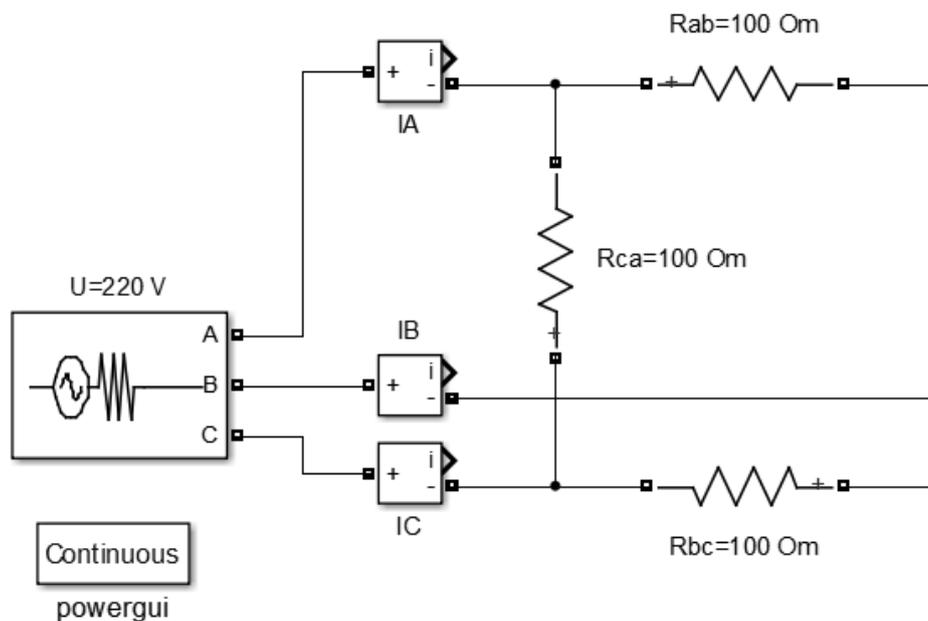


Рисунок 3

Выбрать блок трехфазного генератора **Three-Phase Source** (раздел **Electrical Sourcer** библиотеки **SimPowerSystem**). Добавить в схему блок «Земля»  $\perp$ , а в качестве фазных сопротивлений используйте блоки **Series RLC Branch** (раздел **Elements** библиотеки **SimPowerSystem**).

Для измерения действующих значений линейных токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  добавьте в схему три амперметра **Current Measurement** (раздел **Measurements** библиотеки **SimPowerSystem**).

С помощью соответствующих текстовых полей отредактируйте имена блоков в соответствии с вариантом задания (см. рисунок 3).

4 Задать для трехфазного генератора значения параметров, указанные на рисунке 4:

– **Phase-to-phase rms voltage (V)** (Действующее значение линейного напряжения);

– **Internal connection (Y)** (Соединение фаз источника по схеме звезда);

– **Source resistance (Ohms)** (Собственное сопротивление источника в омах) – **0.01**;

– **Source inductance (H)** (Собственная индуктивность источника в генриях) – **0**.

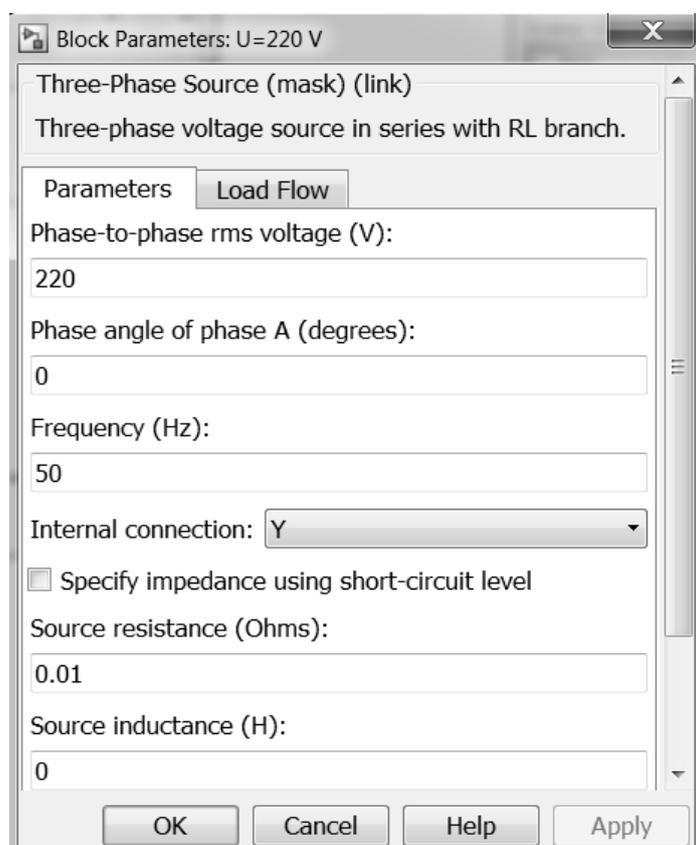


Рисунок 4

5 Установить в окне **Block Parameters** (рисунок 5) заданное в соответствии с вариантом значение сопротивления для фазного сопротивления. Выбрать из списка **Measurements** (Измеряемые переменные) (рисунок 5) значение параметра **Branch voltage and current**. При этом измеряемым переменным присваиваются метки: **Ib** – ток через блок параметров, **Ub** – напряжение на блоке параметров.

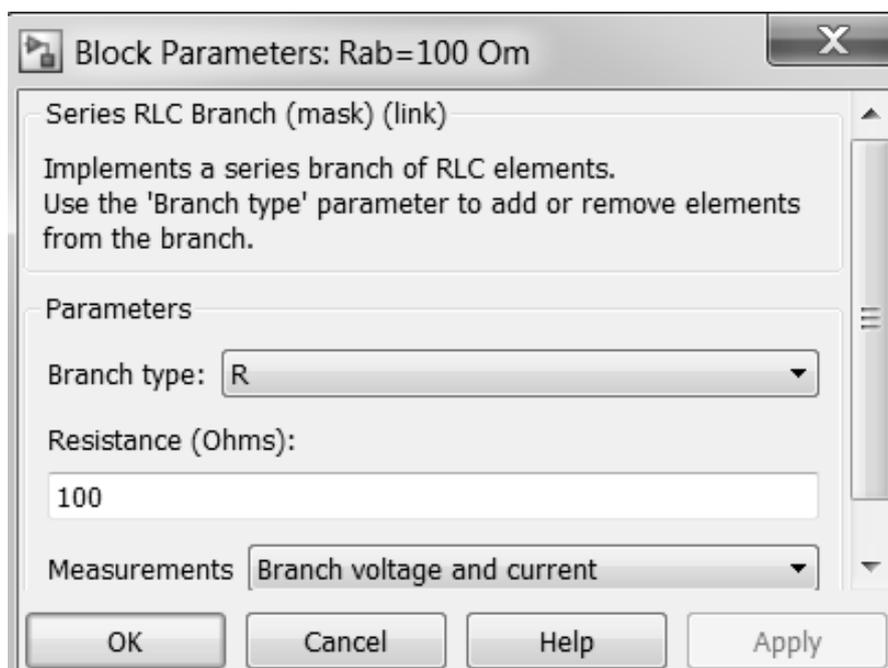


Рисунок 5

6 Используя графический интерфейс пользователя (GUI), рассчитать установившийся режим для схемы (см. рисунок 3). Для этого выполнить двойной щелчок по блоку **Powergui**, и в появившемся окне нажать кнопку **Steady-State Voltages and Currents** (Установившийся режим).

В результате откроется окно **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool**, в котором необходимо выбрать:

- вид системы измерения **Units** – **RMS values** (Действующие значения);
- задать значение частоты источников в герцах **Frequency** – **50**;
- выбрать отображаемые переменные **Display: Measurement** (Измеряемые переменные);
- задать требуемый формат вывода результата измерения **Format:**

Полученные в результате моделирования модули действующих значений токов и напряжений (рисунок 6) занести в таблицу 2

и сравнить их с соответствующими расчетными значениями. Сделать выводы.

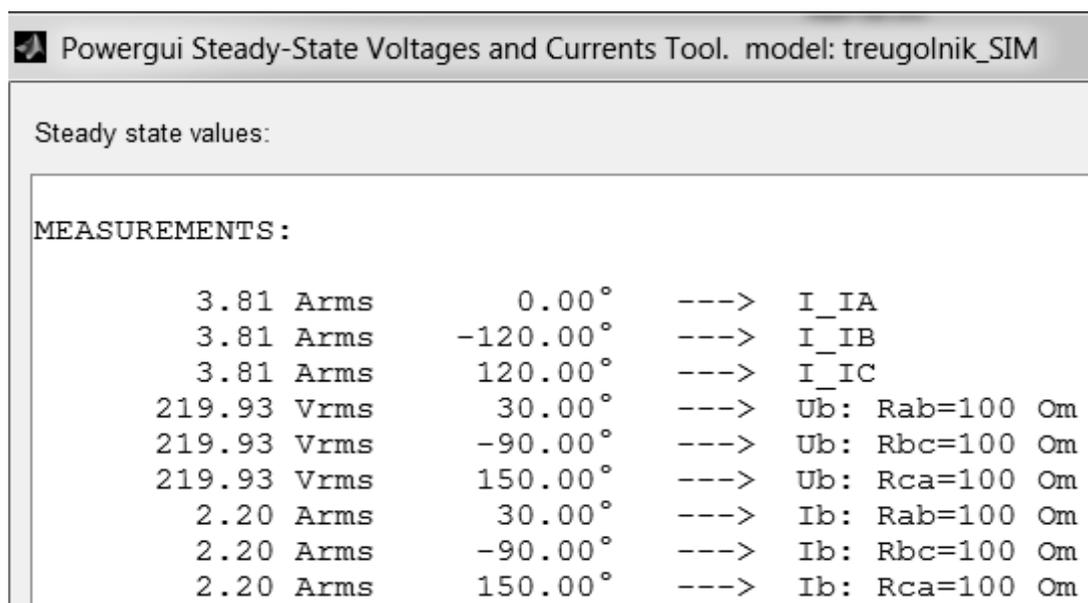


Рисунок 6

7 Рассчитать по результатам моделирования значение активной мощности, потребляемой цепью, и занести в таблицу 2.

8 Смоделировать в системе **Simulink** заданную электрическую цепь для несимметричной нагрузки, используя виртуальные блоки пакета **SimPowerSystem** (рисунок 7).

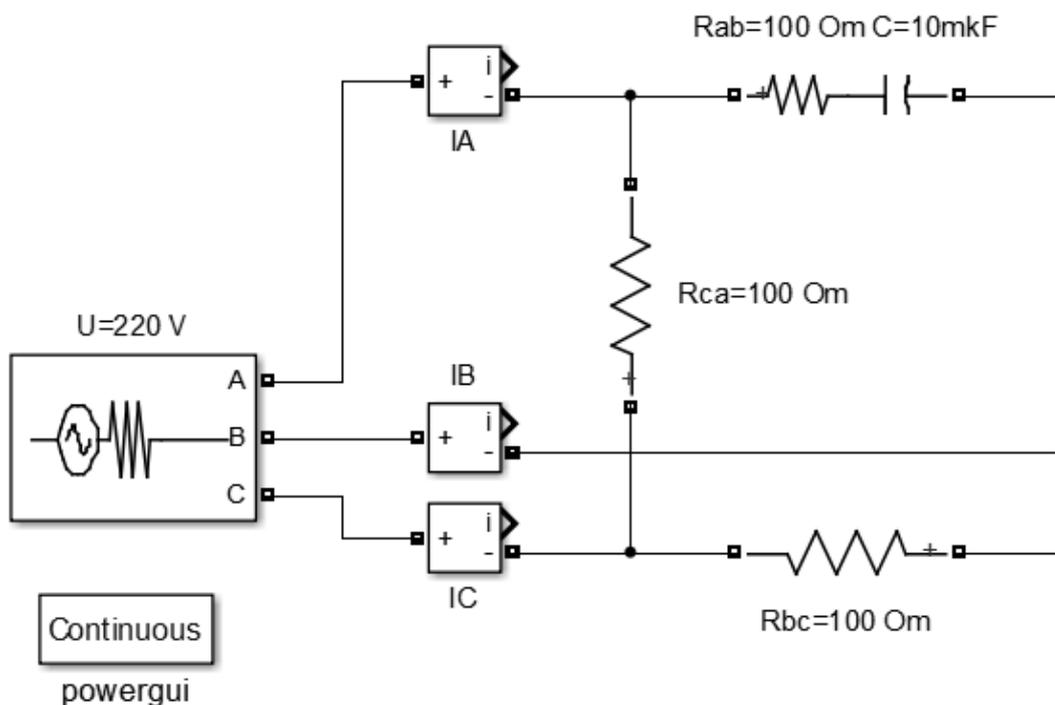


Рисунок 7

9 Установить в окне **Block Parameters** заданные в соответствии с вариантом значения параметров. На рисунке 8 в фазе «*ab*» включены элементы **RC**.

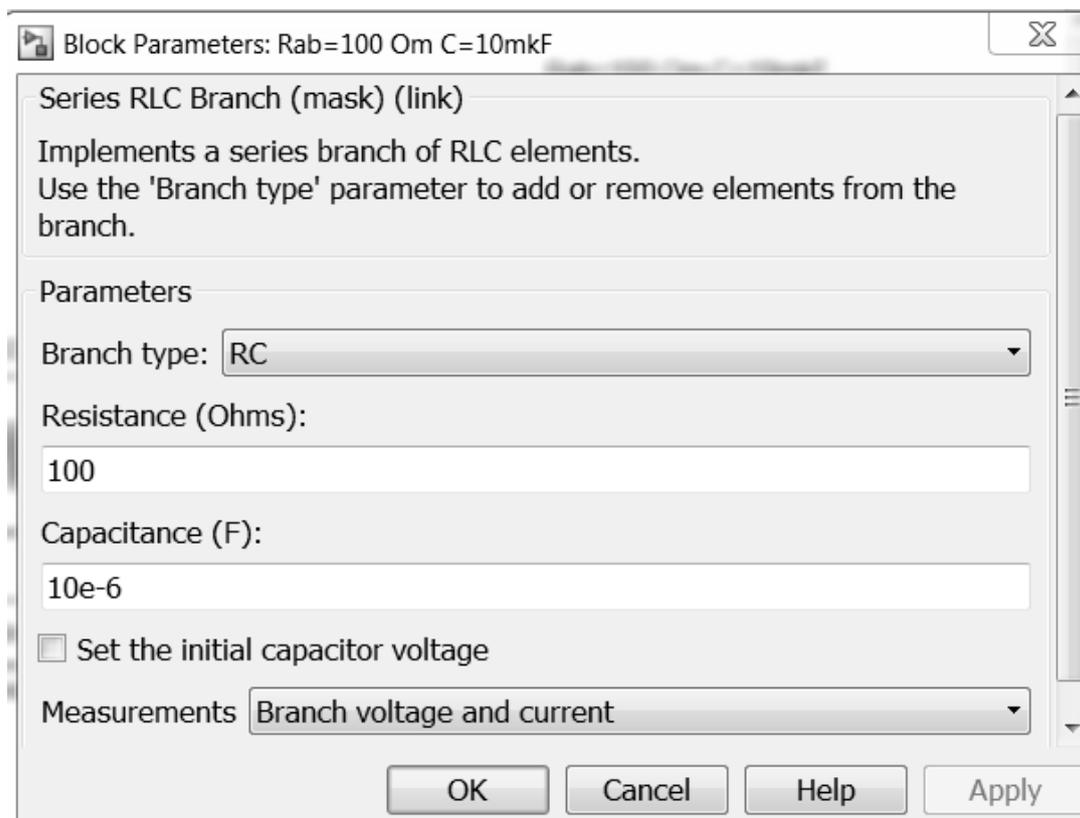


Рисунок 8

10 Повторить для полученной схемы (см. рисунок 7) пп. 6–7.

Полученные в результате моделирования модули действующих значений токов и напряжений занести в таблицу 3 и сравнить их с соответствующими расчетными значениями. Сделать выводы.

11 Смоделировать в системе **Simulink** заданную электрическую цепь для несимметричной нагрузки в режиме обрыва линейного провода или в режиме холостого хода, используя виртуальные блоки пакета **SimPowerSystem**.

На рисунке 9 изображена схема, приведенная на рисунке 7, при обрыве линейного провода «*bB*».

На рисунке 10 изображена схема, приведенная на рисунке 7, при холостом ходе в фазе «*ca*».

12 Повторить для полученной схемы (рисунок 9 или 10 в зависимости от номера варианта) пп. 6–7.

Полученные в результате моделирования значения занести в таблицу 4 и сравнить их с соответствующими расчетными значениями. Сделать выводы.

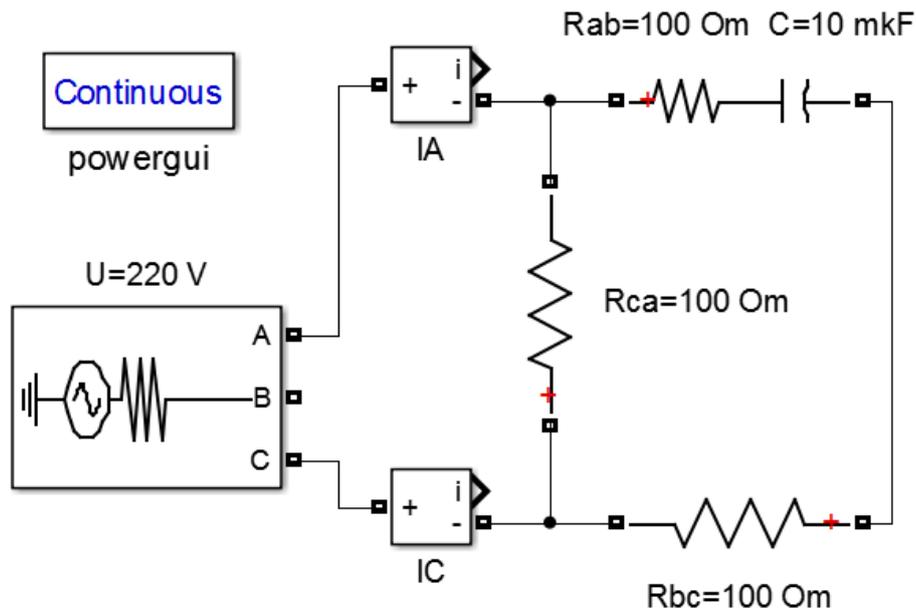


Рисунок 9

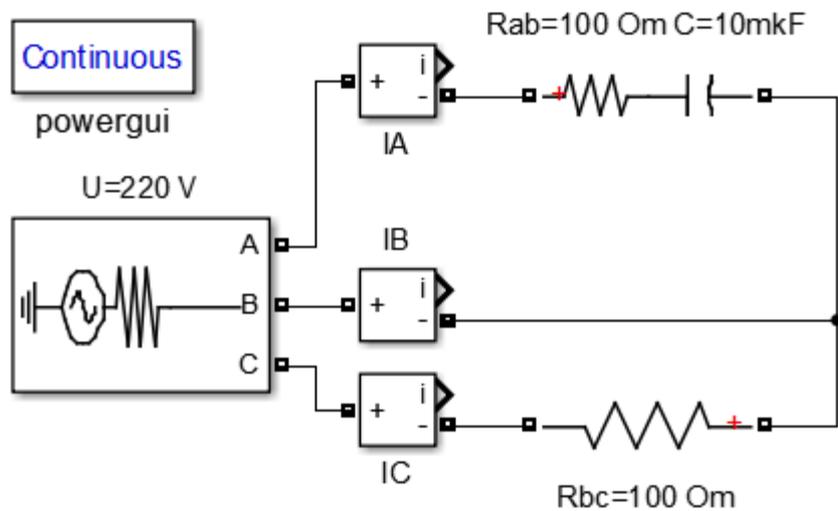


Рисунок 10

Отчет

Составить отчет по лабораторной работе, включив в него титульный лист, результаты расчета в MATLAB, а также все схемы для моделирования в Simulink, окна свойств для всех использованных блоков, таблицы с результатами расчета и моделирования.

### Контрольные вопросы

1. Каким образом можно вывести требуемые результаты расчета в **Command Window** в системе MATLAB?
2. Каким образом можно построить векторную диаграмму в системе MATLAB?

3. Чем отличаются P-модели из раздела SimPowerSystems от обычных S-моделей **Simulink** и как осуществляется связь между ними?

4. Какие настройки нужно задать в окне **Configuration Parameters** перед запуском модели?

5. Какие настройки можно задать для блока **Series RLC Branch**?

6. Какие настройки можно задать для блока **Three-Phase Source**?

7. Каким образом можно использовать графический интерфейс пользователя (**GUI**) для расчета электрических цепей в установленном режиме?

# Лабораторная работа № 5

## Моделирование переходных процессов в линейных электрических цепях

**Цель работы:** научиться моделировать и исследовать переходные процессы в линейных электрических цепях при помощи SPS-моделей пакета **Simulink**.

### Методические указания

Процессы, возникающие в электрической цепи при переходе от одного установившегося энергетического режима к другому установившемуся энергетическому режиму, называются *переходными процессами (режимами)*. Причиной возникновения переходных процессов является *коммутация*, т.е. скачкообразное изменение структуры цепи, параметров ее элементов, а также подключение или отключение источников энергии.

При этом если электрическая цепь содержит индуктивные и емкостные элементы, то энергия электрического или магнитного поля, запасенная в соответствующем элементе, не может измениться скачком при коммутации. Поэтому если в процессе коммутации индуктивность (емкость) элемента не изменяется, то значение тока в индуктивности (напряжения на емкости) сразу же после коммутации равно соответствующему значению до коммутации, а затем может плавно изменяться от этого значения.

Ток и напряжение на сопротивлении, напряжение на индуктивности и ток через емкость могут меняться скачком при коммутации. Эти величины определяются по состоянию цепи после коммутации.

В данной лабораторной работе будут рассмотрены:

– *RL*-схема замещения цепи в случае подключения обмотки управления реле к источнику постоянного напряжения  $E$  (рисунок 1);

– *RC*-схема замещения цепи в случае подключения конденсатора через ограничительный резистор к источнику постоянного напряжения  $E$  и его отключении от источника (рисунок 2);

– *RLC*-схема замещения цепи в случае разряда конденсатора, предварительно заряженного от источника постоянного напряжения  $E$ , на катушку индуктивности (с параметрами  $R$  и  $L$ ) (рисунок 3);

– разветвленная электрическая цепь первого порядка, в которой после коммутации происходит изменение ее топологии. Один из вариантов такой схемы приведен на рисунке 4.

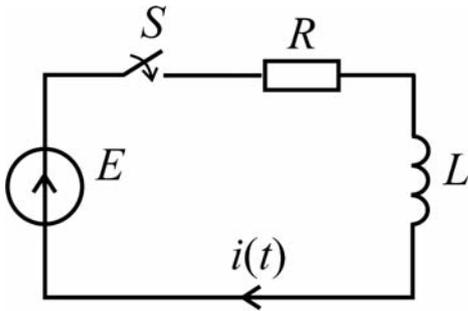


Рисунок 1

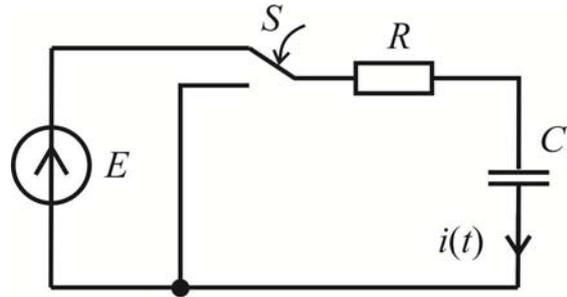


Рисунок 2

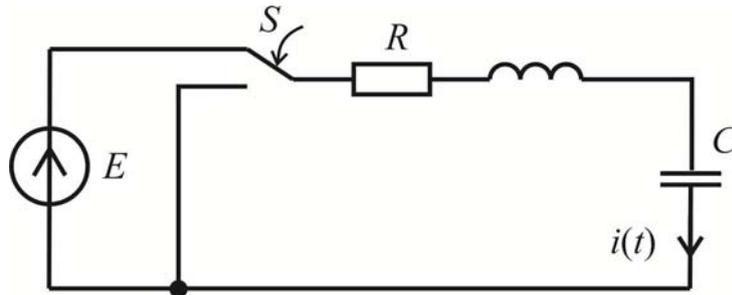


Рисунок 3

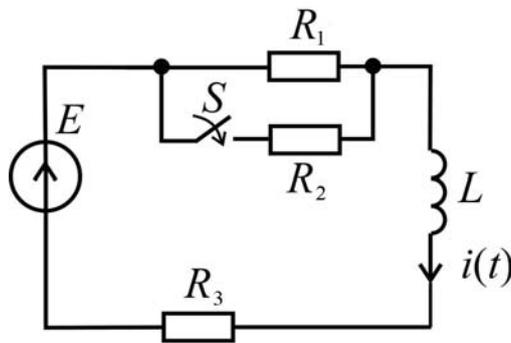


Рисунок 4

В общем случае, мгновенное значение тока или напряжения в цепи после коммутации зависит от корней характеристического уравнения цепи, которое определяется из уравнения

$$Z(p) = 0,$$

где  $Z(p)$  – числитель входного сопротивления цепи в операторной форме записи [4].

Мгновенное значение тока через индуктивность в схеме, приведенной на рисунке 1, можно найти по формуле

$$i(t) = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-t/\tau} \right), \quad (1)$$

где  $\tau = \frac{L}{R}$  – постоянная времени  $RL$ -цепи.

Мгновенное значение напряжения на емкости в схеме, приведенной на рисунке 2, можно найти по формуле

$$u_C(t) = E \left( 1 - e^{-t/\tau} \right), \quad (2)$$

где  $\tau = RC$  – постоянная времени  $RC$ -цепи.

Корни характеристического уравнения для схемы, приведенной на рисунке 3, равны

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2},$$

где  $\delta = \frac{R}{2L}$ ;  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Критическое сопротивление цепи определяется из условия равенства нулю дискриминанта и равно

$$R_K = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3)$$

Характер переходного процесса в схеме, приведенной на рисунке 3, зависит от соотношения сопротивлений  $R$  и  $R_K$ :

- при  $R > R_K$  переходный процесс называется аperiodическим;
- при  $R = R_K$  переходный процесс называется аperiodическим критическим;
- при  $R < R_K$  переходный процесс называется колебательным с частотой свободных колебаний, равной

$$\omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}. \quad (4)$$

Операторное сопротивление для схемы, приведенной на рисунке 4, равно

$$Z(p) = R_{12} + R_3 + pL, \quad (5)$$

где  $R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ ;  $p$  – корень характеристического уравнения (5).

Так как уравнение (5) имеет один корень, то свободная составляющая, определяющая переходный процесс, будет равна  $A e^{pt}$ , где постоянная интегрирования  $A$  определяется исходя из независимых начальных условий до коммутации.

## Рабочее задание

1 Запустить **MATLAB** и **Simulink**. Настроить имя директории для хранения создаваемых файлов, указав свою папку на рабочем диске.

2 Провести моделирование схемы замещения цепи в случае подключения обмотки управления реле к источнику постоянного напряжения  $E$  (рисунок 1).

2.1 Добавить в окно модели (рисунок 5) необходимые блоки из библиотеки **SimPowerSystem**: блок **DC Voltage Source** (из раздела **Electrical Sources**), два блока **Series RLC Branch** (из раздела **Elements**), блок **Multimeter** (из раздела **Measurements**) и блок **Powergui** (из корневой раздела библиотеки **SimPowerSystem**).

Примечание – При размещении и поворотах элементов в окне модели следует обращать внимание на согласное включение элементов по току (по красному маркеру), иначе в дальнейшем полученные графики исследуемых величин могут оказаться в противофазе.

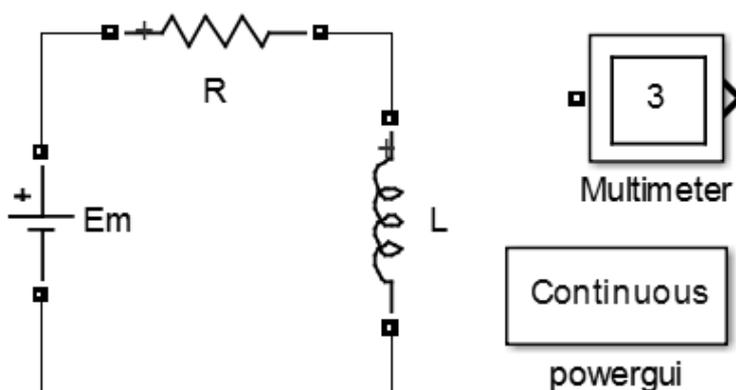


Рисунок 5

2.2 Выполнить необходимые соединения блоков (см. рисунок 5) и задать названия блокам цепи в соответствии с вариантом задания.

В данном примере для исследования переходного процесса используется свойство **Simulink**, согласно которому при моделировании момент времени, равный 0, воспринимается как начало работы цепи (включение источника), поэтому ключи для коммутации не требуются.

2.3 Выполнить в окне параметров блоков необходимые настройки в соответствии с номером варианта  $N$ .

Параметры блока **DC Voltage Source**, который является источником постоянного по уровню напряжения:

– **Amplitude (V)**:  $-E_m = N + 20$  В;

– **Measurements:** – **None** (нет переменных для отображения с помощью блока **Multimeter**).

Параметры первого блока **Series RLC Branch**:

– **Branch type:** (Тип ветви) – **R**;

– **Resistance R (Ohms):** –  $R = N \cdot 5 + 50$  Ом;

– **Measurements:** – **Branch voltage and current** (при этом отображаемым сигналам в блоке **Multimeter** присваиваются метки: **Ib** – ток цепи, **Ub** – напряжение цепи).

Параметры второго блока **Series RLC Branch**:

– **Branch type:** (Тип ветви) – **L**;

– **Inductance (H):** –  $L = N/8 + 5$  мГн;

– **Measurements:** – **Branch voltage and current**.

Блок **Multimeter** позволяет измерять значения токов и напряжений блоков библиотеки **SimPowerSystem**, для которых в их окне диалога установлен соответствующий параметр **Measurements**.

Выберите в окне параметров блока **Multimeter** измеряемые переменные, которые будут передаваться на его выход в соответствии с рисунком 6, а также включите переключатель **Plot selected measurements**, позволяющий по окончании моделирования вывести кривые измеряемых сигналов в отдельное графическое окно.

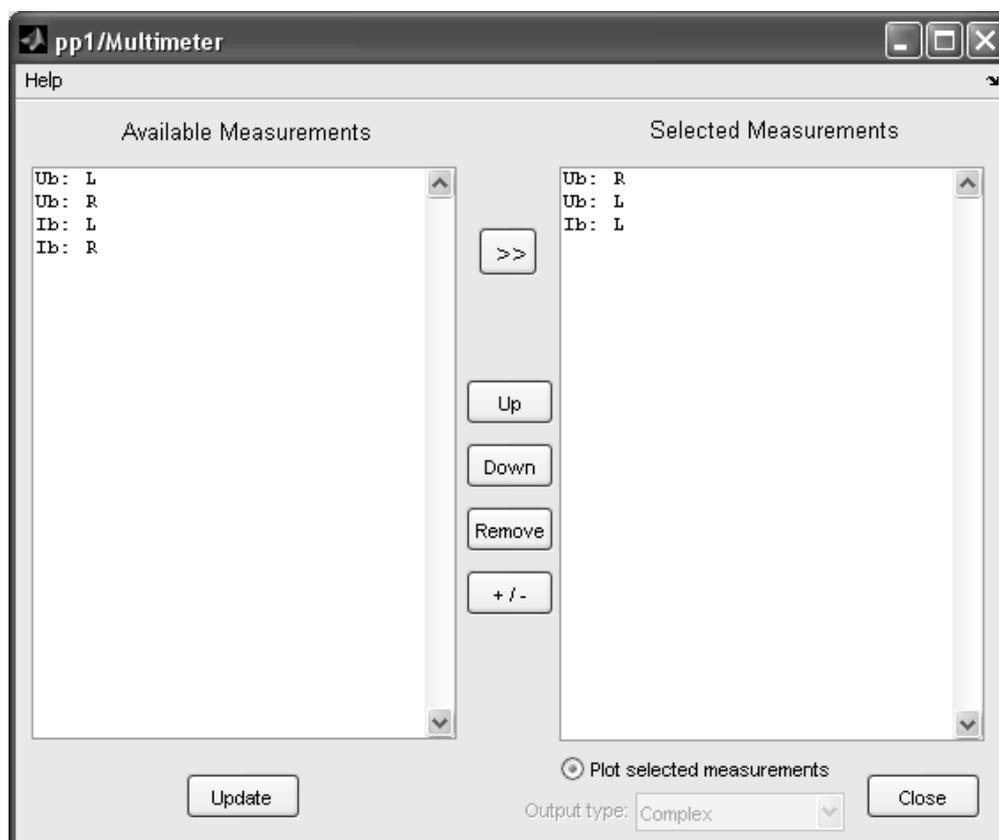


Рисунок 6

Блок **Powergui** (пользовательский интерфейс, необходимый для моделирования электрических цепей) в данном случае дополнительных настроек не требует.

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

Отчет

Вставить в отчет по лабораторной работе полученную схему модели, а также соответствующие окна параметров для всех блоков модели.

2.5 Установить параметры моделирования с помощью команды **Simulation** ⇒ **Model Configuration Parameters**.

Рассчитать постоянную времени цепи  $\tau$  для своего варианта, например при  $R = 100 \text{ Ом}$ ;  $L = 20 \text{ мГн}$  она равна

$$\tau = L/R = 0,02/100 = 0,2 \text{ мс.}$$

Время окончания моделирования (**Stop time:**) выберите равным значению  $5\tau$ . Для  $\tau = 0,2 \text{ мс}$  оно равно  $1 \text{ мс}$ .

Так как модель имеет непрерывные состояния, то для параметра **Solver:** (Вычислитель) можно выбрать метод моделирования общего назначения **ode45** с вариативным (переменным) шагом (**Type: Variable-step**).

Остальные параметры можно оставить по умолчанию.

Выбрать обычный (не ускоренный) режим расчета (**Normal**).

2.6 Сохранить полученную модель в своей папке (например, под именем **pp1.slx**) и запустить моделирование (**Run**).

2.7 По окончании моделирования сразу откроется графическое окно **Simulation result for: Multimeter** с результатами моделирования. Результаты моделирования для цепи с  $E = 50 \text{ В}$ ;  $R = 100 \text{ Ом}$ ;  $L = 20 \text{ мГн}$  приведены на рисунке 7.

Отчет

Вставить в отчет результаты моделирования для своего варианта. По полученным результатам сделать выводы.

Примечание – Перед началом очередного этапа моделирования следует принудительно закрыть предыдущее графическое окно **Multimeter**.

2.8 Оставить в окне параметров блока **Multimeter** только одну измеряемую переменную **Ib: L**, удалив две другие переменные, с помощью кнопки **Remove**.

Запустить моделирование и настройте параметры полученного в окне **Simulation result for: Multimeter** графика с помощью ко-

манды **View**⇒**Property Editor**. Выделить рамку графика и установить диапазон изменения по оси **X** и **Y** и другие настройки в соответствии с рисунками 8–9.

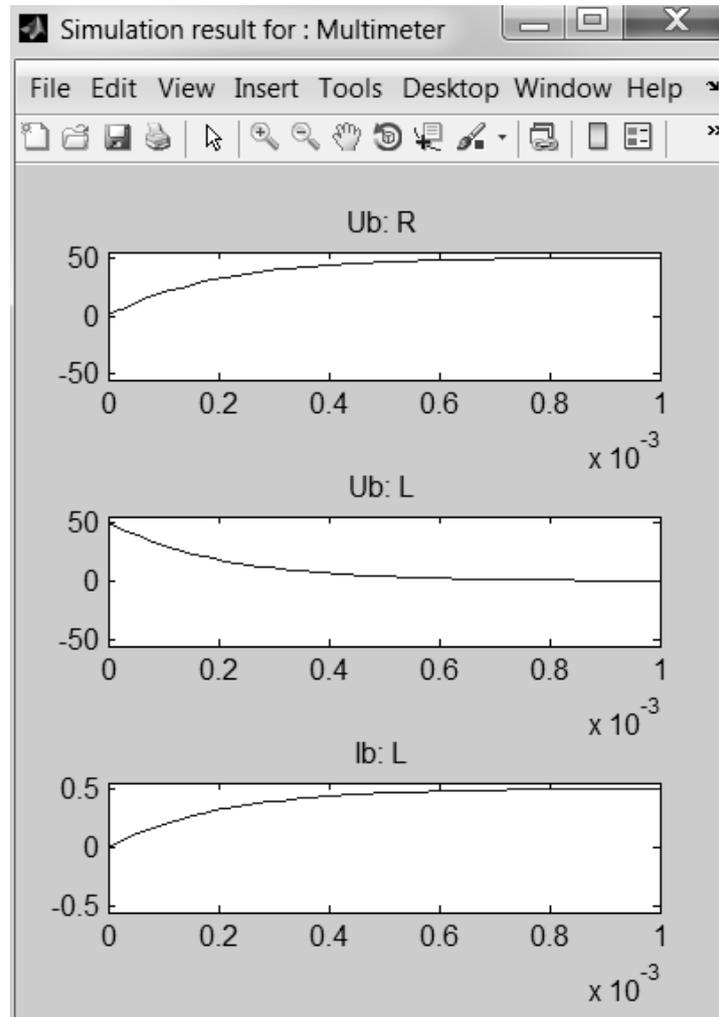


Рисунок 7

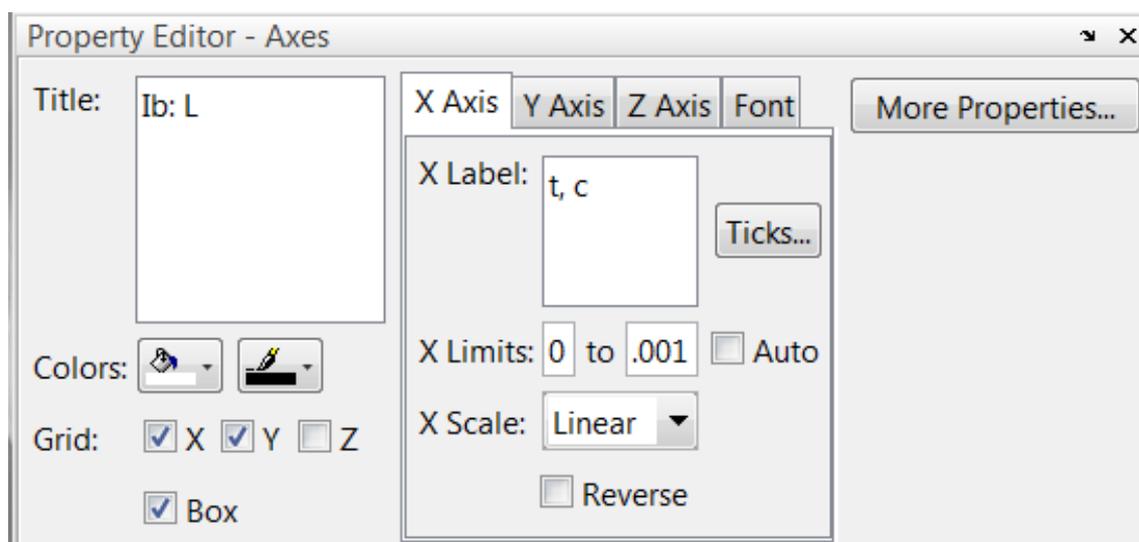


Рисунок 8

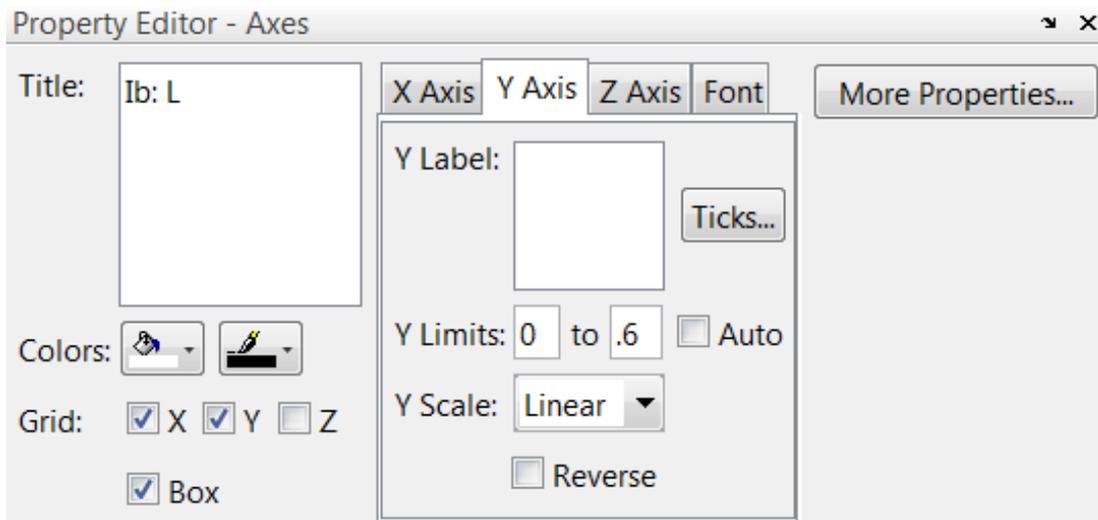


Рисунок 9

Выделить график и установить тип линии и маркера в соответствии с рисунком 10. Закрыть окно настройки параметров графика.

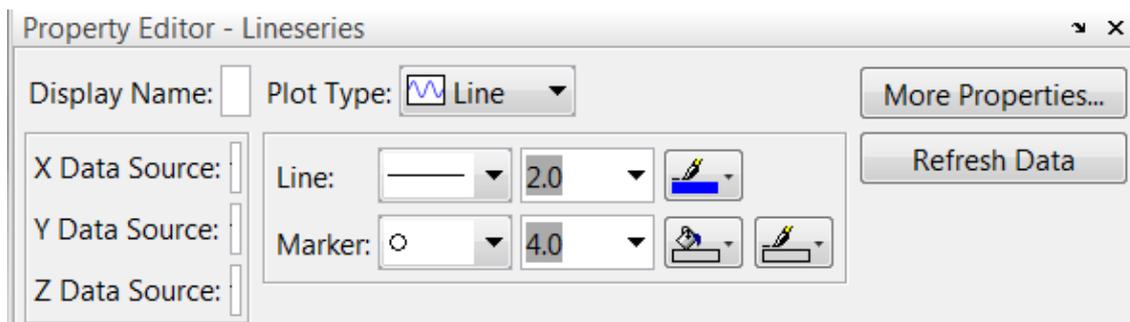


Рисунок 10

На рисунке 11 приведен полученный график переходного процесса для цепи с  $E = 50$  В;  $R = 100$  Ом;  $L = 20$  мГн, отображающий реакцию  $RL$ -цепи на скачкообразное изменение входного напряжения.

2.9 Определить по результатам моделирования значение постоянной времени цепи. Для этого, используя формулу (1), рассчитать в MATLAB мгновенное значение тока обмотки управления реле в момент времени  $t = \tau$ :

$$i(\tau) = \frac{50}{100} (1 - e^{-1}) \approx 0,3161 \text{ А.}$$

Нажмите на кнопку  (**Data cursor**) на панели инструментов в окне **Simulation result for: Multimeter** (рисунок 11), которая позволяет определить координаты точек, выбранных на гра-

фиге. Установите курсор в точку со значением координаты по  $Y$ , наиболее близкой к рассчитанному значению  $i(\tau) = 0,3161$  в амперах (на рисунке 11 –  $Y: 0.3091$ ). Соответствующая координата  $X: 0.0001925$ , что примерно равно расчетному значению постоянной времени цепи  $\tau = 0,2$  мс.

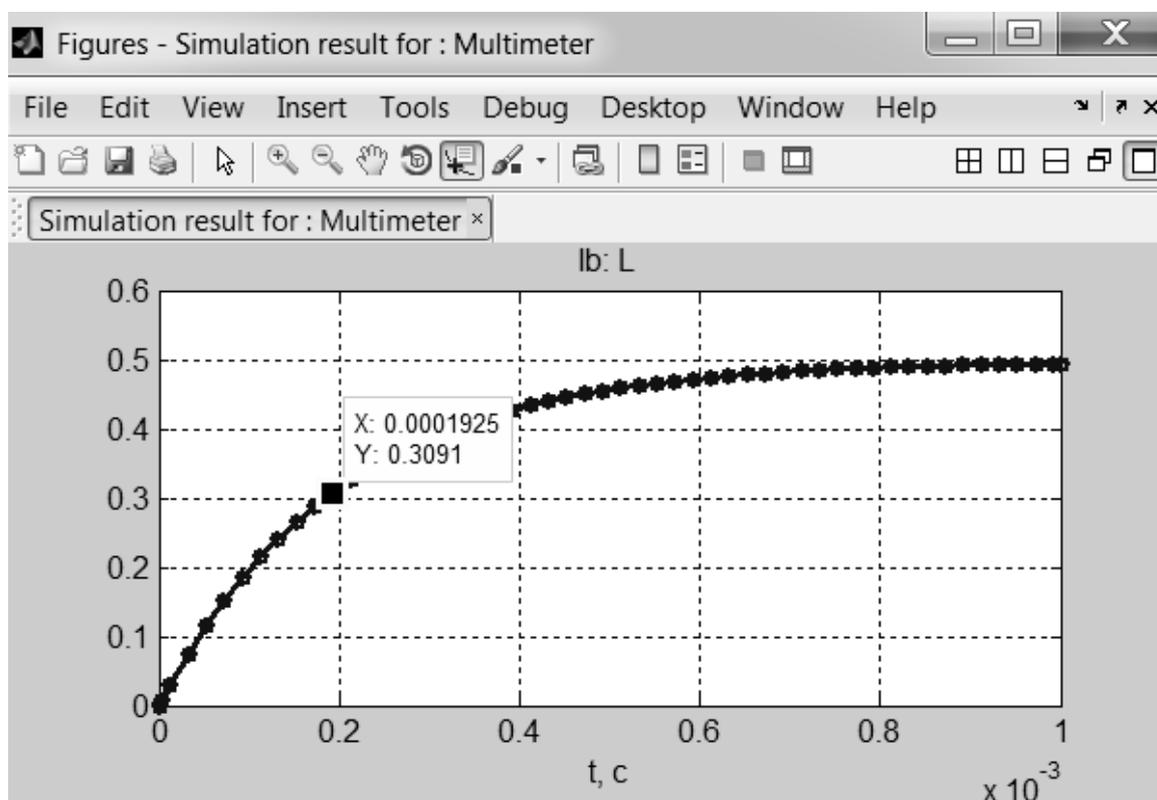


Рисунок 11

Таким образом, результаты расчета и моделирования совпадают с погрешностью не более 2 %.

Из графика на рисунке 11 видно также, что по истечении времени, равного  $5\tau = 1$  мс, переходный процесс завершится с погрешностью не более 1 %.

2.10 Определить время включения реле  $t_{\text{вкл}}$ . Рассчитать мгновенное значение тока обмотки управления реле, когда оно достигнет 70 % от установившегося значения  $I_{\text{уст}} = E / R = 0,5$  А, как

$$I = 0,7I_{\text{уст}} = 0,7 \cdot 0,5 = 0,35 \text{ А.}$$

Установить курсор в графическом окне **Simulation result for: Multimeter** в точку со значением координаты по  $Y$ , наиболее близкой к рассчитанному значению  $I = 0,35$  А (на рисунке 12 –  $Y: 0.3437$ ). На рисунке 12 соответствующая координата  $X: 0.0002325$ , что соответствует искомому времени включения реле в секундах.

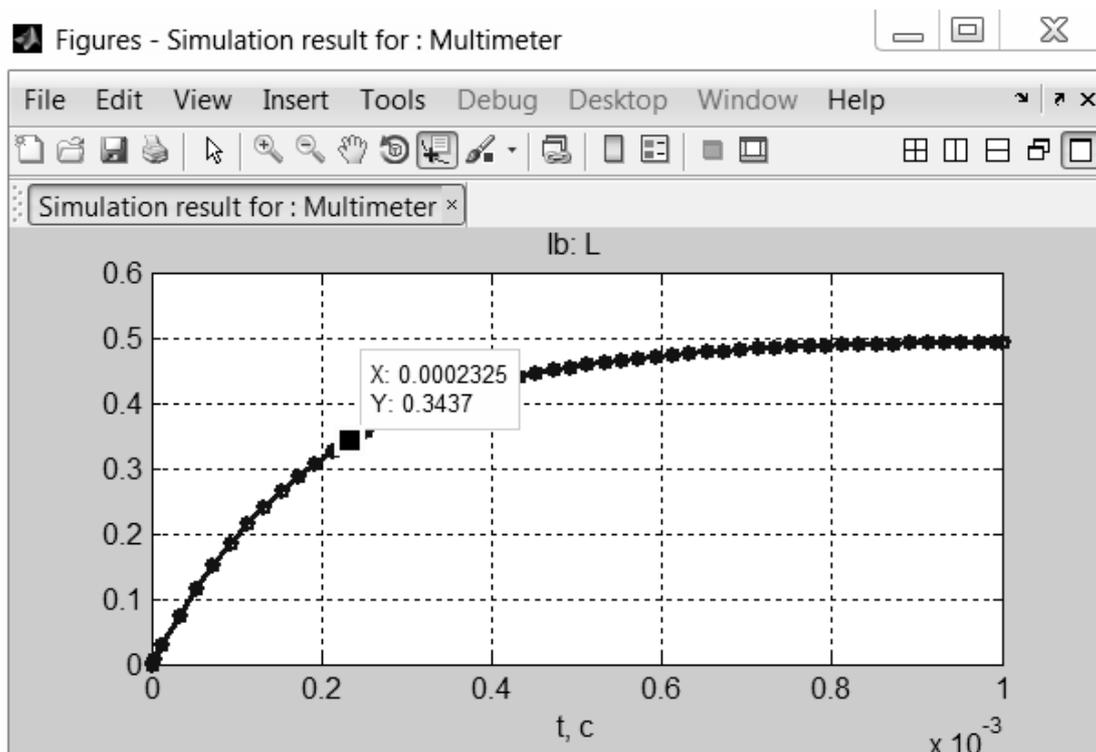


Рисунок 12

2.11 Увеличить значение индуктивности  $L$  в два раза, запустить моделирование и повторно проделать пп. 2.9–2.10. По полученным результатам сделать выводы, как влияет индуктивность обмотки  $L$  на время включения реле.

Отчет

Вставить в отчет результаты моделирования по пп. 2.8–2.11 для своего варианта. Проведите анализ. Сделайте выводы.

3 Провести моделирование линейной электрической цепи в случае подключения конденсатора через ограничительный резистор к источнику постоянного напряжения  $E$  и его отключении от источника (рисунок 2).

3.1 Добавить в окно модели (рисунок 13) необходимые блоки из библиотеки **SimPowerSystem**: блок **DC Voltage Source**, два блока **Series RLC Branch**, блоки **Voltage Measurement** и **Current Measurement** (из раздела **Measurements**), два блока **Ideal Switch** (из раздела **Power Electronics**), блок **Powergui**; из библиотеки **Simulink**: два блока **Step** (из раздела **Sources**), блок **Scope** и блок **Sum** (из раздела **Commonly Used Blocks**).

3.2 Выполнить необходимые соединения блоков (рисунок 13) и задать названия блокам цепи в соответствии с вариантом задания.

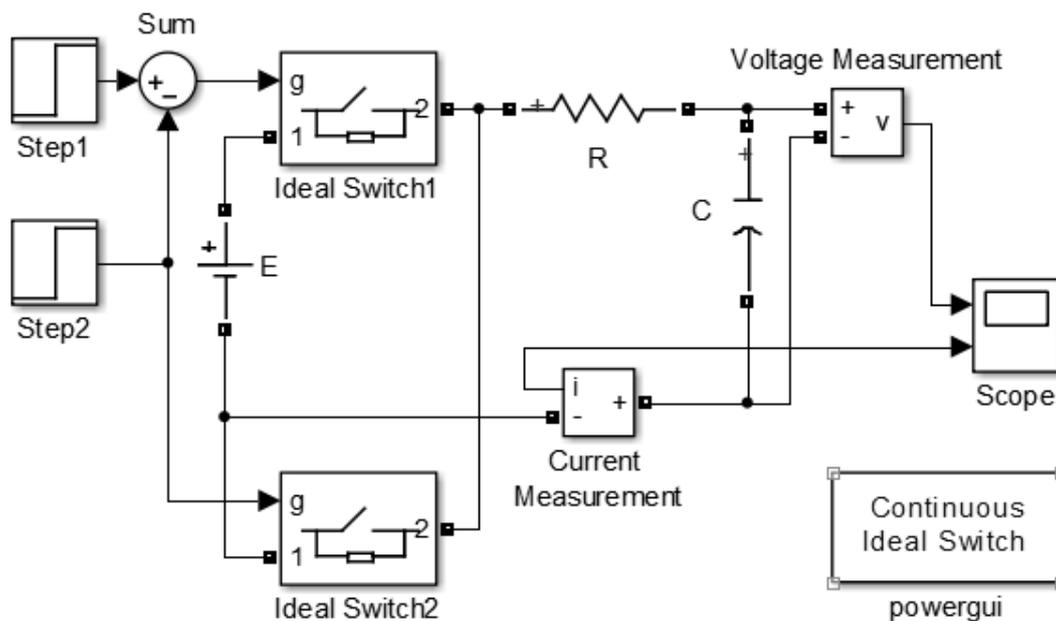


Рисунок 13

В данном примере подключение источника напряжения к нагрузке обеспечивается блоком **Ideal Switch1**, который замыкает электрическую цепь по сигналу, вырабатываемому генераторами ступенчатого сигнала **Step1**. Измерение напряжения на емкости и тока в цепи выполняется соответственно с помощью блока **Voltage Measurement** и блока **Current Measurement**. Результаты измерения отображаются на блоке **Scope**.

Управляющий сигнал на ключ **Ideal Switch1** для отключения электрической цепи от источника формируется на выходе сумматора **Sum**, на вход которого подаются сигналы с выхода блоков **Step1** и **Step2**.

Для подключения электрической цепи на землю используется ключ **Ideal Switch2**, управляемый сигналом с выхода блока **Step2**.

3.3 Выполнить в окне параметров блоков необходимые настройки в соответствии с номером варианта N.

Параметры блока **DC Voltage Source**, который является источником постоянного по уровню напряжения:

- **Amplitude (V)**:  $-E_m = N + 20$  В;
- **Measurements**: – **None**.

Параметры первого блока **Series RLC Branch**:

- **Branch type**: (Тип ветви) – **R**;
- **Resistance R (Ohms)**:  $-R = N \cdot 5 + 50$  Ом;
- **Measurements**: – **Branch voltage and**.

Параметры второго блока **Series RLC Branch**:

- **Branch type**: (Тип ветви) – **C**;

- **Capacitance (F)**: (Емкость (Ф)) –  $C = N/4 + 10$  мкФ;
- **Set the initial capacitor voltage** (Начальное значение напряжения на емкости) – установить флажок и задать значение **0**.

Параметры блоков **Step1** и **Step2**:

- **Initial value** (Начальное значение сигнала) – **0**;
- **Final value** (Конечное значение сигнала) – **1** (или любое положительное значение);
- **Sample time** (Шаг модельного времени) – **0**;

Примечание – Этот параметр используется для согласования работы источника и приемника сигнала во времени. Значение 0 используется при моделировании непрерывных систем.

– **Interpret vector parameters as 1-D** (Интерпретировать вектор параметров как одномерный) – установить флажок;

– **Enable zero crossing detection** (Определение прохождения сигнала через ноль) – установить флажок.

Для наглядности отображения графиков время первой коммутации целесообразно задать с небольшим смещением от 0, например, 0,001 с.

Для цепи с  $R = 100$  Ом;  $C = 10$  мкФ постоянная времени цепи равна  $\tau = RC = 100 \cdot 0,00001 = 0,001$  с. Время второй коммутации должно составлять не менее  $5\tau$ , чтобы переходный процесс после первой коммутации установился с погрешностью не более 1 %.

Задать параметр **Step time** (Время наступления перепада сигнала в секундах):

- для блока **Step1** – **0.001**;
- для блока **Step2** – **0.01**.

Параметры блоков **Ideal Switch**, **Voltage Measurements**, **Current Measurements** оставить по умолчанию.

Задать следующие значения параметров блока **Sum**:

– **List of signs** (Лист сигналов) – установить | + – (1-й вход блока не задействован, 2-й вход имеет знак плюс, 3-й вход – знак минус);

– **Sample time** – **-1** (данное значение устанавливается при наследовании шага модельного времени от предыдущего блока).

Блок **Scope** (Осциллограф) строит графики исследуемых сигналов в функции времени. Порядок графических зависимостей в этом окне соответствует порядку подачи сигналов на входные зажимы осциллографа в направлении сверху вниз.

В диалоговом окне **'Scope' parameters**, на вкладке **General** необходимо задать следующие значения параметров:

- **Number of axes** (Количество графических полей, число входов осциллографа) – **2**;
- **Time range** (Интервал времени моделирования (с)) – **auto**;
- **Tick labels** (Подписи для осей) – **bottom axis only** (подписи горизонтальной оси только для нижнего графика).

Выбрать из списка **Sampling**, задающего режим вывода расчетных точек на экран, параметр **Decimation** и задать для него значение – **1** (шаг выводимых расчетных точек).

Задать на вкладке **Style** в окне ‘**Scope**’ parameters белый цвет для окна и фона, черный цвет для линии графика и толщину линий графика, равной **3**.

В настройках блока **Powergui** для работы с ключами и учета начальных условий необходимо в разделе **Configure parameters** на вкладке **Solver** выбрать **Simulation type: Continuous** (Непрерывные модели) и установить флажок на **Enable use of switching devices** (Доступно использование переключающих устройств).

3.4 Уменьшить окно модели до минимального размера, при котором будут видны все элементы, и скопировать его в буфер обмена.

Отчет

Вставить в отчет полученную схему модели, а также соответствующие окна параметров для всех блоков модели.

3.5 Задать в окне параметров моделирования время окончания моделирования (**Stop time:**), равное **0.02**, что соответствует удвоенному времени второй коммутации. Выбрать обычный режим расчета (**Normal**).

3.6 Сохранить полученную модель в своей папке (например, под именем **pp2.slx**) и запустить моделирование.

3.7 Посмотреть результаты моделирования, открыв окно блока **Scope**. Пример графиков **Scope** для цепи с  $E = 50$  В;  $R = 100$  Ом;  $C = 10$  мкФ приведен на рисунке 14.

Для полного отображения кривых установите оптимальный масштаб по осям в окне блока (кнопка ).

Если требуется изменение диапазона отображения по оси  $Y$  (не вся ось  $Y$  видна или нужно несколько увеличить диапазон), то с помощью ПКМ следует вызвать контекстное меню и в свойствах осей (**Axes properties**) установить необходимые значения начала (**Y-min**) и конца диапазона (**Y-max**).

В случае, если установленное время моделирования недостаточно, чтобы переходный процесс полностью отобразился на гра-

фиках или оно слишком большое, необходимо установить новое время и повторить процесс моделирования.

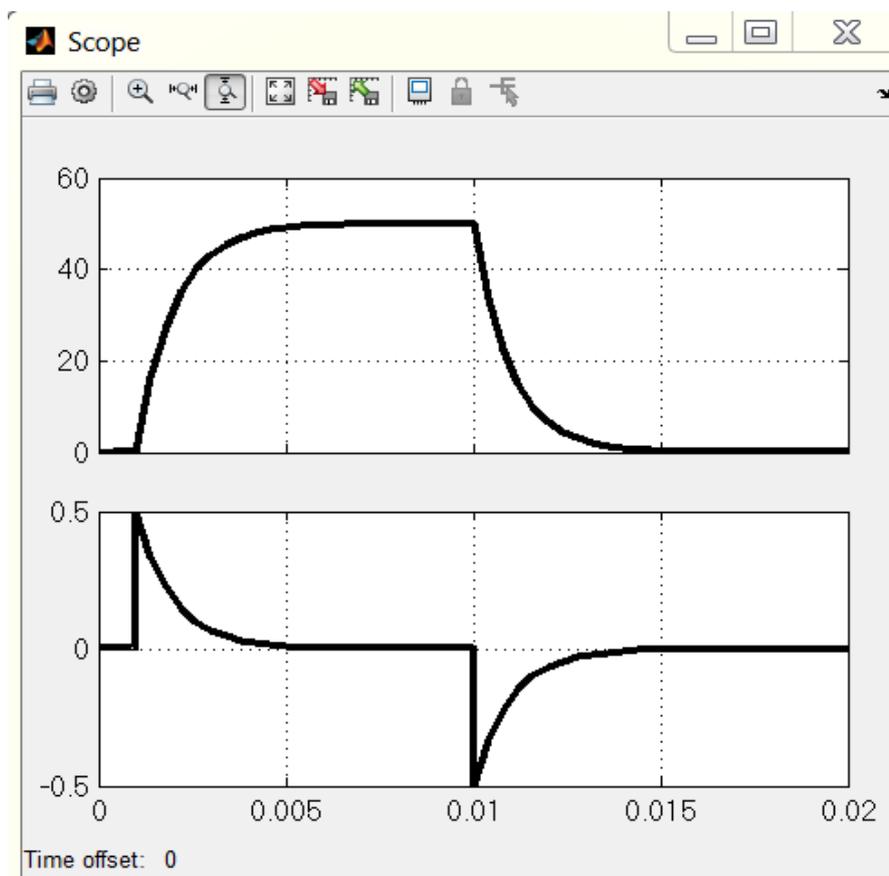


Рисунок 14

3.8 Чтобы получить доступ к дополнительным возможностям окна блока **Scope** необходимо в Command Window MATLAB ввести следующие команды:

```
set(0,'ShowHiddenHandles','On')  
set(gcf,'menubar','figure')
```

В результате в графическом окне **Scope** появится меню (рисунок 15).

3.9 Определить по результатам моделирования значение времени установления цепи с погрешностью не более 1 %. Для этого, используя формулу (2), рассчитайте в MATLAB мгновенное значение напряжения на емкости в момент времени  $t_{уст} = 5\tau = 0,005$  с после первой коммутации:

$$u_C(t) = 50 - 50e^{-5} \approx 49,66 \text{ В.}$$

Выберите в меню окна **Scope** команду **Tools⇒Data Cursor**, которая позволяет определить координаты точек на графике. Уста-

новите курсор в точку со значением координаты по  $Y$ , наиболее близкой к рассчитанному значению  $u_C(t) \approx 49,66$  в вольтах (на рисунке 16 –  $Y: 49.59$ ). Соответствующая координата  $X: 0.0058$ , что примерно равно значению  $t_{уст} = 0,0048$  с плюс начальное смещение первой коммутации на  $0,001$  с.

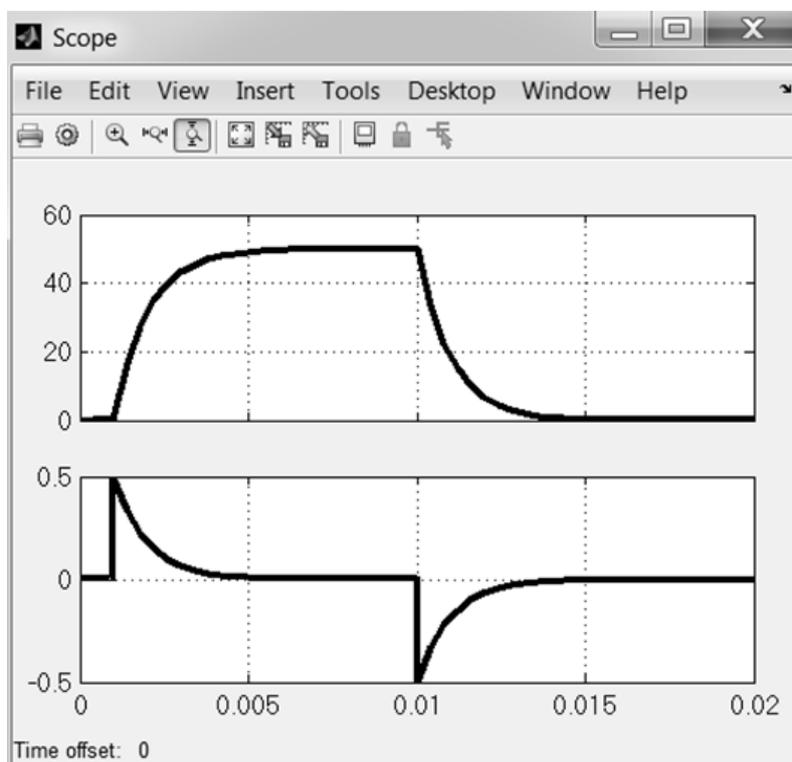


Рисунок 15

Таким образом, результаты расчета и моделирования времени установления совпадают с погрешностью примерно 4 %.

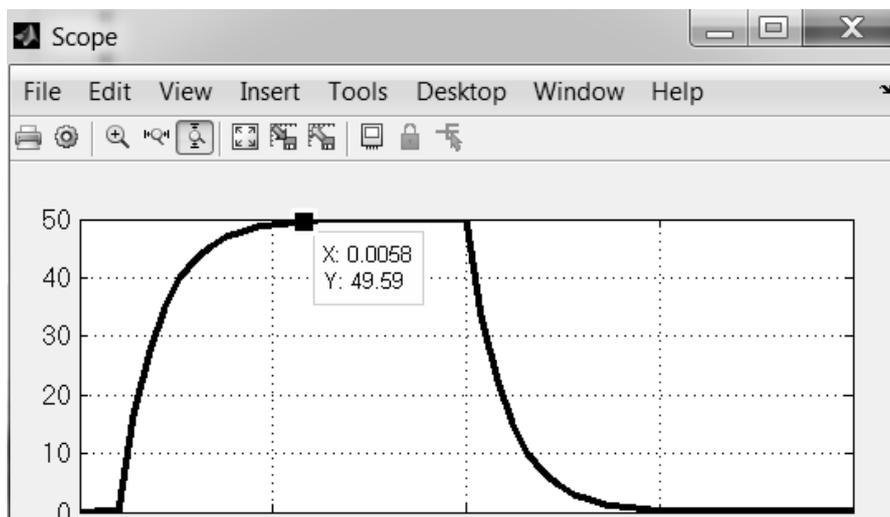


Рисунок 16

3.10 Для анализа влияния значения добавочного сопротивления на заряд (разряд) конденсатора уменьшить значение сопротивления в два раза и повторно провести моделирование (п. 3.9). По полученным результатам сделайте выводы (при этом обратите внимание на время переходных процессов, а также на максимальное значение тока через емкость).

Отчет

Вставить в отчет результаты моделирования по пп. 3.7–3.10 для своего варианта. Проведите анализ. Сделайте выводы.

4 Провести моделирование схемы линейной электрической цепи при разряде емкостного элемента на активно-индуктивную нагрузку (см. рисунок 3).

4.1 Добавить в окно модели (рисунок 17) необходимые блоки из библиотеки, три блока **Series RLC Branch** (из раздела **Elements**), блок **Current Measurement** (из раздела **Measurements**), **Powergui**; из библиотеки **Simulink**: блоки **Step** и **Clock** (из раздела **Sources**), два блока **To Workspace** (из раздела **Sinks**).

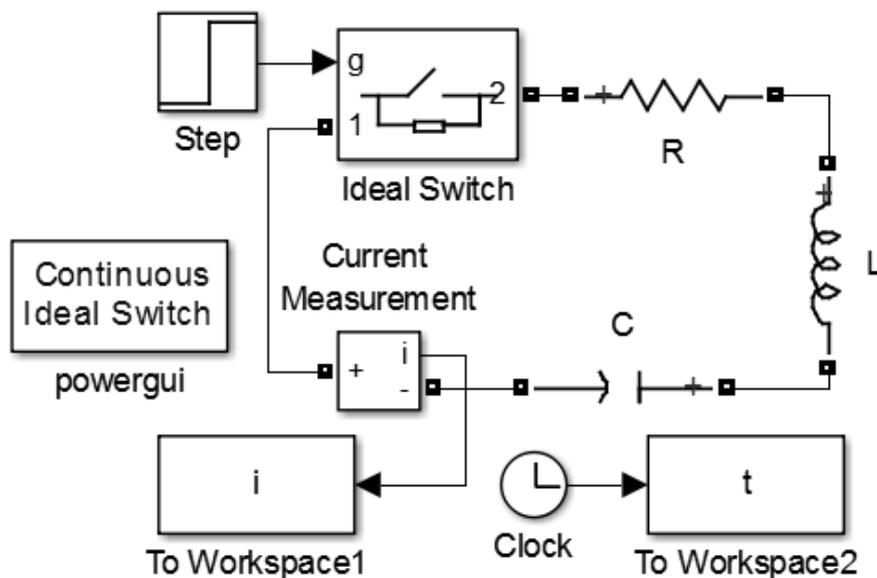


Рисунок 17

4.2 Выполнить необходимые соединения блоков (см. рисунок 17) и задайте названия блокам цепи в соответствии с заданием для своего варианта.

Коммутация в цепи обеспечивается блоком **Ideal Switch**, который замыкает электрическую цепь по сигналу, вырабатываемому генератором ступенчатого сигнала **Step**. Измерение тока в цепи выполняется с помощью блока **Current Measurement**. Блок **Clock** является источником временного сигнала. Блоки **To Workspace** необ-

ходимы для сохранения значений сигналов в рабочей области MATLAB.

4.3 Выполнить в окнах параметров блоков необходимые настройки в соответствии с номером варианта N.

Параметры  $R$ ,  $L$ ,  $C$  блоков **Series RLC Branch** устанавливаются в соответствии с заданием для своего варианта. Для емкости установить начальное значение напряжения (**Set the initial capacitor voltage**), равное значению  $Em$  для своего варианта.

В параметрах блока **Step** время наступления перепада сигнала **Step time** задайте, равным 0. Остальные значения оставьте без изменений (**Initial value – 0; Final value – 1; Sample time – 0**).

Задайте для блоков **To Workspace** следующие имена для параметров **Variable name**: для блока данных тока –  $i$ ; для блока данных времени –  $t$ . Для параметра, устанавливающего формат сохранения данных **Save format**: выберите **Array** (Массив). Остальные настройки оставьте без изменений.

Настройка параметров блоков **Ideal Switch**, **Current Measurements**, **Clock** не требуется.

В настройках блока **Powergui** в разделе **Configure parameters** на вкладке **Solver** необходимо выбрать **Simulation type: Continuous** (Непрерывные модели) и установить флажок на **Enable use of switching devices** (Доступно использование переключающих устройств).

Отчет

Вставить в отчет полученную схему модели и соответствующие окна параметров для всех ее блоков.

4.4 Выполнить для своего варианта расчеты значения критического сопротивления  $R_K$  по формуле (3) и значения постоянной времени  $\tau$  для сопротивления цепи  $R = R_K$  по формуле

$$\tau = 1/\delta = 2L/R_K.$$

Например, для цепи с  $R = 125$  Ом;  $C = 10$  мкФ;  $L = 25$  мГн

$$- R_K = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\sqrt{\frac{0,025}{0,00001}} = 100 \text{ Ом};$$

$$- \tau = 1/\delta = 2L/R_K = 2 \cdot 0,025/100 = 0,0005 \text{ с.}$$

4.5 Задать в параметрах моделирования: время окончания моделирования (**Stop time**), равное  $20\tau = 0,01$  с.

Для равномерного распределения точек расчета по диапазону моделирования выберите метод моделирования **ode1** с фиксирован-

ным шагом (**Type: Fixed-step**). Размер шага (**step size**), определяющий точность моделирования, выберите равным значению

$$\text{Stop time}/1000 = 0,01/1000 = 0,00001 \text{ с.}$$

4.6 Сохранить полученную модель в своей папке (**pp3.slx**).

4.7 Исследовать характер переходных процессов при разряде конденсатора в цепи с двумя реактивными элементами для своего варианта при изменении значения сопротивления цепи в диапазоне от  $0,25R_K$  до  $1,25R_K$  с шагом  $0,25R_K$ .

Для решения поставленной задачи напишите и запустите в окне Command Windows следующую программу:

```
clear all; % Очистка Workspace (рабочей области)
open('pp3.slx') % Открытие модели figure
xlabel('t, s'); ylabel('i, A'); grid on;
Rk=100; % Задание значения критического сопротивления
for R = 0.25*Rk: 0.25*Rk: 1.25*Rk % Начало цикла
    % Присвоение значения R (от 25% до 125% от Rk)
    set_param('pp3/R','Resistance',num2str(R));
    sim('pp3.slx'); % Запуск моделирования
    switch R % Изменение цвета кривых с помощью switch
        case 0.25*Rk
            C='r'; % красный цвет
        case 0.5*Rk
            C='m'; % малиновый цвет
        case 0.75*Rk
            C='g'; % зеленый цвет
        case Rk
            C='b'; % синий цвет
        case 1.25*Rk
            C='k'; % черный цвет
    end
    line(t, i, 'Color', C, 'LineWidth', 2); % Построение графиков
end % Конец цикла
```

В программе формируется цикл, в котором задаются пять значений сопротивления **Resistance** блока **R**:  $0,25R_K$ ;  $0,5R_K$ ;  $0,75R_K$ ;  $R_K$  и  $1,25R_K$ ; и осуществляется запуск моделирования при обращении к файлу модели (**pp3.slx**). Графики строятся на основании данных **t** и **i**, которые передаются в рабочую область двумя блоками **To Workspace**. Для различия зависимостей использован цвет (с помощью конструкции выбора **switch**).

4.8 Результаты работы программы при изменении сопротивления от 25 до 125 Ом (для  $R_K = 100$  Ом) приведены на рисунке 18.

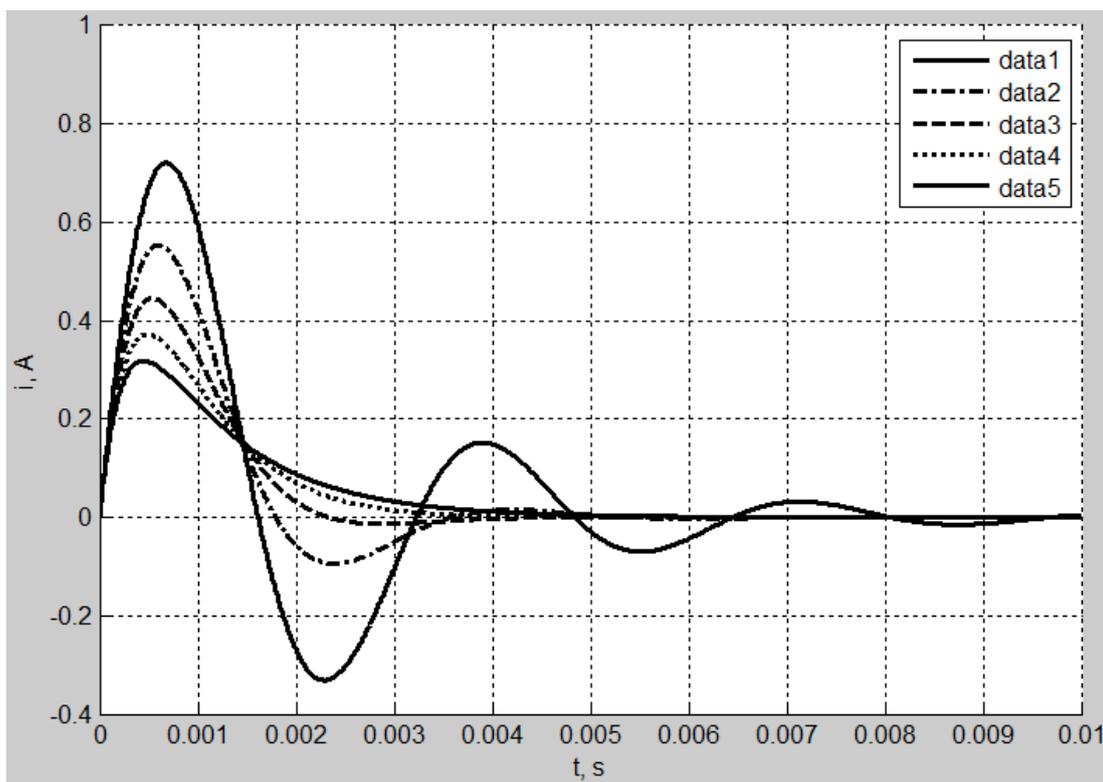


Рисунок 18

Отчет

Вставить в отчет листинг программы и семейство графиков, полученных в окне **Figure**. Сделайте выводы о характере переходных процессов при  $R > R_K$ ,  $R = R_K$  и  $R < R_K$ . Проанализировать, как зависит частота свободных колебаний и амплитуда для колебательного переходного процесса от сопротивления  $R$ .

5 В зависимости от номера варианта провести моделирование разветвленной электрической цепи первого порядка, в которой после коммутации происходит изменение ее топологии (см. приложение).

5.1 Определить корень характеристического уравнения для заданной электрической цепи. Для решения поставленной задачи напишите и запустите в окне **Command Windows** программу.

Пример программы, с помощью которой можно найти корень характеристического уравнения  $p$  для схемы (рисунок 4) на основании выражения (5) для операторного сопротивления цепи после коммутации. Программа составлена для следующих значений параметров схемы:  $E = 10$  В;  $R_1 = R_2 = 10$  Ом;  $R_3 = 5$  Ом;  $L = 2$  мГн.

**E=10; L=0.002;R1=10;R2=10; R3=5;**

```

syms p; % Объявляем символьную переменную
D=R1*R2/(R1+R2)+R3+p*L;% Характеристическое уравнение
p=solve(D) % Нахождение корня

```

В результате выполнения программы будет возвращено значение корня характеристического уравнения  $p = -5000 \text{ с}^{-1}$ .

5.2 Определить значения постоянной времени цепи как

$$\tau = -1/p = 200 \text{ мкс.}$$

5.3 Добавить в окно модели необходимые блоки. Предусмотрите вывод требуемых результатов моделирования в окно блока **Scope**. На рисунке 19 приведен пример модели для схемы, указанной в п. 5.1.

5.4 Выполнить необходимые соединения блоков и задать названия блокам цепи в соответствии с заданием для своего варианта.

5.5 Выполнить в окнах параметров блоков необходимые настройки в соответствии с номером варианта N.

Момент коммутации задать с помощью блока **Step**, установив для него время наступления перепада сигнала **Step time**, равное  $5\tau$ .

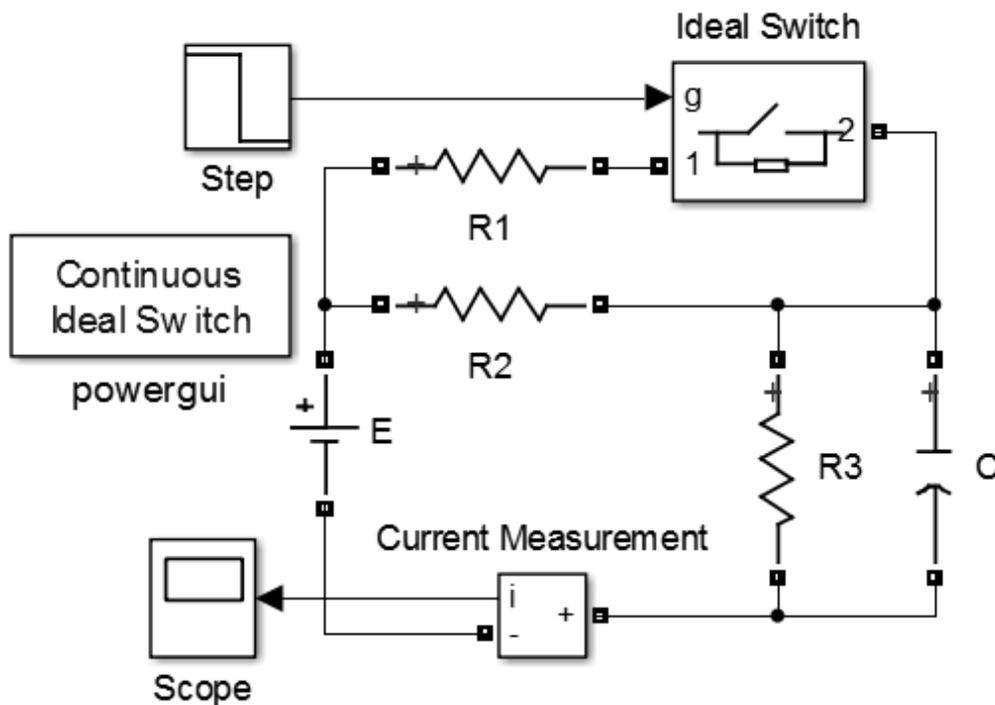


Рисунок 19

Отчет

Вставить в отчет полученную схему модели и соответствующие окна параметров для всех ее блоков.

5.6 Задать в параметрах моделирования время окончания моделирования (**Stop time:**), примерно равное  $10\tau$ .

5.7 Сохранить полученную модель и запустить моделирование.

5.8 Посмотреть результаты моделирования, открыв окно блока **Scope**. Пример графиков **Scope** модели для схемы, указанной в п. 5.1, приведен на рисунке 20.

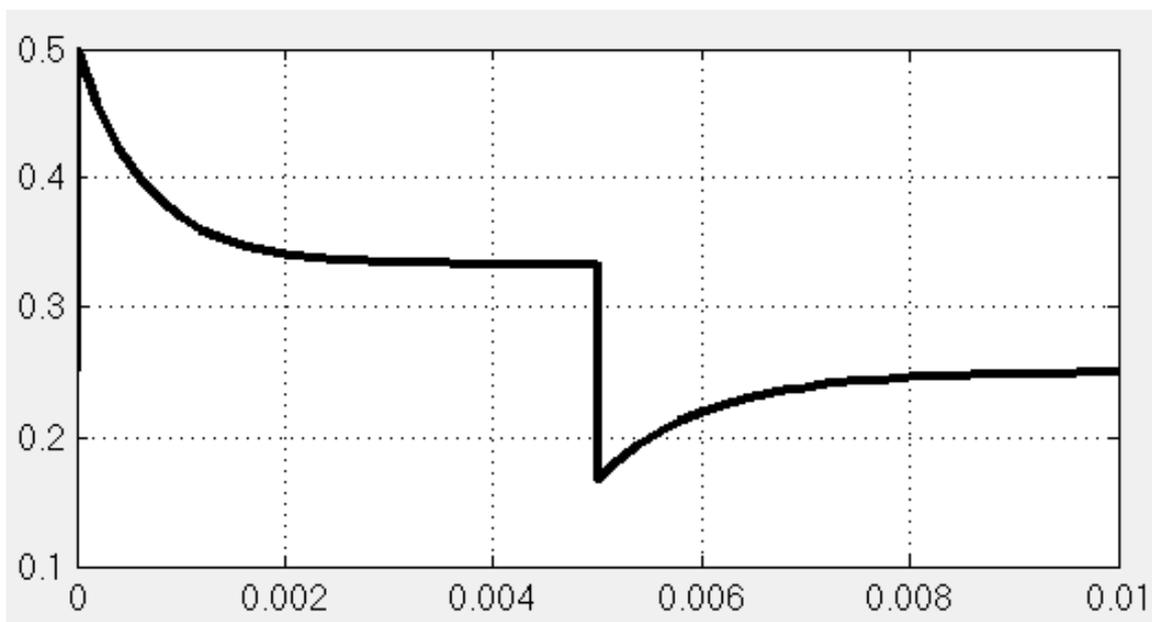


Рисунок 20

5.9 Определить по результатам моделирования постоянную времени цепи после подключения источника и после коммутации с помощью блока **Ideal Switch**.

Отчет

Вставить в отчет результаты моделирования по пп. 5.1–5.9 для своего варианта. Проанализировать полученную зависимость. Сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. От чего зависит переходный процесс в электрической цепи?
2. Как связана постоянная времени цепи с длительностью переходного процесса?
3. От каких факторов зависит значение постоянной времени?
4. Как правильно выбрать (рассчитать) время моделирования?
5. Какие блоки пакета Simulink могут быть использованы для моделирования переходного процесса в электрических цепях?
6. Для чего предназначен указанный блок (**DC Voltage Source**, **Series RLC Branch**, **Current Measurement**, **Voltage Meas-**

urement, Ideal Switch, Step, Scope, Sum, Multimeter, Powergui), какие настройки у него имеются?

7. Какие настройки нужно задать в окне **Model Configuration Parameters** перед запуском модели?

8. В каких блоках могут быть представлены результаты моделирования переходных процессов?

9. Как передать результаты моделирования в рабочую область MATLAB?

10. Как определить координаты точек, выбранных на графике?

11. Как смоделировать переходные процессы в заданной разветвленной электрической цепи?

# **Задание на проектную работу на тему «Расчет и моделирование в системе MATLAB-Simulink параметров компенсатора трехфазной электрической цепи для улучшения коэффициента мощности»**

**Цель работы:** исследование способа улучшения коэффициента мощности в симметричной трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз приемника в зависимости от варианта по схеме звезда или треугольник с резистивно-индуктивной нагрузкой.

## **Методические указания**

Компенсирующие устройства в электрической системе предназначены для компенсации реактивных параметров сетей, например, линий электропередачи (ЛЭП) переменного тока и реактивной мощности, потребляемой нагрузками и элементами электрической системы. В качестве компенсирующих устройств на ЛЭП используются *продольно* (последовательно) включаемые батареи электрических конденсаторов, а также *поперечно* (параллельно) включаемые электрические реакторы и синхронные компенсаторы, которые устанавливаются на конечных или промежуточных подстанциях ЛЭП. Для компенсации реактивной мощности, потребляемой нагрузками (асинхронными двигателями, электролизными установками и др.), и элементами электрической системы, часто применяют поперечно включаемые батареи электрических конденсаторов.

Методика расчета емкости компенсатора приведена в [3].

## **Рабочее задание**

1 Начертить эквивалентную схему заданной симметричной трехфазной цепи с резистивно-индуктивной нагрузкой по трехпроводной схеме звезда или треугольник в зависимости от номера варианта, в соответствии с таблицей 1.

2 Задать значения фазных напряжений  $U_{\phi}$  в соответствии с таблицей 1. Принять частоту питающего трехфазного генератора  $f = 50$  Гц.

3 Рассчитать по заданным значениям активной мощности  $P$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  для заданной трехфазной цепи:

- фазные и линейные токи;
- фазные сопротивления  $R_{\phi}$  и индуктивности  $L_{\phi}$ .

Таблица 1 – Значение параметров

Номер варианта (N)	Соединение приемника/ Фаза	$U_{\phi}$ , В	$P$ , кВт	$\cos\varphi$	$P_K$ , Вт	$\cos\varphi_{\text{пк}}$
1	звезда / A	127	5	0,6	100	0,99
2	треугольник / B	220	5,5	0,5	120	0,98
3	звезда / C	380	6	0,4	140	0,97
4	треугольник / A	127	6,5	0,6	160	0,96
5	звезда / B	220	7	0,5	180	0,95
6	треугольник / C	380	5	0,4	100	0,99
7	звезда / A	127	5,5	0,6	120	0,98
8	треугольник / B	220	6	0,5	140	0,97
9	звезда / C	380	6,5	0,4	160	0,96
10	треугольник / A	127	7	0,6	180	0,95
11	звезда / B	220	5	0,5	100	0,99
12	треугольник / C	380	5,5	0,4	120	0,98
13	звезда / A	127	6	0,6	140	0,97
14	треугольник / B	220	6,5	0,5	160	0,96
15	звезда / C	380	7	0,4	180	0,95
16	треугольник / A	127	5	0,6	100	0,99
17	звезда / B	220	5,5	0,5	120	0,98
18	треугольник / C	380	6	0,4	140	0,97
19	звезда / A	127	6,5	0,6	160	0,96
20	треугольник / B	220	7	0,5	180	0,95

4 Построить векторную диаграмму фазного напряжения генератора, а также фазных и линейных токов для заданной в таблице фазы. Проверить по ней выполнение первого закона Кирхгофа. Определить по векторной диаграмме сдвиг по фазе  $\varphi$  между фазным током и фазным напряжениями генератора. Сделать выводы.

5 Смоделировать трехфазную цепь без компенсатора в системе **Simulink**.

6 Результаты расчета и моделирования свести в таблице 2. Сравнить результаты моделирования с расчетными значениями и сделать выводы.

7 Для трехфазной цепи из п. 1 с компенсатором по заданному значению коэффициента мощности цепи с компенсатором  $\cos\varphi_{\text{пк}}$  рассчитать суммарную реактивную мощность приемника и компенсатора.

8 Найти реактивную мощность трехфазного компенсатора, которая позволяет получить заданное в таблице 1 значение коэффициент мощности цепи  $\cos\varphi_{\text{пк}}$ .

Таблица 2 – Результаты расчета и моделирования

Способ определения	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$\varphi,$ °
Расчет										
Моделирование										

9 Через комплекс полной мощности компенсатора  $\underline{S}_k = \underline{U}\underline{I}^*$ , с учетом известных начальных фаз фазных напряжений генератора найти комплексносопряженные значения действующих фазных токов компенсатора и соответствующие комплексы действующих значений фазных токов компенсатора и линейных токов трехфазного генератора.

10 Построить векторную диаграмму фазных токов компенсатора. Проверить по ней выполнение первого закона Кирхгофа. Сделать выводы.

11 Построить векторную диаграмму фазного напряжения генератора для заданной в таблице фазы, а также фазных токов генератора. Проверить по ней выполнение первого закона Кирхгофа. Определить по векторной диаграмме сдвиг по фазе  $\varphi_k$  между фазным током и напряжением генератора. Сделать выводы.

12 Вычислить для компенсатора фазное сопротивление  $R_k$  в омах и емкость  $C_k$  конденсатора в фарадах, которые необходимо включить в сеть по трехпроводной схеме звезда параллельно приемнику, чтобы коэффициент мощности цепи  $\cos\varphi_{пк}$  стал равным значению, указанному в таблице 1.

13 Смоделировать трехфазную цепь с компенсатором в системе **Simulink**.

14 Результаты расчета и моделирования свести в таблице 3. Сравнить результаты моделирования с расчетными значениями и сделать выводы.

Таблица 3 – Результаты расчета и моделирования

Способ определения	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$\varphi,$ °
Расчет										
Моделирование										

15 По результатам расчета и моделирования составить отчет по проектной работе.

## Библиографический список

1 Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

2 Герман-Галкин, С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink : учеб. / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : Лань, 2013. – 448 с.

3 Ашанин, В. Н. Трехфазные цепи : учеб. пособие / В. Н. Ашанин, О. Н. Регада. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – 52 с.

4 Регада, О. Н. Расчет и моделирование электрических цепей : учеб. пособие / О. Н. Регада. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 170 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица – Исходные данные для заданий

№ варианта	Номер рисунка	Исследуемая величина	№ варианта	Номер рисунка	Исследуемая величина
1	П.1	$u_C(t)$	25	П.9	$u_C(t)$
2	П.2	$i_1(t)$	26	П.10	$i_2(t)$
3	П.3	$i_3(t)$	27	П.11	$i_1(t)$
4	П.4	$u_{R1}(t)$	28	П.12	$u_{R3}(t)$
5	П.5	$i_1(t)$	29	П.13	$i_2(t)$
6	П.6	$i_2(t)$	30	П.14	$i_1(t)$
7	П.7	$u_C(t)$	31	П.15	$u_C(t)$
8	П.8	$i_1(t)$	32	П.16	$i_2(t)$
9	П.9	$i_2(t)$	33	П.1	$u_{R2}(t)$
10	П.10	$u_{R1}(t)$	34	П.2	$i_2(t)$
11	П.11	$i_3(t)$	35	П.3	$i_1(t)$
12	П.12	$i_1(t)$	36	П.4	$u_{R3}(t)$
13	П.13	$u_C(t)$	37	П.5	$u_C(t)$
14	П.14	$u_L(t)$	38	П.6	$i_3(t)$
15	П.15	$i_1(t)$	39	П.7	$i_1(t)$
16	П.16	$u_{R3}(t)$	40	П.8	$u_L(t)$
17	П.1	$i_1(t)$	41	П.9	$i_2(t)$
18	П.2	$u_L(t)$	42	П.10	$u_{R2}(t)$
19	П.3	$u_C(t)$	43	П.11	$u_C(t)$
20	П.4	$i_2(t)$	44	П.12	$i_2(t)$
21	П.5	$i_3(t)$	45	П.13	$i_1(t)$
22	П.6	$u_{R1}(t)$	46	П.14	$i_3(t)$
23	П.7	$i_2(t)$	47	П.15	$i_2(t)$
24	П.8	$i_3(t)$	48	П.16	$u_{R2}(t)$

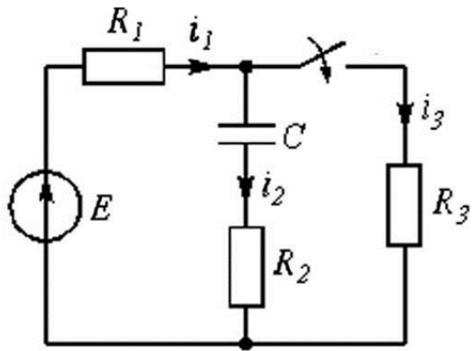


Рисунок П.1

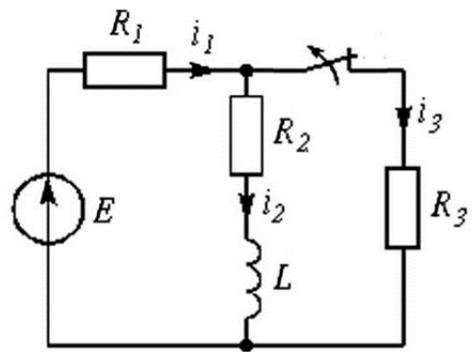


Рисунок П.2

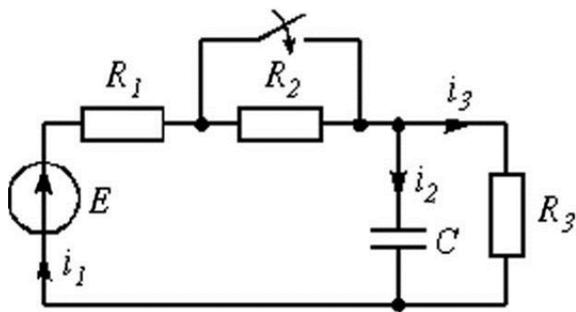


Рисунок П.3

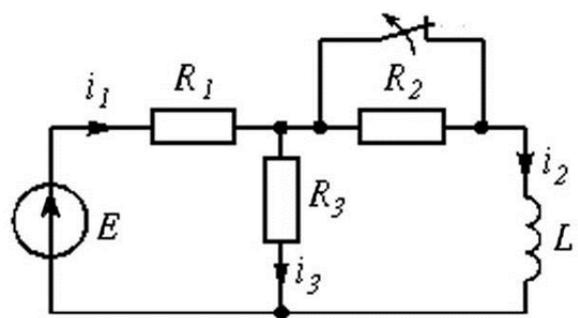


Рисунок П.4

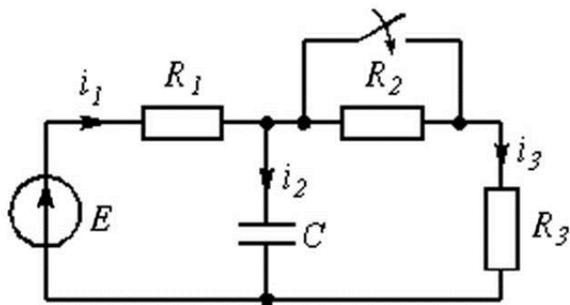


Рисунок П.5

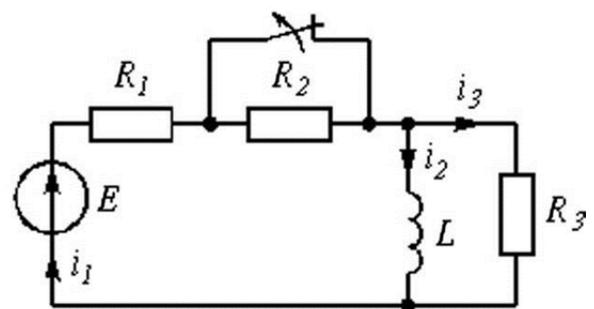


Рисунок П.6

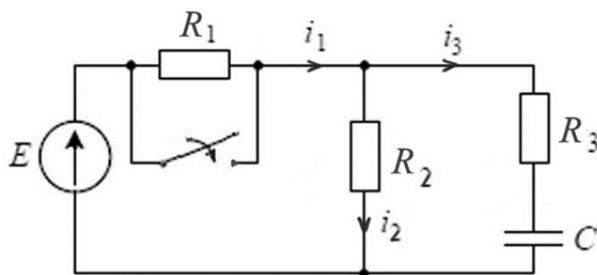


Рисунок П.7

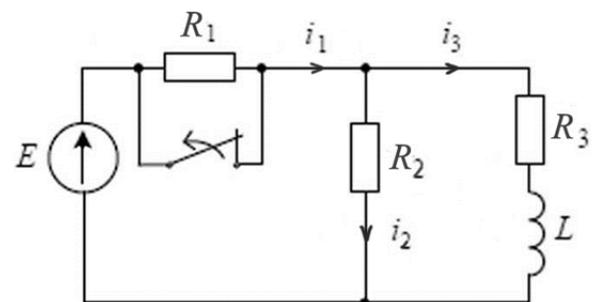


Рисунок П.8

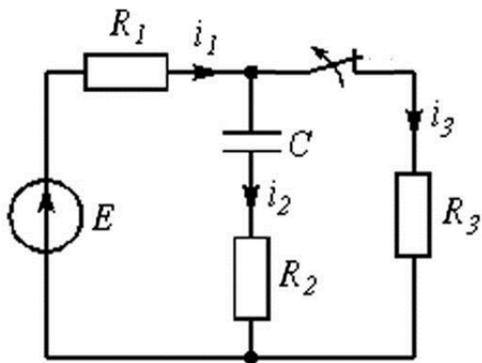


Рисунок П.9

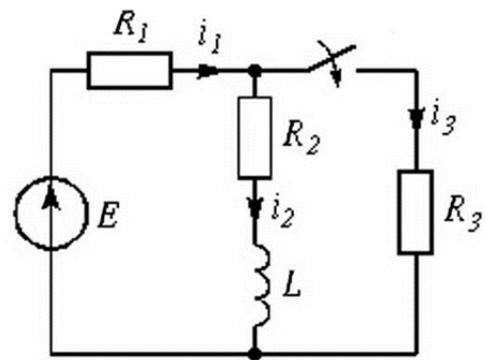


Рисунок П.10

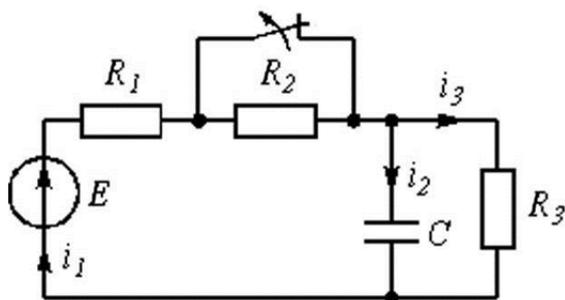


Рисунок П.11

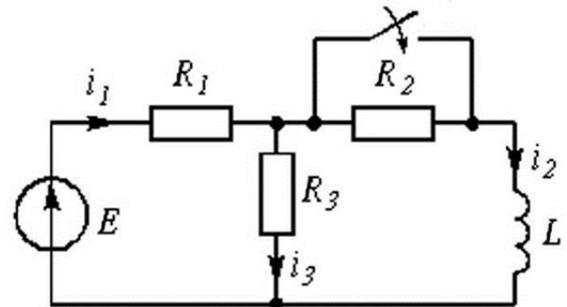


Рисунок П.12

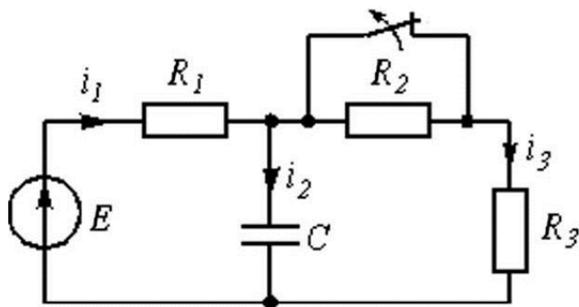


Рисунок П.13

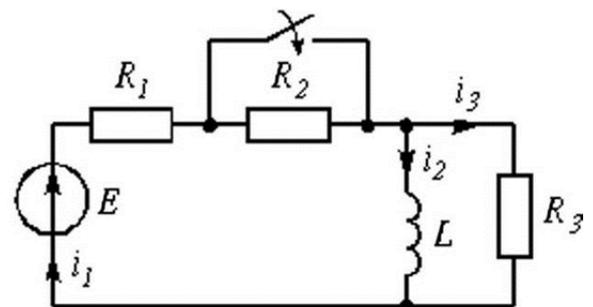


Рисунок П.14

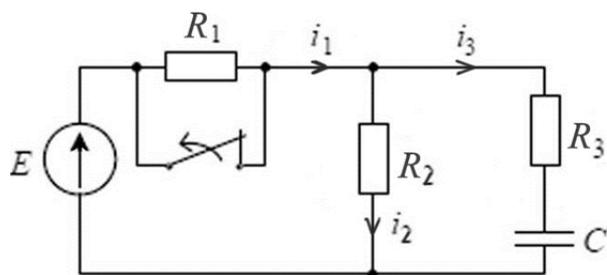


Рисунок П.15

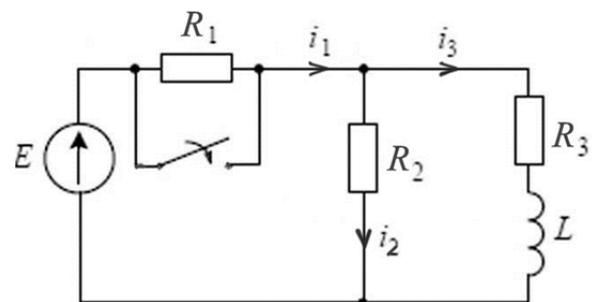


Рисунок П.16

*Учебное издание*

Моделирование  
в среде MATLAB-Simulink

Составители:

**Герасимов** Андрей Ильич,  
**Регеда** Владимир Викторович,  
**Регеда** Ольга Николаевна

Редактор *Л. Ю. Обухова*  
Технический редактор *М. Б. Жучкова*  
Компьютерная верстка *М. Б. Жучковой*

Подписано в печать 24.08.2017.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 6,05.  
Тираж 50. Заказ № 487.

---

Издательство ПГУ.  
440026, Пенза, Красная, 40.  
Тел./факс: (8412) 56-47-33; e-mail: iic@pnzgu.ru



