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

В. В. Регеда, О. Н. Регеда

ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В СИСТЕМЕ MATLAB-SIMULINK

Методические указания
к лабораторным работам

Пенза
Издательство ПГУ
2020

УДК 001.8(083.95)
Р32

Р е ц е н з е н т

доктор технических наук, профессор,
академик Российской метрологической академии,
директор Государственного регионального центра
стандартизации, метрологии и испытаний в Пензенской области
А. А. Данилов

Регеда, В. В.

Р32 Визуальное моделирование электрических цепей в среде MATLAB-Simulink : метод. указания к лабораторным работам / В. В. Регеда, О. Н. Регеда. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – 88 с.

Рассмотрены основные приемы работы с программным модулем Simulink – главным пакетом расширений MATLAB. Основное внимание уделено изучению раздела библиотеки Simscape Power Systems, который содержит набор визуальных объектов для имитационного моделирования типовых электроэнергетических и электротехнических устройств. Рассмотрены возможности системы по моделированию линейных электрических цепей постоянного и переменного тока в установившихся и переходных режимах, по определению импеданса электрической цепи и выполнению гармонического анализа цепи, а также по визуализации результатов расчета и моделированию электрических цепей переменного тока по векторным и топографическим диаграммам. Приведено задание на проектную работу по расчету и моделированию линейной электрической цепи. 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 обучающихся вузов по направлениям подготовки: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 12.03.01 «Приборостроение».

УДК 001.8(083.95)

© Пензенский государственный
университет, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4
Лабораторная работа № 1 Основы моделирования
с использованием структурных блоков в среде MATLAB-Simulink..... 6
Лабораторная работа № 2 Моделирование линейных
электрических цепей с использованием имитационных блоков
в среде MATLAB-Simulink..... 28
Лабораторная работа № 3 Дополнительные блоки
для моделирования электрических цепей гармонического тока
в системе Simulink..... 44
Лабораторная работа № 4 Визуализация результатов
моделирования в системе MATLAB-Simulink..... 53
Лабораторная работа № 5 Дополнительные возможности блока
Powergui в системе MATLAB-Simulink..... 64
Проектная работа по курсу «Компьютерные технологии
в электроэнергетике»..... 83
Библиографический список..... 86

ВВЕДЕНИЕ

Профессиональная подготовка выпускников бакалавриата по направлению «Электроэнергетика и электротехника» ориентирована в том числе на формирование у них навыков схемотехнического моделирования с использованием информационных технологий и современного программного обеспечения, которые позволят им решать задачи в рамках проектной и конструкторской деятельности.

В настоящее время наибольшее распространение как в учебном процессе, так и в научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках получила среда вычислений и моделирования MATLAB-Simulink. Наиболее близка по интерфейсу к MATLAB бесплатная система компьютерной математики Scilab, которая по своим возможностям близка MathCAD. В состав Scilab входит система компьютерного моделирования Xcos, поддерживающая многие возможности Simulink. В настоящее время доступен MATLAB-Simulink с использованием «облачных» технологий.

Пакет Simulink применяет принцип визуального программирования для создания моделей из стандартных блоков, помещаемых в различных библиотеках. Результаты моделирования могут выводиться в различные приемники в виде числовых значений, графиков или таблиц, а также использоваться для проведения различных расчетов и визуализации данных. 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.

Частным случаем математического моделирования является имитационное моделирование. Его целесообразно применять для объектов, аналитические модели которых либо очень сложные, либо принципиально не могут быть разработаны, либо имеют неустойчивые решения.

Библиотека Simscape Power Systems [1] включает большой набор блоков для имитационного моделирования пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и т.д. Для существенного упрощения модели сложных электротехнических систем можно сочетать имитационные блоки Simscape Power Systems и обычные блоки Simulink.

Элементы библиотеки компонентов Simscape в отличие от стандартных элементов Simulink из раздела библиотеки Simulink имеют ряд особенностей.

Элементы (блоки) библиотеки представляют собой **модели физических компонентов**, а не просто передаточные функции и другие математические объекты.

Соединения между блоками соответствуют физическим связям между компонентами – **сигналам схемы**, под которыми понимается изменение какой-то одной физической величины относительно другой. Под передачей сигнала подразумевается взаимовлияние одного элемента системы на другой.

Существуют несколько типов сигналов в зависимости от их физической сущности (электрические, механические и т.д.): электрический сигнал – это изменение напряжения на одном проводе относительного другого (земля); механический сигнал – это изменение положения одной точки относительно другой (неподвижной).

В библиотеке компонентов Simscape существуют компоненты для измерения, которые конвертируют физические сигналы в соответствующие информационные сигналы, а также специальные компоненты-конвертеры – для того, чтобы присоединить к элементам Simscape стандартные элементы Simulink.

Данные методические указания включают описание пяти лабораторных работ по визуальному моделированию и расчету линейных электрических цепей постоянного и переменного тока во временной области. Рассмотрены различные виды анализа электрических цепей:

– расчет установившегося режима работы электрической цепи на переменном токе;

– выполнение гармонического анализа электрической цепи;

– расчет импеданса для участка цепи;

– получение частотных характеристик.

Кроме того, рассмотрены вопросы визуализации результатов моделирования электрических цепей переменного тока с помощью векторных и топографических диаграмм.

В данных методических указаниях описывается версия MATLAB R2017b, 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, используемым в ранее созданных версиях пакета.

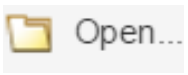
Лабораторная работа № 1

ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРНЫХ БЛОКОВ В СРЕДЕ MATLAB-SIMULINK

Цель работы: изучение интерфейса и основных возможностей программного модуля Simulink; знакомство с разделами библиотеки Simulink, предназначенными для моделирования на функциональном уровне.

Рабочее задание

1 Запустить программу MATLAB и войти в среду **Simulink** с помощью команды **Home ⇒ New ⇒ Simulink Model** (для версии с меню – это команда **File ⇒ New ⇒ Model**), в результате откроется стартовая страница **Simulink Start Page** (рисунок 1).

На стартовой странице ранее созданную модель можно открыть, либо выбрав требуемый файл на диске по ссылке 

в левой части окна, либо среди избранных файлов в разделе **Favorites**, либо среди недавно открываемых файлов в разделе **Recent**.

На закладке **Examples** стартовой страницы **Simulink Start Page** можно открыть примеры моделей из различных областей.

На закладке **New** можно создать новую модель либо с помощью своего ранее созданного шаблона из раздела **My Templates**, либо открыть пустой шаблон **Blank Model** в разделе **Simulink**, либо используя другие шаблоны из различных разделов.

2 Создать новую модель в редакторе Simulink, выбрав пустой шаблон модели **Blank Model** в разделе **Simulink**.

В открывшемся окне с помощью команды **File ⇒ Save As...** сохранить файл под именем **model_1** с расширением **slx** (для более ранних версии MATLAB – с расширением **.mdl**) на диске в своей папке.

Вид окна, в котором будет осуществляться сборка **S**-модели **model_1**, приведен на рисунке 2.

Модели в Simulink создаются по технологии Drag-and-Drop (перетяни и оставь) из отдельных блоков (модулей). Сами блоки хранятся в библиотеках программного модуля **Simulink**, которые имеют иерархическую структуру и могут расширяться пользователем за счет разработки собственных блоков.

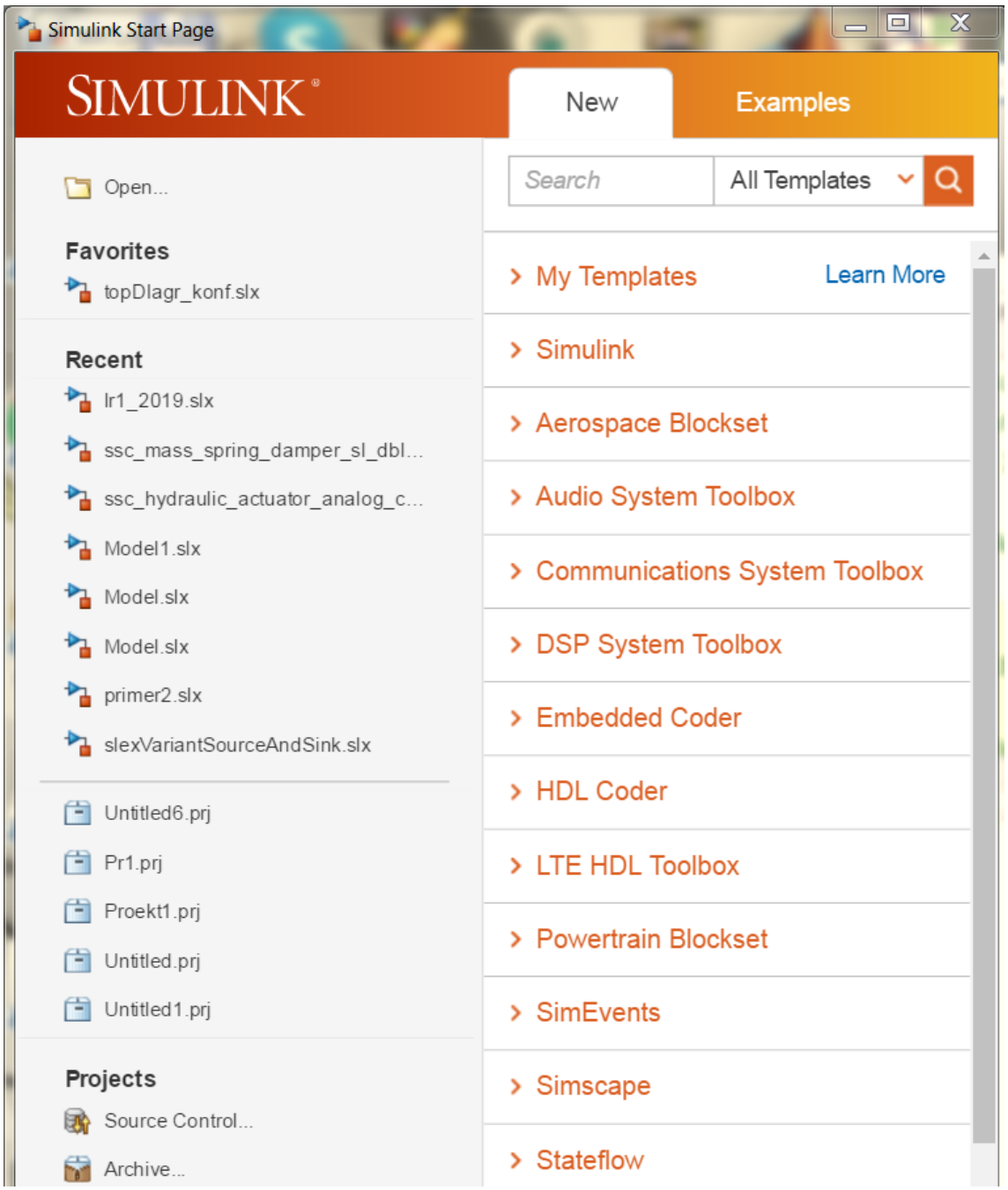


Рисунок 1

3 Открыть окно библиотеки **Simulink Library Browser** (рисунок 3) с помощью кнопки (для версии с меню – это кнопка).

В левой части окна представлен перечень **Simulink**-библиотек, входящих в состав установленной конфигурации программного модуля **Simulink**. В правой части окна на закладке **Library: Simulink** в зависимости от выбранного раздела библиотеки помещаются соответствующие пиктограммы ее подразделов (на рисунке 3 – для раздела **Simulink**).

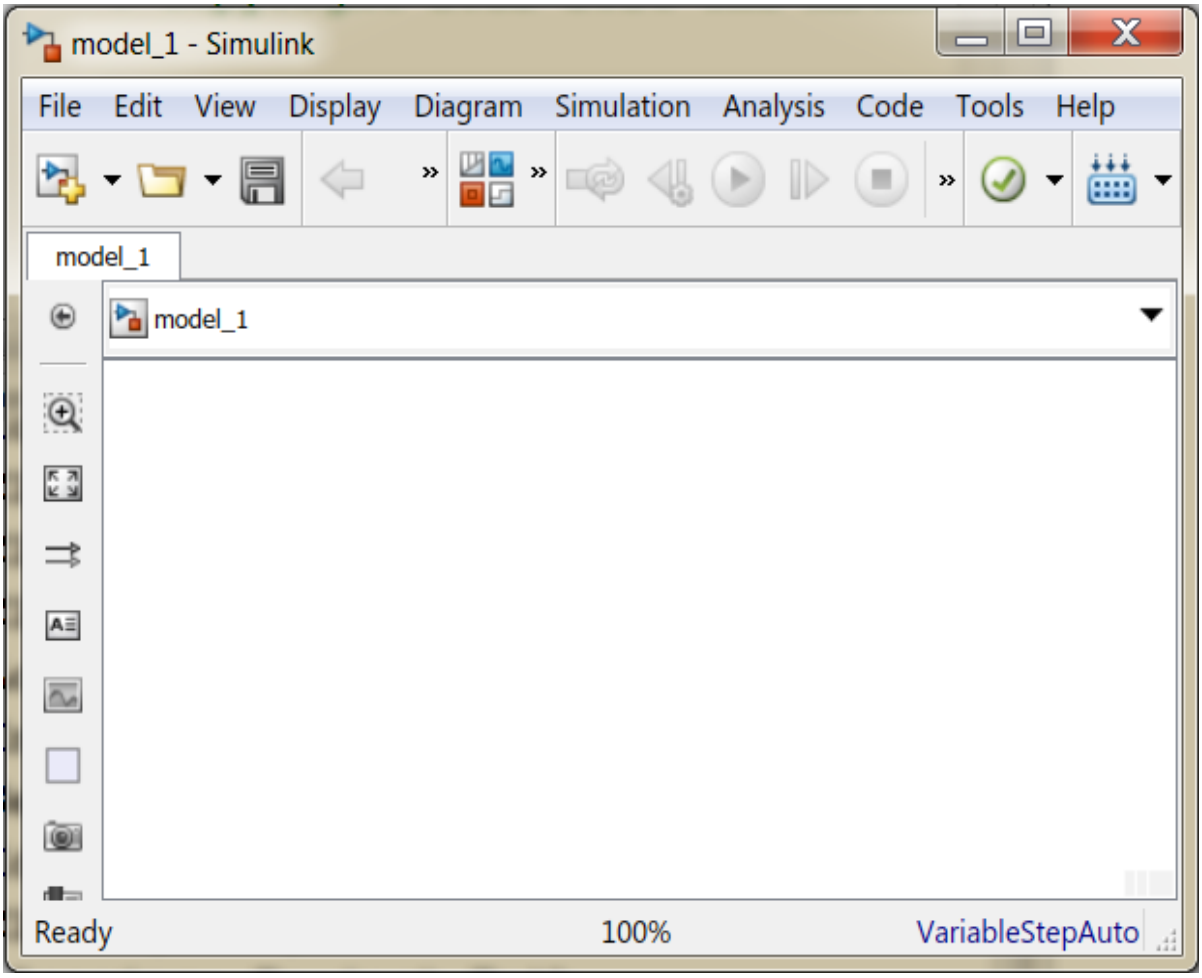


Рисунок 2

В зависимости от версии и выбранной конфигурации программного модуля **Simulink** окно библиотеки **Simulink Library Browser** может содержать разное число библиотек.

Чтобы раскрыть перечень разделов какой-либо из библиотек, следует выполнить двойной щелчок на ее имени.

Ядром пакета **Simulink** является одноименная библиотека **Simulink**, которая представляет собой набор визуальных **S**-моделей, предназначенных для получения функциональных блок-схем любого устройства. В **S**-моделях входные и выходные величины не имеют физического содержания, а линии соединения переносят некоторый информационный сигнал.

На рисунке 4 в правой части окна **Simulink Library Browser** приведены пиктограммы подразделов для раздела библиотеки **Simscape**. Данная библиотека представляет собой набор визуальных **P**-моделей, сигналы на выводах которых зависят от их физической сущности (электрические, электронные, механические и т.д.).

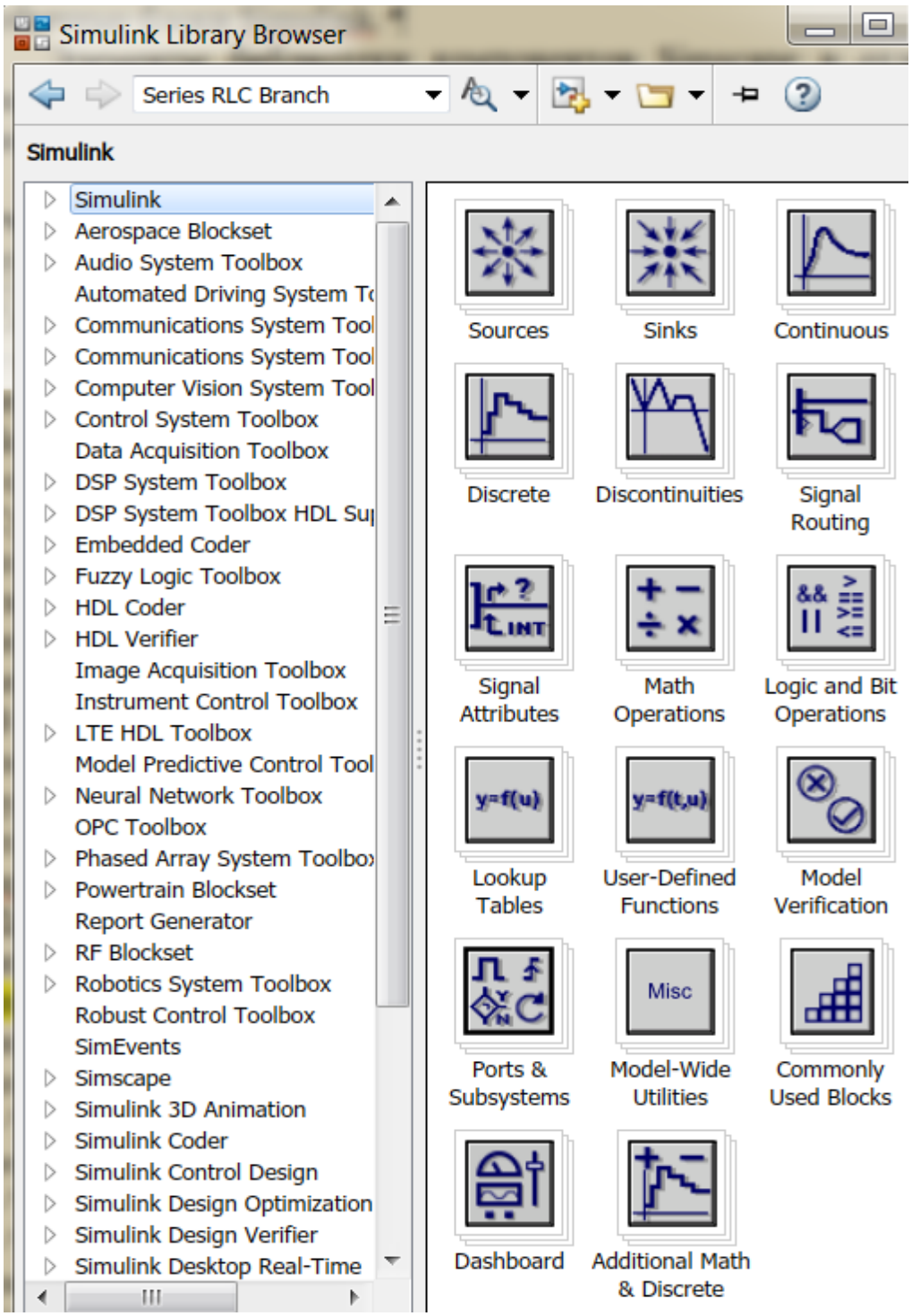


Рисунок 3

4 Для наблюдения и управления процессом моделирования, а также для обеспечения сохранения промежуточных и исходных результатов моделирования используются специальные блоки («обзорные окна»). Ознакомиться с основными блоками раздела **Sinks** (Приемники) библиотеки **Simulink**. На рисунке 5 показаны блоки раздела **Sinks**, которые имеют только входы и не имеют выходов.

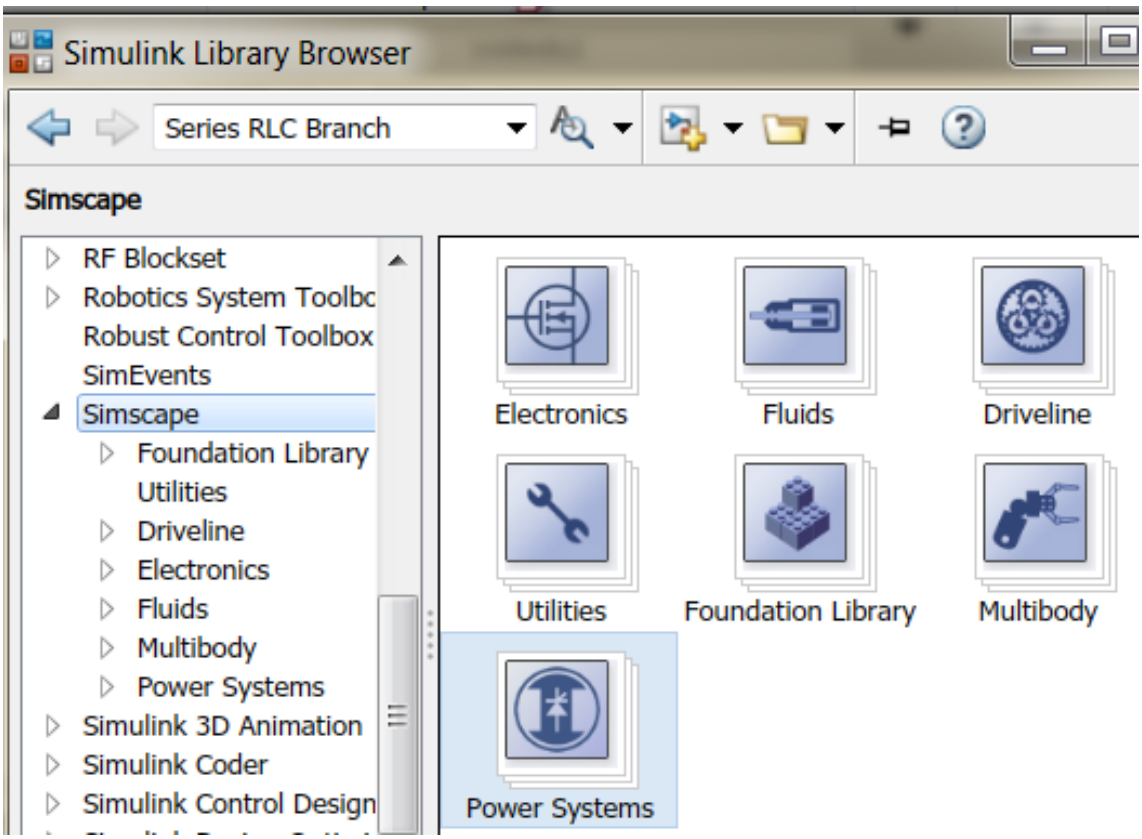


Рисунок 4

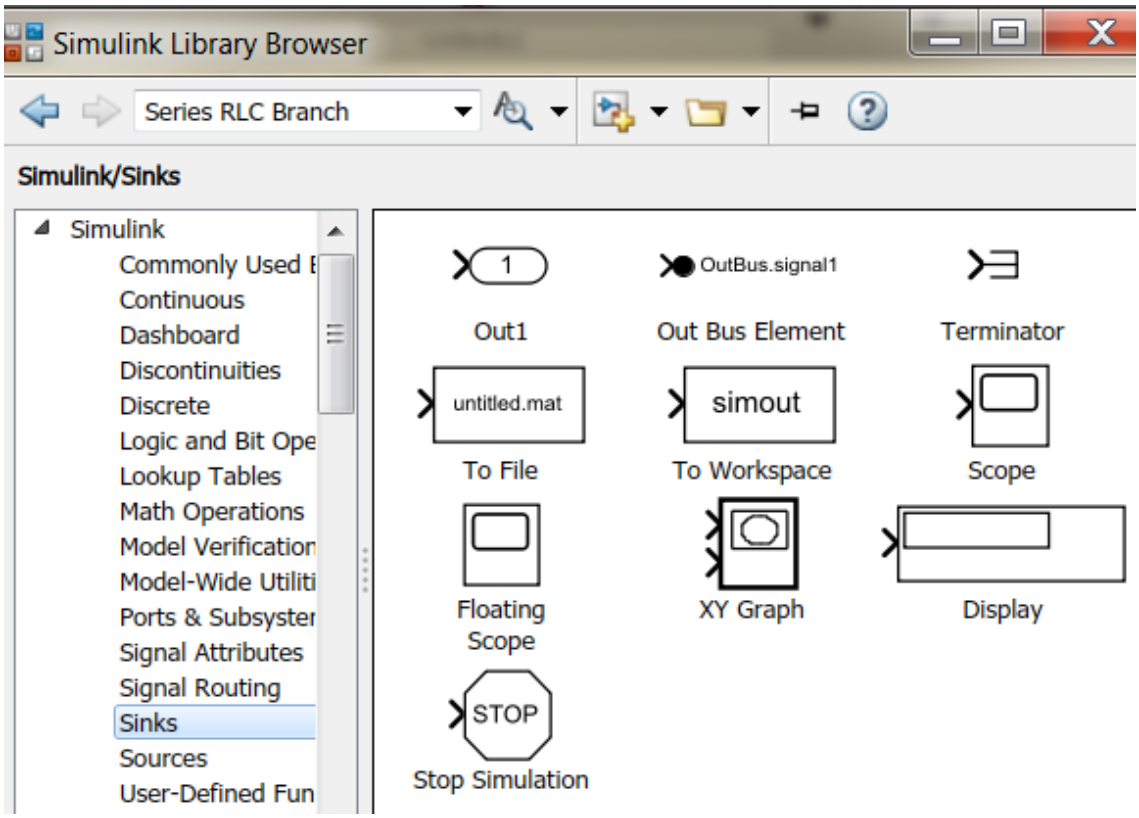


Рисунок 5

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

– блок **Scope** выводит в графическое окно график зависимости от времени подаваемых на его вход величин;

– блок **Display** с одним входом, предназначенный для отображения численных значений входной величины;

– блок **To Workspace** с одним входом, предназначенный для передачи данных по результатам моделирования из Simulink в рабочую область MATLAB, где их можно увидеть в окне **Workspace**.

5 Ознакомиться с основными блоками раздела **Sources** (источники) библиотеки **Simulink** (рисунок 6), 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.

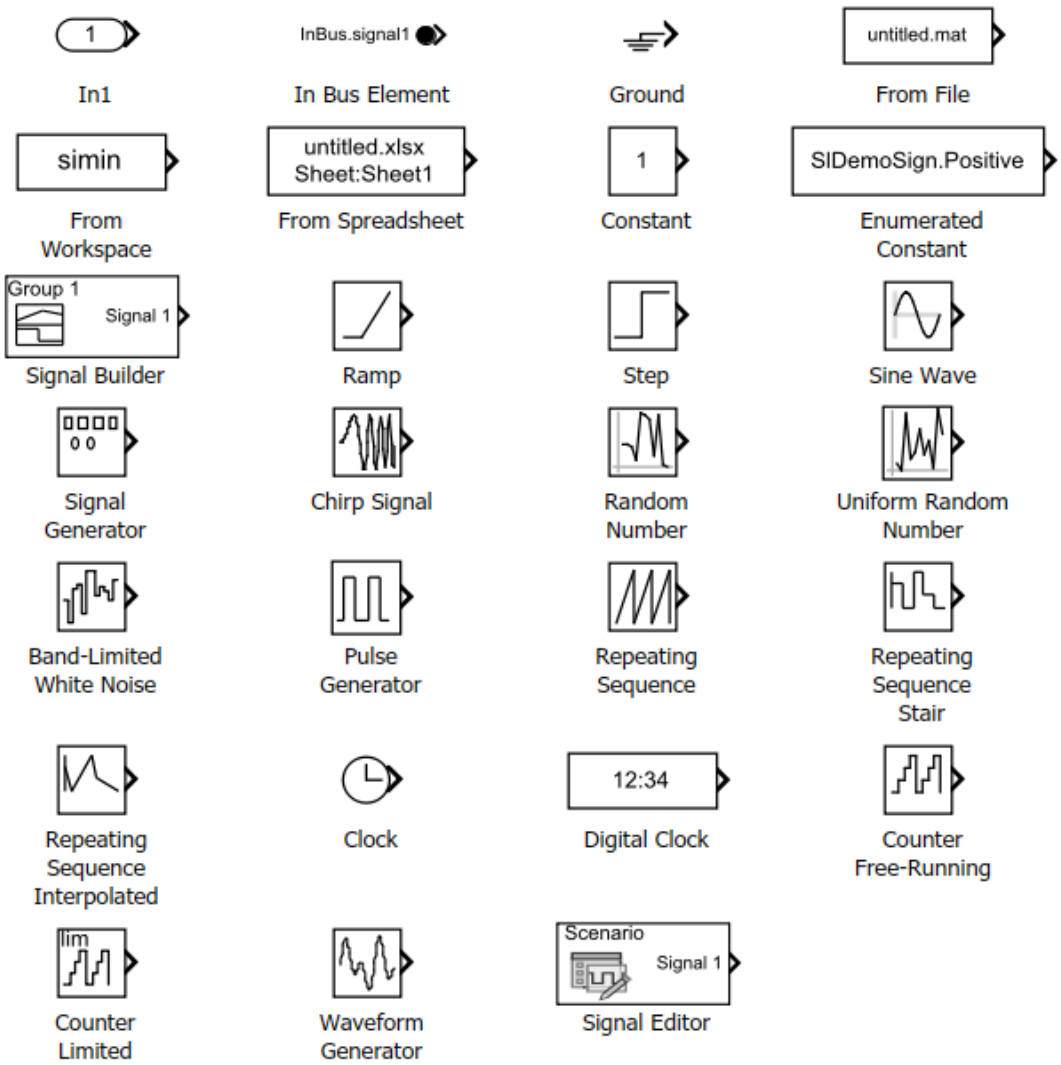


Рисунок 6

В данной лабораторной работе будут использоваться такие блоки-источники, как:

– **Sine Wave**, который генерирует непрерывный гармонический сигнал;

– **Pulse Generator**, который генерирует непрерывный прямоугольный сигнал;

– **Step**, регулируемый по высоте («**Final Value**») и времени («**Step Time**») скачок;

– **Ground**, позволяющий избегать выдачи ошибочных сообщений, если неиспользуемые входы не объединены с другими блоками.

6 Построить блок-схему **S**-модели, содержащей следующие блоки библиотеки **Simulink: Sine Wave** и **Pulse Generator** – из раздела **Sources**, а также **Scope** – из раздела **Sinks** (рисунок 7).

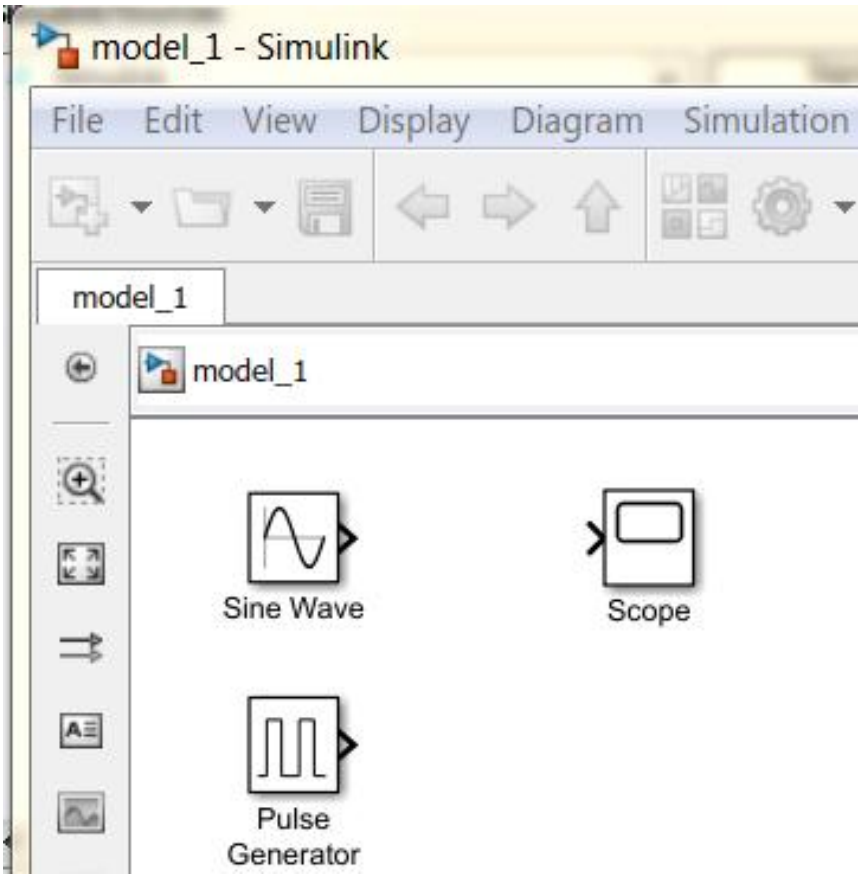


Рисунок 7

Найти нужные блоки можно, открыв библиотеку, в которой он размещается. 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 кнопке мыши (ЛКМ).

Если известно имя блока, то его можно ввести в левое верхнее окно **Enter search term** окна библиотеки **Simulink Library Browser** (см. рисунок 5).

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

– **Clockwise** – разворот блока на 90° по часовой стрелке (Ctrl +R);

– **Clockwise** – разворот блока на 90° против часовой стрелки (Ctrl+Shift +R);

– **Flip Block** – разворот блока в другую сторону (Ctrl+I);

– **Flip Block Name** – перенос надписи с другой стороны блока.

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.

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

– амплитуда гармонического сигнала **Amplitude** – **1**;

– смещение или постоянная составляющая **Bias** – **0**;

– частота колебаний ω, 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.

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

– тип импульсов (**Pulse type:**) – непрерывный импульс, аргумент время (**Time based**);

– время (**Time(t)**:) – **Use simulation time**;

– амплитуда (**Amplitude**) – **1**;

– период, в секундах (**Period**) – **2*pi**;

– скважность или ширина импульса, в процентах, от периода (**Pulse width**) – **20**;

– величина задержки, в секундах, первого импульса относительно t = 0 (**Phase delay**) – **0**.

Выполнить двойной щелчок по блоку **Scope**. При этом откроется окно **Scope**, для настройки свойств которого необходимо нажать на его панели инструментов кнопку .

В результате откроется диалоговое окно **Configuration Properties: Scope** (рисунок 8), на вкладке **Main** которого требуется:

– установить флажок **Open at simulation start**, чтобы область окна **Scope** открывалась автоматически при запуске моделирования;

– задать количество графических полей **Number of axes:** – **2**.

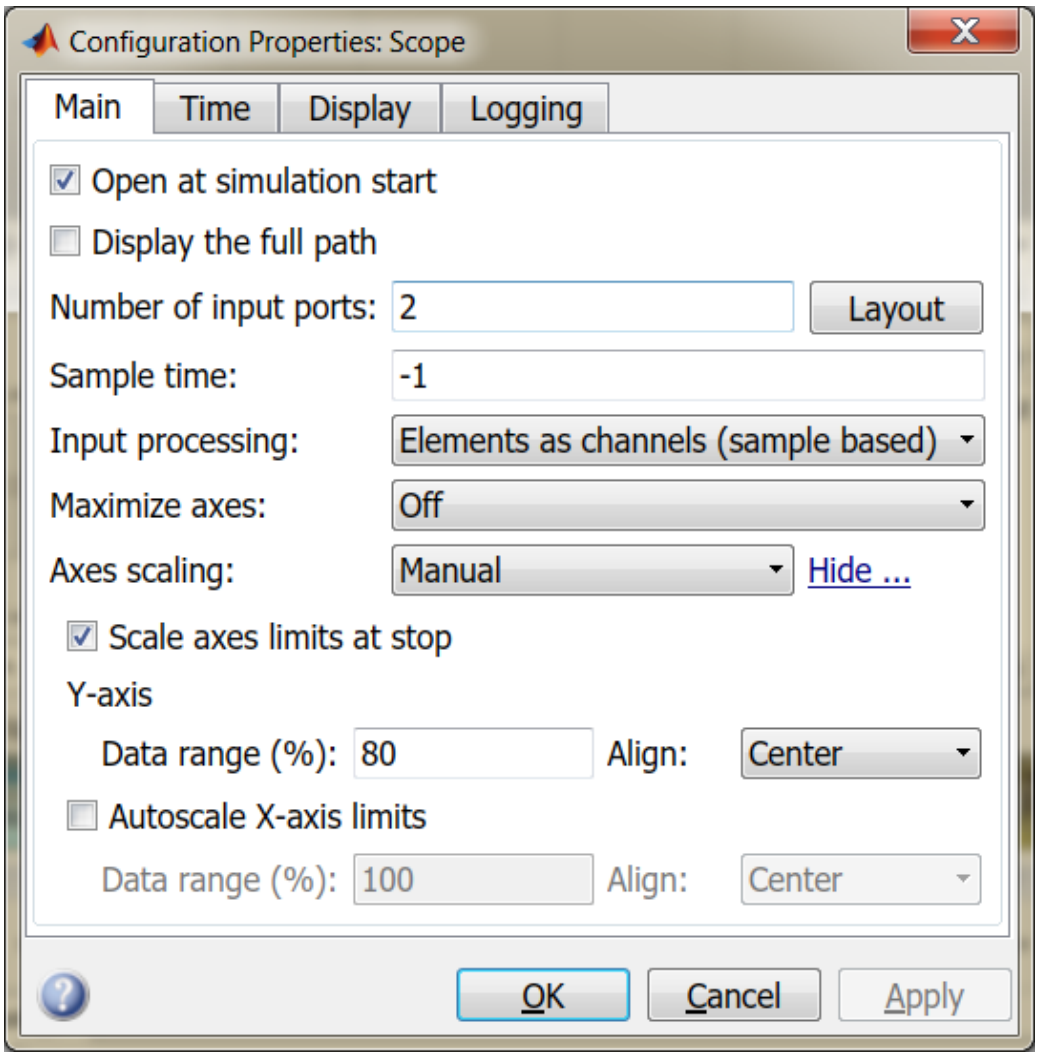


Рисунок 8

С помощью кнопки **Layout** можно определить, как будут располагаться окна на экране **Scope**: друг под другом или рядом. По умолчанию оба входных сигнала будут отображаться в одном окне.

Соединить блоки между собой в соответствии с рисунка 9. Для этого установить указатель мыши в область выходного порта блока

Sine Wave (при этом указатель принимает вид крестика) и, удерживая нажатой левую кнопку мыши, 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** соединить с выходным портом блока **Pulse Generator**.

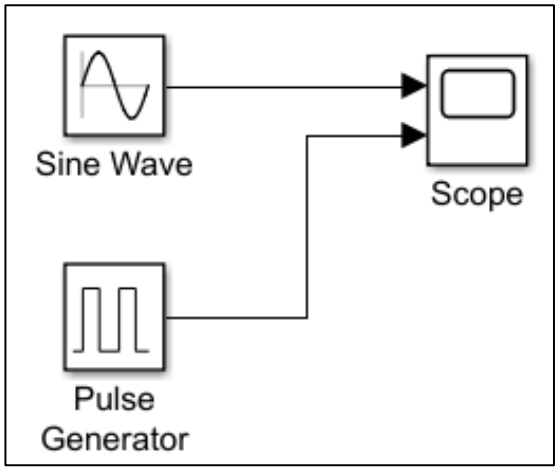


Рисунок 9

6.2 Перед запуском полученной блок-схемы на моделирование сначала необходимо установить требуемые параметры моделирования, выбрав команду **Simulation ⇒ Model Cofiguration Parameters** или нажав на панели инструментов окна модели клавишу . В результате откроется окно настройки параметров, группа **Solver** которого показана на рисунке 10.

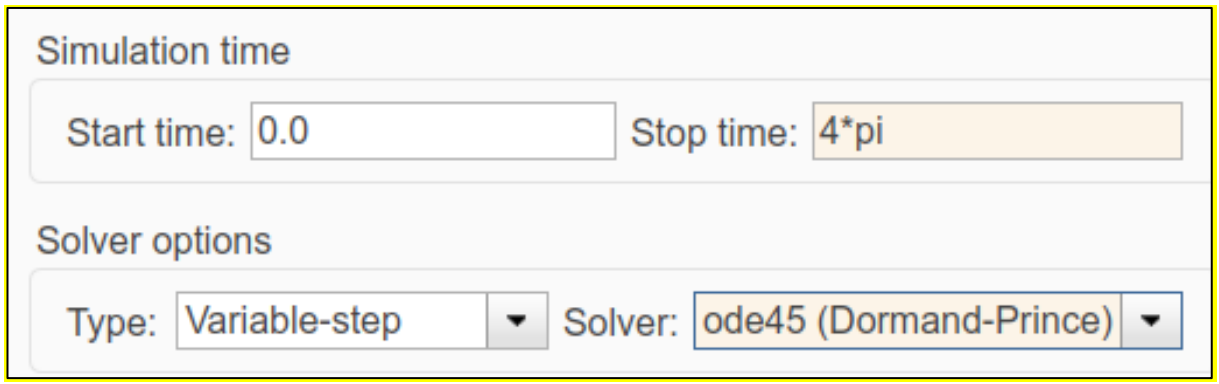


Рисунок 10

Задать в области **Simulation time** значения начального времени моделирования **Start time: 0.0** и конечного времени моделирования

Stop time: 4*pi. Величина конечного времени выбрана из условия проведения моделирования в течение двух периодов гармонического сигнала, частота которого в рассматриваемом случае равна 1 рад/с, а период равен **2*pi**. Однако следует иметь в виду, что текущее физическое время и время моделирования не являются одинаковыми понятиями. Оно 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 [2]. 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. Вариант (**discrete**) используется для расчета дискретных систем. Остальные методы используются для расчета непрерывных систем. При моделировании с переменным шагом по умолчанию устанавливается метод общего назначения **ode45** (одношаговый явный метод Рунге–Кутта 4–5-го порядков точности) [2].

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

– для максимального шага расчета, который определяется как **Max step size = (StopTime – 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 $\mathbf{(4\pi - 0)/50 = 2\pi/25 \approx 0{,}252}$.

6.3 Начать моделирование с помощью команды **Simulation** ⇒ **Run** . На рисунке 11 представлены результаты моделирования.

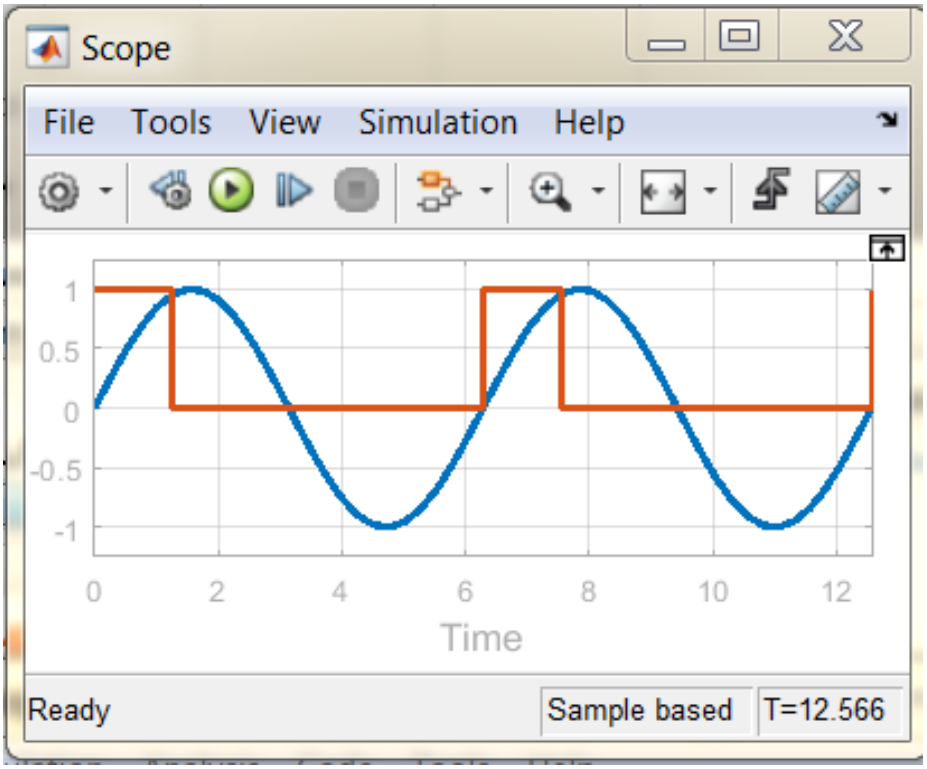


Рисунок 11

На экране **Scope** видны два периода синусоидального и прямоугольного сигналов в интервале от нуля до 4π (≈12,566). При этом период в радианах равен **T = 2π ≈ 6,28**, что соответствует частоте синусоидального сигнала, в герцах, равной **f = 1/T = 1/(2π)** и угловой частоте, в радианах в секунду, равной **ω = 2πf = 1**.

Отчет

Смоделировать схему, приведенную на рисунке 9, задав для ее блоков следующие значения параметров в зависимости от номера варианта (N):

– для блока **Sine Wave** частоту колебаний (рад/с), равную (N+1);

– для блока **Pulse Generator** период, в секундах, равный 2π/(N + 1).

Подобрать параметры моделирования таким образом, чтобы на экране в блоке **Scope** отображалось два периода моделируемых сигналов. 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**. Провести анализ полученных графиков зависимостей, определить периоды и амплитуды сигналов и сделать выводы: соответствуют ли результаты моделирования параметрам блоков **Sine Wave** и **Pulse Generator**.

Открыть диалоговое окно **Configuration Properties: Scope** и найти на его вкладке **Main** параметр **Sample time:**. Этот параметр задает интервал дискретизации, через который полученные данные моделирования будут использоваться для построения графиков.

Он может принимать следующие значения:

–1 – значение шага модельного времени устанавливается таким же, как в предыдущем блоке;

0 – для моделирования непрерывных систем;

> 0 (положительное значение) задается при моделировании дискретных систем. При этом шаг модельного времени можно интерпретировать как шаг квантования по времени сигнала на входе.

На рисунке 12 показаны результаты работы модели при задании параметру **Sample time** значения, равного **1**. Графики зависимостей на рисунке 12 отличаются от аналогичных графиков на рисунке 11, так как для их построения использовалась не 51 точка, для которых выполнялось моделирование при переменном шаге **Variable-step**, а лишь 13 из них. При увеличении интервала дискретизации существенно изменился вид графиков: синусоида представлена в виде ломанной; у прямоугольных импульсов изменилась скважность для различных интервалов времени; последняя точка на графике соответствует значению 12.000 по временной оси, а не ≈12,566.

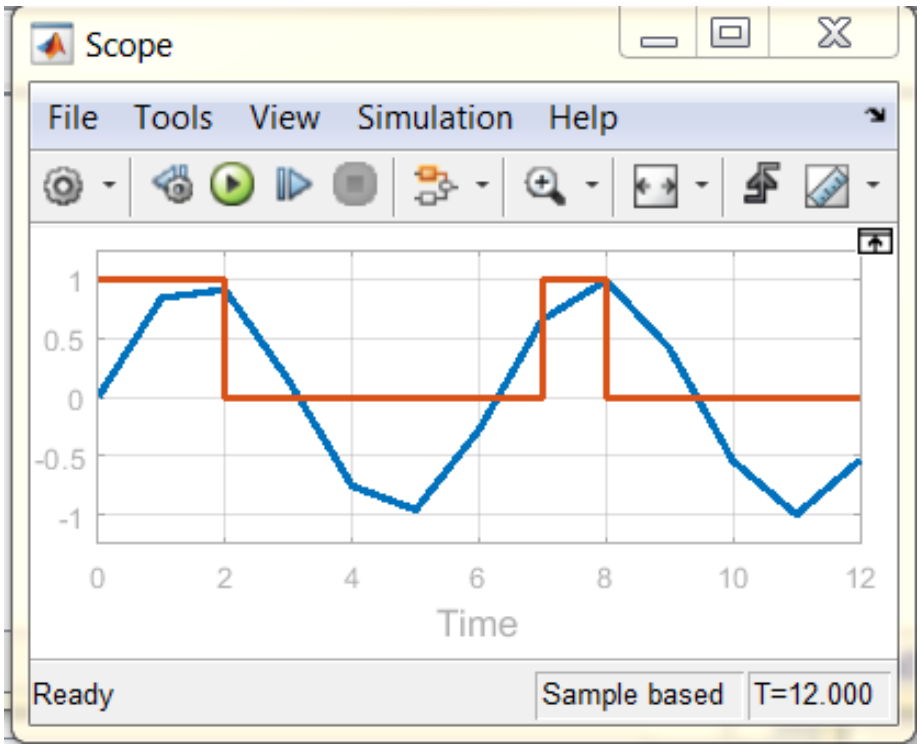


Рисунок 12

Отчет

Измените настройку параметра **Sample time** таким образом, чтобы для вашего варианта примерно два периода графика строилось по 25 точкам.

Вставить в отчет результаты моделирования в обзорном окне блока **Scope** для своего номера варианта. Провести анализ полученных графиков зависимостей и сделать выводы.

Вернуть для параметра **Sample time:** значение, равное –1.

6.4 Ознакомиться с другими настройками диалогового окна **Configuration Properties: Scope** на вкладке **Main** (см. рисунок 8).

Для параметра **Input processing** (Обработка ввода) оставьте установку по умолчанию **Elements as channels (sample based)** – обрабатывать каждый элемент как уникальный сэмпл. Альтернативная установка **Columns as channels (frame based)** доступна только с дискретными входными сигналами и задает обработку сигналов в канале как группу значений из нескольких временных интервалов.

Для параметра **Maximize axes** (задание максимального размера участков) оставьте значение по умолчанию **Off** – не максимизировать участки.

Для параметра **Axes scaling** (масштаб по осям) оставьте значение по умолчанию **Manual** – вручную масштабировать диапазон по оси **Y** с помощью кнопки масштаб по оси на панели инструментов окна **Scope**.

В нижней части закладки **Main** можно задать в процентах по оси **Y-axis** и **X-axis** ту часть окна экрана **Scope**, в пределах которой будет строиться график. Задать для оси **Y-axis** значение **Data range (%) – 80**, а для **X-axis** – значение **Data range (%) – 100**.

Дополнительно с помощью списка **Align:** выбрать различные настройки для выравнивания данных по диапазону оси Y:

Top – выравнивание сигналов с максимальными значениями в верхней части диапазона оси Y;

Center – сигналы центра между минимальными и максимальными значениями;

Bottom – выравнивание сигналов с минимальными значениями в нижней части диапазона оси Y.

Эти настройки работают, если диапазон данных оси Y установлен менее чем на 100 %. Посмотрите, как при этом будет изменяться местоположение графиков в обзорном окне **Scope**.

Отчет

Вставить в отчет результаты выполнения п. 6.4 для своего номера варианта. Включить в отчет по лабораторной работе результаты моделирования в обзор-

ном окне блока **Scope** для различных настроек с целью выравнивания данных по диапазону оси Y. Провести анализ полученных графиков зависимостей и сделать выводы.

6.5 Ознакомьтесь с настройками на вкладке **Time** диалогового окна **Configuration Properties: Scope**. Задайте значения параметров, приведенные на рисунке 13.

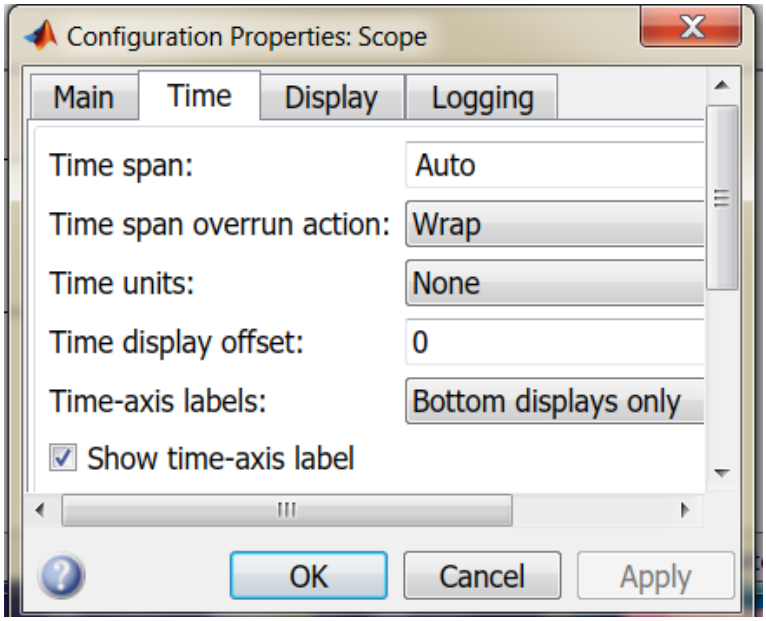


Рисунок 13

Параметр **Time span:** (Временной интервал) задает длину оси X для отображения. По умолчанию этот параметр имеет значение **Auto**. При этом временной интервал равен разнице между временем начала и окончания моделирования с учетом смещения по оси X.

При выборе из списка **Time span:** значения **User defined** пользователь может сам задать требуемое значение меньше общего времени моделирования. Ногда в окне **Scope** будет отображен график, соответствующий только последнему отрезку времени, равному **Time span**.

Значение смещения по оси X задается параметром **Time display offset**, который по умолчанию равен 0, но может равняться либо одинаковому скалярному значению для всех каналов, либо вектору для независимого смещения каналов.

Измените настройку по умолчанию для параметра **Time display offset** на значение, равное номеру вашего варианта, и посмотрите, как изменится содержимое обзорного окна **Scope**.

Параметр **Time units:** позволяет задать размерность по оси X.

Параметр **Time-axis labels** позволяет регулировать отображение меток по осям и выбирается из списка:

All отображает метки на оси X и на всех осях Y;

None не отображает метки (при выборе параметра **None** также снимается флажок **Show time-axis label**, который задает обозначение / метку временной оси);

Bottom displays only отображает метку только на нижней оси X.

Отчет

Вставить в отчет результаты выполнения п. 6.5 для своего номера варианта. Включить в отчет по лабораторной работе результаты моделирования в обзорном окне блока Scope для смещения по оси X, равного номеру вашего варианта. Провести анализ полученных графиков зависимостей и сделать выводы.

6.6 Ознакомьтесь с настройками на вкладке **Display** диалогового окна **Configuration Properties: Scope**. Задайте значения параметров, приведенные на рисунке 14.

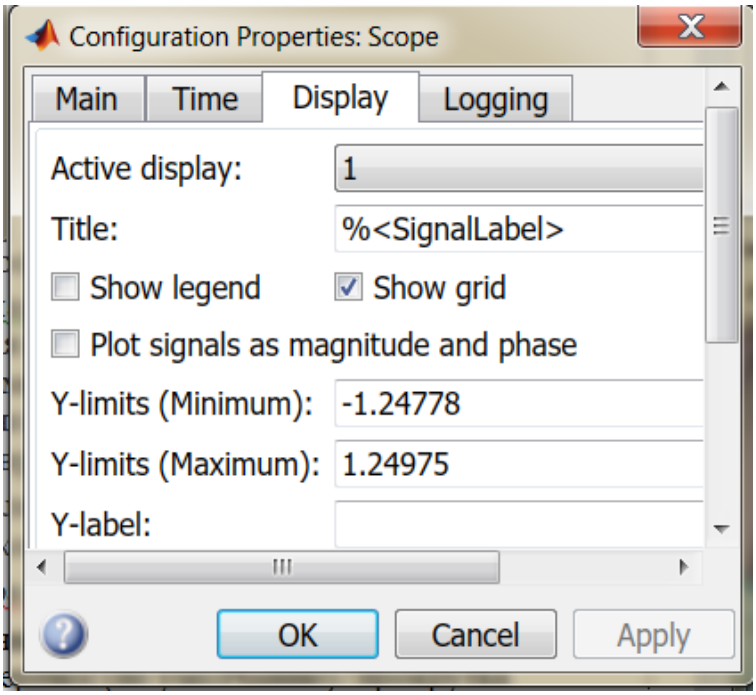


Рисунок 14

Параметр **Active Display:** позволяет выбрать желаемое отображение в случае использования нескольких экранов в обзорном окне **Scope**.

Параметр **Title:** используется для добавления заголовка к графику.

При необходимости с помощью флажка можно добавить на график легенду (**Show legend**) и сетку (**Show grid**).

С помощью флажка **Plot signals as magnitude and phase:** можно вывести в обзорном окне **Scope** модуль амплитуды и фазу на отдельных экранах друг под другом.

Задав нужные значения параметров **Y-limits (Minimum):** и **Y-limits (Maximum):**, можно вывести на экран требуемую часть графика. С помощью окна **Y-label** можно добавить обозначение оси Y.

Отчет

Вставить в отчет результаты выполнения п. 6.6 для своего номера варианта. Включить в отчет по лабораторной работе результаты моделирования своего графика в обзорном окне блока **Scope** при различных настройках параметров на вкладке **Display** окна **Configuration Properties: Scope**.

Добавить соответствующие пояснения.

6.7 Ознакомьтесь с настройками на вкладке **Logging** диалогового окна **Configuration Properties: Scope**. Задайте значения параметров, приведенные на рисунке 15.

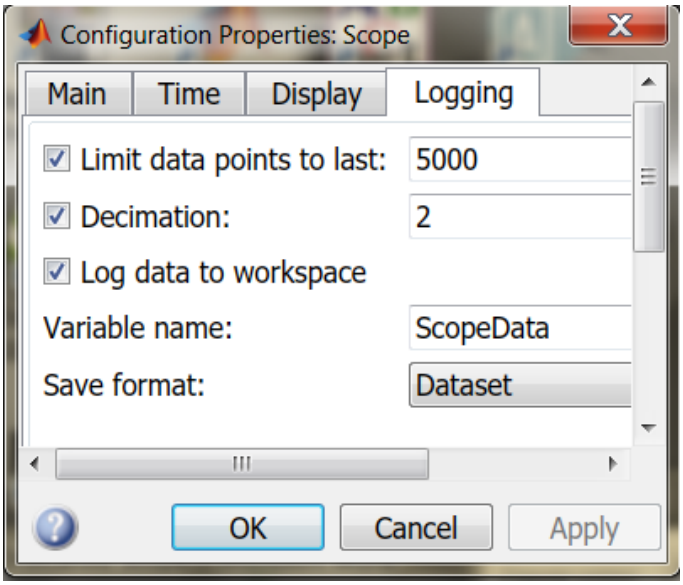


Рисунок 15

Флажок **Limit data point to last:** позволяет задать максимальное количество элементов массива данных, используемых при построении графиков, для передачи в рабочее пространство MATLAB.

Флажок **Log data to workspace** позволяет задать имя переменной **Variable name:** для сохранения данных. По умолчанию присваивается имя **ScopeData**.

При этом в списке **Save format:** можно выбрать один из четырех форматов записи данных:

– **Structure With Time** (сохранение данных в виде структуры со связанной информацией о времени);

– **Structure** (сохранение данных в виде структуры);

– **Array** (сохранение данных в виде массива со связанной информацией о времени);

– **Dataset** (сохранение данных в виде объекта **dataset**).

Флажок **Dicimation:** (Прореживание) позволяет уменьшить объем отображаемых в окне **Scope** данных.

На рисунке 15 установлено значение **Dicimation:** равное двум. Это обозначает, что для построения графика будут использоваться данные, полученные через два интервала дискредитации.

6.8 Выбрать в списке справа от кнопки на панели инструментов блока **Scope** команду **Style…**, в результате откроется окно (рисунок 16), с помощью которого можно 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.

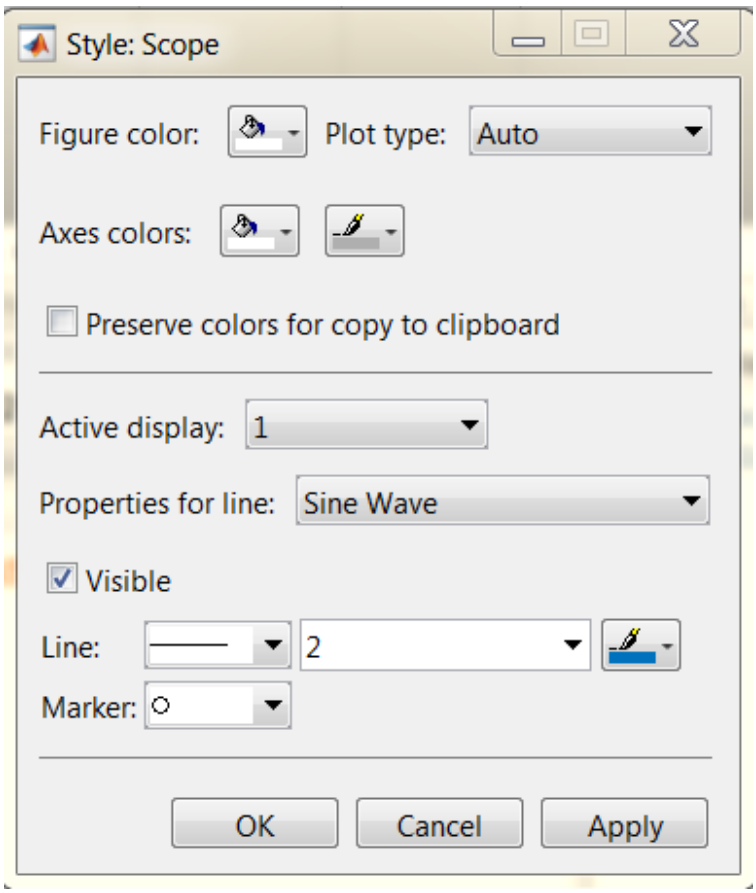


Рисунок 16

Задать в области **Line:**

– для обеих линий толщину **2**;

– для первой линии синий цвет, для второй линии – красный цвет.

Выбрать в списке **Marker:** тип маркера в виде круга. Закрыть окно, нажав клавишу **ОК**.

Снять на вкладке **Logging** диалогового окна **Configuration Properties: Scope** флажок **Dicimation:**.

Начать моделирование с помощью команды **Simulation ⇒ Run**.

Результаты моделирования представлены на рисунке 17.

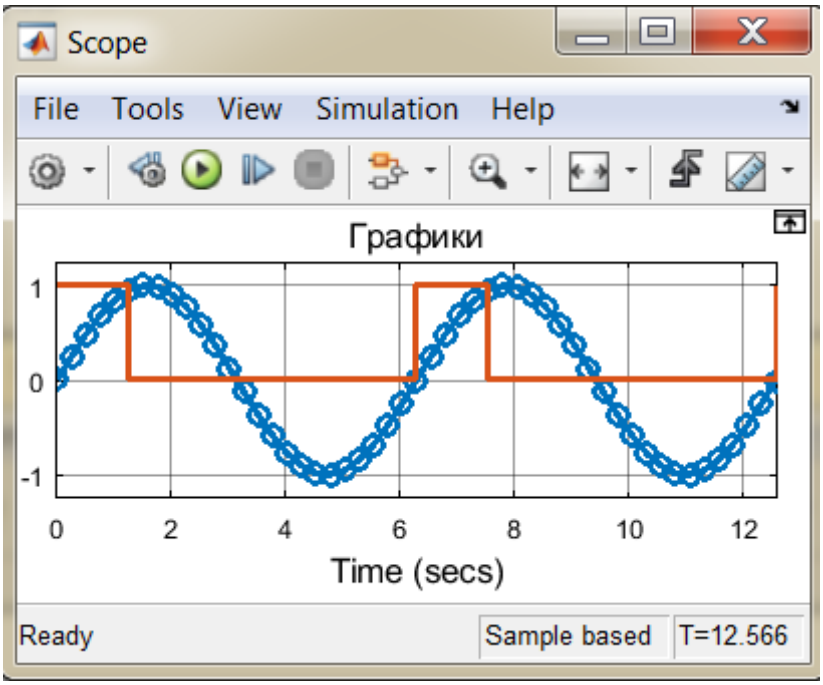


Рисунок 17

Расстояние между двумя соседними маркерами, через которые полученные данные моделирования используются для построения графиков, соответствует интервалу дискретизации.

6.9 Установить на вкладке **Logging** диалогового окна **Configuration Properties: Scope** флажок **Dicimation:** и задать значение **Dicimation:**, равное **2**.

Снова начните моделирование с помощью команды **Simulation ⇒ Run**.

Результаты моделирования представлены на рисунке 18.

Расстояние между двумя соседними маркерами стало в два раза больше, точек, по которым строятся графики, – в два раза меньше, если не считать начальную точку.

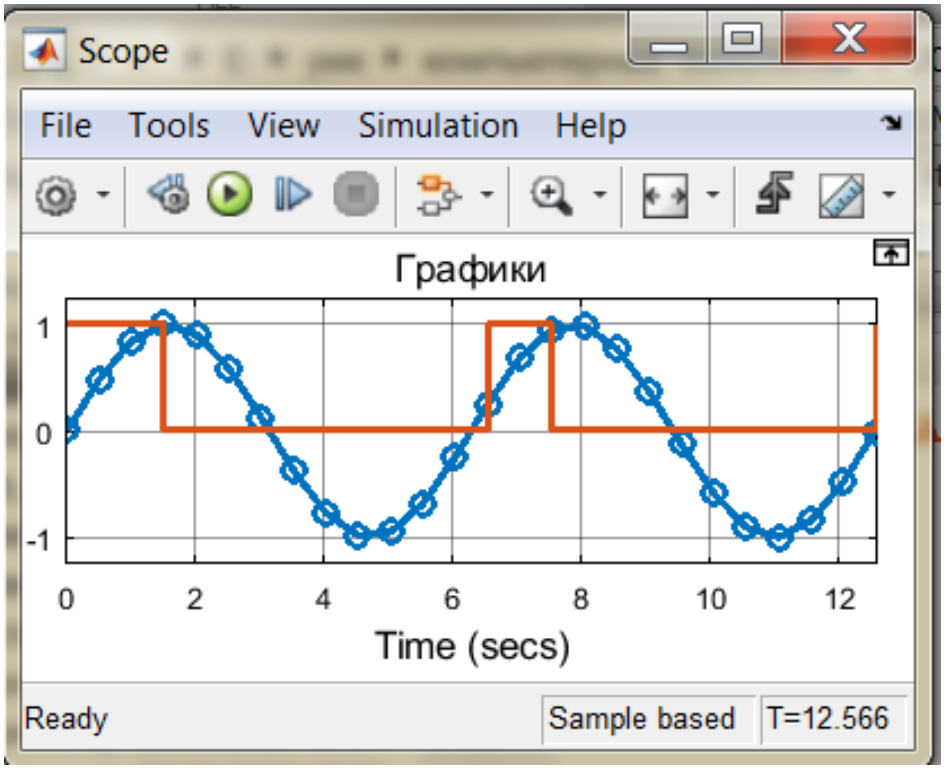


Рисунок 18

Отчет

Вставить в отчет результаты выполнения пп. 6.7–6.9 для своего номера варианта. Включить в отчет по лабораторной работе результаты моделирования для различных настроек параметров в окне **Style** блока **Scope.**

Представить результаты моделирования в обзорном окне блока **Scope** для значения его параметра **Decimation**, равного 1 и 2. Провести анализ полученных графиков зависимостей и сделать выводы.

Усложненный уровень

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 Opetations**; блок **Scope** из раздела **Sinks** (рисунок 19).

Самостоятельно разберитесь с назначением этих блоков.

Установить значение коэффициента усиления блока **Gain** равным двум, а значение константы блока **Constant** – равным номеру варианта.

Задать для блока **Signal Generator** режим работы, указанный в таблиц 1, в зависимости от номера варианта.

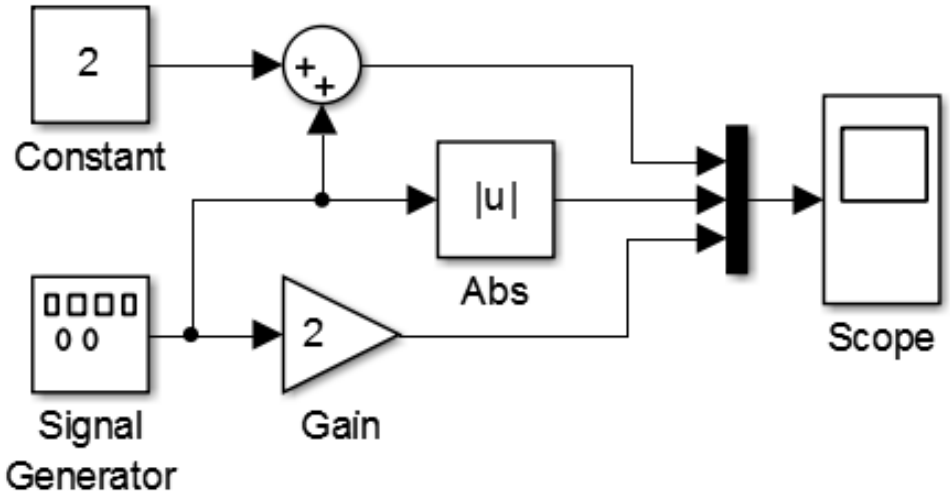


Рисунок 19

Таблица 1

Wave form:	**Номер варианта**						
sine	1	9	17	25	33	41	49
square	2	10	18	26	34	42	50
sawtooth	3	11	19	27	35	43	51
random	4	12	20	28	36	44	52
sine	5	13	21	29	37	45	53
square	6	14	22	30	38	46	54
sawtooth	7	15	23	31	39	47	55
random	8	16	24	32	40	48	56

Установить для блока **Signal Generator** значения амплитуды и частоты, в герцах, равными номеру варианта.

Подобрать параметры моделирования таким образом, чтобы на экране в блоке **Scope** отображался один период моделирования для детерминированного сигнала или случайный сигнал в интервале по временной оси от 0 до значения, равного номеру варианта.

Отчет

Вставить в отчет результаты выполнения п. 7 для своего номера варианта.

Включить в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с моделью и окон параметров входящих в нее блоков. Представить результаты моделирования в обзорном окне блока **Scope**. Провести анализ полученных графиков зависимостей и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1 Каким образом можно создать новую или открыть ранее созданную модель в **Simulink**?

2 Что такое **Simulink Library Browser**?

3 Каким образом строятся блок-схемы в программном модуле **Simulink**?

4 Как в модель добавить новый блок? Как скопировать блок в окне модели?

5 Как соединить блоки между собой?

6 Как сделать, чтобы один и тот же сигнал поступал на несколько блоков?

7 Как удалить блок или связь между блоками?

8 Каким образом можно поворачивать блоки?

9 Какие настройки имеются у обзорного окна **Scope** и блока **Display**?

10 Какие настройки имеются у блоков-источников **Constant**, **Sine Wave**, **Signal Generator и Pulse Generator**?

11 Для чего предназначены блоки **Gain**, **Sum**, **Abs** и **Mux**?

12 Какие настройки необходимо задать в окне **Cofiguration Parameters** перед запуском модели?

13 Из каких соображений выбирается время моделирования?

14 Как выбирается значение шага при выборе моделирования с фиксированным шагом?

15 Чему равно максимальное значение шага при выборе моделирования с переменным шагом?

Лабораторная работа № 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ БЛОКОВ В СРЕДЕ MATLAB-SIMULINK

Цель работы: изучение основных возможностей среды MATLAB-Simulink по созданию имитационных моделей линейных электрических цепей.

Рабочее задание

1 Запустить программу MATLAB, зайти в среду Simulink и сохранить открывшееся окно для сборки модели под именем **model_2_1** с расширением **slx.**

2 Ознакомиться с разделом **Power Systems** библиотеки **Simscape**, которая представляет собой набор визуальных объектов, для имитационного моделирования типовых электротехнических устройств.

В зависимости от имеющейся версии MATLAB электрические элементы для создания модели можно найти в следующих разделах библиотеки:

– **Simscape ⇒ Electrical ⇒ Specialized Power Systems ⇒ Fundamental Blocks** (для версии MATLAB R218);

– **Simscape ⇒ Power Systems ⇒ Specialized Technology ⇒ Fundamental Blocks** (для версии MATLAB R217b);

– **SimPowerSystems ⇒** (для версии MATLAB 2007).

На рисунке 1 представлено окно библиотеки **Simulink Library Browser** для версии MATLAB R217b.

В данных методических указаниях к лабораторным работам будут использоваться имитационные блоки из раздела **Simscape ⇒ Power Systems ⇒ Specialized Technology ⇒ Fundamental Blocks**.

Раздел **Fundamental Blocks** включает шесть различных подразделов. В данных лабораторных работах мы будем использовать имитационные блоки из подразделов: **Electrical Sources**, **Elements**, **Measurement**.

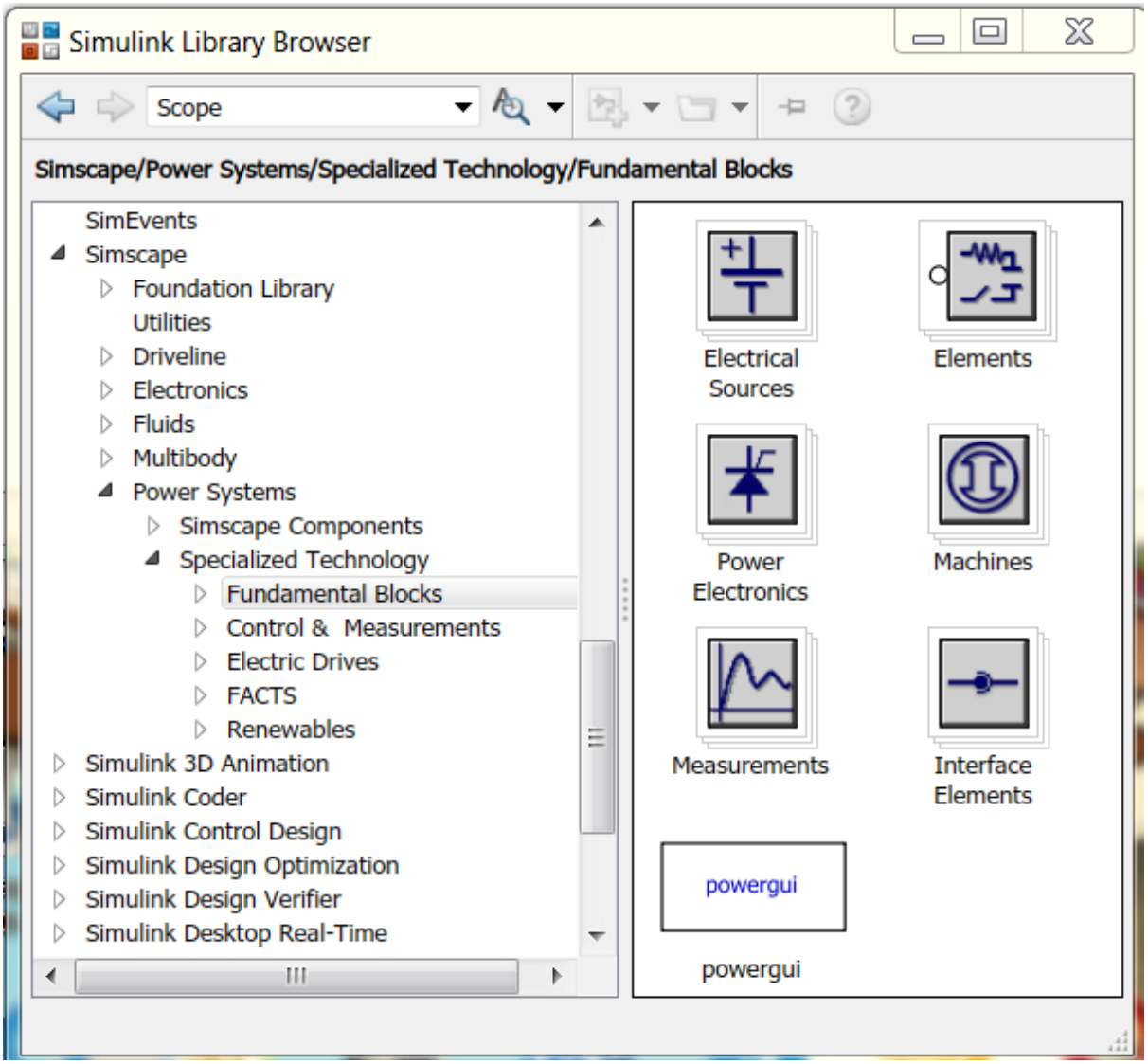


Рисунок 1

Выбрать раздел **Electrical Sources** библиотеки **Simscape Power Systems**. В результате в правой части окна **Simulink Library Browser** отобразятся элементы, предназначенные для моделирования различных источников энергии (рисунок 2), 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;

– **Controlled Voltage Source** – управляемый источник напряжения.

Элементы из раздела **Elements** библиотеки **Simscape Power Systems** (рисунок 3) включают различные электротехнические элементы.

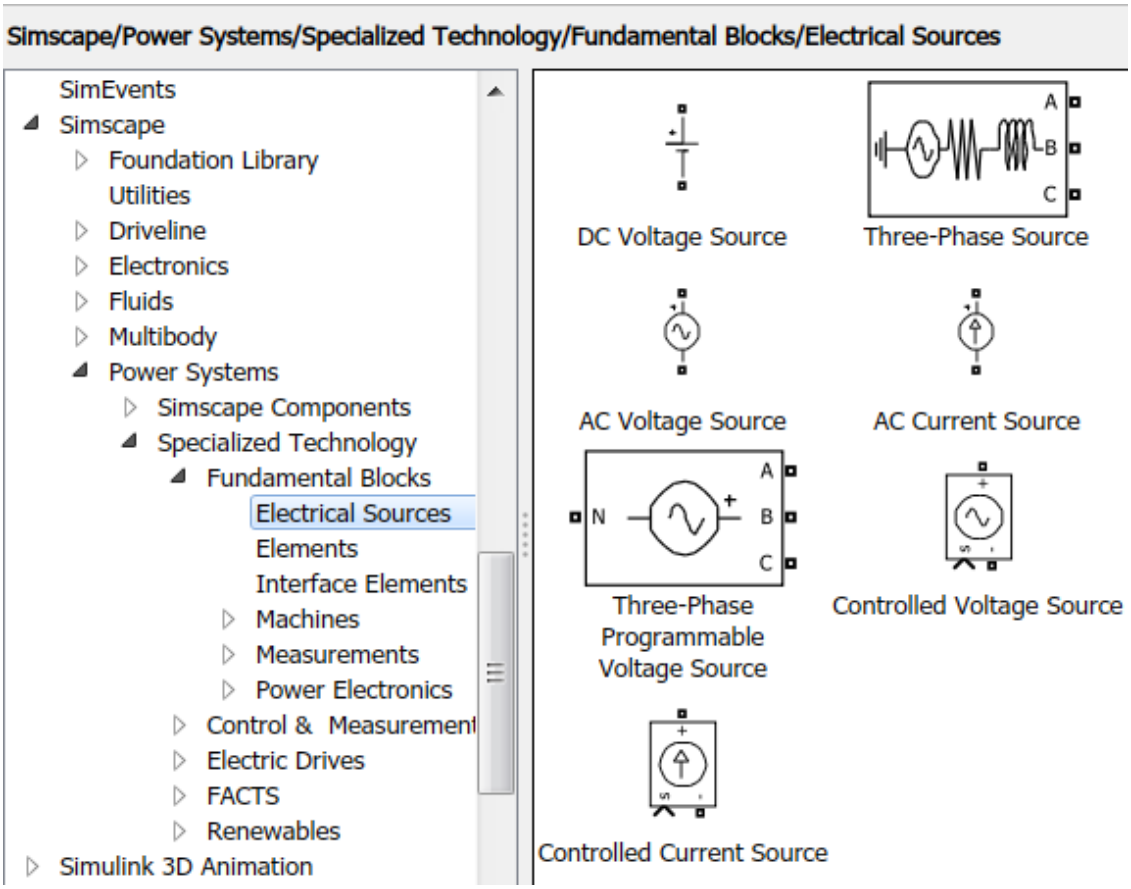


Рисунок 2

Блоки и **Parallel RLC Branch** – последовательная и параллельная R-L-C-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 R-L-C-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, коммутаторы, заземление, нейтраль и т.д.

Обратите внимание, что модели в библиотеке **Simscape Power Systems** получили название **P**-модели (с **P**-входами и **P**-выходами). Они имитируют процессы в электрических цепях и позволяют выполнять моделирование на принципиальном уровне. Они отличаются от **S**-моделей (с **M**-входами и **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.

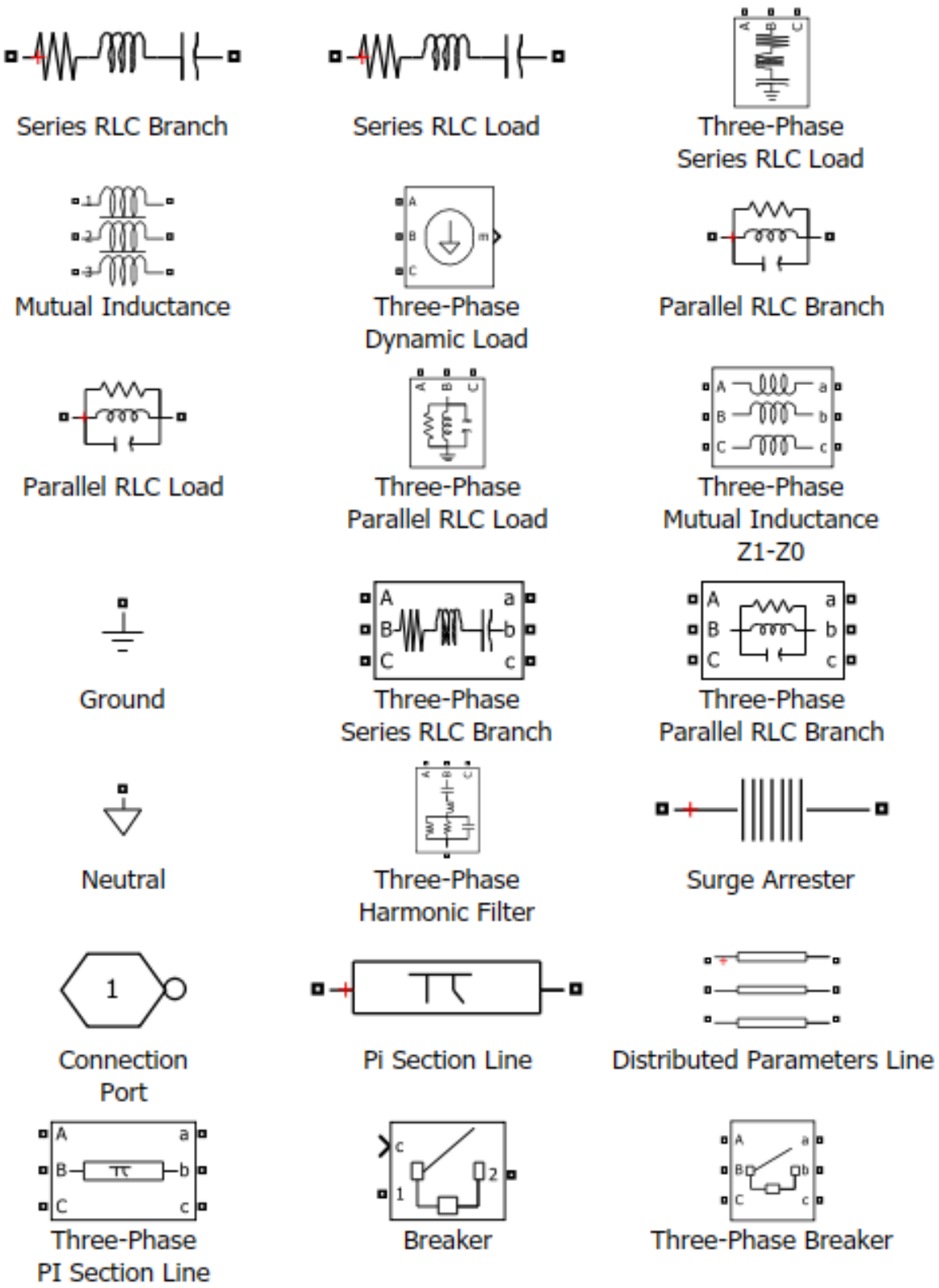


Рисунок 3

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

В разделе **Measurements** (рисунок 4) размещаются блоки-измерители, имеющие **P**-входы и **M**-выходы (амперметр **Current Measurement**, вольтметр **Voltage Measurement**, мультиметр **Multimeter** 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**»).

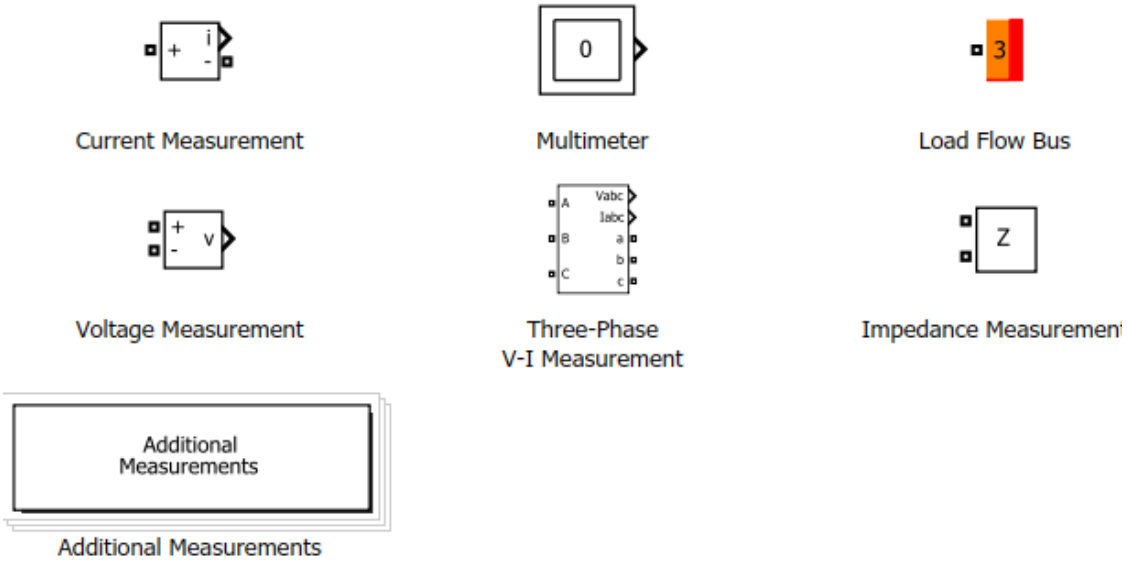


Рисунок 4

В разделе **Electrical Sources** размещаются блоки источников электрических сигналов, имеющие **M**-выходы и **P**-входы:

– **Controlled Voltage Source** – управляемый источник напряжения;

– **Controlled Current Source** – управляемый источник тока.

В подразделе **Additional Measurements** раздела **Measurements** размещаются дополнительные блоки-измерители, имеющие **M**-входы и **M**-выходы (измеритель активной и реактивной мощности **Power**, блок Фурье для проведения гармонического анализа **Fourier** и т.д.).

Для работы **P**-модели необходим блок **Powergui**, который находится в разделе библиотеке **Simscape Power Systems**: (см. рисунок 1).

Блок **Powergui** помещается в любое место модели 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.

3 Создать модель одноконтурной R-L-C-цепи (рисунок 5) с источником переменного синусоидального напряжения **AC Voltage Source**.

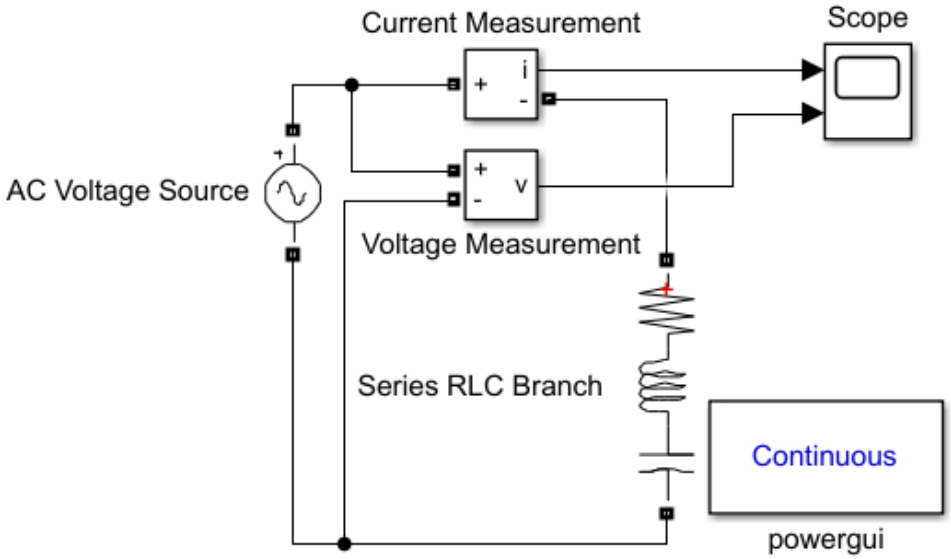


Рисунок 5

Обратите внимание на то, что наименования отдельных блоков появляются только после выделения этого блока. Для того, чтобы обозначения отображались постоянно, нужно выделить блок, нажать правую клавишу мыши и в появившемся контекстном меню выбрать команду **Format ⇒ Show Block Name ⇒ On**.

В качестве R-L-C-цепи использовать блок **Series RLC Branch**, представляющий собой последовательное соединение сопротивления, индуктивности и емкости, которым можно задать любые, в том числе нулевые (если элемент в моделе не один) и бесконечно большие значения параметров (системная константа **inf**).

Задать для блока **Series RLC Branch** значение сопротивления **R**, а для блока **AC Voltage Source** – амплитудное значение напряжения источника ЭДС **Em** и частоты **f** из таблицы 1 в зависимости от номера варианта. Значение емкости, в микрофарадах, и индуктивности, в миллигенри, взять равными номеру варианта.

Таблица 1

		Номер варианта							
Em, В	5	1	9	17	25	33	41	49	100
	6	2	10	18	26	34	42	50	90
	7	3	11	19	27	35	43	51	80
	8	4	12	20	28	36	44	52	70
	9	5	13	21	29	37	45	53	60
	10	6	14	22	30	38	46	54	50
	11	7	15	23	31	39	47	55	40
	12	8	16	24	32	40	48	56	30
R, Ом		70	80	90	100	110	120	130	f, Гц

Отредактировать обозначения блоков на схеме в соответствии с рисунком 6 для своего номера варианта, выполнив щелчок левой кнопкой мыши по текстовой надписи элемента.

В данных методических указаниях заданы значения параметров, указанные на рисунке 6. При этом аргумент синусоидальной функции задается как 2πft.

Задать в окне свойств для блока **Series RLC Branch** (рисунок 7) и блока **AC Voltage Source** (рисунок 8) значения параметров для своего номера варианта.

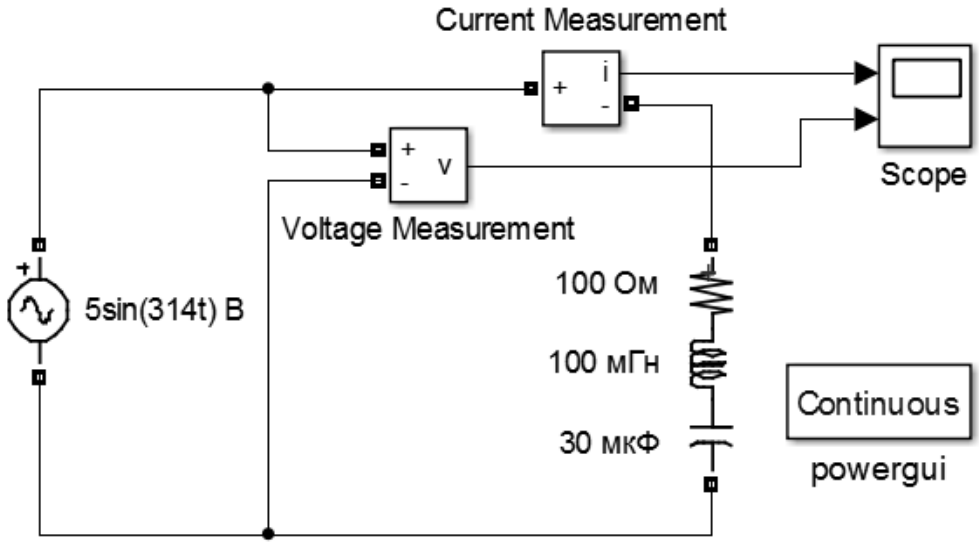


Рисунок 6

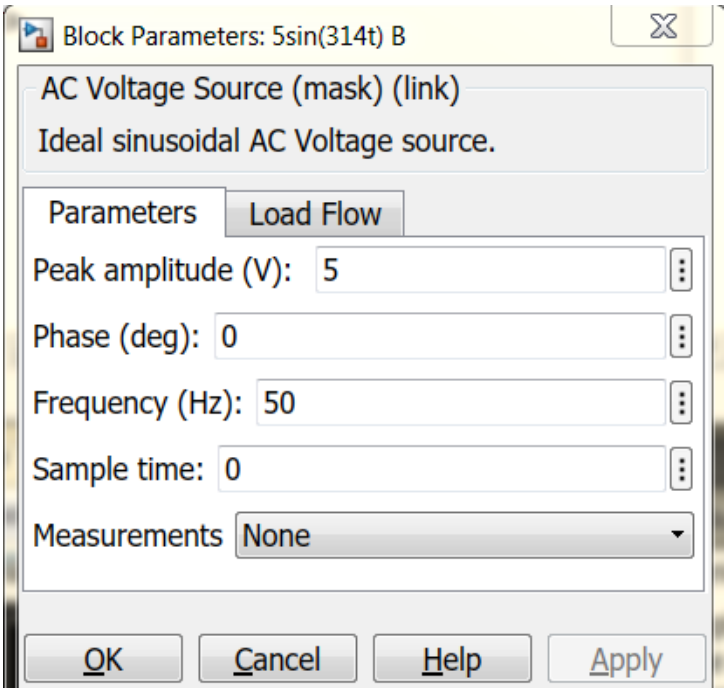


Рисунок 7

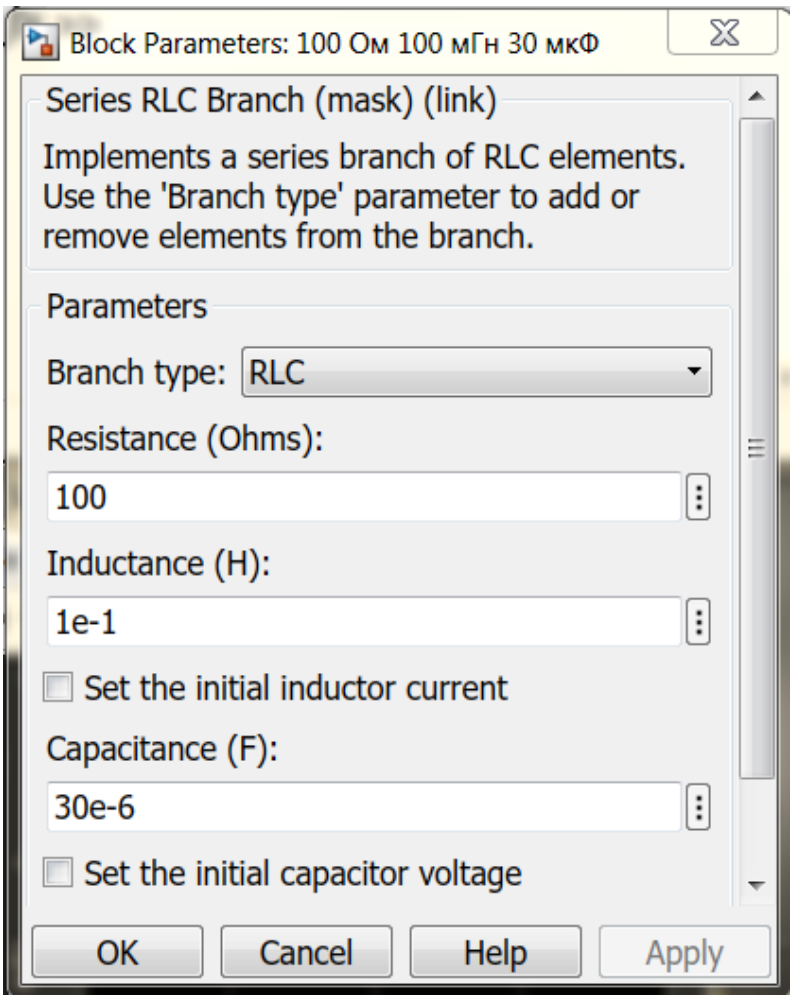


Рисунок 8

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

Установить для созданной модели параметры моделирования в окне **Cofiguration Parameters:** таким образом, чтобы на графике в блоке **Scope** отображался один период колебаний гармонического сигнала. Задать в области **Simulation time** значения начального времени моделирования (**Start time:**), равного «**0**», и конечного времени моделирования (**Stop time:**), равного периоду гармонического сигнала. Для схемы на рисунке 6 это значение равно «**0.02**». Выбрать в области **Solver options** (Параметры расчета) переменный шаг дискретизации **Variable-step** и метод моделирования **ode45**.

Начать моделирование с помощью команды **Run**, а затем дважды щелкнуть на изображении блока **Scope**. В результате появится

окно **Scope** с изображениями временных диаграмм тока и напряжения. Добавить надписи по всем осям в соответствии с рисунком 9.

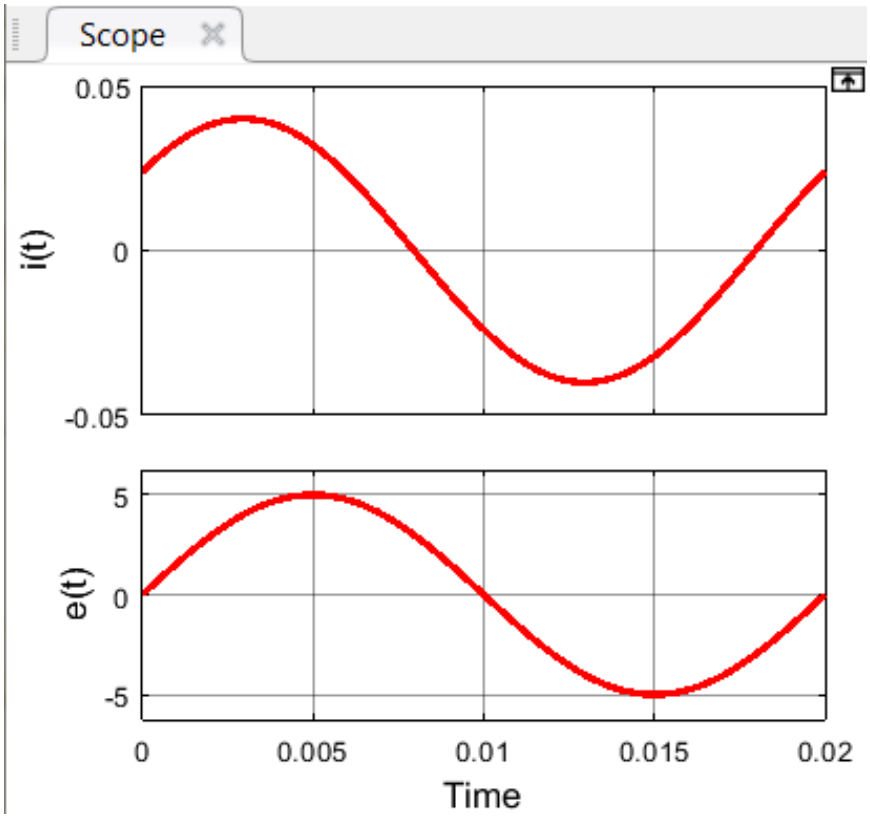


Рисунок 9

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 40° с минусом, что соответствует резистивно-емкостному характеру сопротивления цепи.

Отчет

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**. Провести анализ полученных графиков зависимостей и сделать выводы.

4 Создать модель одноконтурной цепи постоянного тока (рисунок 10) с источником постоянного напряжения **DC Voltage Source.** Добавить в модель блок амперметра **Current Measurement**, три вольтметра **Voltage Measurement**, пять блоков **Display** и два блока **Product**, на **M**-выходе которых формируется сигнал, равный произведению двух **M**-сигналов, поступающих на два его входа.

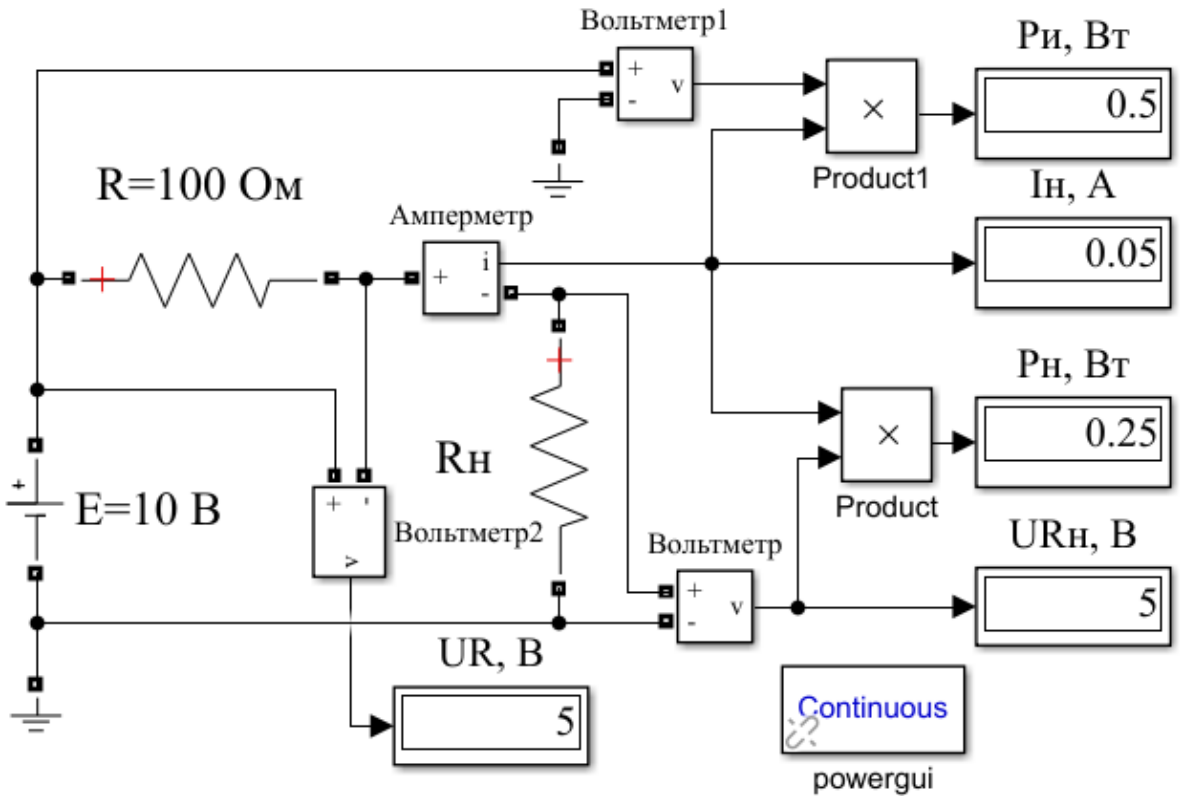


Рисунок 10

Задать для верхнего блока **Series RLC Branch** значение сопротивления R, а для блока **DC Voltage –** значение напряжения источника ЭДС E из таблицы 1 в зависимости от номера варианта.

Отредактировать обозначения блоков на схеме в соответствии с рисунком 10 для своего номера варианта, выполнив щелчок левой кнопкой мыши по текстовой надписи элемента. В данных методических указаниях заданы значения параметров, указанные на рисунке 10.

Параметры моделирования для данной модели можно оставить по умолчанию.

Закоротить с помощью линии связи выводы блока Rн (Rн = 0).

Начать моделирование с помощью команды **Run**. В результате на блоках **Display** появятся следующие значения:

– UR, В – напряжение на сопротивлении R, в вольтах;

– URн, В – напряжение на сопротивлении Rн, в вольтах;

– Рн, Вт – мощность, потребляемая на Rн, в ваттах;

– Iн, А – ток в контуре, в амперах;

– Ри, Вт – мощность, отдаваемая источником, в ваттах.

Результаты моделирования занести в первую строку таблицы 2.

Таблица 2

Rн, Ом	Uн, В	Iн, мА	UR, В	Pн, Вт	Pи, Вт
0					
R/2					

……

Удалить линию связи, с помощью которой были закорочены выводы блока Rн. Последовательно задавая значения Rн, равные R/2, R, 2R, 4R, 6·R, 8R и 10R для своего номера варианта, провести моделирование с помощью команды **Run**. Все результаты моделирования занести в соответствующие строки таблицы 2.

Перейти в окно **Command Window** среды MATLAB и сформировать из полученных данных векторы Iн, Uн и Pн со значениями из таблицы 2. Построить графики зависимости Uн (Iн) и Pн (Iн), используя функцию plot.

Отчет

Включить в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с результатами всех восьми экспериментов, заполненную таблицу 2 и полученные графики зависимости. Проанализировать графики и сделать выводы.

5 Используя графический интерфейс пользователя (**GUI**), смоделировать установившийся режим для схемы рисунка 10 для значения сопротивления Rн, равного R, в омах. Выполнить двойной щелчок по блоку **Powergui**. В результате откроется окно **Block Parameters: powergui** (рисунок 11), на закладке **Solver** которого требуется выбрать непрерывный режим моделирования **Continuous**.

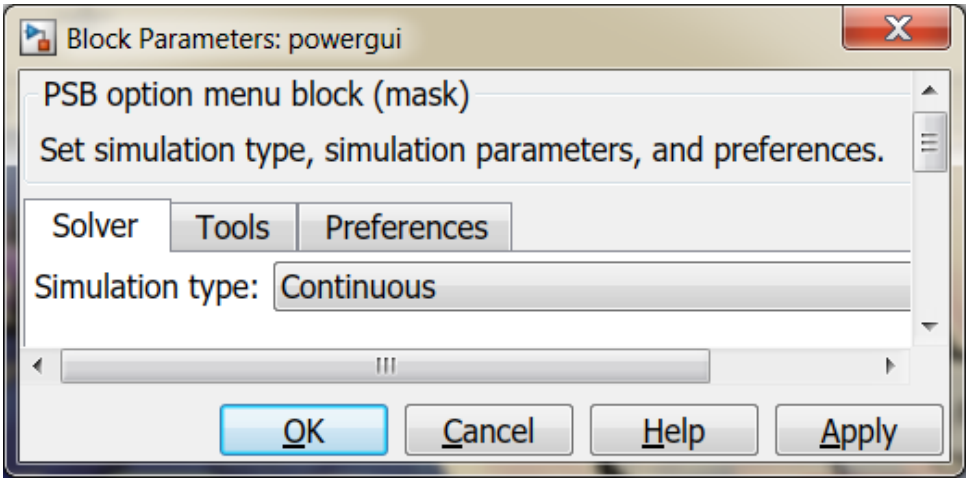


Рисунок 11

Перейти на закладку **Tools** окна **Block Parameters: powergui** и нажать кнопку **Steady-State** (рисунок 12).

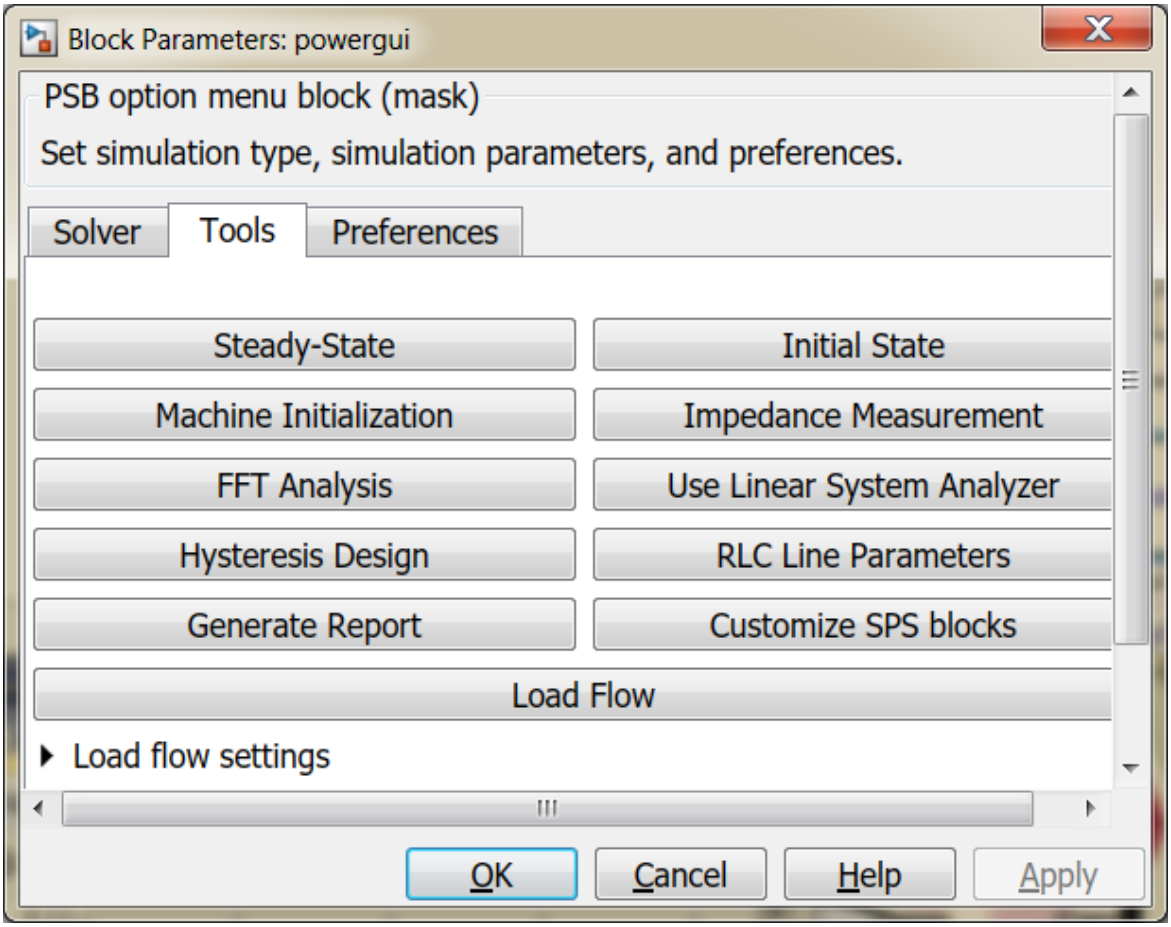


Рисунок 12

В окне **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool** (рисунок 13) можно установить требуемые настройки:

– вид системы измерения **Units:** – **RMS values** (действующие значения) или **Peak values** (амплитудное значение) – для постоянного тока эта настройка может быть любой;

– задать значение частоты источников **Frequency:** – для постоянного тока 0 Гц;

– в разделе **Display**: поставить флажки в полях **Measurements** (измеряемые переменные) и **Sources** (источники энергии);

– задать требуемый формат вывода результата измерения **Format:** и **Ordering:**.

На рисунке 13 в разделе **MEASUREMENTS:** приводятся результаты моделирования для значений параметров, указанных на рисунке 10, и для R = 100 Ом. При сравнении полученных результатов

моделирования с соответствующими значениями из таблицы 2 видим, что они совпадают.

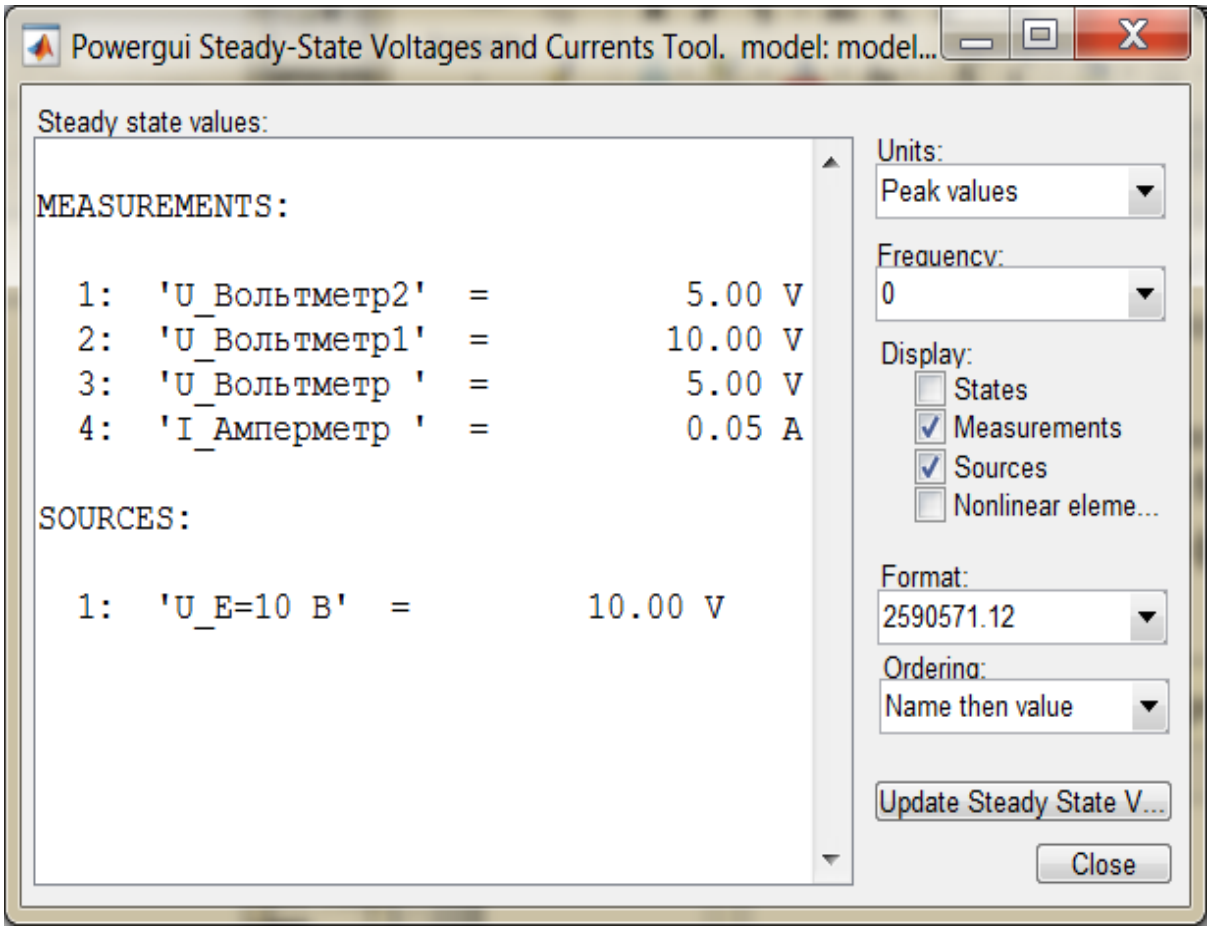


Рисунок 13

Отчет

Включить в отчет по лабораторной работе содержимое окна **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool** для своего номера варианта. Сравнить полученные результаты моделирования с соответствующими значениями из таблицы 2 и сделать выводы.

6 С помощью блока **Powergui** смоделировать установившийся режим для разветвленной цепи постоянного тока (рисунок 14) и измерить токи во всех ее ветвях, используя блоки **Current Measurement**. Обратить внимание на полярность подключения блоков в модель (рисунок 15).

Выходы блоков **Current Measurement** подключить к блокам **Terminator** из раздела **Sinks** библиотеки **Simulink** для предотвращения появления сообщения об ошибке, о том, что их выходы никуда не подключены.

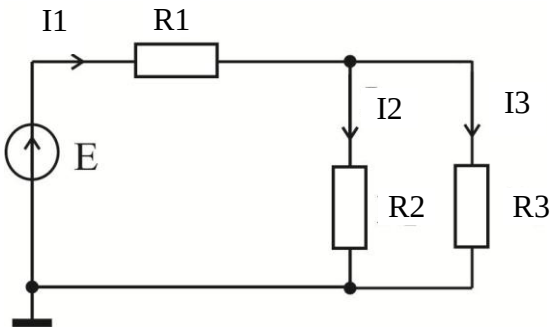


Рисунок 14

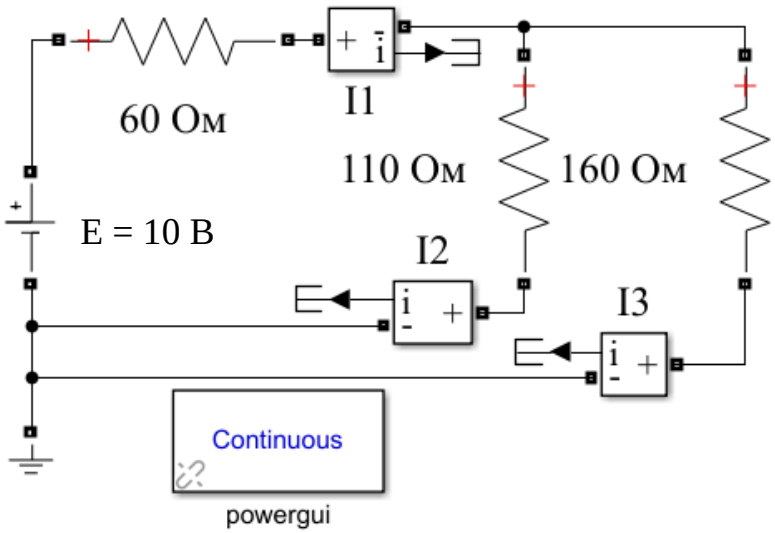


Рисунок 15

При моделировании использовать значения сопротивления R1 = R и напряжения источника ЭДС E из таблицы 1 в зависимости от номера варианта. Остальные значения параметров задать равными: R2 = R1+ 50 Ом, R3 = R1 + 100 Ом.

Выбрать установившийся режим моделирования **Steady-State** на закладке **Tools** окна **Block Parameters: powergui** и задать в открывшемся окне **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool** (см. рисунок 13) формат вывода результата измерения **Format: – 112.3 (best of)**.

Отчет

Включить в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с моделью, а также содержимое окна **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool** с результатами моделирования для своего номера варианта. Проверить по результатам измерения выполнение первого закона Кирхгофа и сделать выводы.

7 С помощью блока **Powergui** смоделировать установившийся режим для разветвленной цепи постоянного тока (рисунок 16) и измерить напряжения на всех ее элементах. Обратить внимание на полярность подключения блоков в модель. При расчете использовать значения сопротивлений и ЭДС из таблицы 1 для своего номера варианта. Остальные значения параметров задать равными: E1 = E/2 В, E2 = E/2 В, R1 = R, R2 = R1+ 50 Ом, R3 = R1 + 100 Ом, R4 = 30 Ом, Rн = 300 Ом.

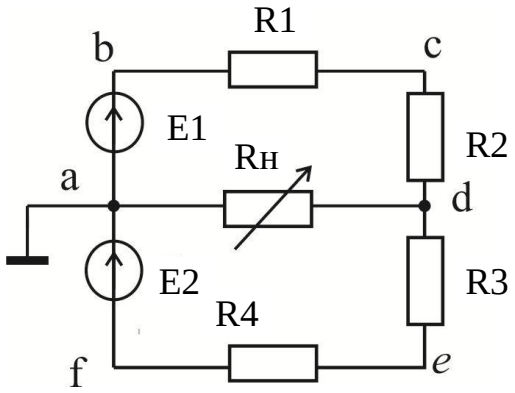


Рисунок 16

Отчет

Включить в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с моделью, а также содержимое окна **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool** с результатами моделирования для своего номера варианта. Проверить по результатам измерения выполнение второго закона Кирхгофа для всех контуров и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1 Чем отличаются **P**-модели из раздела **PowerSystems** от **S**-моделей из раздела **Simulink**? Как осуществляется связь между ними?

2 Какие настройки нужно задать в окне **Cofiguration Parameters** перед запуском модели?

3 Как настраиваются параметры блоков **Series RLC Branch** и **DC Voltage Source**, **AC Voltage Source**? Какие значения они могут принимать?

4 Для чего предназначены блоки из раздела **Measurements**?

5 Каково назначение блока **Product**?

6 Каково назначение блока **Powergui**?

7 Какие средства для вывода результатов моделирования существуют в **Simulink**?

Лабораторная работа № 3

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ БЛОКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ГАРМОНИЧЕСКОГО ТОКА В СИСТЕМЕ SIMULINK

Цель работы: проверка основных законов электрических цепей при расчете и моделировании электрических цепей гармонического тока в системе MATLAB-Simulink.

Рабочее задание

1 Запустить программу MATLAB, зайти в среду Simulink и сохранить открывшееся окно для сборки модели под именем **model_3_1** с расширением **slx.**

2 Создать модель параллельной R-L-C-цепи (рисунок 1) с источником переменного синусоидального напряжения.

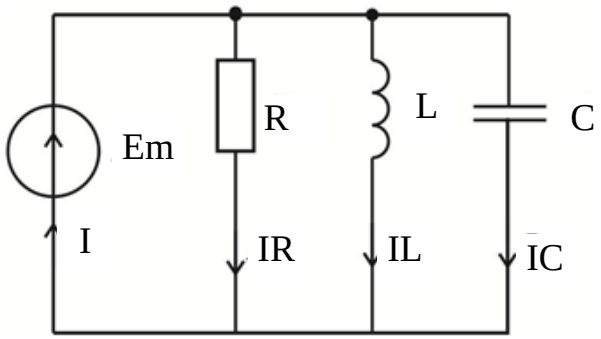


Рисунок 1

Включить в модель блок **AC Voltage Source**, четыре блока **Series RLC Branch** и блок **Ground** («Земля»).

Для измерения токов и напряжений включить в модель (рисунок 2) амперметр **Current Measurement** (**I**), вольтметр **Voltage Measurement** (**U**), мультиметр **Multimeter**, а также блок **Powergui** из раздела **Measurements** библиотеки **Simscape Power Systems**.

Для визуального представления сигналов и измерения сдвига по фазе между входным напряжением и током добавить в модель обзорное окно **Scope**.

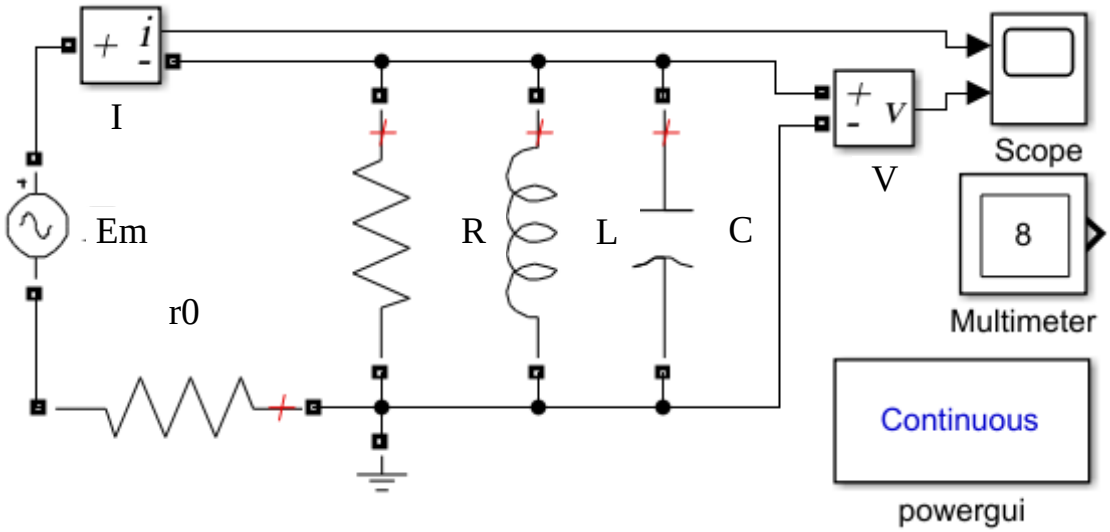


Рисунок 2

Для обеспечения работы модели последовательно с источником **AC Voltage Source** (**Em**) включена последовательная R-L-C-цепь – блок **Series RLC Branch** в режиме **R** (**r0)**, моделирующий его внутреннее сопротивление, для которого задано значение сопротивления, равное 1 Ом. Если запустить на выполнение модель с нулевым внутренним сопротивлением источника переменного напряжения, то будет выдано сообщение об ошибке следующего содержания: «Блок источника напряжения ‘Em’ не может быть подключен параллельно емкостному элементу. Добавьте небольшой резистор последовательно с блоком источника напряжения или с емкостным элементом».

Обратить внимание на полярность подключения блоков в модели. На рисунке 2 вывод «+» блока **AC Voltage Source** подключен к выводу «+» блока **Current Measurement**, вывод «–» которого подключен к выводам «+» трех блоков **Series RLC Branch**, нижние выводы этих блоков подключены к выводу «+» блока **r0.**

Блок вольтметра **Voltage Measurement** (**U**) также должен быть подключен с учетом полярности. Блок **Multimeter** в данной модели никуда не требуется подключать.

Задать для блока **AC Voltage Source** амплитудное значение напряжения источника ЭДС Em и частоты f, в герцах, из таблицы 1 в зависимости от номера варианта.

В зависимости от номера варианта задать в окне параметров для трех блоков **Series RLC Branch**, включенных параллельно, следующие настройки:

– для блока в режиме **R** значение сопротивления, в омах, равным значению R из таблицы 1;

– для блока в режиме **L** значение индуктивности, в миллигенри, равным значению R из таблицы 1;

– для блока в режиме **C** значение емкости, в микрофарадах, равным значению R из таблицы 1.

Таблица 1

		Номер варианта							
Em, В	5	1	9	17	25	33	41	49	100
	6	2	10	18	26	34	42	50	90
	7	3	11	19	27	35	43	51	80
	8	4	12	20	28	36	44	52	70
	9	5	13	21	29	37	45	53	60
	10	6	14	22	30	38	46	54	50
	11	7	15	23	31	39	47	55	40
	12	8	16	24	32	40	48	56	30
R, Ом		70	80	90	100	110	120	130	f, Гц

Задать дополнительно в окне параметров **Block Parameters:** для блоков **R**, **L** и **C** в списке **Measurements** [Измеряемые переменные] значение параметра **Branch voltage and current**.

Это позволяет передать в блок **Multimeter** массивы данных, соответствующие мгновенным значениям напряжений и токов на этих элементах. После запуска процесса моделирования в окне **Simulation result for: Multimete**r будут отображаться эти сигналы.

При этом отображаемым сигналам в блоке **Multimeter** присваиваются метки: **Ib** – ток цепи, **Ub** – напряжение цепи.

Расположить блоки в модели и соединить их между собой так, как это показано на рисунке 2. С помощью соответствующих текстовых полей отредактировать имена блоков в соответствии с вариантом задания.

3 Выполнить двойной щелчок по блоку **Multimeter**. В результате откроется окно (рисунок 3), в котором можно указать, какие временные диаграммы и в каком порядке будут выводиться в окне **Simulation result for: Multimeter**.

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

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

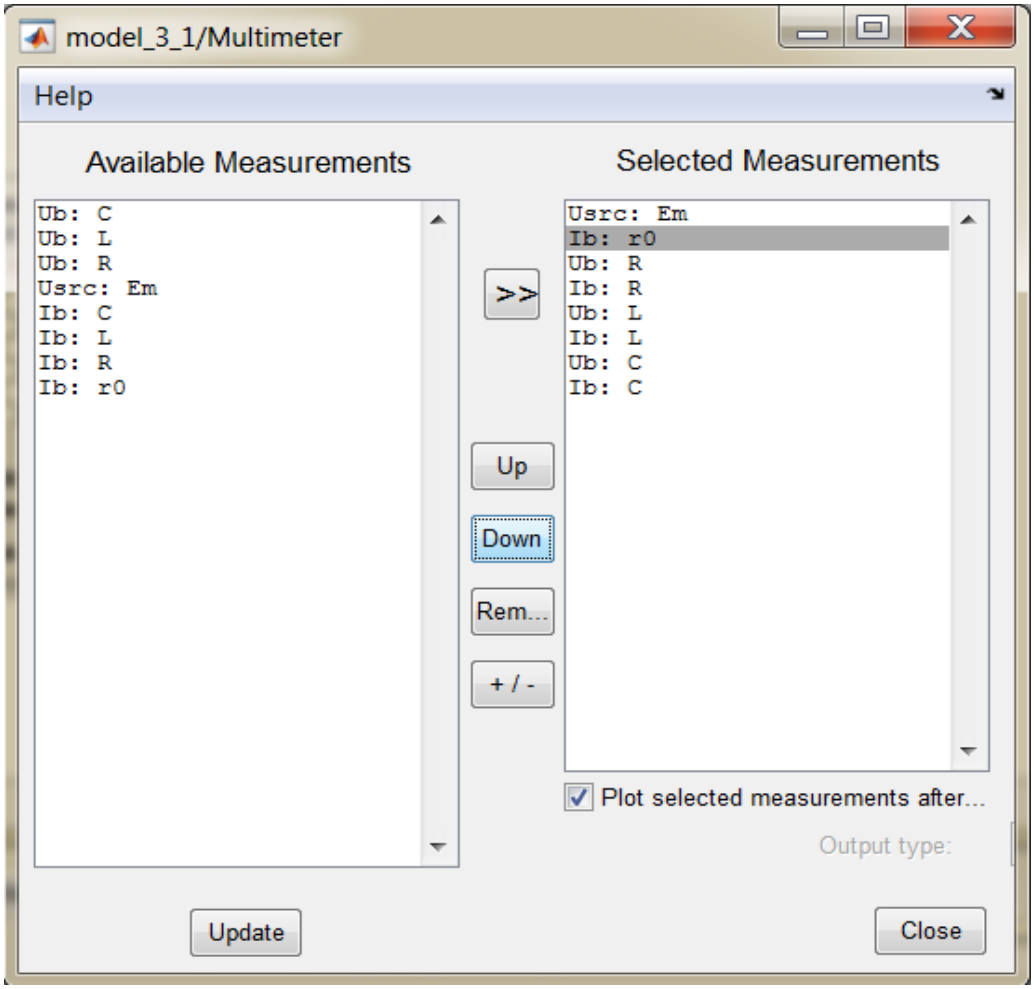


Рисунок 3

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 и закрыть окно, нажав на клавишу **Close**.

4 Перед запуском полученной блок-схемы на моделирование необходимо установить требуемые параметры моделирования с помощью команды **Simulation⇒Model Cofiguration Parameters**.

Установить в окне настройки параметров следующие значения:

– в области **Simulation time** – значения начального времени моделирования **Start time: 0.0** и конечного времени моделирования, равного периоду сигнала источника переменного напряжения;

– в области **Type:** – тип решения с переменным шагом (**Variable-step**);

– в области выбора метода моделирования **Solver:** при моделировании с переменным шагом по умолчанию устанавливается метод общего назначения **ode45**.

5 Начать моделирование с помощью команды **Simulation** ⇒ **Run**. На рисунке 4 представлены результаты моделирования в окне **Scope**. На верхнем графике окон **Scope** выведен один период временной диаграммы тока в неразветвленной части цепи, а на нижнем графике – один период напряжения на параллельном участке. Это напряжение соответствует напряжению на выходе реального источника ЭДС с учетом падения напряжения на его внутреннем сопротивлении.

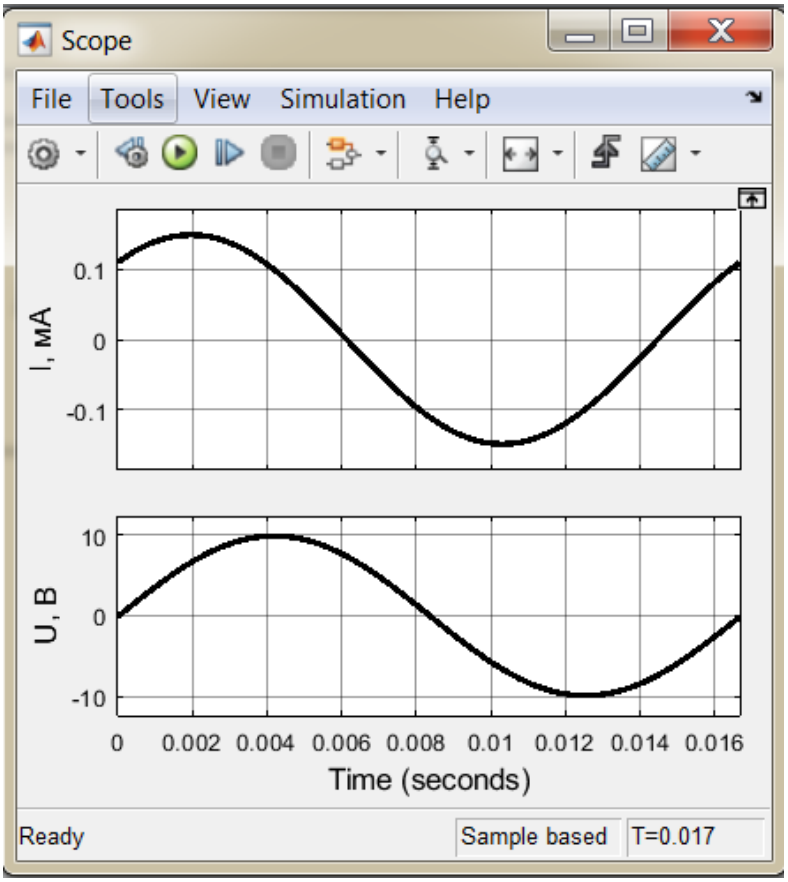


Рисунок 4

Определить по временной диаграмме в окне **Scope** амплитудные значения входного тока и напряжения, а также сдвиг по фазе между напряжением и током на входе цепи и занести полученные значения в соответствующие ячейки таблицы 2. Сделать выводы о характере сопротивления цепи.

Таблица 2

Способы определения величин	Em, В	Im, мА	φ, °	UmC, В	UmL, В	UmR, В	ImC, мА	ImL, мА	ImR, мА
Scope				–	–	–	–	–	–
Multimeter									
Powergui									

На рисунке 5 представлены результаты моделирования в окне **Simulation result for: Multimeter:** восемь временных диаграмм напряжений и токов на входе цепи и для каждого элемента R, L и C.

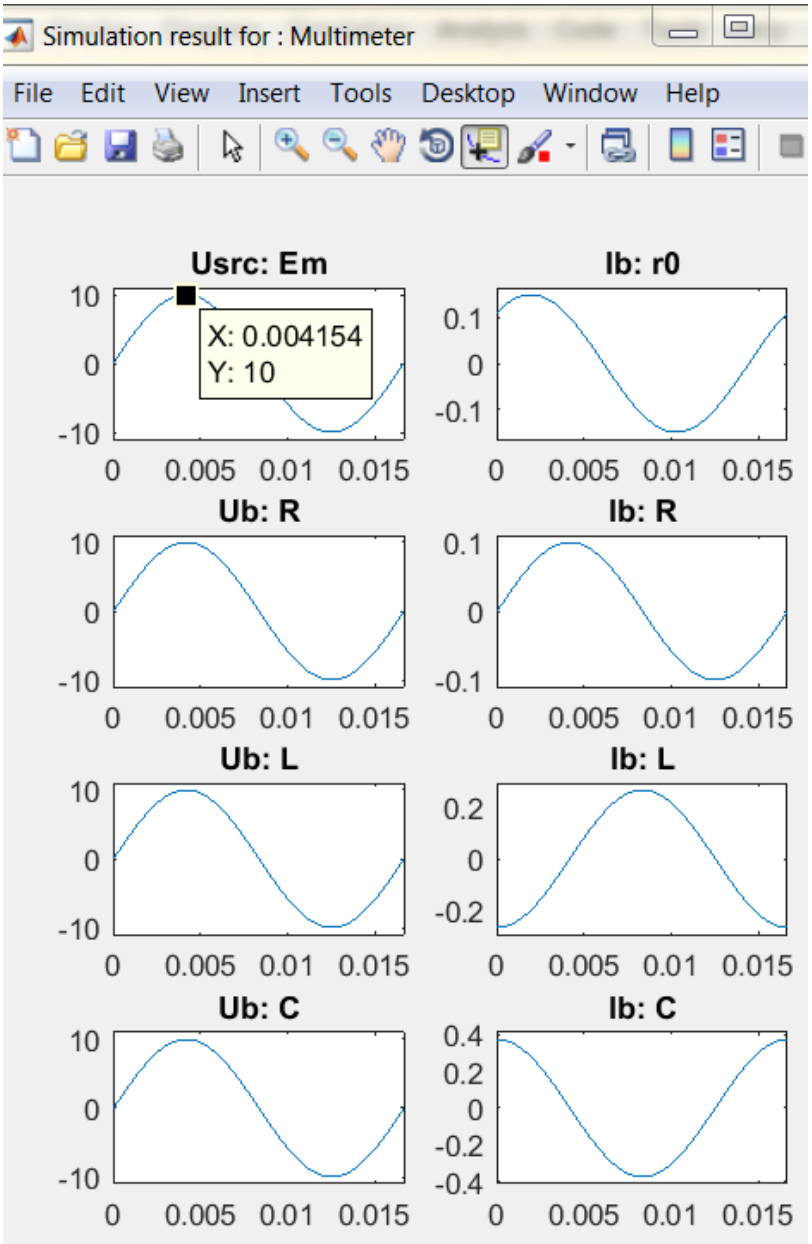


Рисунок 5

С помощью инструмента **Data Cursor** (см. рисунок 5) измерить амплитудные значения всех напряжений и токов и занести в таблице 2. Сравнить их с соответствующими значениями, полученными с помощью **Scope**. Сделать выводы.

Обратить внимание, что при повторном запуске модели содержимое окна **Scope** обновляется, а новое окно **Simulation result for: Multimeter** добавляется к уже открытому. Поэтому не забывайте закрывать не нужные уже окна **Simulation result for: Multimeter**.

6 Выбрать в блоке **Powergui** на закладке **Solver** окна **Block Parameters: powergui** непрерывный режим моделирования **Continuous**.

Запустить установившийся режим моделирования **Steady-State** на закладке **Tools** окна **Block Parameters: powergui**.

Результаты моделирования выводятся в окне **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool** (рисунок 6) и соответствуют амплитуде и фазе соответствующих напряжений и токов.

```
MEASUREMENTS:

  1:   'U_V      '   =          9.90 V    -0.63°
  2:   'I_I      '   =          0.15 A    47.54°
  3:   'Ub: C    '   =          9.90 V    -0.63°
  4:   'Ub: L    '   =          9.90 V    -0.63°
  5:   'Ub: R    '   =          9.90 V    -0.63°
  6:   'Usrc: Em'   =         10.00 V     0.00°
  7:   'Ib: C    '   =          0.37 A    89.37°
  8:   'Ib: L    '   =          0.26 A   -90.63°
  9:   'Ib: R    '   =          0.10 A    -0.63°
 10:   'Ib: r0   '   =          0.15 A    47.54°
```

Рисунок 6

Занести полученные значения в соответствующие ячейки таблицы 2. Сравнить их с соответствующими значениями, полученными в п. 5. Сделать выводы.

Используя функцию MATLAB **compass**, построить векторные диаграммы для токов и напряжений.

На основании векторных диаграмм сделать вывод о выполнении законов Кирхгофа для данной цепи.

Отчет

Включить в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с моделью, содержимое окна **Scope**, окна **Simulation result for: Multimeter** и **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool** с результатами моделирования, а также заполненную таблицу 2 и векторные диаграммы, построенные с помощью функцию MATLAB **compass** для своего номера варианта. Проверить выполнение законов Кирхгофа по результатам моделирования и сделать выводы.

7 Повторить пп. 2–6 для цепи переменного тока при смешенном соединении элементов (рисунок 7).

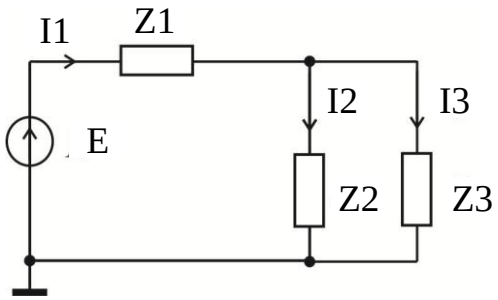


Рисунок 7

В зависимости от номера варианта использовать в ветвях электрические элементы, указанные в таблице 3. При расчете использовать значения параметров из таблицы 1 в зависимости от номера варианта.

Таблица 3

Элемент Z находится в ветви			Номер варианта						
Номер ветви									
1	2	3							
R	L	C	1	9	17	25	33	41	49
L	C	R	2	10	18	26	34	42	50
C	R	L	3	11	19	27	35	43	51
R	C	L	4	12	20	28	36	44	52
L	R	C	5	13	21	29	37	45	53
C	L	R	6	14	22	30	38	46	54
R	L	C	7	15	23	31	39	47	55
L	C	R	8	16	24	32	40	48	56

Результаты вычислений занести в таблицу 4.

Таблица 4

Способы определения величин	E, В	I, мА	φ, °	UC, В	UL, В	UR, В	IC, мА	IL, мА	IR, мА
Scope				–	–	–	–	–	–
Multimeter									
Powergui									

Отчет

Включить в отчет по лабораторной работе содержимое рабочего окна с моделью, содержимое окна **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool,** окна **Scope** и окна **Simulation result for: Multimeter** с результатами моделирования, а также заполненную таблицу 4 и векторные диаграммы, построенные с помощью функцию MATLAB **compass** для своего номера варианта. Проверить выполнение законов Кирхгофа по результатам моделирования и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1 Чем отличаются **P**-модели из раздела **Simscape Power Systems** от **S**-моделей Simulink? Как осуществляется связь между ними?

2 Какие настройки нужно задать в окне **Cofiguration Parameters** перед запуском модели?

3 Как настраиваются параметры блоков Series RLC Branch и **AC Voltage Source**? Какие значения они могут принимать?

4 Для чего предназначены блоки **Current Measurement** и **Voltage Measurement**?

5 Какую информацию можно получить с помощью блока **Multimeter**? Как он подключается в модель?

6 Какие настройки имеются для блока **Multimeter**?

7 Какие режимы работы блока **Powergui** использовались в данной работе?

8 Каким образом можно построить векторные диаграммы для токов и напряжений в MATLAB?

Лабораторная работа № 4

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ MATLAB-SIMULINK

Цель работы: изучение дополнительных возможностей системы MATLAB-Simulink по визуализации результатов моделирования электрических цепей переменного тока, а также их анализу по векторным и топографическим диаграммам.

Рабочее задание

1 Запустить программу MATLAB, перейти в среду Simulink и сохранить файл под именем **model_4_1** на диске в своей папке.

2 Собрать модель, приведенную на рисунке 1.

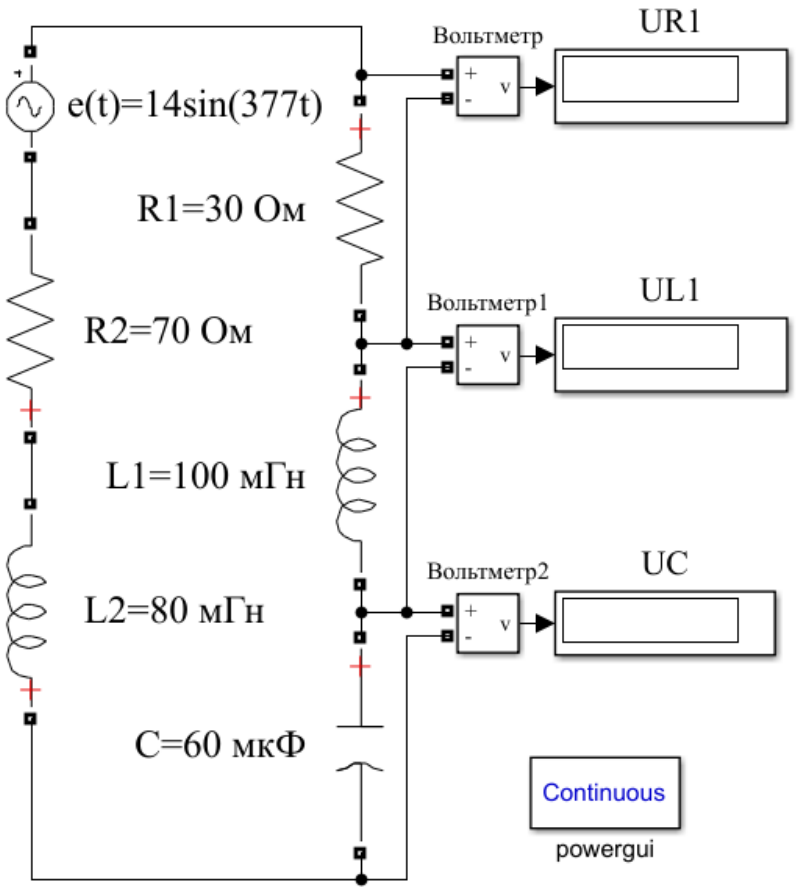


Рисунок 1

Включить в модель блок **AC Voltage Source** и пять блоков **Series RLC Branch**.

Для измерения напряжений включить в модель три вольтметра **Voltage Measurement**, а также блок **Powergui** из раздела **Measurements** библиотеки **Simscape Power Systems**.

Для вывода результатов измерения вольтметров добавить в модель три блока **Display** (раздел **Sinks** библиотеки **Simulink**).

Обратить внимание на полярность подключения элементов друг к другу. На рисунке 1 вывод «+» блока **AC Voltage Source** подключен к выводу «+» первого блока **Series RLC Branch**, нижний вывод которого подключен к выводу «+» второго блока **Series RLC Branch**. Аналогично последовательно подключены еще четыре блока **Series RLC Branch**, последний из которых подключается к выводу «–» блока **AC Voltage Source**.

Три блока **Voltage Measurement** подключены параллельно первым трем блокам **Series RLC Branch** также с учетом их полярности.

Задать для блока **AC Voltage Source** амплитудные значения напряжения источника ЭДС Em, в вольтах, и частоты f, в герцах, из таблицы 1 в зависимости от номера варианта, а начальную фазу – равной нулю.

Таблица 1

		Номер варианта							
Em, В	5	1	9	17	25	33	41	49	100
	6	2	10	18	26	34	42	50	90
	7	3	11	19	27	35	43	51	80
	8	4	12	20	28	36	44	52	70
	9	5	13	21	29	37	45	53	60
	10	6	14	22	30	38	46	54	50
	11	7	15	23	31	39	47	55	40
	12	8	16	24	32	40	48	56	30
R, Ом		70	80	90	100	110	120	130	f, Гц

В зависимости от номера варианта задать в окне параметров для первых трех блоков **Series RLC Branch**, включенных последовательно, следующие настройки:

– для блока в режиме **R1** значение сопротивления, в омах, равным значению R из таблицы 1;

– для блока в режиме **L1** значение индуктивности, в миллигенри, равным значению R из таблицы 1;

– для блока в режиме **C** значение емкости, в микрофарадах, равным значению R из таблицы 1.

Для всех вариантов R2 = 70 Ом, L2 = 80 мГн.

Отредактировать позиционные обозначения для всех элементов цепи в соответствии с номером варианта. Обратите внимание, что для схемы на рисунке 1 угловая частота равна $2\pi f = 2\pi \cdot 60 \approx 377$ рад.

3 Для блока **Voltage Measurement** могут быть заданы разные форматы выходного сигнала **Output signal:** (рисунок 2).

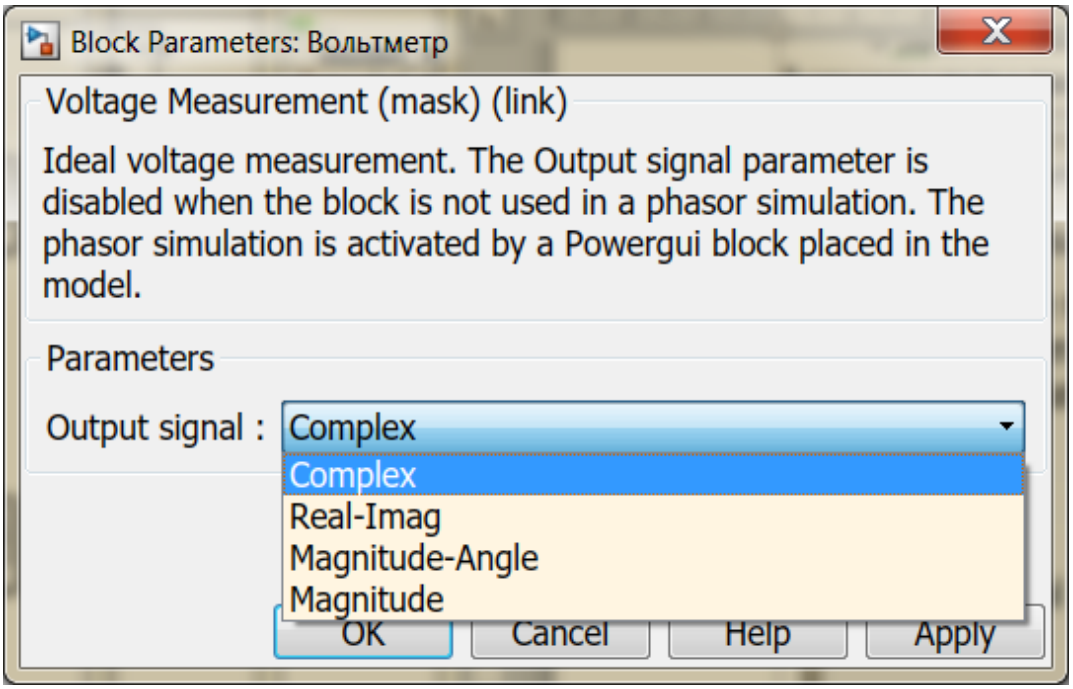


Рисунок 2

Выбрать следующие форматы вывода выходного сигнала для вольтметров:

– **Complex** (комплексная форма) – для вольтметра, подключенного к **R1**;

– **Real-Image** (вещественная и мнимая части) – для вольтметра, подключенного к **L1**;

– **Magnitude-Angle** (модуль и аргумент) – для вольтметра, подключенного к **C**.

Для блока **Display** могут быть заданы разные форматы выходного сигнала **Format:** (рисунок 3). Оставить формат по умолчанию **short**.

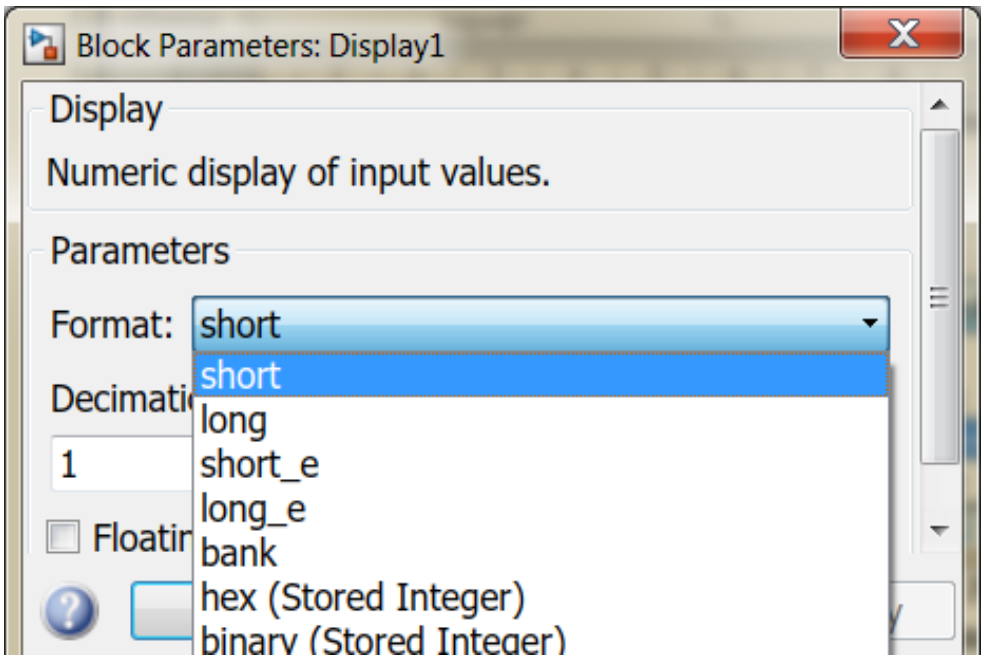


Рисунок 3

4 Установить требуемые параметры моделирования с помощью команды **Simulation ⇒ Model Cofiguration Parameters**:

– в области **Simulation time** – значения начального времени моделирования, равного нулю, и конечного времени моделирования, равного периоду гармонического сигнала источника переменного напряжения для своего варианта;

– в области **Type:** – тип решения с переменным шагом (**Variable-step**);

– в области выбора метода моделирования **Solver:** – при моделировании с переменным шагом по умолчанию устанавливается метод общего назначения **ode45**.

5 Выбрать в блоке **Powergui** на закладке **Solver** непрерывный режим моделирования **Continuous**. Начать моделирование с помощью команды **Simulation ⇒ Run**.

В результате на экранах блоков **Display** отображаются мгновенные значения напряжений на **R1**, **L1** и **C** в момент времени t = 0 при любых форматах выходного сигнала, выбранных в блоках **Voltage Measurement** (рисунок 4).

6 Выбрать в блоке **Powergui** на закладке **Solver** режим моделирования **Phazor**, в котором моделируемая цепь рассчитывается комплексным методом. Задать в окне **Frequency (Hz):** значение частоты, в герцах, в соответствии с вариантом и закрыть окно клавишей **ОК**.

Начать моделирование с помощью команды **Simulation ⇒ Run**.

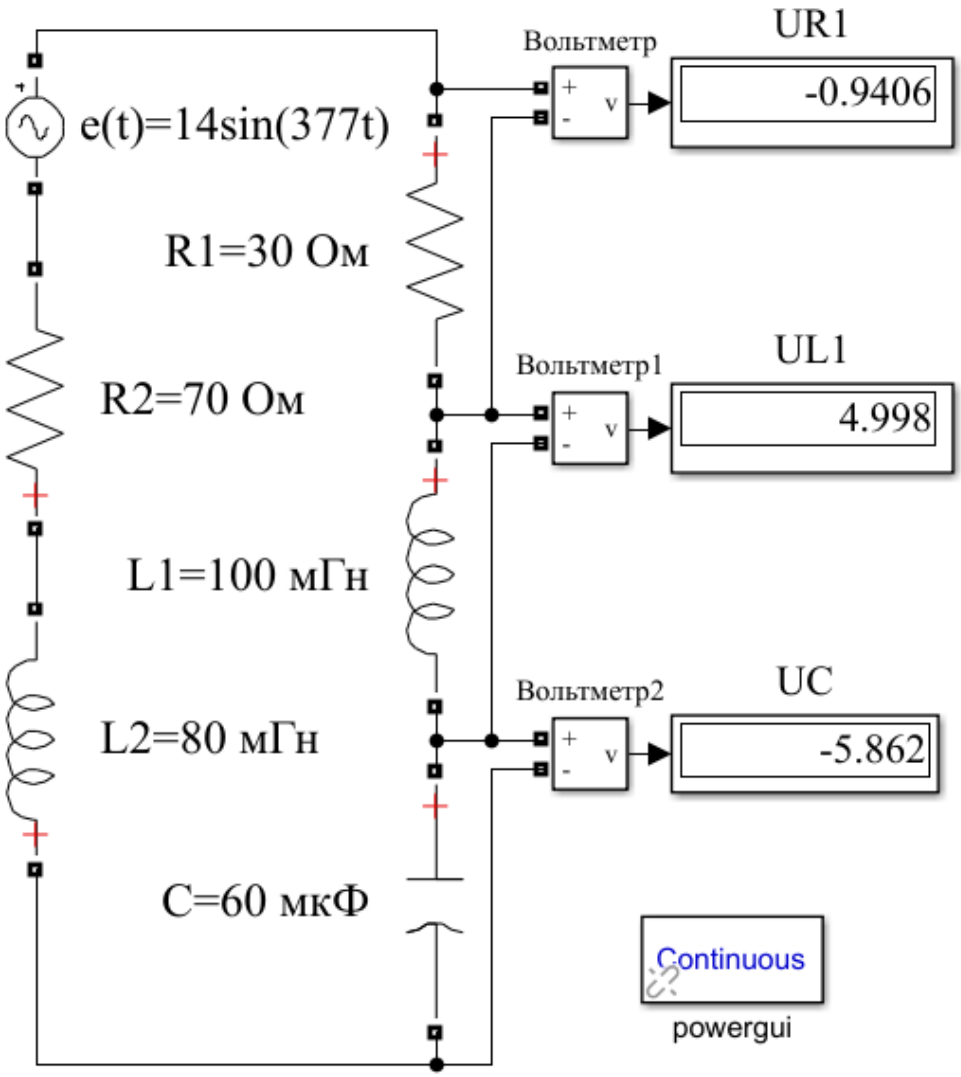


Рисунок 4

В экранах блоков **Display** (рисунок 5) в соответствии с выбранным форматом выходного сигнала блоков **Voltage Measurement** отображаются:

– напряжения на **R1** в комплексной форме;

– вещественная и мнимая части напряжения на **L1**;

– модуль и аргумент, в градусах, для напряжения на **C**.

7 Выполнить двойной щелчок по блоку **Powergui** и на закладке **Tools** окна **Block Parameters: powergui** выбрать установившийся режим моделирования **Steady-State**.

В результате откроется окно **Powergui Steady-State Voltages and Currents Tool**, в котором необходимо задать настройки, указанные на рисунке 6. Расчет проводится для одной фиксированной частоты, равной частоте источников схемы. В рассматриваемой модели используется источник напряжения с частотой 60 Гц, значение которой автоматически устанавливается в окне **Frequency:**.

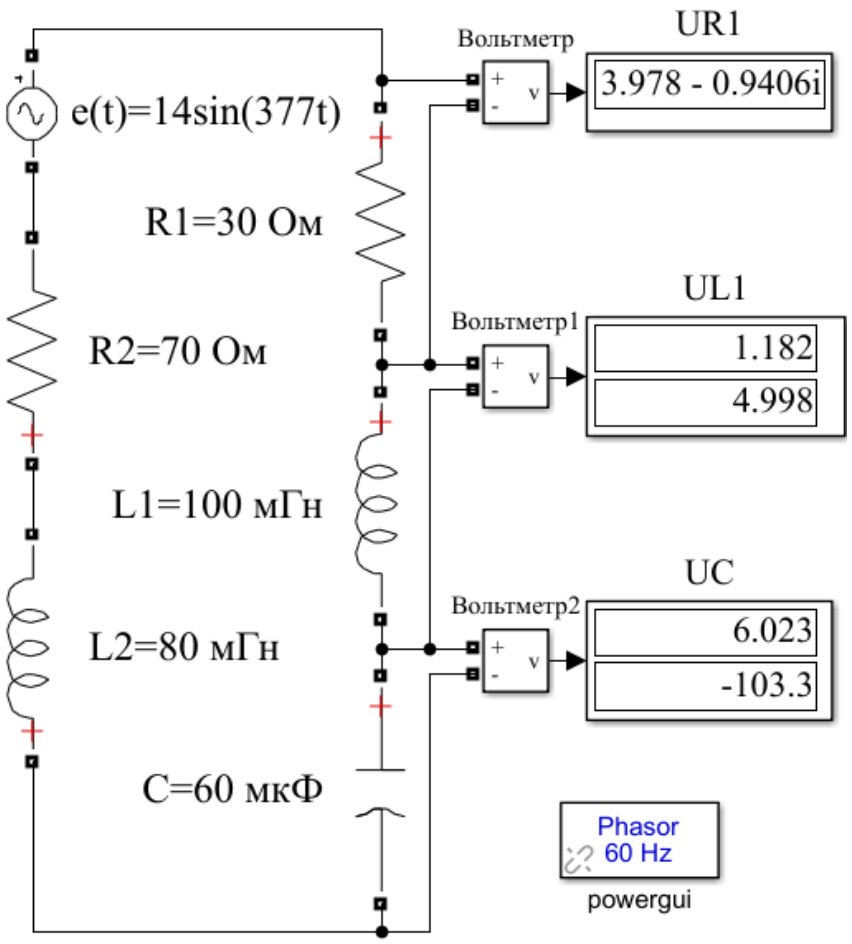


Рисунок 5

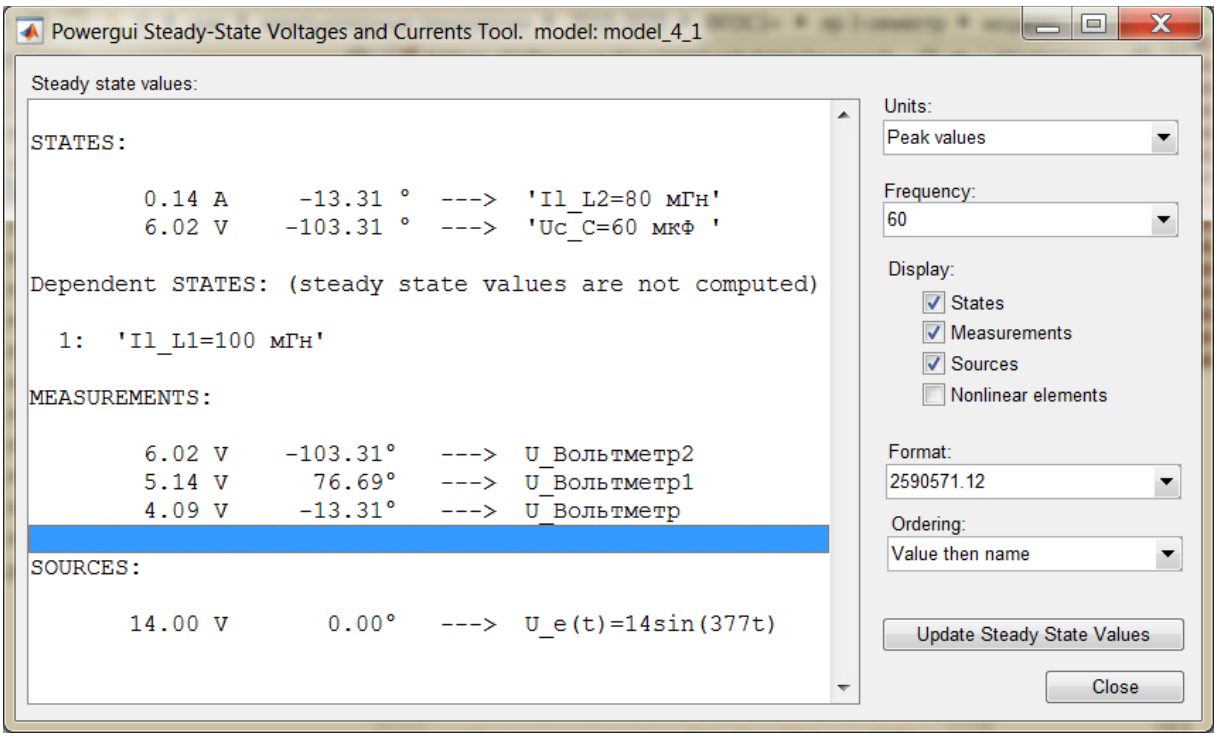


Рисунок 6

В разделе **States:** отображаются значения переменных состояния (модуль и аргумент тока через индуктивность и напряжения на емкости).

В разделе **Measurement:** отображаются измеряемые переменные (модуль и аргумент для комплексной амплитуды напряжений на **R1**, **L1** и **C**).

В разделе **Sources:** отображаются модуль и аргумент комплексной амплитуды напряжения **e(t)**.

Отчет

Вставить в отчет по лабораторной работе блок-схемы моделей из пп. 2–7 с результатами моделирования и соответствующие окна свойств для всех ее элементов.

Сопоставить все полученные результаты моделирования и сделать выводы. Закрыть окно с собранной моделью.

8 Открыть окно для создания новой модели с помощью команды **File ⇒ New ⇒ Model…** . **С**охранить файл под именем **model_4_2** на диске в своей папке.

Собрать моделируемую цепь, приведенную на рисунке 7. Обратить внимание на полярность подключения элементов друг к другу. Задать параметры элементов из п. 2.

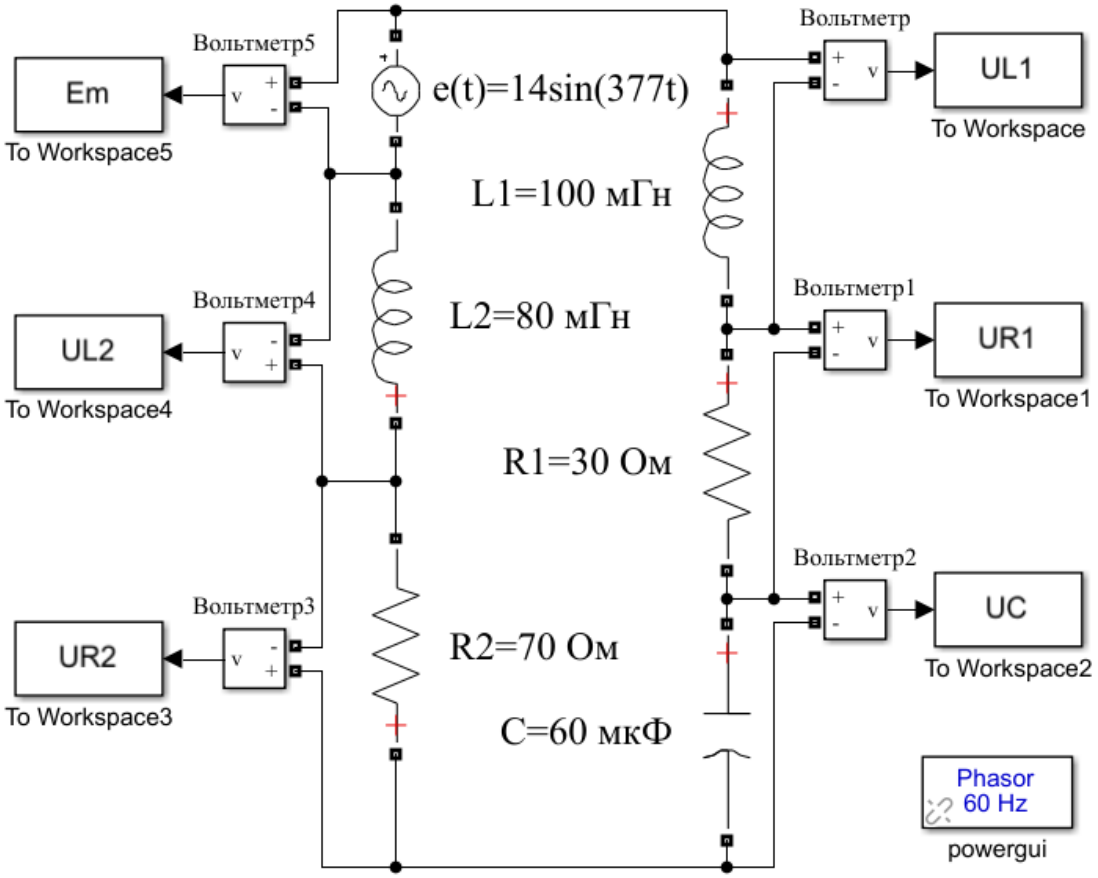


Рисунок 7

Подключить параллельно каждому элементу электрической цепи блок виртуального вольтметра **Voltage Measurement**. При подключении вольтметров к блокам электрических элементов необходимо следить за тем, чтобы их выводы «+» и «–» соединялись к соответствующим выводам «+» и «–» элементов. Задать в окне свойств для вольтметров **Voltage Measurement** тип выходного сигнала **Real-Image** (вещественная-мнимая часть).

Подключить к выходам всех вольтметров шесть структурных блоков **To Workspace** (раздел **Sinks** библиотеки **Simulink**). С помощью блоков **To Workspace** выходные данные вольтметров передаются в рабочую область MATLAB, где их можно увидеть в окне **Workspace**.

В окне свойств для блоков **To Workspace** задать имена блоков **Variable name:** в соответствии с рисунком 7, количество входных выборок для сохранения **Limit data points to last – 1** и формат записи **Save fotmat: – Erray** (Массив). Остальные параметры оставить без изменения.

Сохранить изменения в файле под именем **model_4_2**.

9 Выбрать в блоке **Powergui** на закладке **Solver** режим моделирования **Phazor** и задать значение частоты **Frequency(Hz):** для своего варианта. На рисунке 7 частота равна 60 Hz.

Начать моделирование с помощью команды **Simulation ⇒ Run**.

В результате моделирования в окне **Workspace** системы MATLAB появятся шесть векторов (рисунок 8), элементы которых соответствуют вещественной и мнимой частям напряжений на всех электрических элементах модели. Вектор **tout** содержит 168 временных координат в интервале от 0 до 0,0167 с шагом 0,0001 с.

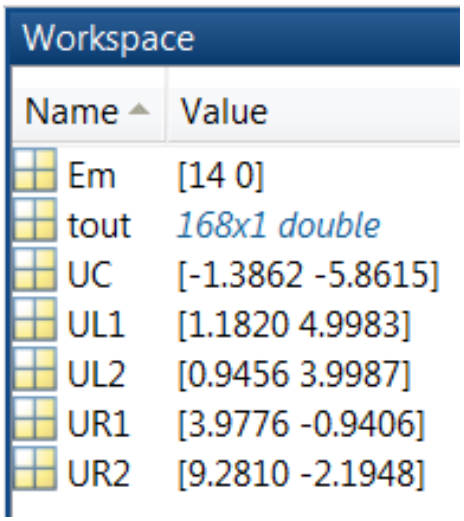


Рисунок 8

Набрать в окне Command Window системы MATLAB следующий программный код:

```
compass([UR1(1) UL1(1) UC(1) UL2(1) UR2(1) Em(1)], ...
        [UR1(2) UL1(2) UC(2) UL2(2) UR2(2) Em(2)])
      gtext ('UR1');gtext ('UL1'); gtext ('UC')
      gtext ('UL2');gtext ('UR2'); gtext ('Em')
      gtext ('+1');gtext ('+j')
```

В результате выполнения программы в графическом окне **Figure** будет построена векторная диаграмма напряжений. На рисунке 9 приведена отформатированная векторная диаграмма, на которой убраны избыточные элементы.

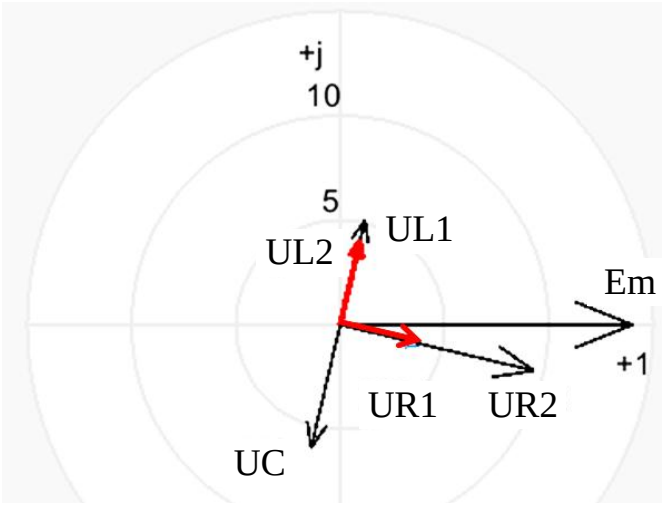


Рисунок 9

Отчет

Вставить в отчет по лабораторной работе блок-схему модели из п. 8 для своего варианта, содержимое окна **Workspace** и текст программы для построения векторной диаграммы в среде MATLAB, а также результаты выполнения программы в графическом окне **Figure**. Проверить по векторной диаграмме выполнение второго закона Кирхгофа. Сделать выводы.

10 Для наглядного определения величины и фазы напряжения между различными точками электрической цепи удобно использовать топографическую диаграмму, на которой в масштабе изображаются потенциалы всех точек схемы относительно любой точки, потенциал которой принят за нуль.

Векторы, полученные при парном соединении потенциалов всех точек, начиная с нулевой, в порядке их следования в любом контуре электрической цепи, образуют топографическую диаграмму. При

этом отрезок, соединяющий потенциалы любых точек, является вектором напряжения между ними. В соответствии со вторым законом Кирхгофа конец последнего вектора на топографической диаграмме должен совпасть с началом первого.

Для построения топографической диаграммы можно использовать команду MATLAB **quiver(X, Y, DX, DY, s)**. Данная команда формирует и выводит в графическом окне **Figure** график градиентов функции в виде стрелок для каждой пары элементов массивов **X** и **Y**.

Топографическую диаграмму напряжений для модели электрической цепи (см. рисунок 7) можно построить с помощью следующей программы из среды MATLAB:

```
U=[UL1 UR1 UC UR2 UL2 -Em];
      hold on;n=length(U); SR=0; SI=0;
for k = 1:2:n
      quiver(SR,SI,U(k),U(k+1),0,'LineWidth',2)
      SR=SR+U(k);SI=SI+U(k+1);
end; grid
      axis('equal');axis([xlim ylim]);xlabel('+1');ylabel('+j')
      gtext ('-Em'); gtext ('UL1'); gtext ('UR1')
      gtext ('UC1'); gtext ('UR2'); gtext ('UL2')
```

В результате выполнения программы в графическом окне **Figure** будет построена топографическая диаграмма, представленная на рисунке 10. Отформатировать график по своему усмотрению.

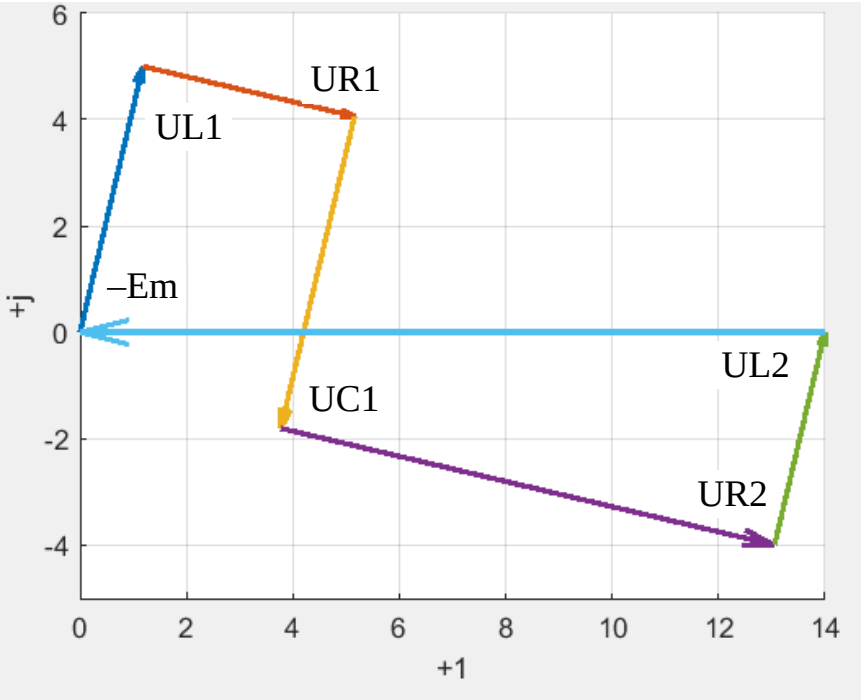


Рисунок 10

Отчет

Вставить в отчет по лабораторной работе текст программы для построения топографической диаграммы в среде MATLAB, а также результаты выполнения программы в графическом окне **Figure** для своего варианта**.** Проверить по топографической диаграмме выполнение второго закона Кирхгофа. Сделать выводы.

11 Самостоятельно изучить другие элементы библиотеки **Simscape Power Systems** из подраздела **Additional Measurements** раздела **Measurements**. Описать их назначение и привести примеры их использования в электротехнической модели.

Контрольные вопросы

1 Какие настройки существуют для блоков **Display**, **To Workspace**?

2 Какие форматы выходного сигнала могут быть заданы для блока **Voltage Measurement**?

3 Какая информация будет выводиться на экране блока **Display**, если в блоке **Powergui** выбран непрерывный режим моделирования **Continuous**?

4 Какая информация будет выводиться на экране блока **Display**, если в блоке **Powergui** выбран режим моделирования **Phasor**?

5 Каким образом можно передать информацию из Simulink в рабочую область MATLAB?

6 Каким образом можно построить векторные диаграммы по результатам моделирования в Simulink?

7 Каким образом можно построить топографические диаграммы по результатам моделирования в Simulink?

Лабораторная работа № 5

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ БЛОКА POWERGUI В СИСТЕМЕ MATLAB-SIMULINK

Цель работы: изучение дополнительных возможностей блока **Powergui** по заданию начальных условий, определению полного сопротивления (импеданса) цепи и выполнению гармонического анализа цепи.

Рабочее задание

1 Запустить программу MATLAB, перейти в среду Simulink и сохранить файл под именем **model_5_1** на диске в своей папке.

2 Собрать модель, приведенную на рисунке 1. Обратить внимание на полярность подключения элементов друг к другу.

Задать параметры элементов цепи из таблицы 1 в зависимости от номера варианта. В таблице 1 параметр E – постоянное напряжение для первой модели или действующее значение переменного напряжения для второй модели. Для всех вариантов значение L, в миллигенри, равно значению R, в омах, минус 40.

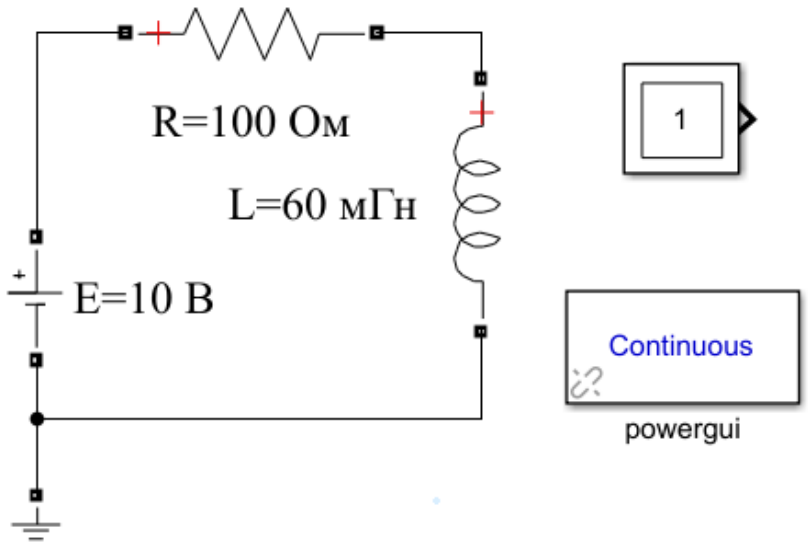


Рисунок 1

Добавить в схему блок **Powergui** и установить в нем на закладке **Solver** непрерывный режим моделирования **Continuous**.

Таблица 1

		Номер варианта							
E, В	5	1	9	17	25	33	41	49	1000
	6	2	10	18	26	34	42	50	900
	7	3	11	19	27	35	43	51	800
	8	4	12	20	28	36	44	52	700
	9	5	13	21	29	37	45	53	600
	10	6	14	22	30	38	46	54	500
	11	7	15	23	31	39	47	55	400
	12	8	16	24	32	40	48	56	300
R, Ом		70	80	90	100	110	120	130	f, Гц

Добавить в модель блок **Multimeter** и задать в модели необходимые настройки, чтобы получить в окне **Simulation result for**: **Multimeter** временную диаграмму тока в цепи.

З Перед запуском полученной блок-схемы на моделирование необходимо установить требуемые параметры моделирования.

Примечание. *Обратите внимание на то, что при моделировании энергетических объектов в Simulink момент времени, равный 0, воспринимается как начало работы цепи (включение источника), следовательно, ток в индуктивности до начала моделирования равняется нулю. Так как моделируемая электрическая цепь содержит реактивный элемент индуктивности L, то в соответствии с первым законом коммутации ток через индуктивность не может меняться скачком.*

Скорость изменения тока определяется постоянной времени цепи τ. Для данной цепи постоянная времени τ равна

$$\tau = L / R = 0{,}06 / 100 = 0{,}0006 \text{ с}.$$

Выбрать время окончания моделирования (**Stop time:**) равным 5τ для своего варианта для схемы на рисунке 1 5τ = 0,003 с.

Выбрать для параметра **Solver:** метод моделирования общего назначения **ode45** с переменным шагом (**Variable-step**). Остальные параметры можно оставить по умолчанию.

Начать моделирование с помощью команды **Simulation ⇒ Run**. В результате откроется графическое окно **Simulation result for: Multimeter** с результатами моделирования (рисунок 2).

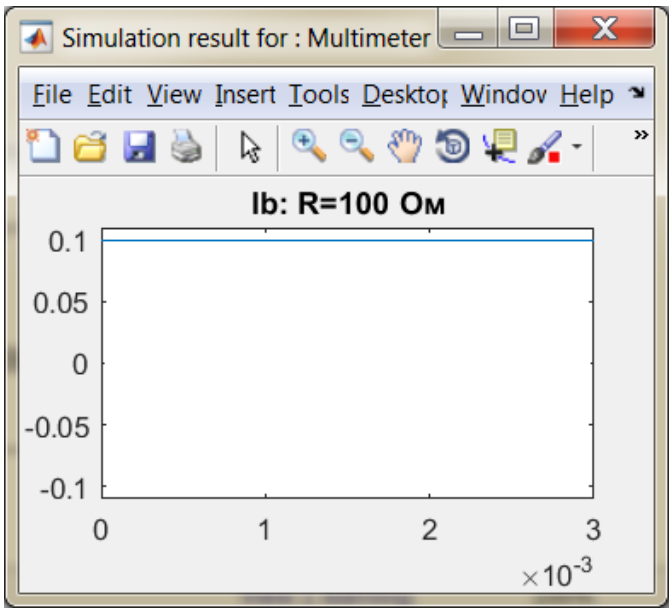


Рисунок 2

Установившееся значение тока в схеме рисунка 1 будет определяться как E/R = 100 мА, так как на постоянном токе реактивное индуктивное сопротивление равно нулю. Как видно из графика, величина тока 100 мА не меняется на всем протяжении моделирования, что противоречит первому закону коммутации. Это объясняется тем, что в непрерывном режиме моделирования **Continuous** для блока **Powergui** в качестве начальных условий для расчета в Simulink принимает результаты расчета установившегося режима **Steady State.**

Отчет

Вставить в отчет по лабораторной работе блок-схему модели, расчет постоянной времени τ и установившегося значения тока, а также результаты моделирования из пп. 2–3 для своего варианта. Сделать выводы.

4 Перед началом очередного этапа моделирования следует закрыть предыдущее графическое окно **Multimeter**.

На закладке **Tools** блока **Powergui** принудительно задать нулевые начальные условия для тока через индуктивность, нажав кнопку **Initial State** (Установка начальных состояний). В результате откроется окно на рисунке 3, в котором необходимо для параметра **Force initial electrical** вместо значения **To Steady State** выбрать значение **To Zero**.

После повторного запуска модели на моделирование откроется графическое окно **Simulation result for: Multimeter** с результатами моделирования (рисунок 4), которые уже не противоречат первому закону коммутации. Ток через индуктивность плавно от нуля изменяется до своего установившегося значения.

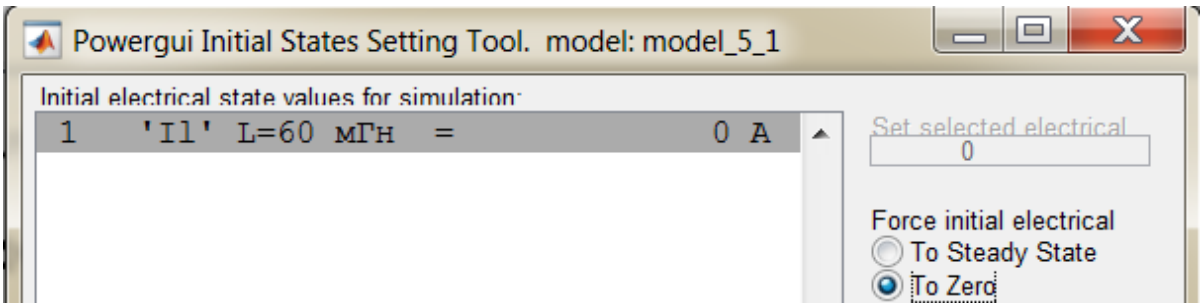


Рисунок 3

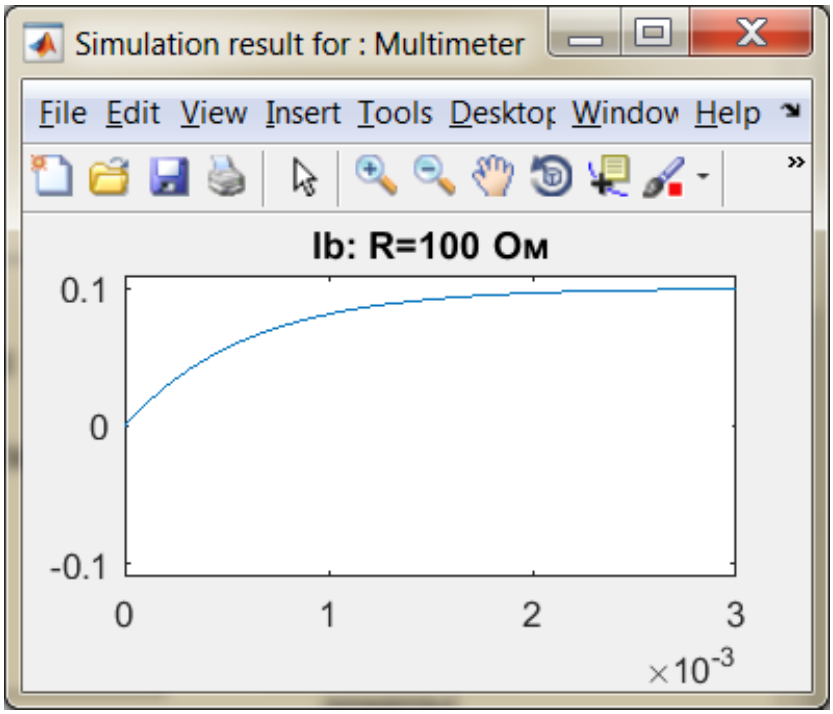


Рисунок 4

5 Заменить в схеме рисунка 1 источник постоянного напряжения на источник гармонического напряжения **AC Voltage Source** (рисунок 5). Задать значения параметров элементов, а также частоту f, в герцах, и амплитудное значение выходного напряжения источника исходя из его действующего значения, приведенного в таблице 1, в зависимости от номера варианта. Для модели на рисунке 5 Em = 14 В, а f = 1000 Гц. Начальную фазу источника взять равной 90°.

Позиционное обозначение источника задано с учетом того, что $\sin(\omega t + 90°) = \cos(\omega \cdot t)$, а $\omega = 2\pi f \approx 6280$ рад/с.

Перед запуском полученной блок-схемы на моделирование сначала необходимо установить требуемые параметры моделирования. Выбрать время окончания моделирования (**Stop time:**) равным четырем периодам гармонического сигнала. Для модели на рисунке 5 зададим **Stop time:– 0.004**.

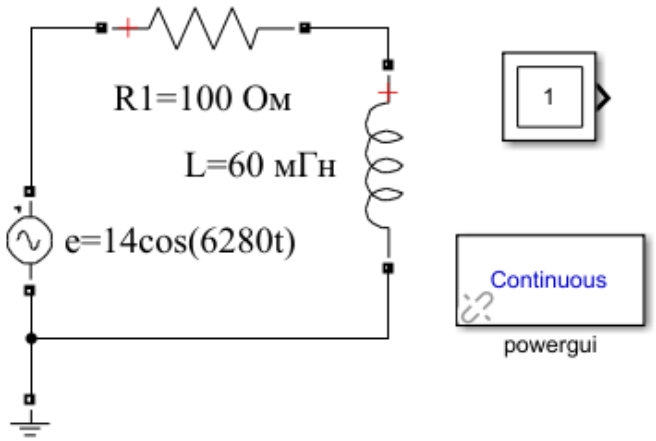


Рисунок 5

На рисунках приведены результаты моделирования для различных значений начальных условий тока через индуктивность: для **To Steady State** (рисунок 6) и **To Zero** (рисунок 7).

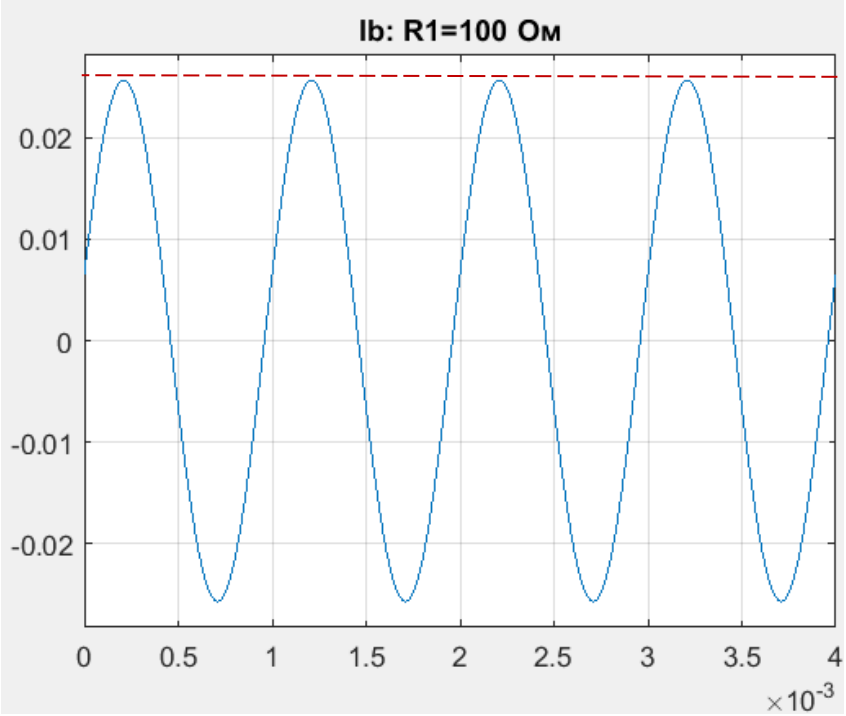


Рисунок 6

В первом случае уже в начальный момент времени сигнал равен установившемуся значению, поэтому гармонические колебания устанавливаются сразу без переходного процесса. Во втором случае в начальный момент времени сигнал равен нулю, и гармонические колебания устанавливаются не сразу, а примерно через 3τ, переходный процесс завершается с погрешностью примерно 5 %.

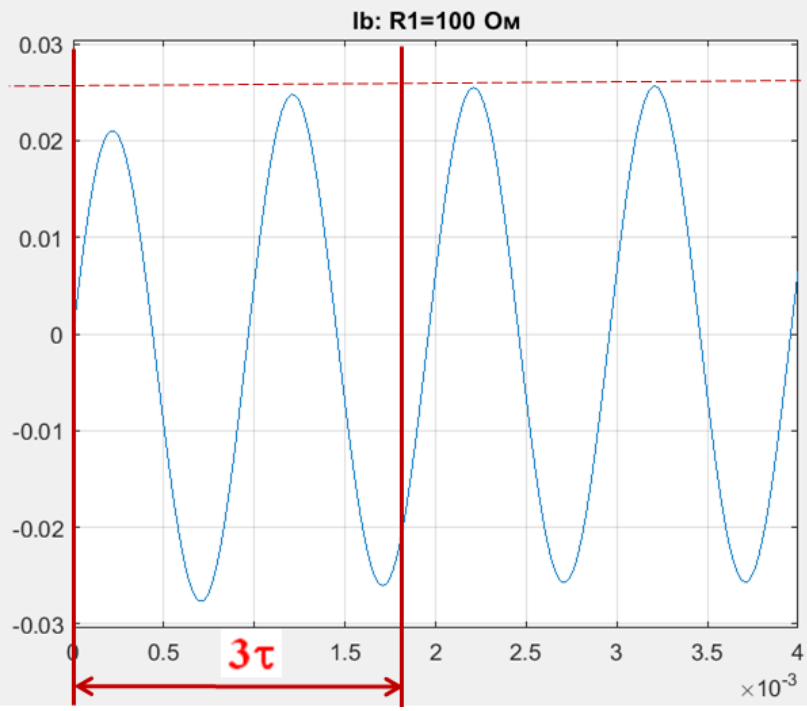


Рисунок 7

Вставить в отчет по лабораторной работе блок-схему модели и результаты моделирования из п. 4. Сделать выводы о времени установления выходного напряжения с погрешностью примерно 5 %.

6 Смоделировать переходный процесс в разветвленной цепи переменного тока при замыкании ключа в одной из ветвей (рисунок 8).

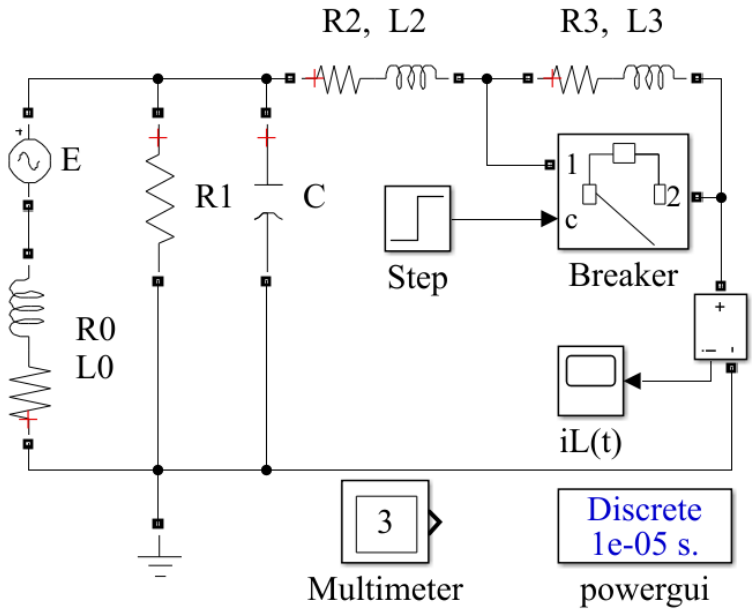


Рисунок 8

В качестве ключевого элемента выбрать блок **Breaker**, а для управления им – блок **Step**.

Параметры сопротивления R и источника гармонического сигнала E в зависимости от номера варианта взять из таблицы 1.

Для всех вариантов взять значения параметров элементов через значение сопротивления R, в омах, для своего варианта как:

– индуктивность L2 = L3 = R, L0 = R/100 мГн;

– сопротивление R1 = R2 = R3 = R, R0 = R/100 Ом;

– емкость C = R/10 мкФ.

Предусмотреть вывод в окне **Simulation result for: Multimeter** осциллограмм двух периодов сигналов на выходе E, а также напряжений на емкости C и на участке цепи с R2, L2 для двух различных моментов замыкания ключа по отношению к периоду гармонического сигнала T.

Следует иметь в виду, что для электрической схемы, имеющей ключевые элементы, дискретизация электрической модели позволяет значительно увеличить скорость ее расчета.

Для этого необходимо выполнить двойной щелчок по блоку **Powergui**. В результате откроется окно **Block Parameters: powergui**, на закладке **Solver** которого требуется выбрать режим дискретизации моделирования **Discrete**.

Точность расчета при моделировании зависит от шага дискретизации: чем меньше шаг, тем больше точность. Для дискретизации двух периодов гармонического сигнала вполне достаточно 100–200 точек, чтобы получить визуально плавный сигнал без «ступенек».

Для модели рисунка 8 с частотой гармонического сигнала 500 Гц был выбран шаг дискретизации $\Delta t = 10$ мкс.

Таким образом, расчет модели проводится по 201 точке, включая точку при $t = 0$.

На рисунке 9 приведен пример осциллограмм при замыкании ключа в момент времени, равный $T/4 = 0{,}0005$ с.

На третьей осциллограмме видно, что на участке цепи с R2, L2 происходит скачок напряжения в момент коммутации. Это не противоречит законам коммутации, так как напряжение на индуктивности может меняться скачком.

При этом ток через индуктивность не может меняться скачком, что видно из осциллограммы (рисунок 10) в окне **Scope**, где показано как изменяется во времени **iL2(t)**.

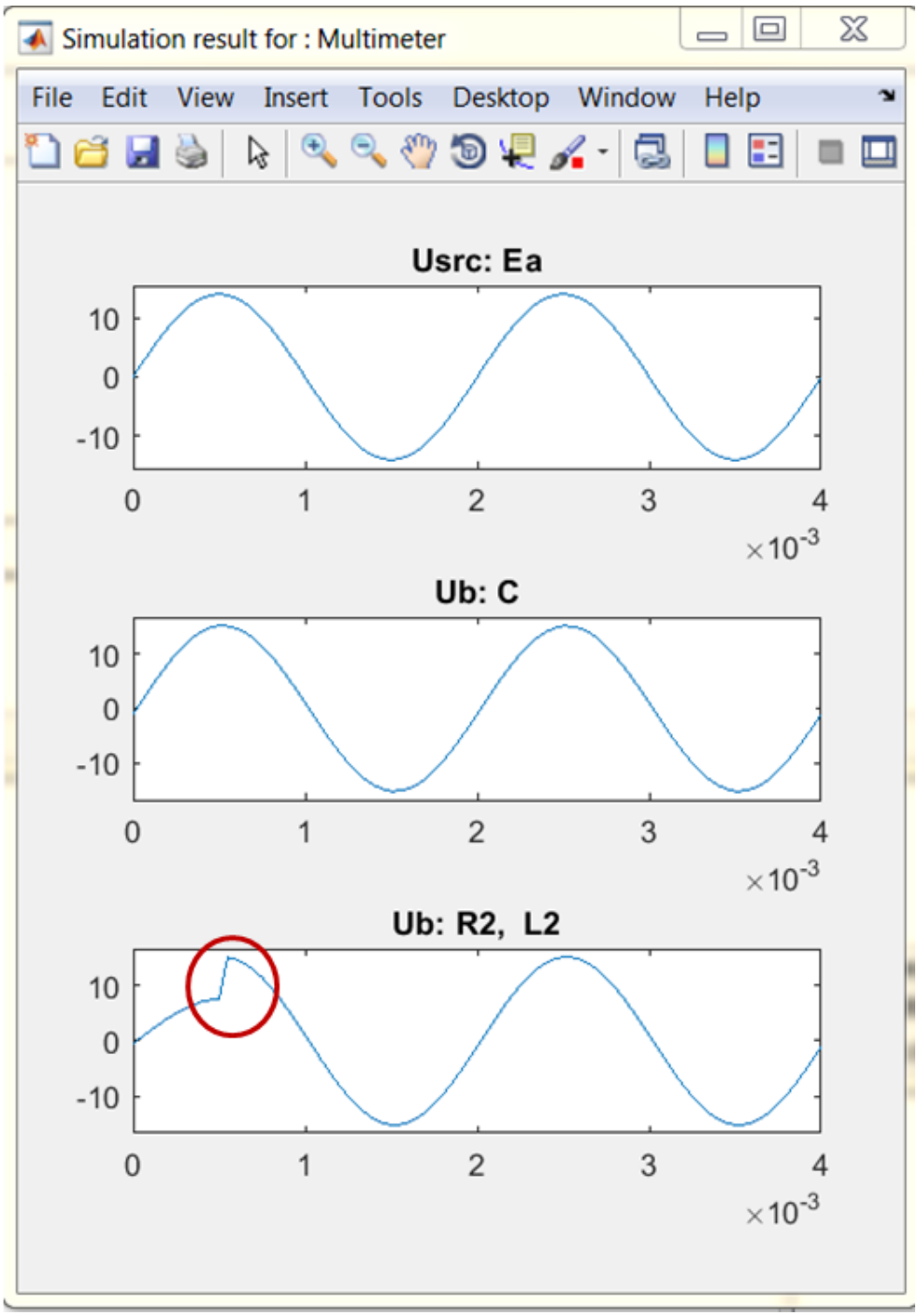


Рисунок 9

Вставить в отчет по лабораторной работе блок-схему модели и результаты ее моделирования из п. 6 для своего варианта. Сделать выводы.

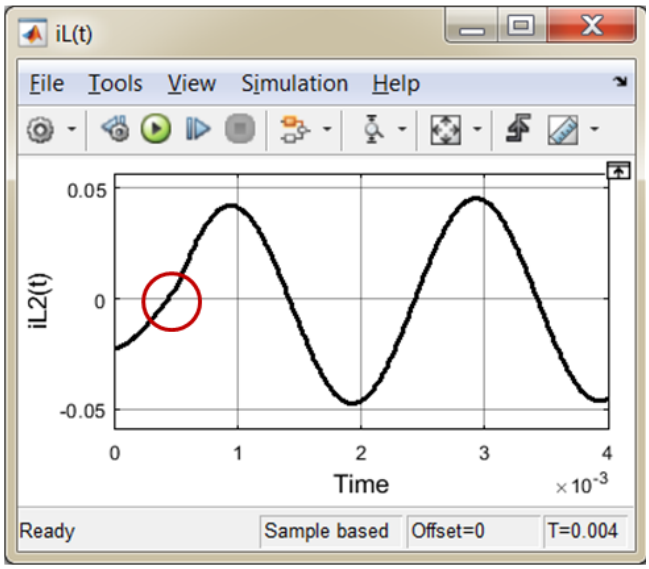


Рисунок 10

7 Создать новую модель, включающую две параллельные ветви R, C и R, L, а также блоки **Impedance Measurements** и **Powergui** (рисунок 11), и сохранить файл под именем **model_5_3** на диске в своей папке.

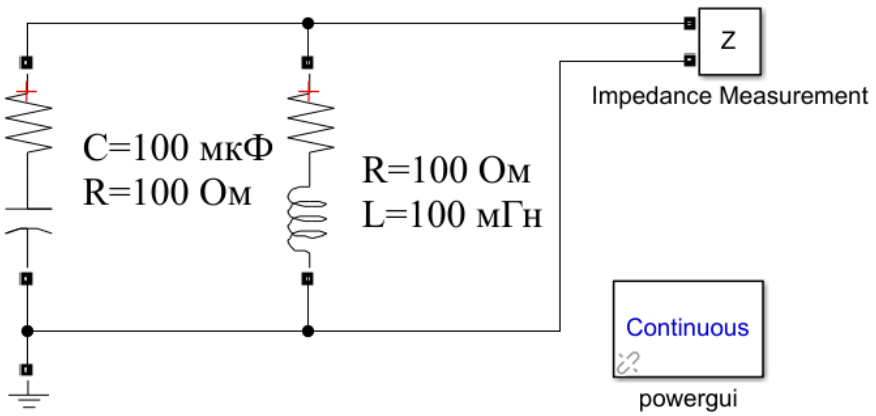


Рисунок 11

Полярность подключения элементов друг к другу не имеет значения. Задать параметры элементов цепи из таблицы 1 в зависимости от номера варианта. Для всех вариантов значения индуктивности, в миллигенри, и емкости, в микрофарадах, равно значению R, в омах.

Включить в цепь блок **Impedance Measurements** для проведения измерения полного сопротивления (*импеданса*) **Z** между двумя узлами линейной электрической цепи. Этот блок состоит из источника тока $J(p)$ и вольтметра $Vz(p)$, подключенного между его входами. Импеданс вычисляется как передаточная функция $Z(p) = \dfrac{Vz(p)}{I(p)}$.

При этом электрическая цепь обязательно должна быть замкнута. Если же требуется измерить импеданс отдельного (разомкнутого) участка цепи, то его следует шунтировать резистором с достаточно большим сопротивлением, не изменяющим существенно общее сопротивление цепи.

Для проведения измерения необходимо на закладке **Tools** блока **Powergui** нажать кнопку **Impedance Measurements**.

При этом откроется окно **Powergui Impedance vs Frequency Measurement** (рисунок 12) с результатами расчета импеданса в виде двух частотных зависимостей: **Impedance** – модуля импеданса от частоты; **Frequency** – аргумента импеданса от частоты.

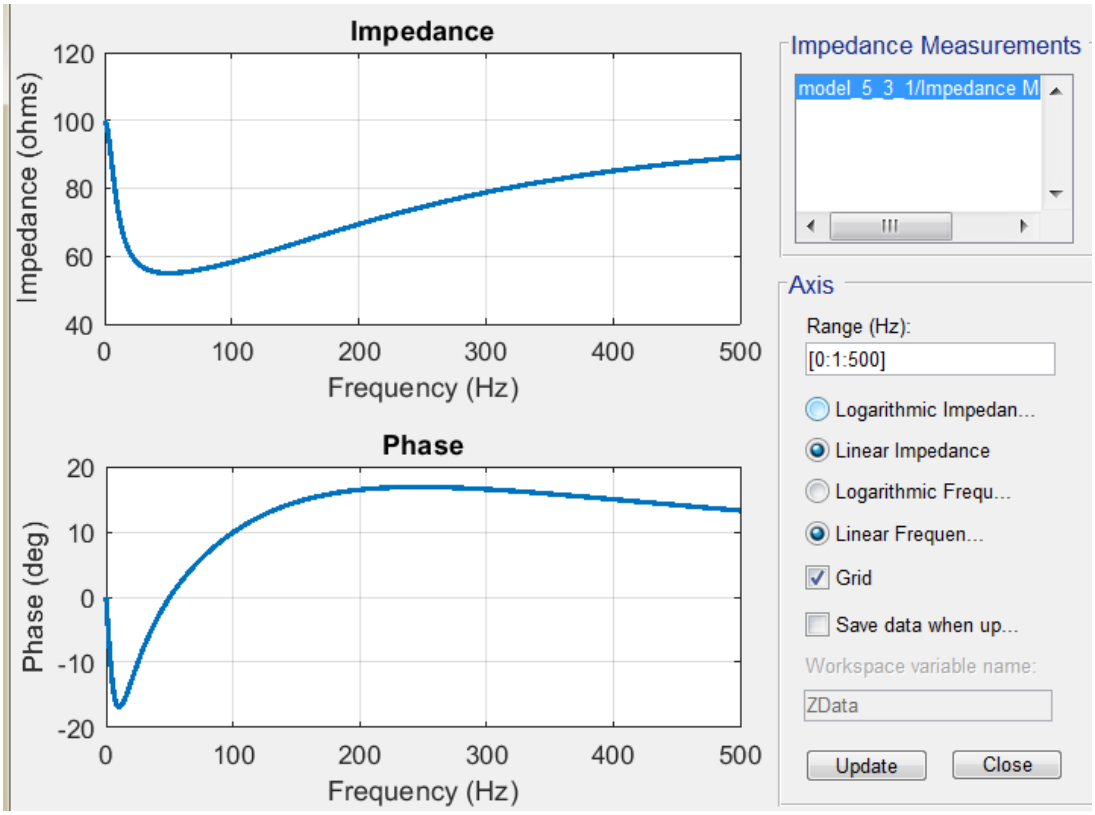


Рисунок 12

Заметим, что первая зависимость получила название амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), а вторая – фазочастотной характеристики (ФЧХ).

Включить сетку **Grid**, поставив флажок в соответствующем окне.

Выбрать логарифмическую шкалу частот **Logarithmic Frequency** (рисунок 13). Сравнить полученные графики с графиками при линейной шкале частот.

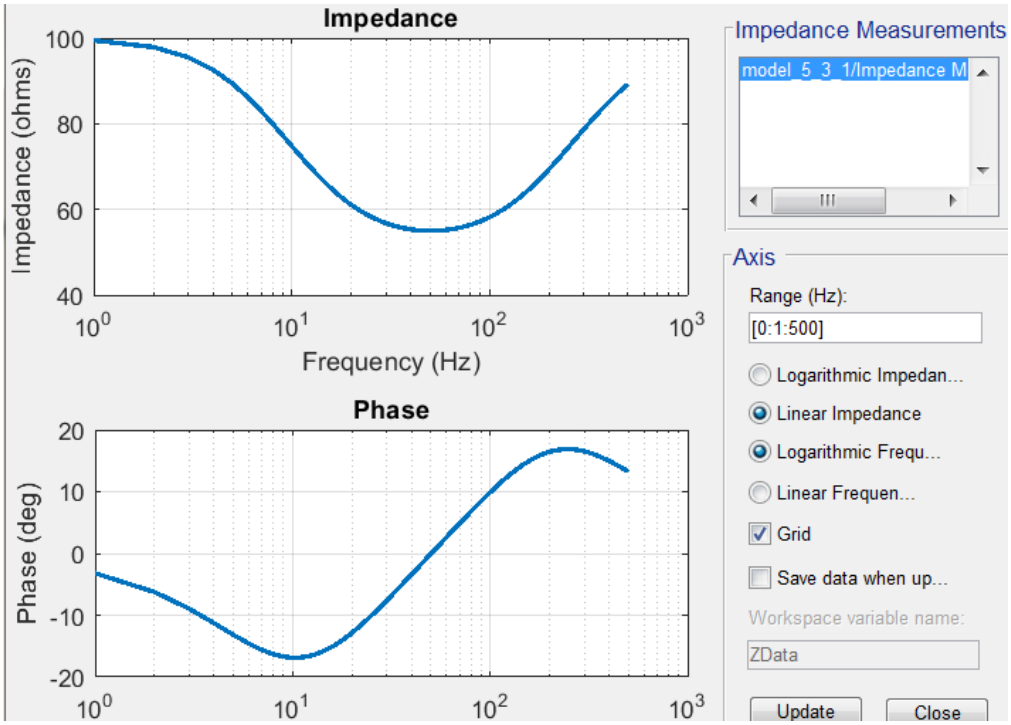


Рисунок 13

Задать верхнее значение диапазона изменения частоты **Range** в десять раз большим значения частоты, указанного в таблице 1 для своего варианта, и нажать клавишу **Update**.

Результаты моделирования приведены на рисунке 14 для линейной шкалы частот **Linear Frequency**, а на рисунке 15 – для логарифмической шкалы частот **Logarithmic Frequency**.

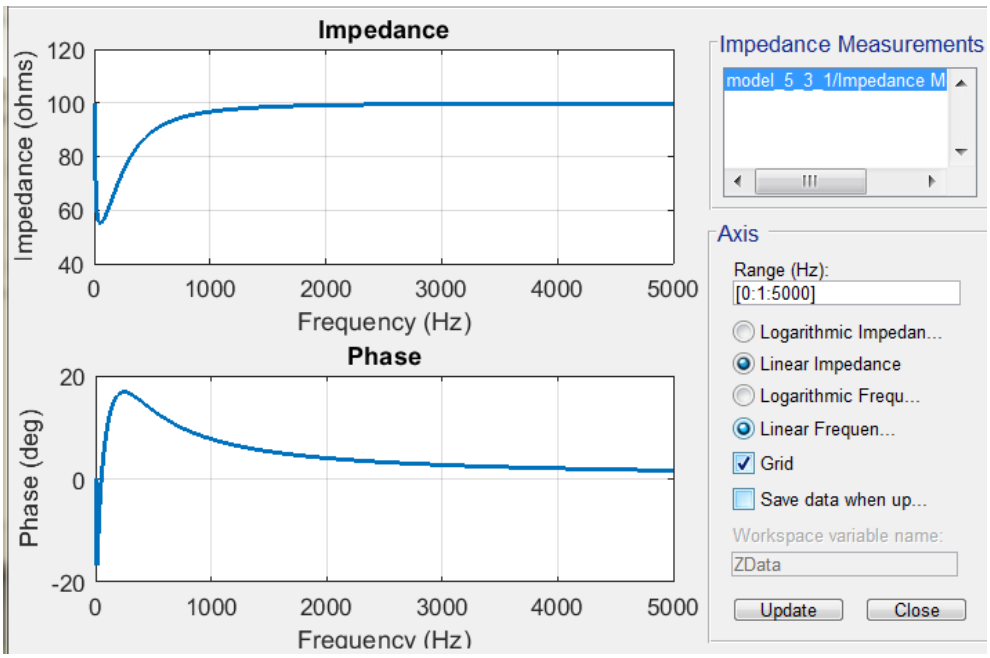


Рисунок 14

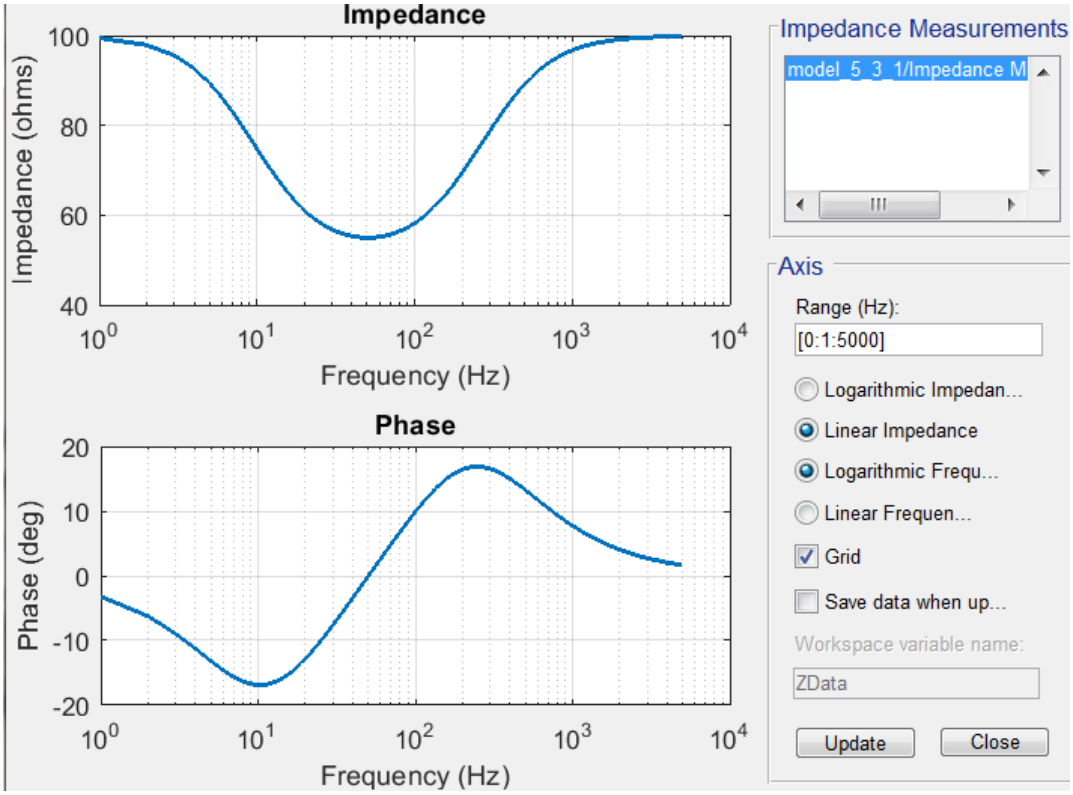


Рисунок 15

Провести измерение полного сопротивления для всех четырех элементов цепи на рисунке 11.

Вставить в отчет по лабораторной работе блок-схемы всех пяти моделей и результаты их моделирования из п. 7. Проанализировать полученные зависимости и сделать выводы.

8 Провести гармонический анализ заданных электрических цепей, используя быстрое преобразование Фурье (**fast Fourier transform** – **FFT**) в среде Simulink.

Создать новую модель (рисунок 16), включающую три источника гармонического сигнала с кратными частотами и сопротивление R, указанное в таблице 1, для своего варианта. На рисунке 16 R = 100 Ом. Сохранить файл под именем **model_5_4** на диске в своей папке.

Задать частоту источника **e1** из таблицы 1 для вашего номера варианта. При этом будем считать гармонический сигнал **e1** главной гармоникой суммарного сигнала. Задать значения частоты для второго и третьего источников, соответственно, в два и три раза больше, чем соответствующее значение частоты главной гармоники. Значение амплитуды источника **e1** задать из таблицы 1, а источника **e2** и **e3** выбрать произвольно.

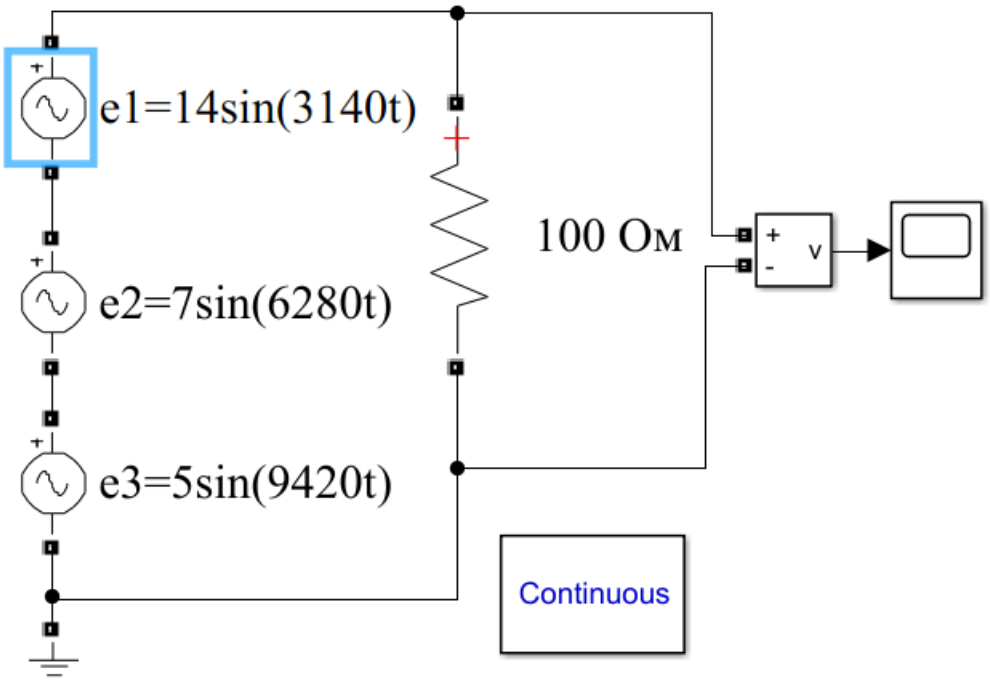


Рисунок 16

Подобрать время моделирования равным двум периодам главной гармоники. Запустить схему на моделирование, проанализировать форму сигнала на экране **Scope** (рисунок 17) и сделать выводы.

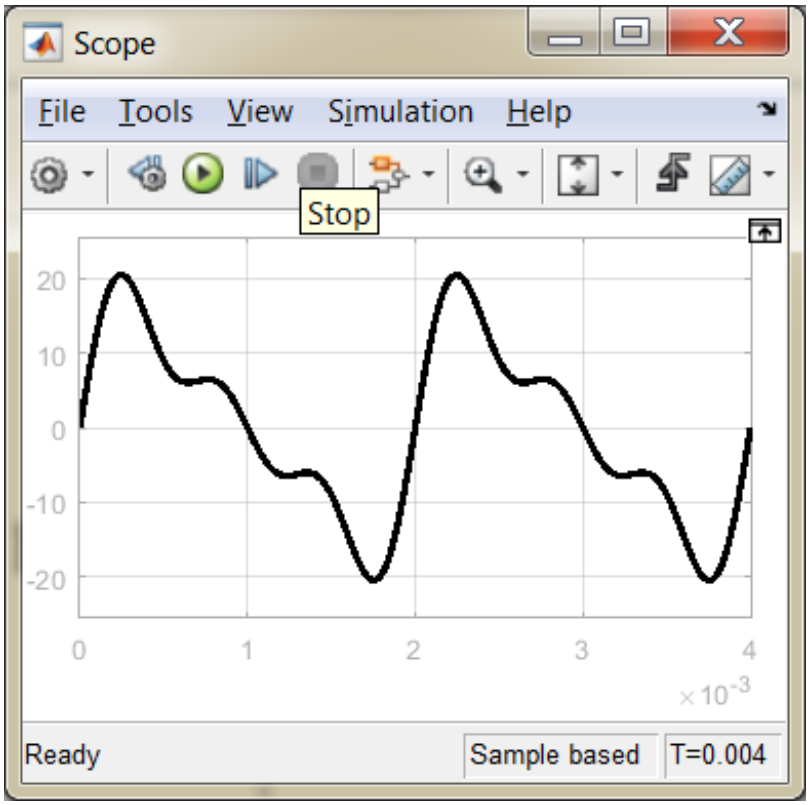


Рисунок 17

Провести гармонический анализ напряжения на резисторе (см. рисунок 16). Для этого необходимо предусмотреть вывод результатов моделирования исследуемого сигнала в рабочую область MATLAB, включив флажок **Log data to workspace** на закладке **Logging** блока **Scope**. Задать формат выводимых данных как **Structure With Time** (структура с полем время).

Запустить схему на моделирование и убедиться, что в окне **Workspace** появились данные под именем **ScopeData** и **tout**.

На закладке **Tools** блока **Powergui** запустить режим быстрого преобразования Фурье, нажав кнопку **FFT Analysis**. При этом откроется окно **Powergui FFT Analysis Tool** (рисунок 18), в области **Signal** которого по данным **ScopeData** из окна **Workspace** будет построен такой же сигнал, как и на экране блока **Scope**.

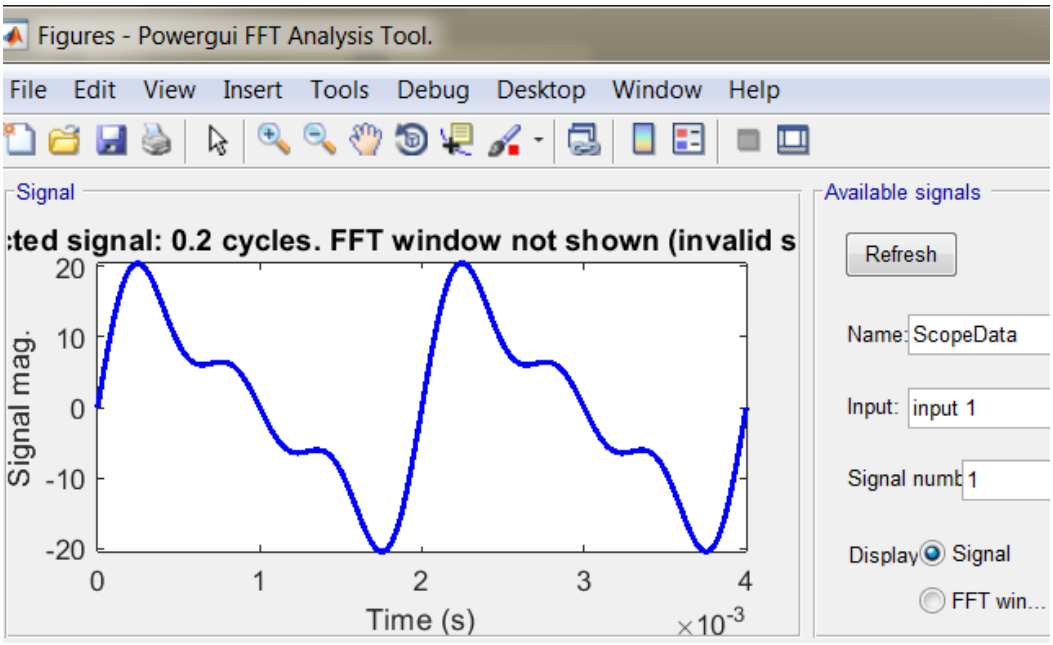


Рисунок 18

Выполнить необходимые настройки в области **FFT settings** в окне **Powergui FFT Analysis Tool** (рисунок 19):

– в окне **Fundamental frequency (Hz)** задать значение частоты главной гармоники;

– в окне **Max frequency (Hz)** задать значение частоты, в четыре раза большее частоты главной гармоники;

– в окне **Max frequency for THD computation** (максимальная частота для вычисления коэффициента нелинейных искажений THD) выбрать из списка значение **Same as Max frequency** (соответствующее максимальной частоте);

– в окне **Display style** (стиль отображения) выбрать из списка способ отображения результатов быстрого преобразования Фурье в виде гистограммы в относительных единицах по отношению к заданному базовому значению – **Bar (relative to specified base)**;

– в окне **Base value** задать базовое значение равным **1.0**;

– в окне **Frequency axis** задать градуировку частот, в герцах (**Hertz**).

Нажать кнопку **Display**. В результате на графике в области **FFT Analysis** появятся результаты гармонического анализа в виде гистограммы (см. рисунок 19).

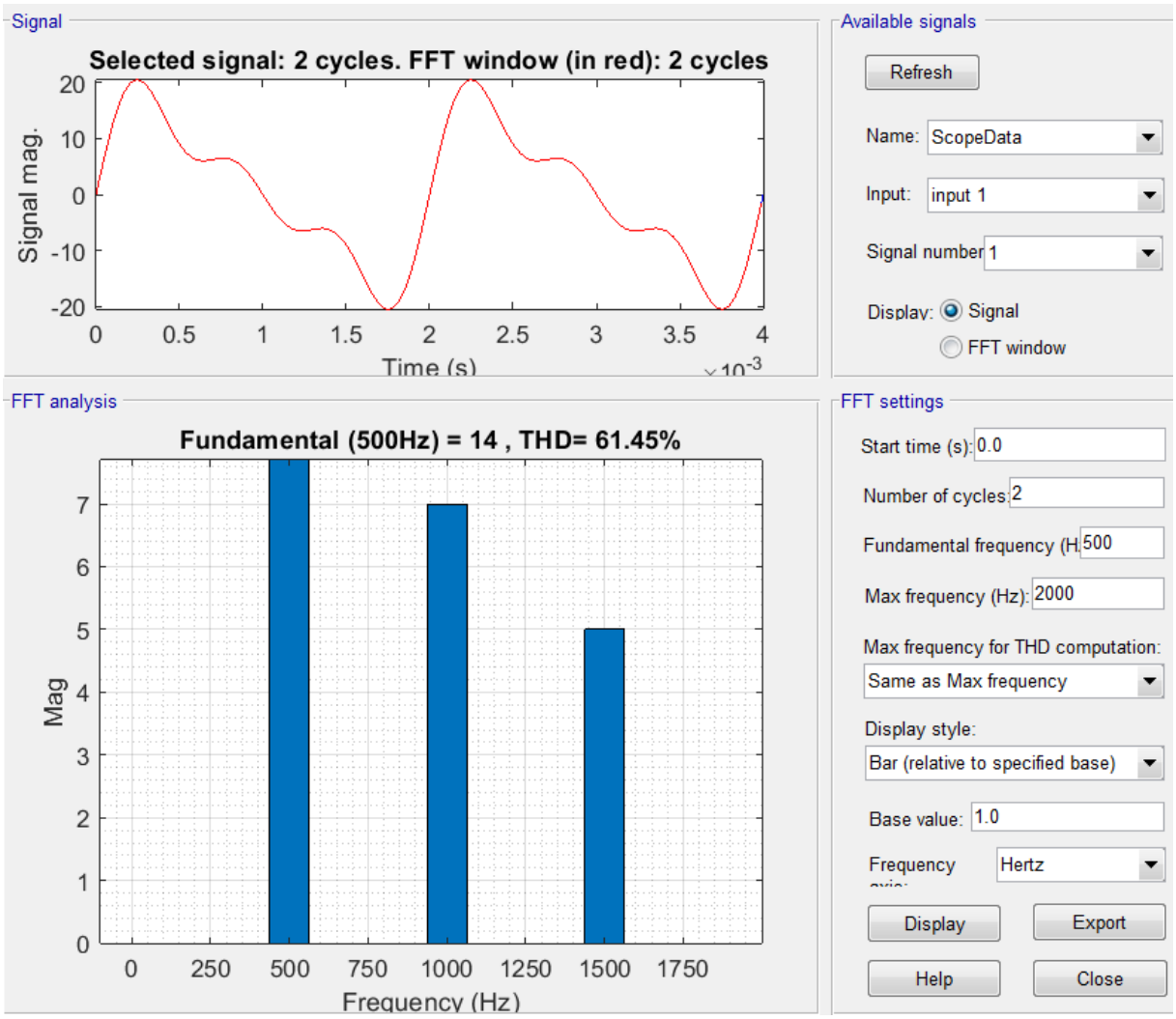


Рисунок 19

Отчет

Вставить в отчет по лабораторной работе блок-схему модели и результаты моделирования из п. 8. Проанализировать полученные зависимости и сделать выводы.

9 Создать новую модель (рисунок 20), включающую генератор прямоугольных импульсов **Pulse Generstor**, блок управляемого источника напряжения **Controlled Voltage Source**, сопротивление R, указанное в таблице 1 для своего варианта. В модели на рисунке 20 используется значение R, равное 100 Ом.

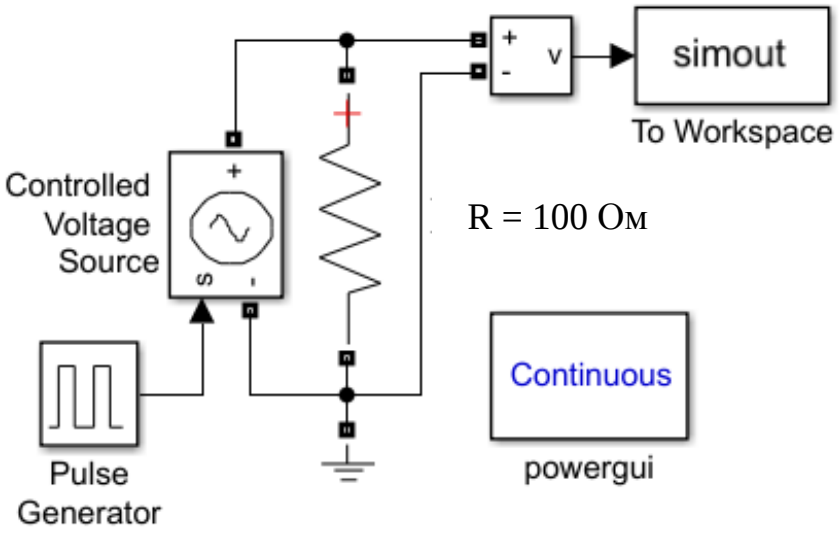


Рисунок 20

Для вывода исследуемого сигнала в рабочую область MATLAB включить в модель блок **To Workspace**, задав в его окне свойств имя переменной для хранения данных **simout** и формат выводимых данных **Structure With Time**.

Задать следующие значения параметров генератора прямоугольных импульсов:

– амплитуда прямоугольных импульсов E в соответствии с таблицей 1 для своего номера варианта;

– период прямоугольных импульсов равным периоду сигнала, заданного в таблице 1 для своего номера варианта;

– скважность **Puls Width (% of period)** равной 10 %.

Оставить по умолчанию значения параметров управляемого источника напряжения **Controlled Voltage Source**, вырабатывающего напряжение на **P**-выходах в соответствии с сигналом управления, поступающим на его **M**-вход.

Подобрать время моделирования равным двум периодам генератора прямоугольных импульсов и запустить схему на моделирование.

Сохранить файл под именем **model_5_5** на диске в своей папке.

Запустить схему на моделирование и убедиться, что в окне **Workspace** появились данные под именем **simout** и **tout.**

Провести гармонический анализ напряжения на резисторе, используя режим быстрого преобразования Фурье.

Установить в окне **Powergui FFT Analysis Tool** в разделе **FFT settings** значения параметра в окне **Max frequency (Hz)** в двадцать раз больше, чем значения частоты прямоугольных импульсов (рисунок 21).

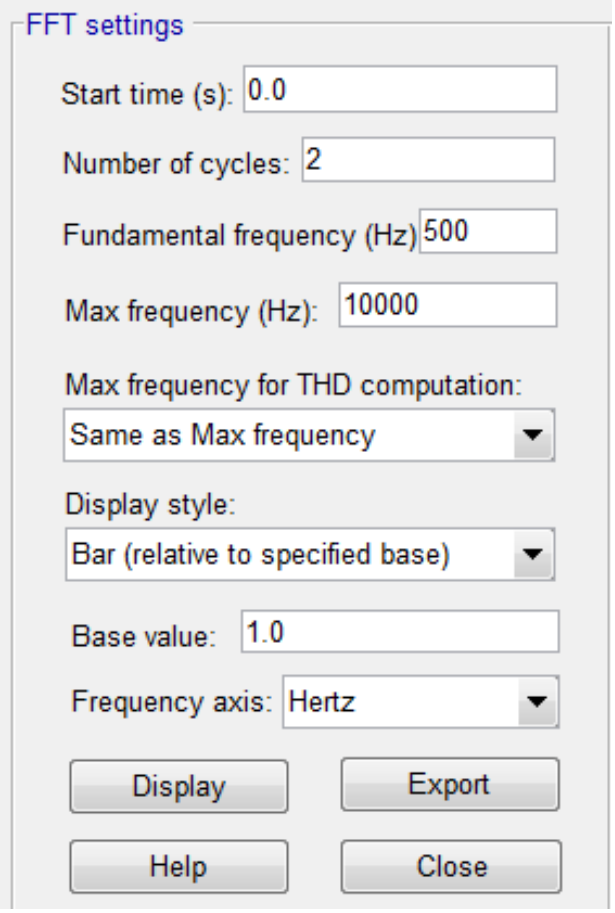


Рисунок 21

При нажатии клавиши **Display** в разделе **FFT analysis** будет построен спектр напряжения на резисторе R.

На рисунке 22 приведен спектр в диапазоне частот от 0 до 10 000 Гц.

Установить в окне **Powergui FFT Analysis Tool** в разделе **FFT settings** значения параметра в окне **Max frequency (Hz)** в сто раз больше, чем значения периода прямоугольных импульсов.

При нажатии на клавишу **Display** в разделе **FFT analysis** будет построен спектр напряжения на резисторе R в диапазоне частот от 0 до 50 000 Гц (рисунок 23).

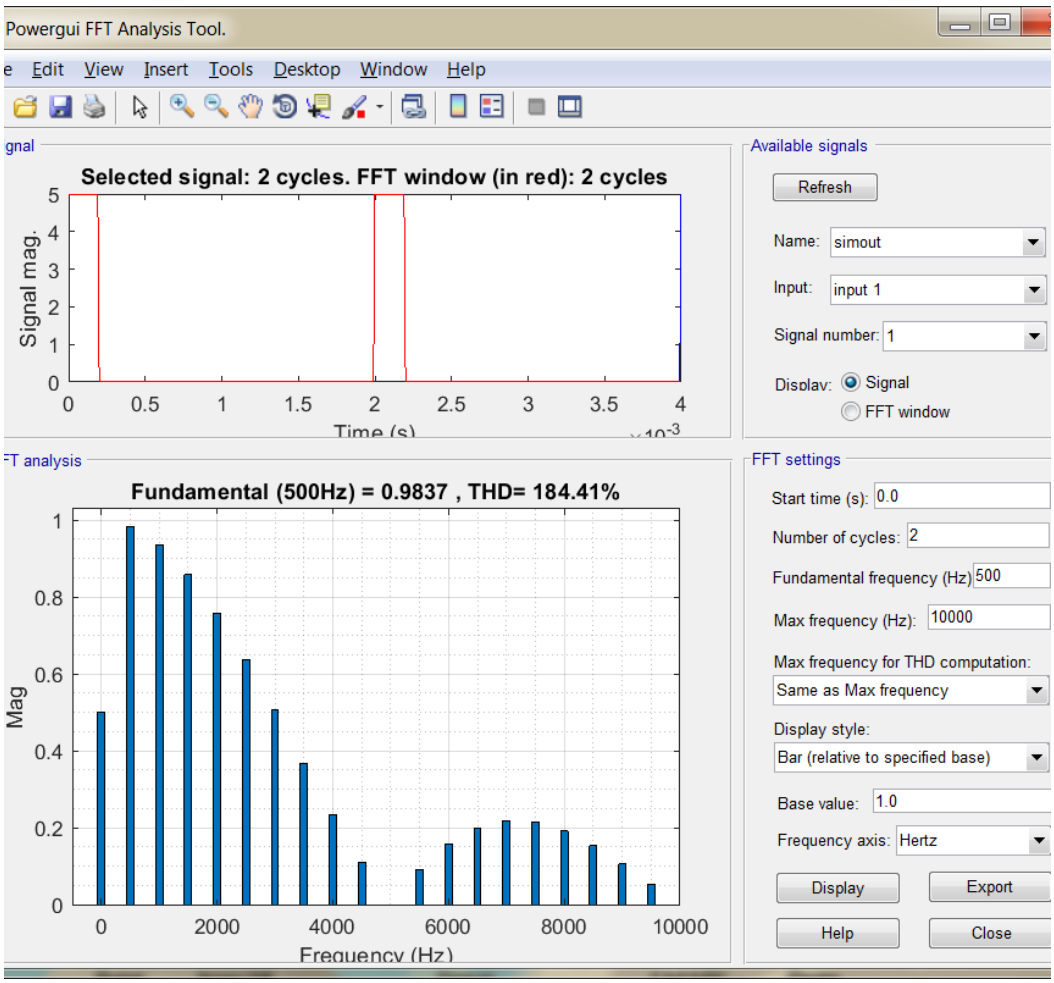


Рисунок 22

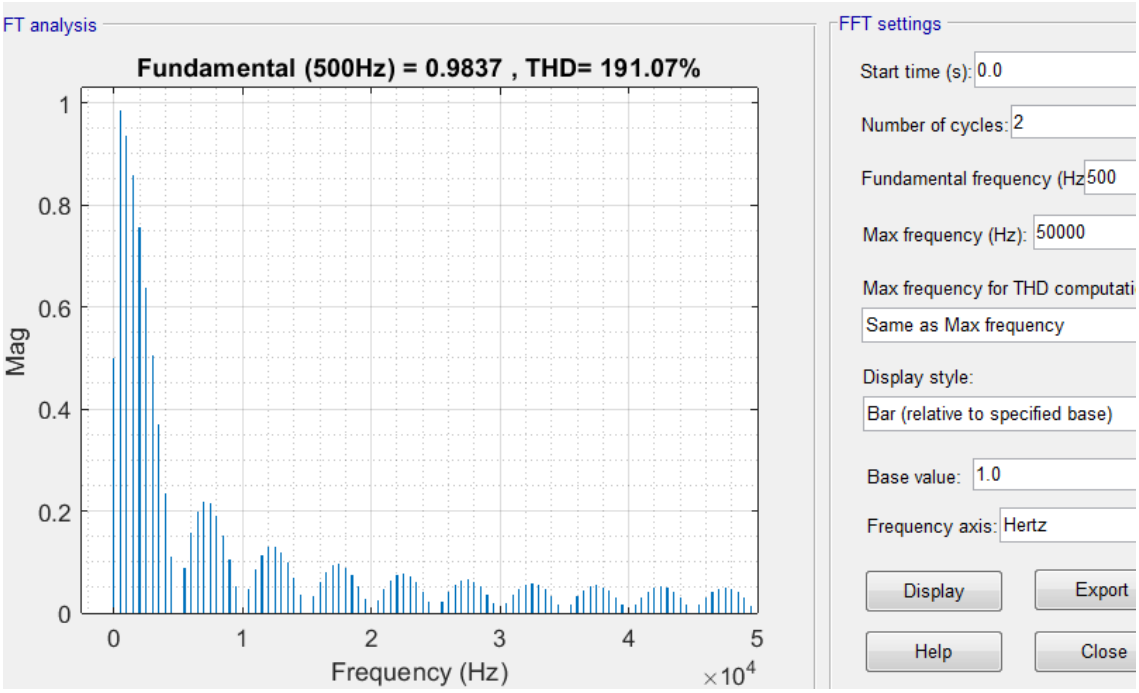


Рисунок 23

Повторить п. 9 для скважности сигналов генератора прямоугольных импульсов, равной 50 %. Все остальные значения параметров оставить без изменений.

Вставить в отчет по лабораторной работе блок-схему модели и результаты моделирования из п. 9. Провести анализ полученных спектров и сделать выводы о том, как изменяется спектр прямоугольного сигнала при изменении скважности.

Контрольные вопросы

1 Какое значение использует блок **Powergui** для расчета в Simulink в качестве начальных условий при непрерывном режиме моделирования **Continuous**?

2 Как задать нулевые начальные условия для расчета в Simulink при непрерывном режиме моделирования ?

3 На что влияет значение постоянной времени цепи?

4 Каким образом можно смоделировать переходный процесс в цепи с коммутирующими элементами?

5 Как получить АЧХ и ФЧХ модели электрической цепи в Simulink?

6 Как блок **Impedance Measurements** должен подключаться к схеме?

7 Какие настройки имеются в окне **Powergui Impedance vs Frequency Measurement**?

8 Каким образом проводится гармонический анализ электрических цепей в среде Simulink?

9 Каким образом можно передать результаты моделирования исследуемого сигнала в рабочую область MATLAB?

10 Какие настройки предусмотрены в окне **Powergui FFT Analysis Tool**?

ПРОЕКТНАЯ РАБОТА ПО КУРСУ «КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ»

Рабочее задание

1 Используя рабочее пространство MATLAB-Simulink, смоделировать схему электрической цепи, показанной на рисунке 1, для значений параметров ЭДС E_i и положения ключей S_i, указанных в таблице 1, в зависимости от варианта задания.

2 Для всех вариантов значение сопротивления R, в омах, равно номеру варианта $E_0 = 10$ В.

3 По результатам моделирования рассчитать в MATLAB значение выходного напряжения $U_{вых}$.

4 Оформить отчет, включив в него результаты моделирования и расчета.

Построить по результатам моделирования топографическую диаграмму для внешнего контура. Сделать вывод о выполнении второго закона Кирхгофа.

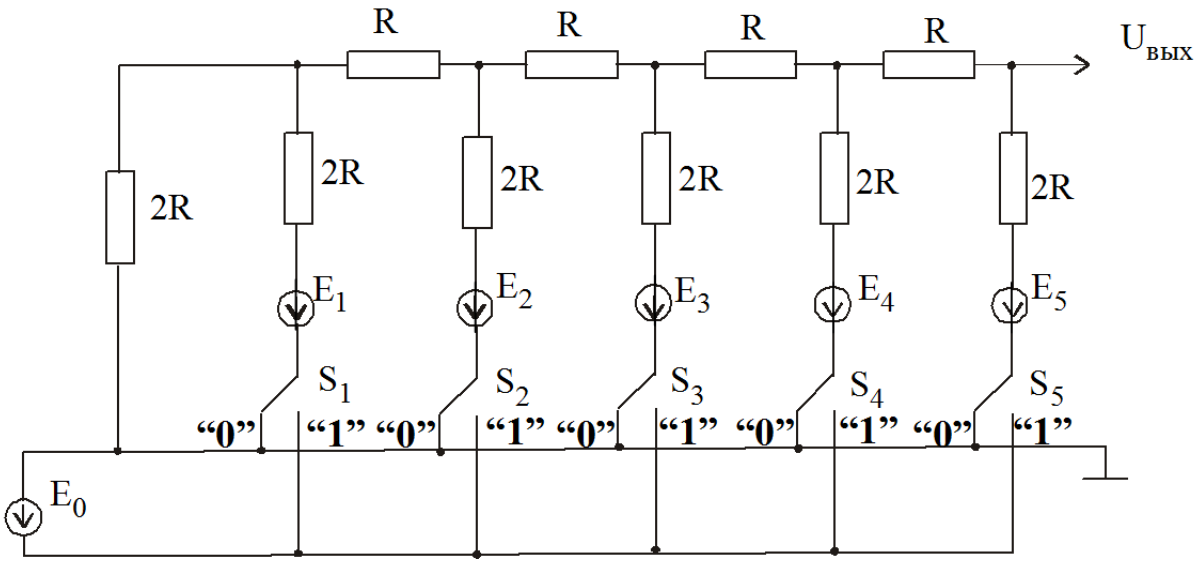


Рисунок 1

Таблица 1

Номер варианта	Положение i-го ключа					E_1, В	E_2, В	E_3, В	E_4, В	E_5, В
	1	2	3	4	5					
1	0	0	0	0	1	1	2	3	4	–
2	0	0	0	1	0	2	3	4	–	5
3	0	0	0	1	1	3	4	–	5	6
4	0	0	1	0	0	4	–	5	6	10
5	0	0	1	0	1	–	5	6	2	3
6	0	0	1	1	0	1	2	3	4	–
7	0	0	1	1	1	2	3	4	–	5
8	0	1	0	0	0	3	4	–	5	6
9	0	1	0	0	1	4	–	5	6	10
10	0	1	0	1	0	–	5	6	2	3
11	0	1	0	1	1	1	2	3	4	–
12	0	1	1	0	0	2	3	4	–	5
13	0	1	1	0	1	3	4	–	5	6
14	0	1	1	1	0	4	–	5	6	10
15	0	1	1	1	1	–	5	6	2	3
16	0	0	0	0	1	1	2	3	4	–
17	0	0	0	1	0	2	3	4	–	5
18	0	0	0	1	1	3	4	–	5	6
19	0	0	1	0	0	4	–	5	6	10
20	0	0	1	0	1	–	5	6	2	3
21	0	0	1	1	0	1	2	3	4	–
22	0	0	1	1	1	2	3	4	–	5
23	0	1	0	0	0	3	4	–	5	6
24	0	1	0	0	1	4	–	5	6	10
25	0	1	0	1	0	–	5	6	2	3
26	1	1	0	1	1	1	2	3	4	–
27	1	1	1	0	0	2	3	4	–	5

Продолжение таблицы 1

Номер варианта	Положение i-го ключа					E_1, В	E_2, В	E_3, В	E_4, В	E_5, В
	1	2	3	4	5					
28	1	1	1	0	1	3	4	–	5	6
29	1	1	1	1	0	4	–	5	6	10
30	1	1	1	1	1	–	5	6	2	3
31	1	1	0	0	0	1	2	3	4	–
32	0	1	0	0	1	2	3	4	–	5
33	1	0	1	0	0	3	4	–	5	6
34	0	1	0	1	0	4	–	5	6	10
35	1	1	0	0	1	–	5	6	2	3
36	0	1	1	0	0	1	2	3	4	–
37	1	0	1	0	0	2	3	4	–	5
38	0	1	0	1	0	3	4	–	5	6
39	1	0	1	0	1	4	–	5	6	10
40	0	1	1	1	0	–	5	6	2	3
41	1	1	0	1	0	1	2	3	4	–
42	0	1	1	0	1	2	3	4	–	5
43	1	0	1	0	1	3	4	–	5	6
44	0	1	0	1	1	4	–	5	6	10
45	1	1	1	0	1	–	5	6	2	3
46	1	0	1	0	0	1	2	3	4	–
47	1	1	0	0	1	2	3	4	–	5
48	0	1	0	1	1	3	4	–	5	6
49	1	0	1	1	0	4	–	5	6	10
50	1	1	0	0	0	–	5	6	2	3

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 MATLAB.Exponenta – Центр компетенций компании MathWorks. – URL: http://matlab.exponenta.ru

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

3 Герман-Галкин, С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink : учебник / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург : Лань, 2013. – 448 с.

4 Моделирование в среде MATLAB-Simulink : метод. указания к лабораторным работам / сост.: А. И. Герасимов, В. В. Регеда, О. Н. Регеда. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. – 104 с. – URL: http://elib.pnzgu.ru/library/13135900

Учебное издание

Регеда Владимир Викторович,
Регеда Ольга Николаевна

ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В СИСТЕМЕ MATLAB-SIMULINK

Редактор *Н. А. Сидельникова*
Технический редактор *Р. Б. Бердникова*
Компьютерная верстка *Р. Б. Бердниковой*

Подписано в печать 24.08.2020. Формат 60×84$^{1}/_{16}$.
Усл. печ. л. 5,11. Тираж 75.
Заказ № 281.

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

Вниманию авторов!

Издательство ПГУ выпускает учебную, научную и художественную литературу, презентационную и акцидентную продукцию, а также полноцветные юбилейные и мемориальные издания в соответствии с ГОСТ 7.60–2003.

Издательство ПГУ принимает к изданию рукописи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий **2003 и выше**. Формат – А4, основной шрифт – Times New Roman, 14–16 pt через одинарный интервал (минимальный размер шрифта в таблицах и сносках – 12,5 pt). Тип файла в электронном виде – doc, docx.

Работа должна содержать индекс УДК, аннотацию.

Аннотация (ГОСТ 7.86–2003, ГОСТ 7.9–1995) включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели работы и ее результаты. В аннотации указывают, что нового несет в себе данный документ в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению. Аннотация может включать сведения о достоинствах произведения. Текст аннотации начинают фразой, в которой сформулирована главная тема документа. Заканчивается аннотация читательским адресом.

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте после ссылки на них (растровые рисунки предоставляются в виде отдельных файлов в формате jpg, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt. Рисунки должны быть доступны для правки!). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями, на все рисунки и таблицы в тексте должны быть ссылки.

Формулы в тексте выполняются только в редакторе формул **MathType версия 5.0** и выше. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц – прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования необходимо соблюдать и в рисунках.

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте ([1], [2], …). Номер источника указывается в квадратных скобках. Требования к оформлению списка литературы на русские и иностранные источники (ГОСТ 7.1–2003): для книг – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; для журнальных статей, сборников трудов – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; для материалов конференций – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, контактные телефоны.

Контакты Издательства ПГУ: (8412) 56-47-33, 36-84-91. E-mail: iic@pnzgu.ru

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. В. Регеда, О. Н. Регеда

ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В СИСТЕМЕ MATLAB-SIMULINK

Методические указания
к лабораторным работам

ПЕНЗА 2020

ПензГУ