

Міністерство світи і науки України  
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
фізико-технічний факультет  
кафедра радіоелектронної автоматики

В.Б.Мазуренко

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ  
Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт

Дніпро

2019

Наведено Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з курсу «Комп'ютерно-інтегровані системи контролю», який розроблено у відповідності до освітньо-професійної програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Для студентів фізико-технічного факультету ДНУ, що навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на першому рівні вищої освіти.

Укладач: доцент кафедри радіоелектронної автоматики фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара Мазуренко Валерій Борисович.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО КУРСУ "КОМП'ЮТЕРНО-ИНТЕГРОВАНІ  
СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ"  
№ KI-01

**Тема:** Начало работы в системе SIMULINK. Создание простейшей модели.

### **Общие сведения**

---

Пакет расширения Simulink системы MATLAB является ядром интерактивного программного комплекса, предназначенного для *математического моделирования* линейных и нелинейных динамических систем, и устройств, представленных своей функциональной блок-схемой, именуемой *S-моделью*, или просто *моделью*. При этом возможны различные варианты моделирования: во временной области, в частотной области, с событийным управлением, на основе спектральных преобразований Фурье, с использованием метода Монте-Карло (реакция на воздействия случайного характера) и т. д.

Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную *библиотеку* блочных компонентов и удобный *редактор блок-схем*. Он основан на графическом интерфейсе пользователя и по существу является типичным средством *визуально-ориентированного программирования*. Используя *палитры компонентов* (наборы блоков), пользователь с помощью мыши переносит нужные блоки с палитр на рабочий стол пакета Simulink и соединяет линиями входы и выходы блоков. Таким образом, создается *диаграмма* (блок-схема) системы или устройства, то есть модель. S-модель фактически является программой, которую можно просмотреть с помощью тестового редактора или с помощью редактора файлов системы MATLAB. Файлы модели имеют расширение .slx. Однако следует отметить, что эти файлы очень громоздки и даже для довольно простых моделей могут содержать тысячи строк программного кода. Это типичное свойство визуально-ориентированных систем программирования.

Simulink автоматизирует наиболее трудоемкий этап моделирования: он составляет и решает сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную функциональную схему (модель), обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль за поведением созданного пользователем *виртуального устройства*. Вам достаточно уточнить (если нужно) вид анализа и запустить Simulink в режиме *симуляции* (откуда и название пакета – Simulink) созданной модели системы или устройства. Средства визуализации результатов моделирования в пакете Simulink настолько наглядны, что порой создается ощущение, что созданная диаграмма (модель) работает «как живая».

Более того, Simulink практически мгновенно меняет математическое описание модели по мере ввода ее новых блоков, даже в том случае, когда этот процесс сопровождается сменой порядка системы уравнений и ведет к существенному качественному изменению поведения системы. Впрочем, это является одной из главных целей пакета Simulink.

Ценность Simulink заключается и в обширной, открытой для изучения и модификации, библиотеке компонентов (блоков). Она включает источники воздействий (сигналов) с практически любыми временными зависимостями, масштабирующие, линейные и нелинейные преобразователи с разнообразными формами передаточных характеристик, квантующее устройство, интегрирующие и дифференцирующие блоки и т. д. В библиотеке имеется целый набор виртуальных регистрирующих устройств – от простых измерителей типа вольтметра или амперметра до универсальных осциллографов, позволяющих просматривать временные зависимости выходных параметров моделируемых систем, например токов и напряжений, перемещений, давлений и т. п. Имеется даже графопостроитель для создания фигур, заданных параметрически и в полярной системе координат, например фигур Лиссажу и фазовых портретов колебаний. Simulink имеет средства анимации и звукового сопровождения. А в дополнительных библиотеках можно отыскать и такие «дорогие приборы», как анализаторы спектра сложных сигналов, многоканальные самописцы и средства анимации графиков.

Программные средства моделирования динамических систем известны давно, к ним относятся, например, программы Tutsim и LabVIEW for Industrial Automation. Однако для эффективного применения подобных средств необходимы высокоскоростные решающие устройства. Интеграция одной из самых быстрых матричных математических систем – MATLAB с пакетом Simulink – открыла новые возможности использования самых современных математических методов для решения задач динамического и ситуационного моделирования сложных систем и устройств. Средства графической анимации Simulink позволяют строить виртуальные физические лаборатории с наглядным представлением результатов моделирования. Возможности Simulink охватывают задачи математического моделирования сложных динамических систем в физике, электро- и радиотехнике, в биологии и химии – словом, во всех областях науки и техники. Этим объясняется популярность данного пакета как в университетах и институтах, так и в научных лабораториях. И наконец, важным достоинством Simulink является возможность задания в блоках произвольных математических выражений, что позволяет решать типовые задачи, пользуясь примерами пакета Simulink или же просто задавая новые выражения, описывающие работу моделируемых пользователем систем и устройств. Важным свойством пакета является и возможность задания системных

функцій (S-функцій) с включением их в состав библиотек Simulink. Необходимо отметить также возможность моделирования устройств и систем в реальном масштабе времени. Как программное средство Simulink – типичный представитель визуально-ориентированных языков программирования. На всех этапах работы, особенно при подготовке моделей систем, пользователь практически не имеет дела с обычным программированием. Программа в кодах автоматически генерируется в процессе ввода выбранных блоков компонентов, их соединений и задания параметров компонентов. Важное достоинство Simulink – это интеграция не только с системой MATLAB, но и с рядом других пакетов расширения, что обеспечивает, по существу, неограниченные возможности применения Simulink для решения практически любых задач имитационного и событийного моделирования.

Разработчики системы MATLAB + Simulink отказались от конкуренции с разработчиками программ узкого назначения, например, схемотехнического. Они сосредоточили свое внимание на решении куда более важной и сложной задачи – моделировании блочных динамических систем и устройств произвольного назначения. Это физические и химические системы и устройства, электротехнические устройства (и даже целые энергетические системы), механические системы и устройства и т. д. и т. п. Для этого пришлось существенно расширить библиотеки компонентов таких систем и устройств, с одной стороны, а с другой – применить укрупненные модели ряда компонентов. Именно благодаря этому возможно моделирование сложных систем и устройств.

Одной из самых сложных проблем в реализации математического моделирования в среде системы MATLAB стала подготовка модели моделируемой системы или устройства. Модель обычно представляется в форме графического, табличного или таблично-топологического описания. При этом необходимо предусмотреть организацию связей между компонентами и установку их, подчас многих, параметров. После этого надо запустить созданную модель на исполнение, то есть задать решение автоматически составленной системы уравнений состояния и вывод результатов решения. Это также представляет собой достаточно сложную проблему. Все эти проблемы блестяще решены введением в MATLAB второй важной части системы – расширения Simulink. Это расширение реализует, по существу, визуально-ориентированное программирование задач автоматического составления графической модели системы или устройства, составления и решения ее уравнений состояния и наглядного представления результатов моделирования.

## Порядок выполнения работы

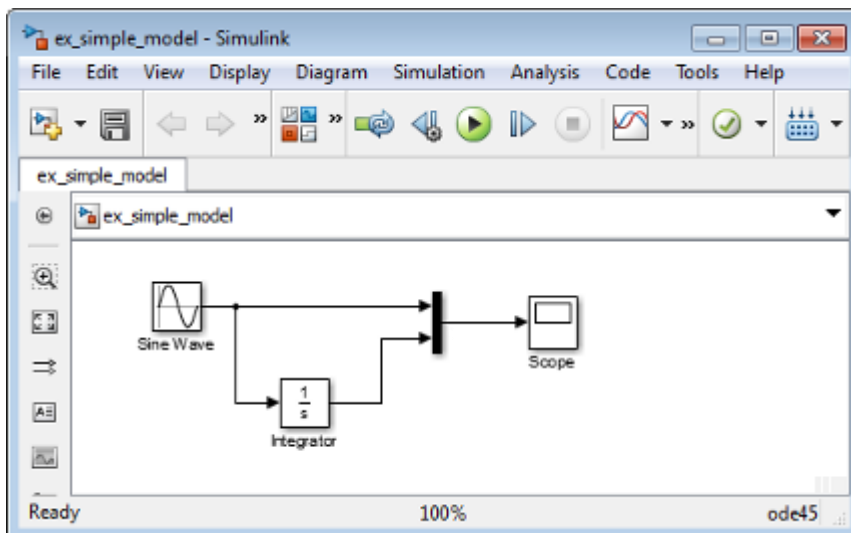
### Создание простой модели

#### Введение

При помощи Simulink® Вы можете создать модель системы, а затем промоделировать динамическое поведение этой системы. Основные приемы, которые вы примените для создания простой модели, — это те же приемы, которые вы затем используете при создании более сложных моделей.

Для создания этой простой модели вам понадобятся четыре блока Simulink. Блоки являются элементами модели, которые задают математические соотношения, описывающие систему, а также задают входные сигналы:


- Sine Wave (генератор синусоидальных сигналов) – генерирует входной сигнал для модели.
- Integrator (идеальное интегрирующее звено) – обрабатывает входной сигнал.
- Bus Creator (шинный формирователь) – объединяет несколько сигналов в одну информационную шину.
- Scope (осциллограф) – визуализирует и сравнивает входной сигнал с выходным сигналом.

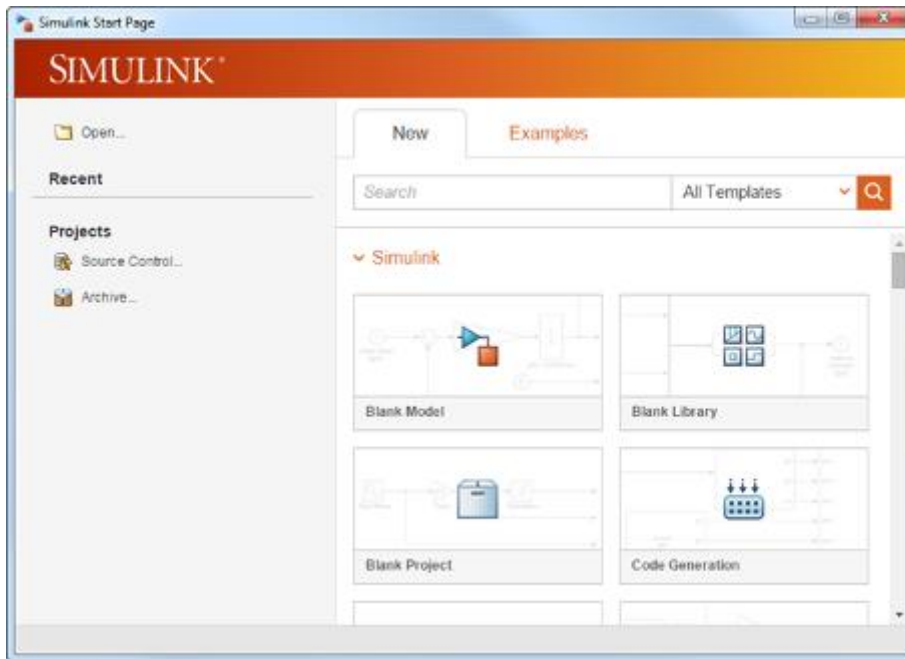


В процессе моделирования этой модели происходит интегрирование синусоидального сигнала, в результате чего получаем косинусоидальный сигнал. Полученный результат отображается вместе с исходным сигналом в окне осциллографа Scope.

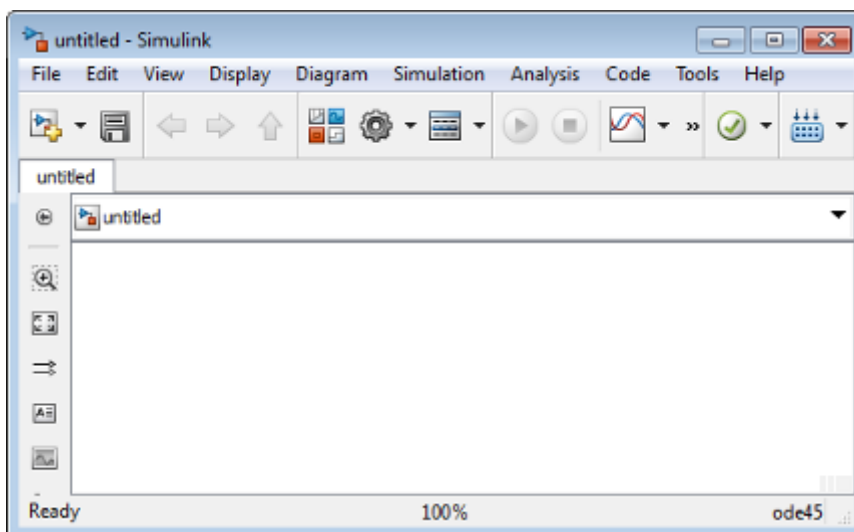
#### Создание новой модели в редакторе Simulink Editor.

Используйте Simulink Editor для построения ваших моделей.

1. В строке инструментов MATLAB нажмите и отпустите кнопку **Simulink** .  
При первом запуске Simulink происходит небольшая задержка.




- Щелкните на шаблон **Пустая модель**, а затем нажмите кнопку **Create Model** (Создать модель).  
Откроется редактор Simulink Editor с новой блок-схемой.

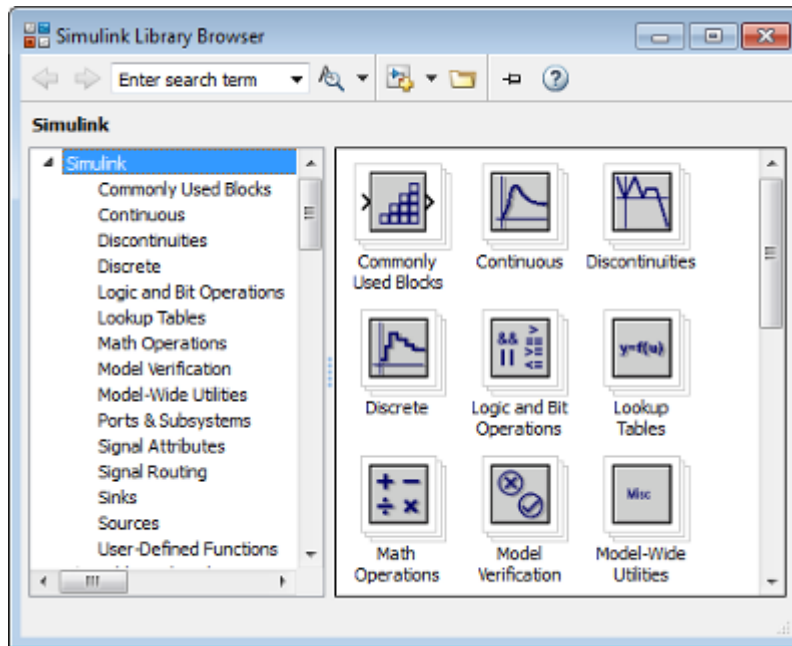



- Выберете **File > Save as** (файл > Сохранить как). В текстовое поле **File name** (Имя файла) введите имя для вашей модели, например, `simple_model.slx`. Нажмите **Save** Сохранить.

### Откройте **Simulink Library Browser** (обозреватель библиотеки Simulink)

В обозревателе библиотеки Simulink (Simulink Library Browser) вы можете искать и выбирать блоки для использования в вашей модели.

- На панели инструментов Simulink Editor щелкните на кнопку **Simulink Library** (Библиотека Simulink). 

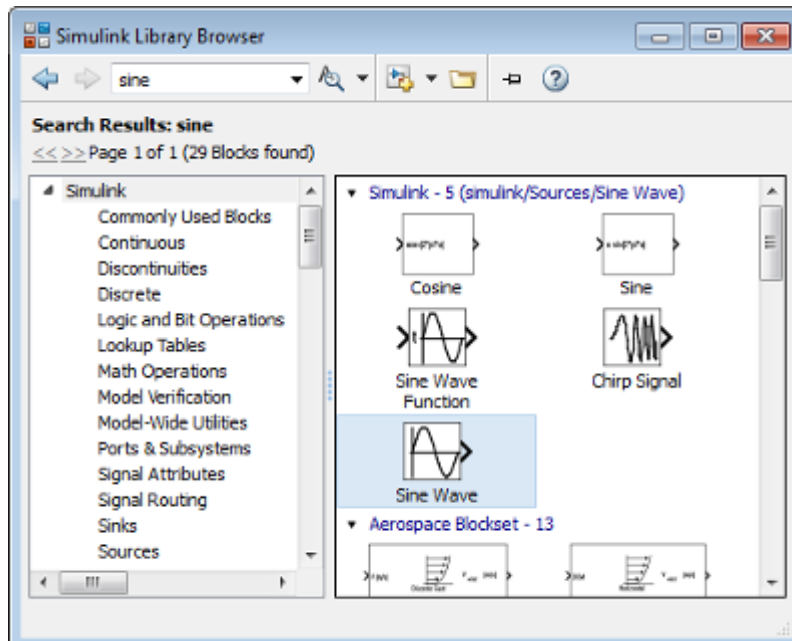


- Установите обозреватель библиотеки так, чтобы он оставался поверх других окон рабочего стола. Для этого на панели инструментов браузера библиотеки выберите кнопку **Stay on top (Закрепить поверх всех окон)** 

### Просмотр или поиск необходимых блоков

Для просмотра библиотек блоков выберите функциональную область в левой панели Simulink Library Browser. Чтобы найти все доступные библиотеки блоков, введите поисковый запрос.

- Поиск блока синусоидальной волны. В поле поиска на панели инструментов браузера введите sine (синус), а затем нажмите клавишу Enter (Ввод). Simulink ищет в библиотеках блоки с sine (синус) в их имени или описании, а затем отображает найденные блоки.



- Получение подробной информации о блоке. Кликните правой кнопкой мыши блок и выберите Help for the <block name>. (Помощь для <имя блока>). Откроется браузер справки со справочной страницей для данного блока.
- Просмотр параметров блока. Щелкните правой кнопкой мыши на блок и выберите Block Parameters (Параметры блока). Откроется диалоговое окно параметров блока.

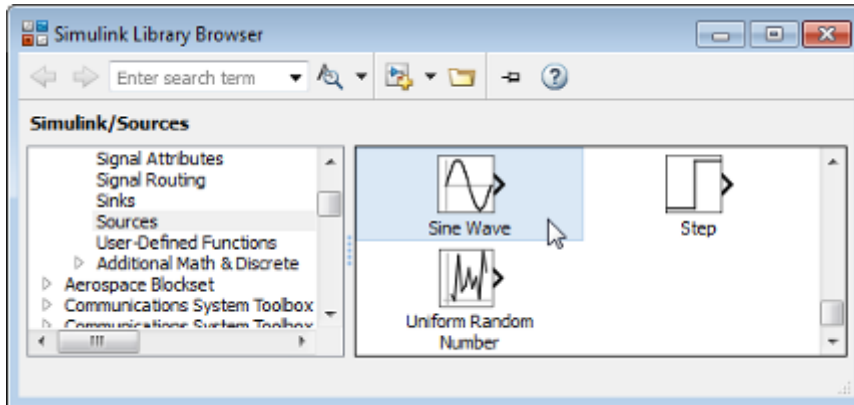


## Добавление блоков в модель

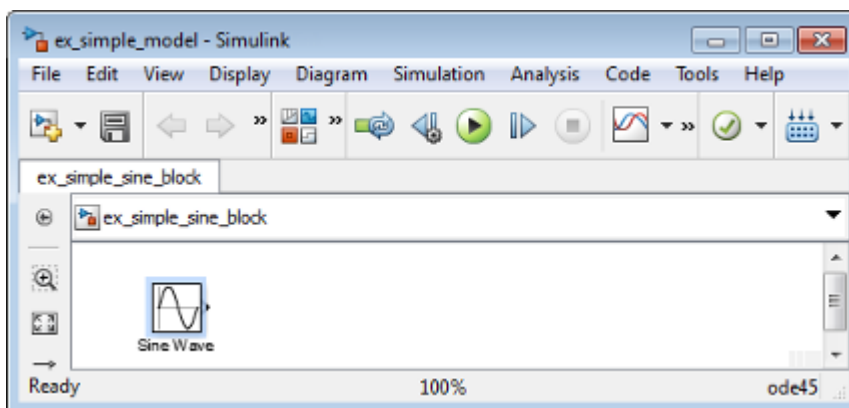
Построение модели производится путем перетаскивания блоков из окна браузера библиотеки Simulink в редактор Simulink или разовым щелчком в окне вашей модели и вводом поискового запроса.


Чтобы построить простую модель, начните с копирования блоков из браузера библиотеки Simulink в редактор Simulink.

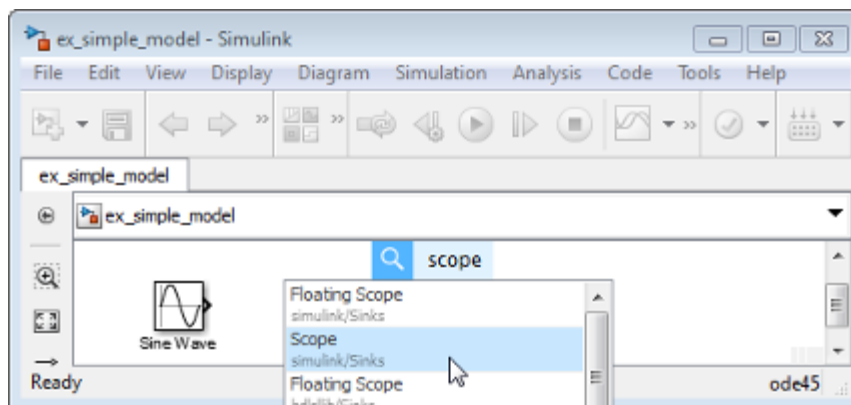
1. На левой панели браузера библиотеки Simulink выберите библиотеку Sources (источники).
2. На правой панели выберите блок Sine Wave (Генератор синусоидальных сигналов).



3. Перетащите блок Sine Wave в редактор Simulink Editor. Копия блока Sine Wave появится в вашей модели.



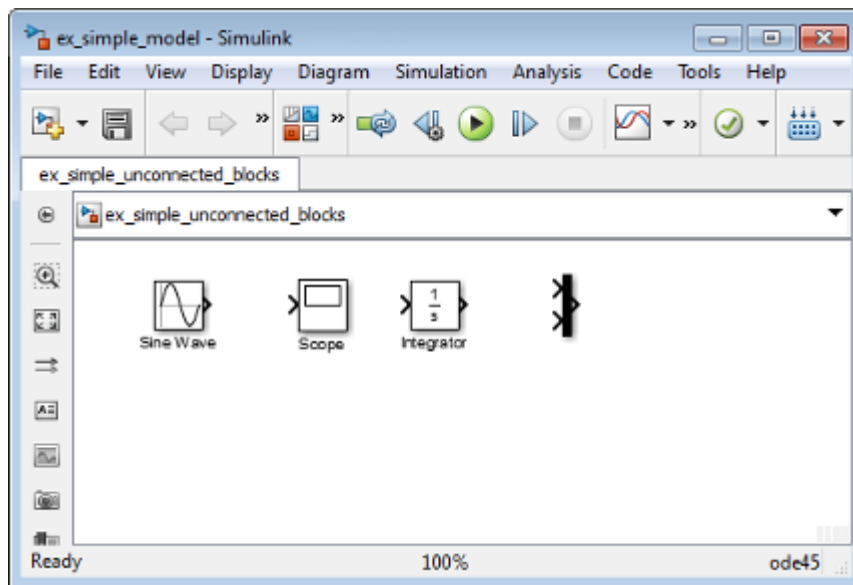
4. Добавьте блок Scope (Осциллограф), используя следующую альтернативную процедуру:
  - a. Кликните внутри блок-схемы.
  - b. После появления значка поиска  введите scope, а затем из списка выберите Scope.



5. Добавьте следующие блоки в вашу модель, используя один из подходов, которые вы использовали для добавления блоков Sine Wave и Scope.

Library	Block
Continuous (Непрерывный)	Integrator
Signal Routing (Маршрутизация сигналов)	Bus Creator

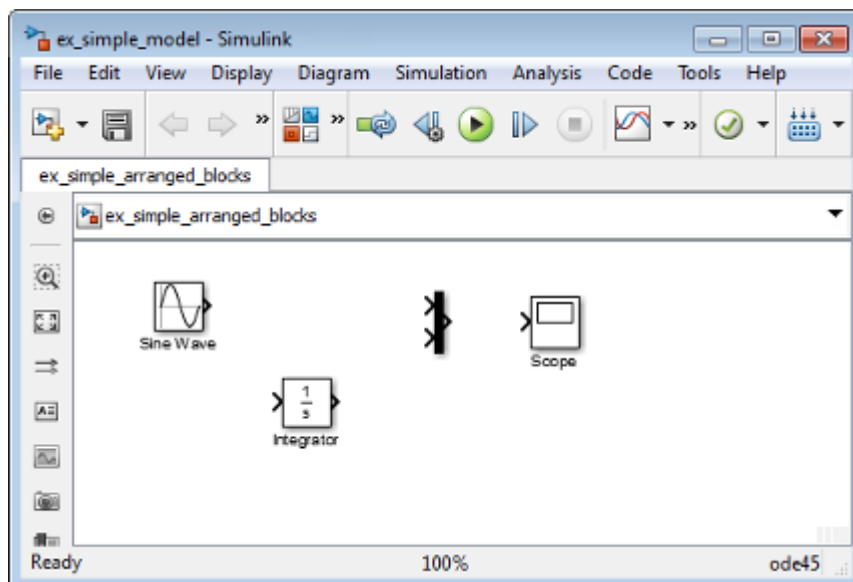
6. Теперь ваша модель должна уже иметь все блоки, необходимые для простой модели.



### Перемещение и изменение размера блоков

Прежде чем соединять блоки в вашей модели, расположите входы и выходы блоков так, чтобы соединения сигналов были максимально простыми.

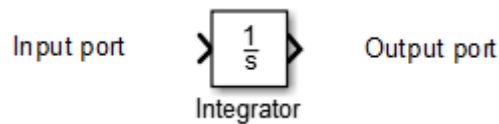
1. Переместите блок Scope после выхода блока Bus Creator. Вы можете либо:
  - Нажать и перетащить блок.
  - Выбрать блок, а затем нажать клавиши со стрелками на клавиатуре.
2. Перемещайте блоки, пока ваша модель не будет похожа на следующий рисунок.



### Соединения блоков

Большинство блоков имеют угловые скобки с одной или обеих сторон. Эти угловые скобки представляют собой входные и выходные порты:

- Символ > указывает на входной порт (*input port*) блока.
- Символ > указывает на выходной порт (*output port*) из блока.

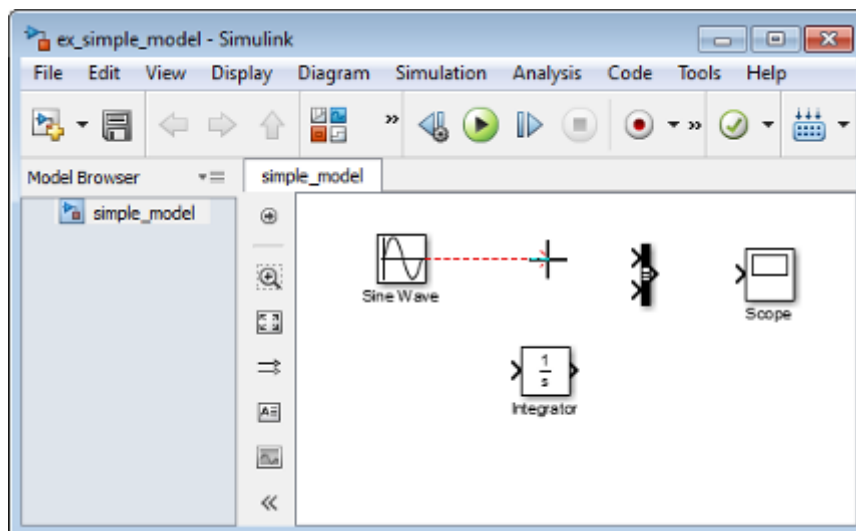


Вы подключаете выходные порты блоков к входным портам с помощью линий. Линии представляют сигналы с изменяющимися во времени значениями.

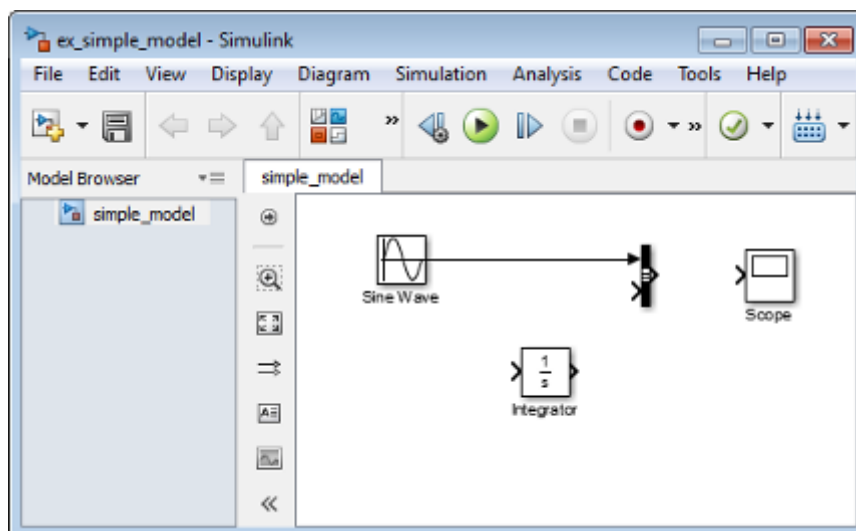
### Рисование сигнальных линий между блоками

Соедините блоки, проводя линии между выходными и входными портами.

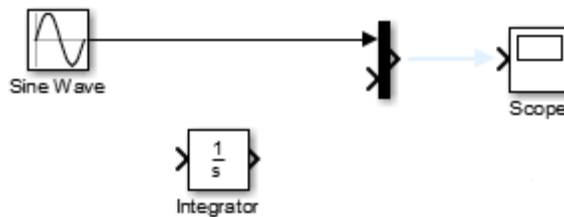
1. Поместите курсор на выходной порт с правой стороны блока Sine Wave. Вид указателя изменится и примет вид крестика (+).
2. Нажмите, а затем перетащите линию из выходного порта в верхний входной порт блока Bus Creator. Пока вы удерживаете кнопку мыши, соединительная линия отображается в виде красной пунктирной стрелки.



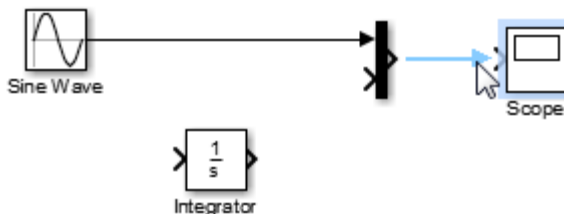
3. Отпустите кнопку мыши в тот момент, когда указатель будет находиться над входным портом. Simulink соединяет блоки линией со стрелкой, указывающей направление потока сигнала.



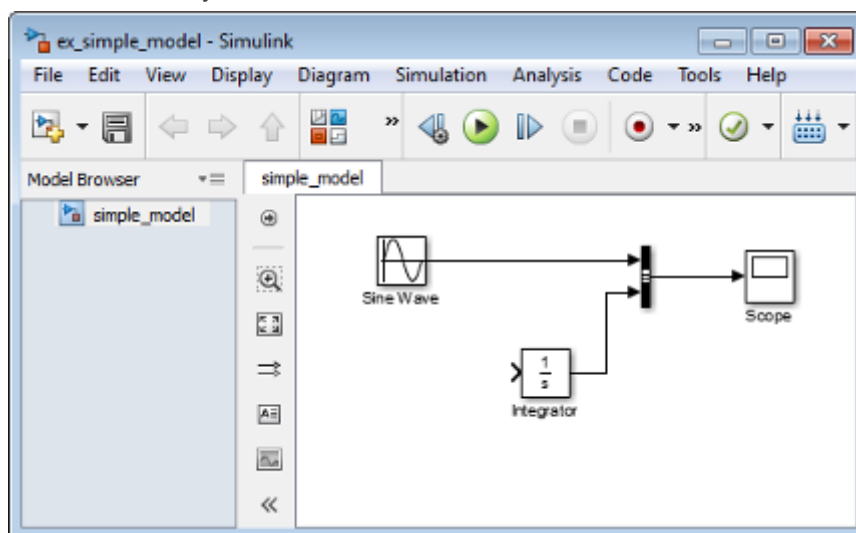
4. Подключите выходной порт блока Integrator к нижнему входному порту блока Bus Creator с помощью клавиши **Ctrl**:
  - a. Выделите блок Integrator.
  - b. Нажмите и удерживайте клавишу **Ctrl**.
  - c. Нажмите на блок Bus Creator.
 Блок Integrator подключится к блоку Bus Creator с помощью сигнальной линии.



- b. Отпустите кнопку мыши. Голубая стрелка появляется на экране в качестве предлагаемого соединения.



- c. Нажмите непосредственно на синюю стрелку. Линия со стрелкой меняется на черную сигнальную линию, соединяющую блоки.

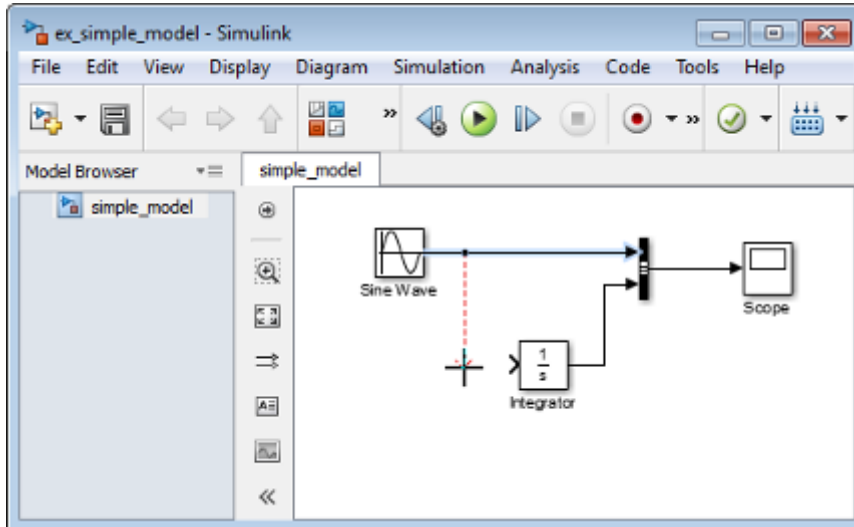


### Разветвление сигнальных линий

Ваша простая модель почти завершена. Чтобы завершить модель, подключите блок Sine Wave к блоку Integrator. Это соединение несколько отличается от других соединений, выполненных ранее, которые просто соединяли выходные порты с входными портами. Для этого:

1. Удерживать клавишу **Ctrl**.

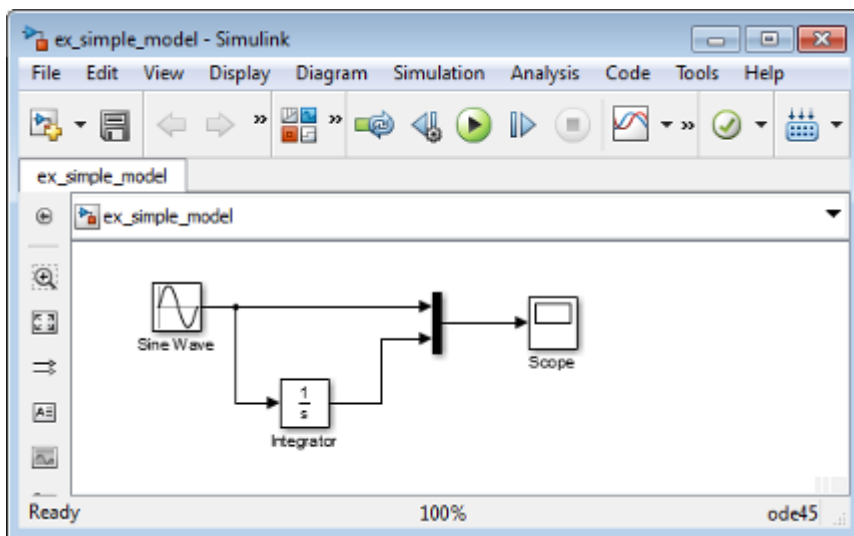
- Поместите курсор в точку, в которой вы хотите начать ответвление. Нажмите, а затем перетащите курсор от линии, чтобы сформировать пунктирный красный отрезок.



- Перетащите курсор на входной порт блока Integrator, а затем отпустите кнопку мыши.

Новая линия под названием *линия ответвления* несет тот же самый сигнал, который идет от блока Sine Wave к блоку Bus Creator.


- Перетащите сегменты линии, чтобы направить линии и выровнять их с блоками. Ваша модель завершена.



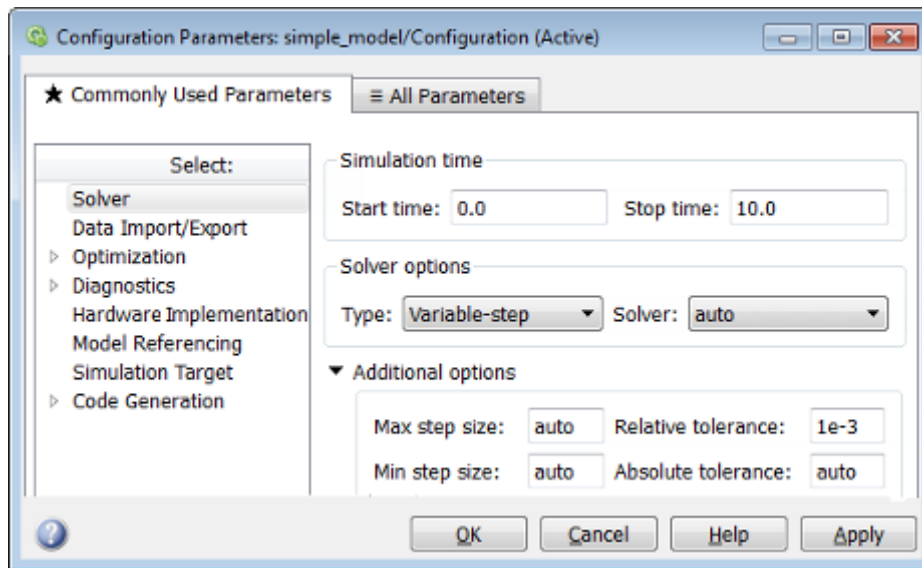
## Определите параметры конфигурации

Прежде чем вы приступите к моделированию поведения вашей модели, вы можете изменить значения параметров конфигурации, принятые по умолчанию. Параметры конфигурации включают в себя: указание метода численного решения дифференциальных уравнений (solver), время начала, время останова и максимальный размер шага.

- В меню Simulink Editor выберите **Simulation** (моделирование) > **Model Configuration Parameters** (Параметры конфигурации модели). Диалоговое окно Configuration Parameters (Параметры конфигурации) раскроется в панель Solver.

**Совет:** В качестве альтернативы, вы можете открыть диалоговое окно Model Configuration Parameters (Параметры конфигурации модели), нажав кнопку параметров  на панели инструментов Simulink Editor.

2. В поле **Stop time** field (Время останова) введите 20. В поле **Max step size** (Максимальный размер шага) укажите auto. Параметр **Solver** также установите в auto, в этом случае Simulink самостоятельно определит наилучший метод численного решения дифференциальных уравнений для моделирования вашей модели.





3. Нажмите OK.

## Запуск моделирования

После того, как вы определили параметры конфигурации, вы готовы к выполнению моделирования работы вашей системы.

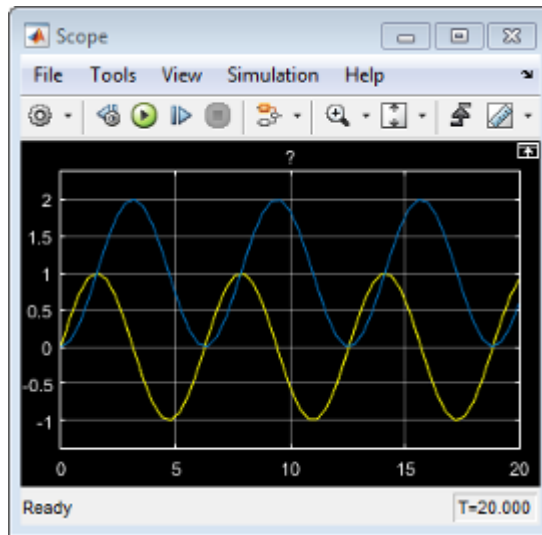
1. В строке меню Simulink Editor выберите Simulation (Моделирование) > Run (Запуск). Моделирование запускается и затем останавливается, когда текущее время моделирования достигнет времени останова, указанного в диалоговом окне Model Configuration Parameters («Параметры конфигурации модели»).

**Совет:** В качестве альтернативы вы можете управлять моделированием, нажимая кнопку **Run (Запуск)**  и кнопку **Pause (Приостановить)**  на панели инструментов Simulink Editor или на панели инструментов окна Scope.

## Просмотр результатов моделирования

После выполнения моделирования вы можете просмотреть результаты моделирования в окне осциллографа Scope.

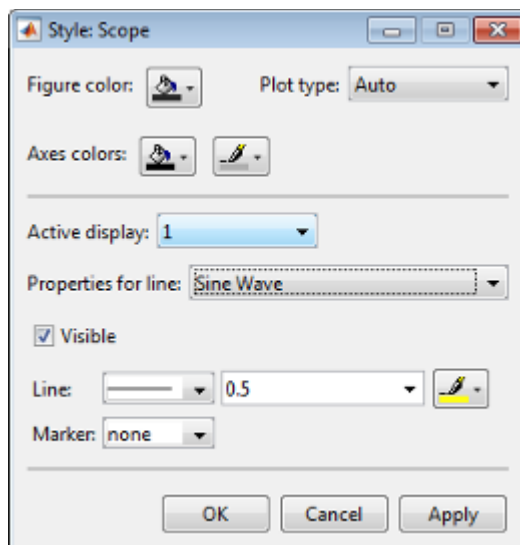
1. Дважды щелкните левой клавишей мышки на блок Scope. Откроется окно Scope и отобразятся дисплей с результатами моделирования. График показывает синусоидальный сигнал вместе с результирующим сигналом косинусоидальной формы, полученным в результате прохождения синусоидального сигнала через интегратор.



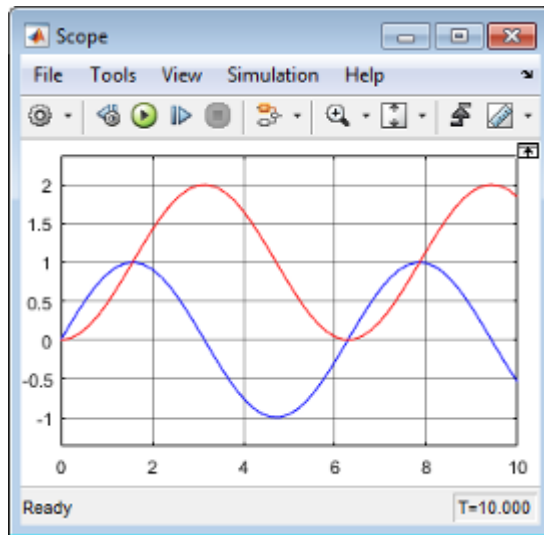
2. В панелі інструментів окна Scope, щелкните на кнопку **Style** (Стиль)



Откроется диалоговое окно Style (Стиль) с параметрами дисплея.



3. Измените внешний вид дисплея. Например, выберите белый в качестве цвета дисплея и цвета фона осей (значки с кувшином).
4. Выберите черный цвет для меток и цветов сетки (значок с кистью).
5. Измените цвет линии сигнала синусоиды на синий, а сигнала с выхода интегратора - на красный. Чтобы увидеть ваши изменения, нажмите **OK** или **Apply** (Применить).



### Оформление результатов

Результаты оформить в виде отчета. В отчете необходимо объяснить ход построения модели и привести результаты моделирования в трех различных режимах (режимы выбираются произвольно).



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО КУРСУ "КОМП'ЮТЕРНО-ИНТЕГРОВАНІ  
СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ"  
№ KI-02

**Тема:** Резонансные методы измерения: моделирование резонансного контура.

**Общие сведения**

**Резонанс напряжений (повторение курса «Теоретичні основи електротехніки»)**

Резонанс в схеме последовательного соединения R, L, C (рис. 1) называют резонансом напряжений.

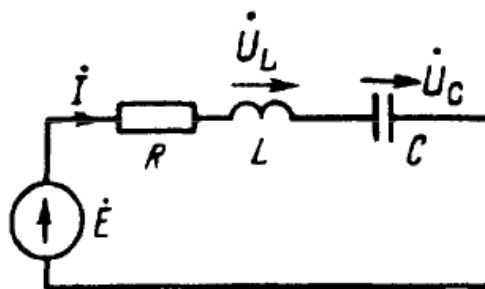


Рис. 1 Схема последовательного соединения R, L, C

При резонансе ток в цепи должен совпадать по фазе с ЭДС  $\dot{E}$ .

Это возможно, если входное сопротивление схемы  $Z = R + j(\omega L - 1/\omega C)$  будет чисто активным. Условие наступления резонанса в схеме (рис. 1)

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (1)$$

где  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – резонансная частота.

При этом  $\dot{I} = \dot{E}/R$ .

Напряжение на индуктивном элементе при резонансе

$$\dot{U}_L = j\omega_0 L \dot{I} = j \frac{\omega_0 L}{R} \dot{E} = j \frac{L}{\sqrt{LC} R} \dot{E} = j \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{\dot{E}}{R} \quad (2)$$

Напряжение на емкостном элементе при резонансе

$$\dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega_0 C} \dot{I} = -j \frac{1}{\omega_0 C R} \dot{E} = -j \frac{\sqrt{LC}}{C R} \dot{E} = -j \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{\dot{E}}{R} = -\dot{U}_L \quad (3)$$

Таким образом, при резонансе напряжения на емкостном элементе и индуктивном элементе равны по величине, но противоположны по фазе. Действующее значение напряжения на индуктивном элементе и действующее

значення напруги на ємкостному елементі при резонансі рівні між собою і пов'язані з діючим значенням ЕДС наступним співвідношенням:

$$U_L = U_C = \frac{\sqrt{L}}{R} E = QE \quad (4)$$

Отношение

$$Q = \frac{\sqrt{L}}{R} \quad (5)$$

називають *добротністю* резонансного контура. Добротність показує, во скільки раз напруга на індуктивному (ємкостному) елементі перевищує напругу на вході схеми в резонансному режимі. В радіотехнічних пристроях  $Q$  може доходити до 300 і більше. Векторна діаграма для режиму резонансу зображена на рис. 2.

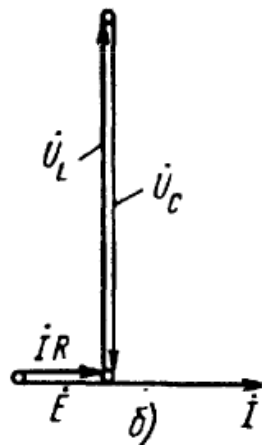


Рис. 2 Векторная диаграмма для режима резонанса напряжений

### **Использование библиотеки Simscape**

В состав пакета Simulink системы MATLAB входит библиотека блоков Simscape. Simscape отличается от всех остальных библиотек Simulink. Это – не просто библиотека. Simscape – это среда, целый комплекс для моделирования физических объектов. Simscape предоставляет окружение для создания моделей и проведения симуляции физических систем, содержащих компоненты из различных инженерных сфер деятельности: механических, электрических, гидравлических и других. Библиотека Simscape предоставляет фундаментальные блоки для построения объектов и систем, относящихся к этим областям знаний. При помощи фундаментальных блоков, в частности, можно создавать модели различных датчиков и исследовать их свойства. На основе электрических схем можно создавать модели компонентов измерительных систем, и путем моделирования определять оптимальные параметры измерительных цепей. Модели Simscape используются для разработки систем измерения, управления и контроля, а также их тестирования на системном уровне.

Построение моделей Simscape выполняется точно также, как и всех других моделей в пакете Simulink. Но есть и некоторые особенности:

1. Связи между электрическими компонентами отражаются как минимум двумя линиями, что соответствует соединительным проводам электрических цепей (в Simulink используются соединения в виде одной линии, по которой проходит сигнал).
2. К модели в обязательном порядке должен быть подсоединен блок Solver (Решатель). Это объясняется тем, что фактически моделирование систем в Simulink выполняется путем решения систем дифференциальных уравнений, вид которых задается средствами визуального программирования: выбором блоков, введением линий связи между блоками и заданием параметров блоков. Поэтому для проведения моделирования к моделям, созданным из блоков библиотеки Simscape, обязательно должен быть подсоединен блок Solver (Решатель), который задает метод решения этих дифференциальных уравнений, шаг времени и другие параметры моделирования.
3. Модели Simscape отличаются по своему внутреннему построению от всех других моделей системы Simulink, и они не могут быть напрямую состыкованы с какими-либо блоками, не относящимися к библиотеке Simscape. Поэтому, когда возникает необходимость в применении блоков Simulink совместно с моделями, состоящими из блоков Simscape, то между блоками разных подсистем необходимо вставить специальные блоки, которые переводят сигналы из модели Simscape в модель Simulink. Таким блоком является блок PS-Simulink Convertor. Обратную задачу – передачу сигналов из Simulink в Simscape обеспечивает блок Simulink-PS Convertor.

## Порядок выполнения работы

### Построение модели

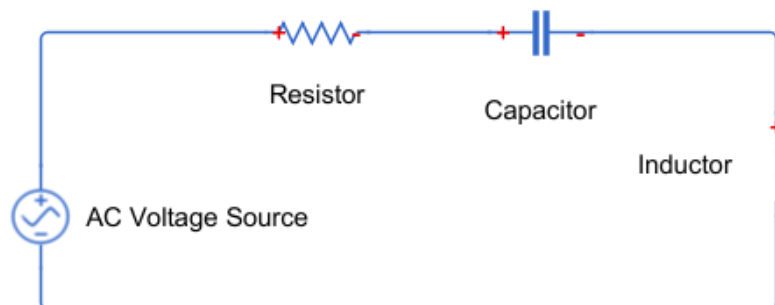
1. Используя следующие блоки библиотеки **Simscape>Foundation Library>Electrical>Electrical Elements**



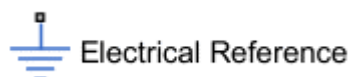
а также блок питания переменного тока



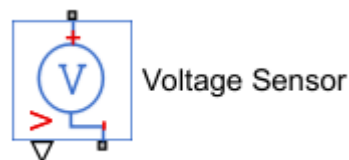
из библиотеки **Simscape>Foundation Library>Electrical>Electrical Sources** создайте модель последовательного RC-контура:



2. Подсоедините к контуру заземление



которое представлено соответствующим блоком в библиотеке **Simscape>Foundation Library>Electrical>Electrical Elements**, а также введите в схему вольтметр для измерения напряжения на индуктивности. Блок вольтметра

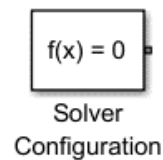


находится в библиотеке **Simscape>Foundation Library>Electrical>Electrical Sensors**.

3. Моделирование систем в **Simulink** выполняется путем решения систем дифференциальных уравнений, вид которых задается средствами визуального

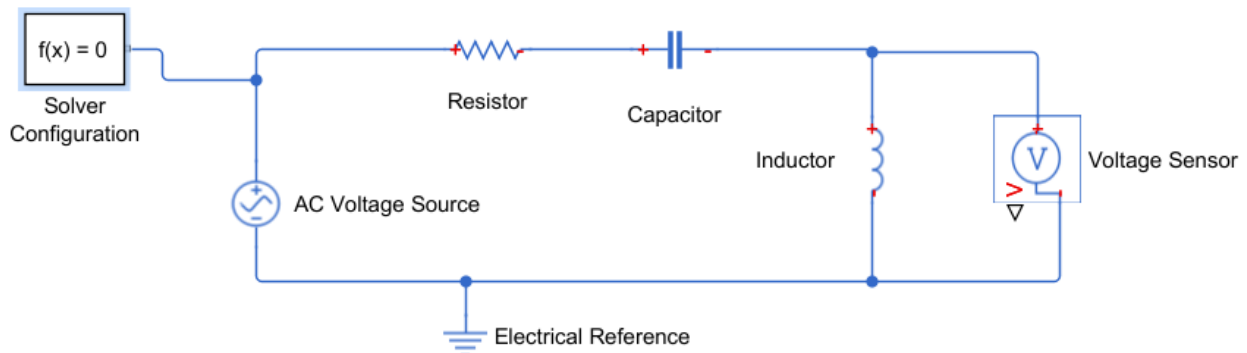
программирования, а именно выбором блоков, введением линий связи между блоками и заданием параметров блоков. Для проведения моделирования к моделям, созданным из блоков библиотеки **Simscape**, обязательно должен быть подсоединен блок **Solver** (Решатель), который задает метод решения дифференциальных уравнений, шаг времени и другие параметры моделирования.

Блок Solver находится в библиотеке **Simscape>Utilities** он имеет следующий вид:



и подключается путем проведения линии от выходного порта блока **Solver** и присоединения этой линии к любой из линий модели.

В результате получаем схему примерно такого вида:



4. Модели **Simscape** отличаются по своему внутреннему построению от всех других моделей системы **Simulink**, и они не могут быть напрямую состыкованы со какими-либо блоками, не относящимися к **Simscape**. Поэтому, когда возникает необходимость в применении этих блоков, то между блоками и необходимо вставить специальные блоки, которые переводят сигналы из модели **Simscape** в модель **Simulink**:

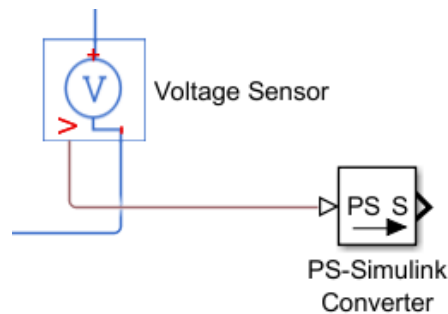


Данный блок находится в библиотеке **Simscape>Utilities**.

*Примечание:* в системе **Simulink** также существуют блоки **Simulink-PS Converter**, которые выполняют и обратную задачу – передачу сигналов из **Simulink** в **Simscape**.

Для наблюдения за ходом моделирования в модель необходимо внести, как минимум осциллограф. Также желательно провести некоторую математическую

обработку получаемых результатов и осуществлять вывод на дисплей. Осциллографы, дисплеи, средства математической обработки находятся вне библиотеки **Simscape**, поэтому для их применения необходимо организовать связь через блок **PS-Simulink Converter**. Для этого необходимо связать порты, имеющие форму треугольника, блоков **Voltage Sensor** и **PS-Simulink Converter**. Линия приобретет коричневый цвет:

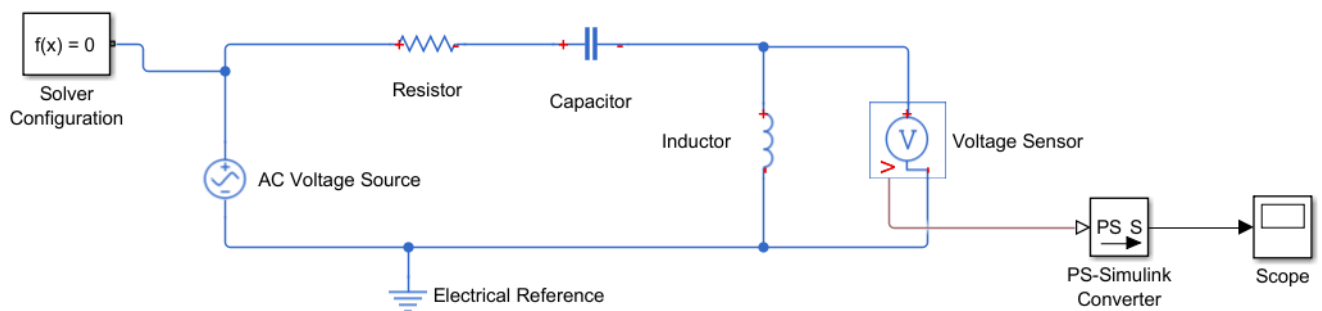


Осциллограф

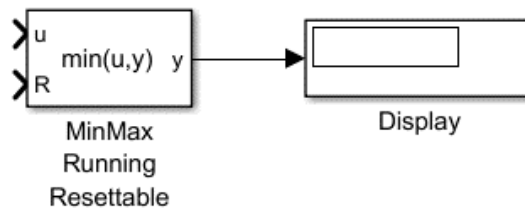


находится в библиотеке **Simulink>Sinks**.

5. После выполнения указанных выше построений модель приобретает примерно такой вид:



Моделирование работы резонансного контура может быть проведено в данной конфигурации. Однако, для измерения амплитуды выходного сигнала (что можно выполнить также и визуально по записям осциллографа) удобно ввести в модель блок **MinMax Running Resettable** из библиотеки **Simulink>Math Operation** (вместе с дисплеем из **Simulink>Sinks**).

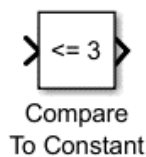


который находит максимальное значение из всех дискретных значений сигнала, поступающих на его вход. Показания блока могут быть сброшены путем подачи сигнала TRUE на вход RESET. Этой опцией необходимо воспользоваться для того, чтобы отсеять «забросы» значений, возникающие из-за переходных процессов в начале моделирования. Сигнал TRUE можно подать на вход RESET примерно по истечении 70% времени моделирования. Для этого в модель следует ввести счетчик времени из библиотеки **Simulink>Sources**



Clock

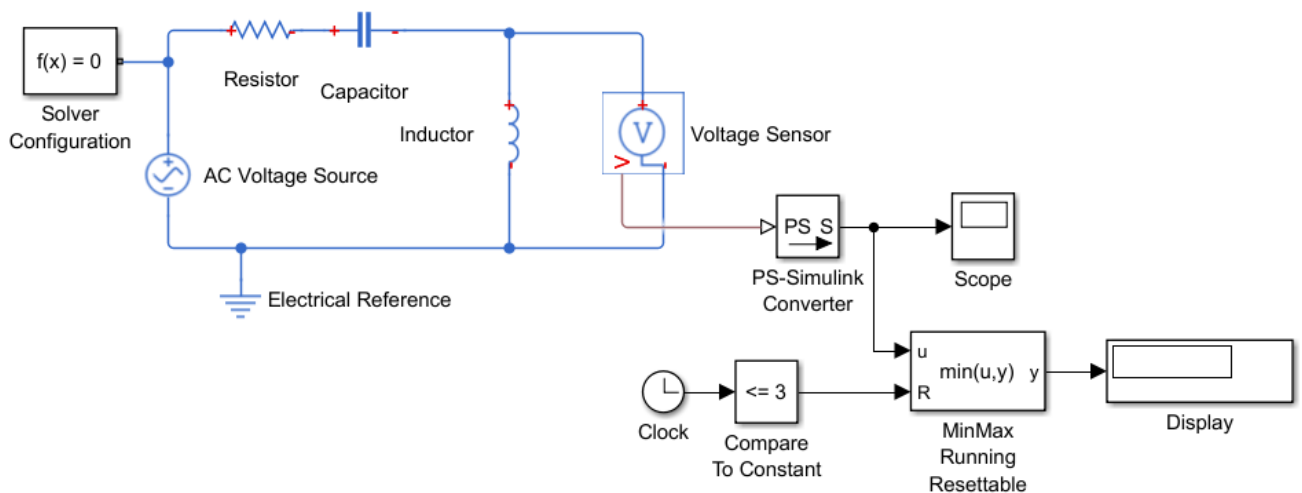
и блок сравнения с заданным значением



Compare To Constant

из библиотеки **Simulink>Logic and Bit Operations**.

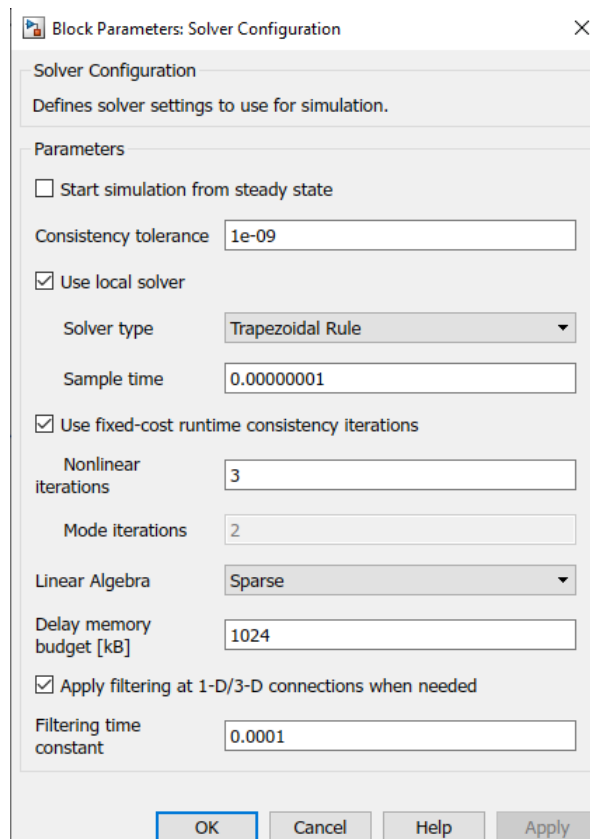
6. Окончательно модель принимает следующий вид:



7. Производим настройку параметров модели.

- а) Параметры  $L$ ,  $R$  и  $C$  соответствующих блоков вводим из таблицы 1. Остальные параметры блоков не меняем (оставляем те, что указаны по умолчанию).

- b) Амплитуду напруги синусоїдального тока от источника питания устанавливаем 1В. Частоту сигнала для получения амплитудно-частотной характеристики резонансного контура варьировать в соответствии с таблицей 2.
- c) В параметрах блока **Solver** установить «галочку» в окошке **Use local solver**. Выбрать в поле **Solver type** метод **Trapezoidal Rule**. Шаг дискретизации (**Sample time**) установить в соответствии с рекомендациями таблицы 1.



- d) Продолжительность моделирования установить в соответствии с рекомендациями таблицы 1. Продолжительность моделирования в области резонанса необходимо увеличивать в связи с большей длительностью переходного процесса. Моделирование для всех частот генератора при наименьшем значении сопротивления необходимо проводить с продолжительностью, которая соответствует продолжительности моделирования в области резонанса.
- e) Параметр **Decimation** блока **Clock** установить в единицу.
- f) Константу сравнения времени в блоке **Compare to Constant** рекомендуется установить равной 0,7 продолжительности времени моделирования. Знак сравнения установить < (меньше). В этом случае все показания блока **MinMax Running Resettable** в первую половину моделирования будут сбрасываться в нуль. В течение второй половины моделирования блок **MinMax Running Resettable** будет фиксировать максимальное значение выходного сигнала, то есть его максимальную



амплитуду. Это значение и будет отражено на экране дисплея после окончания моделирования.

### **Проведение моделирования**

Моделирование проводим для трех значений сопротивления резонансного контура, указанных в таблице 1. Для использования таблицы 1 первоначально рассчитывается значение резонансной частоты  $f_0$  и добротности  $Q$  резонансного контура.

Для каждого из значений  $R$  провести собственный этап моделирования, в ходе которого:

1. На основе рассчитанного значения резонансной частоты  $f_0$  установить значение частоты переменного тока источника питания в соответствии с таблицей 2 и для каждого установленного значения частоты путем моделирования получить значение амплитуды переменного напряжения на катушке индуктивности. Данные с результатами моделирования сохранить в таблице.

2. По данным результатов моделирования построить графики зависимости амплитуды напряжения на катушке индуктивности от частоты сигнала – амплитудно-частотные характеристики резонансного контура.

3. Рассчитать амплитудно-частотные характеристики резонансного контура в относительных единицах. Для этого полученные напряжения на катушке необходимо разделить на максимальное значение. Тогда максимальное значение станет равным единице. Все остальные значения будут меньше единицы.

4. Представить на одном графике амплитудно-частотные характеристики резонансного контура в относительных единицах для трех разных значений сопротивления  $R$ .

5. Проанализировать связь величины добротности резонансного контура  $Q$  и формы его амплитудно-частотной характеристики. Сформулировать полученные по результатам проведения моделирования выводы.

### **Данные для проведения моделирования**

В таблице 1 приведены параметры резонансного контура и рекомендуемые параметры моделирования. Номера вариантов соответствуют порядковому номеру фамилии студента в журнале группы.

Таблица 1

Параметры резонансного контура и моделирования (по вариантам)

№ вар	Параметры контура			Рекомендуемые параметры моделирования		
	$L$	$C$	$R$ , Ом	Шаг, сек	Продолжительность моделирования, сек	Продолжительность моделирования в области резонанса, сек
1	10 мкГн	1000 пФ	3	$3 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
			1		$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
			0.3		$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$

№ вар	Параметры контура			Рекомендуемые параметры моделирования		
	$L$	$C$	$R$ , Ом	Шаг, сек	Продолжительность моделирования, сек	Продолжительность моделирования в области резонанса, сек
2	10 мкГн	100 пФ	10	$1 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
			3		$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
			1		$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
3	1 мкГн	100 пФ	3	$3 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
			1		$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
			0.3		$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
4	0.1 Гн	1.0 мкФ	10	$1 \cdot 10^{-6}$	0.15	1.5
			3		0.15	1.5
			1		1.5	1.5
5	0.1 мГн	0.1 мкФ	1	$1 \cdot 10^{-8}$	0.0015	0.015
			0.3		0.0015	0.015
			0.1		0.015	0.015

Таблица 2

Рекомендуемые значения частоты переменного тока при проведении моделирования с целью построения амплитудно-частотных характеристик резонансного контура

№ испытания	Частота	№ испытания	Частота	Жирным шрифтом выделена область резонанса
1	$0,68 f_0$	9	<b><math>1,005 f_0</math></b>	
2	$0,84 f_0$	10	<b><math>1,01 f_0</math></b>	
3	$0,92 f_0$	11	<b><math>1,02 f_0</math></b>	
4	$0,96 f_0$	12	$1,04 f_0$	
5	<b><math>0,98 f_0</math></b>	13	$1,08 f_0$	
6	<b><math>0,99 f_0</math></b>	14	$1,16 f_0$	
7	<b><math>0,995 f_0</math></b>	15	$1,32 f_0$	
8	$f_0$	—	—	

### Оформление результатов

Результаты оформить в виде отчета. В отчете необходимо объяснить ход построения модели и привести результаты моделирования.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО КУРСУ "КОМП'ЮТЕРНО-ИНТЕГРОВАНІ  
СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ"  
№ КІ-03**

**Тема:** Дифференциальные методы измерения с использованием неуравновешенных мостов

**Цель:** Изучить дифференциальные методы измерения с использованием неуравновешенных мостов путем моделирования работы измерителя омического сопротивления, построенного на основе моста постоянного тока.

**Задача исследования:** В ходе выполнения лабораторной работы необходимо:

- а) получить градуировочную характеристику измерителя омического сопротивления, построенного на основе неуравновешенного моста постоянного тока;
- б) найти линеаризованную градуировочную характеристику;
- в) определить диапазон измеряемых значений сопротивлений, на котором может быть применена линеаризованная градуировочная характеристика при заданном предельном значении методической погрешности, обусловленной нелинейностью действительной характеристики.

Лабораторная работа выполняется по вариантам. Номера вариантов соответствуют порядковому номеру фамилии студента в журнале группы.

### **Общие сведения**

---

#### ***Методы прямых измерений***

Метод измерений – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

Принцип измерений – физическое явление или эффект, положенное в основу измерений (например, использование силы тяжести при измерении массы взвешиванием, или применение эффекта Доплера для измерения скорости).

Различают:

**1. Метод непосредственной оценки** – метод, при котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора, например, измерение давления пружинным манометром, массы на весах, силы электрического тока амперметром.

**2. Метод сравнения с мерой (метод сравнения)** метод, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Пример:

- а) измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями (мерами массы с известными значениями);
- б) измерение напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с известной ЭДС нормального элемента.

**3. Метод заміщення** – метод порівняння з мірою, в якій вимірювану величину заміщують мірою з відомим значенням величини.

Приклад:

Взвешування з поочередним розміщенням вимірюваної маси і гирь на одну і ту ж чашку ваг (метод Борда).

**4. Метод вимірювань доповненням (метод доповнення)** – метод, в якому значення вимірюваної величини доповнюється мірою цієї ж величини з таким розрахунком, щоб на прилад порівняння впливала їх сума, рівна раніше заданому значенню.

**5. Нульовий метод** – метод порівняння з мірою, в якому результуючий ефект впливу вимірюваної величини і міри на прилад порівняння доводять до нуля.

Вимірювання параметрів  $R$ ,  $C$ ,  $L$  елементів електричної ланки за допомогою збалансованих мостів належить до нульових методів вимірювання. Збалансування моста здійснюється шляхом вибору міри – опору в опорному плечі моста.

**6. Дифференціальний метод** – метод, при якому вимірювана величина порівнюється з однорідною величиною, маючою відоме значення, незначительно відмінною від значення вимірюваної величини, і при якому вимірюється різниця між цими двома величинами. Метод характеризується вимірюванням різниці між вимірюваною величиною і відомою величиною, вимірюваною мірою. Метод дозволяє отримати результат високої точності при використанні відносно грубих засобів вимірювання.

Нульовий метод аналогічний дифференціальному, але різниця між вимірюваною величиною і мірою зводиться до нуля. При цьому нульовий метод має перевагу, що міра може бути набагато менше вимірюваної величини.

Вимірювання параметрів  $R$ ,  $C$ ,  $L$  елементів електричної ланки за допомогою незбалансованих мостів належить до дифференціальних методів вимірювання.

### **Вимірювальний мост постійного струму**

В найпростішому випадку мостова схема містить чотири резистори, з'єднаних в кільцевий замкнений контур. Таку схему має одинарний мост постійного струму (рис. 1). Резистори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  і  $R_4$  цього контуру називаються плечами моста, а точки з'єднання сусідніх плеч – вершинами моста. Цепі, що з'єднують протилежні вершини, називають діагоналями. Одна з діагоналей (3–4) містить джерело живлення  $GB$  а інша (1–2) – індикатор рівноваги  $PG$ . В випадку моста змінного струму його плечі можуть включати в себе не тільки резистори, але також конденсатори і котушки індуктивності, т.е. опору можуть мати комплексний характер.

Мост називається збалансованим, якщо різниця потенціалів між точками 1 і 2 дорівнює нулю, т.е. напруга на діагоналі, що містить індикатор, дорівнює нулю, відсутній і струм через індикатор дорівнює нулю.

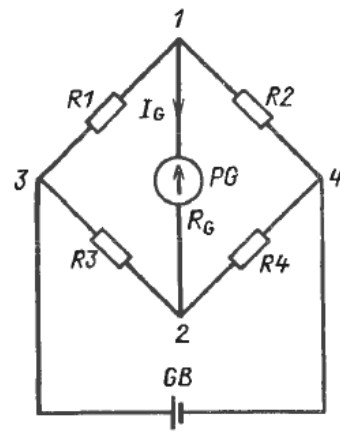


Рис. 1 Измерительный мост постоянного тока

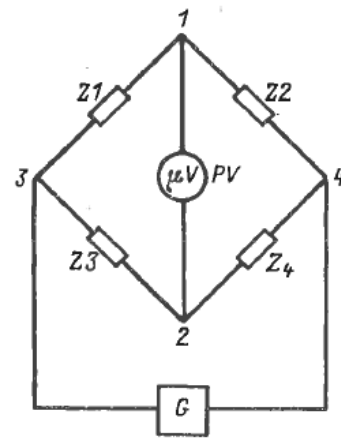


Рис.2 Измерительный мост переменного тока

Соотношение между сопротивлениями плеч, при котором мост уравновешен, называется условием равновесия моста. Это условие можно получить, используя законы Кирхгофа для расчета мостовой схемы. Например, для одинарного моста постоянного тока зависимость протекающего через индикатор нуля (гальванометр)  $PG$  тока  $I_G$  от сопротивлений плеч, сопротивления гальванометра и напряжения питания и имеет вид

$$I_G = \frac{U(R_1R_4 - R_2R_3)}{R_G(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1R_2(R_3 + R_4) + R_3R_4(R_1 + R_2)} \quad (1)$$

Ток  $I_G = 0$  при

$$R_1R_4 = R_2R_3 \quad (2)$$

Это и есть условие равновесия одинарного моста постоянного тока, которое можно сформулировать следующим образом: для того, чтобы мост был уравновешен, произведения сопротивлений противоположных плеч должны быть равны. Если сопротивление одного из плеч неизвестно (например,  $R_1 = R_x$ ), то условие (2) будет иметь вид

$$R_x = R_2R_3/R_4 \quad (3)$$

Таким образом, измерение при помощи одинарного моста можно рассматривать как сравнение неизвестного сопротивления  $R_x$  с образцовым сопротивлением  $R_2$  при сохранении неизменным отношением  $R_3/R_4$ . По этой причине плечо  $R_2$  называют плечом сравнения, плечи  $R_3$  и  $R_4$  – плечами отношения.

Этот метод измерения относится к нулевым методам измерения.

### Измерительный мост переменного тока

Мосты могут также работать и на переменном токе. В этом случае сопротивления плеч являются комплексными. Обобщенная схема моста переменного тока представлена на рис. 2. Индикатором нуля обычно служит электронный милливольтметр. Возможно также использование электронного

индикатора нуля на базе электронно-лучевой трубки. Электронные индикаторы имеют очень большое входное сопротивление, что выгодно отличает их от электромеханических устройств, таких, как вибрационный гальванометр или телефонные наушники, которые тоже иногда используются в качестве индикаторов нуля.

Аналогично соотношению (2) условие равновесия одинарного моста переменного тока имеет вид

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad (4)$$

где  $Z_1, Z_2, Z_3$  и  $Z_4$  – комплексные сопротивления плеч.

Как известно, любое комплексное число  $Z$  можно представить в показательной форме:  $Z = z e^{j\varphi}$ . Используя это представление, получим вместо условия (4) равенство

$$z_1 e^{j\varphi_1} z_4 e^{j\varphi_4} = z_2 e^{j\varphi_2} z_3 e^{j\varphi_3}, \quad (5)$$

которое справедливо только в том случае, если выполняются вытекающие из него соотношения

$$z_1 z_4 = z_2 z_3 \quad (6)$$

и

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (7)$$

Условие (6), требующее равенства произведений модулей комплексных сопротивлений противоположных плеч, дополняется условием (7), налагающим требование равенства сумм их аргументов. Только одновременное выполнение соотношений (6) и (7) обеспечивает равенство нулю напряжения на диагонали 1–2, в которую включен индикатор нуля  $PV$  (рис. 2).

Условия равновесия можно записать иначе, если воспользоваться не показательной, а алгебраической формой представления комплексных чисел  $Z = R + jX$ , где  $R$  и  $X$  – вещественная и мнимая части соответственно. В нашем случае символом  $Z$  обозначено комплексное сопротивление, а  $R$  и  $X$  представляют собой активную и реактивную составляющие. В алгебраической форме условие (4) переписывается в виде

$$(R_1 + jX_1)(R_4 + jX_4) = (R_2 + jX_2)(R_3 + jX_3) \quad (8)$$

Это равенство выполняется, если справедливы равенства для активных и реактивных частей:

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3 \quad (9)$$

и

$$R_1 X_4 - R_4 X_1 = R_2 X_3 - R_3 X_2 \quad (10)$$

Вновь требуется одновременное выполнение соотношений (9) и (10).

Две пары равенств (6), (7) и (9), (10) полностью равноправны, и выбор того или другого определяется соображениями удобства при расчетах конкретных мостовых схем. Чтобы обеспечить выполнение двух условий одновременно, необходимо иметь не менее двух регулируемых элементов. Ими чаще всего являются резисторы и конденсаторы, поскольку они допускают более точную регулировку, чем катушки индуктивности. На практике важно, чтобы мост можно было быстро, с наименьшим числом элементарных операций по регулировке, уравновесить. Число таких операций, необходимых для достижения равновесия, характеризует "сходимость" моста. Правильный выбор регулируемых элементов и их положения в плечах моста обеспечивает наилучшую сходимость, а следовательно, и наименьшее время измерений.

### **Мостовая цепь в неравновесном режиме**

Измерение электрических параметров элементов цепи с использованием неуравновешенного моста относится к дифференциальным методам. Данный метод широко применяется при проведении контроля. Это обусловлено тем, что при проведении контроля решение принимается не на основе абсолютного значения параметра (например, сопротивления датчика температуры или индуктивности датчика перемещения), а на основе величины отклонения этого параметра от некоторого номинального (заданного) значения. Например, температура поднялась выше заданного значения на максимально допустимую величину  $\Delta T_{\text{доп}}$ . Или скорость упала относительно требуемой на величину большую, чем  $\Delta V_{\text{доп}}$ . Или размер детали выходит за допустимый предел  $\pm \Delta H_{\text{доп}}$ . Во всех этих случаях принимается соответствующее решение: включить охлаждение; включить ускоритель; забраковать деталь.

Параметры моста (сопротивления его плеч, в общем случае – комплексные) выбираются таким образом, чтобы при номинальном значении измеряемых параметров элементов, находящихся в одном из плеч моста (например, сопротивления датчика  $R$ , включенного в плечо моста), мост находился бы в равновесном состоянии. Метод основан на том, что при отклонении величины параметра от своего номинального значения в измерительной диагонали моста возникает разность потенциалов – напряжение  $U_{\text{изм}}$ , которое измеряют при помощи вольтметра. Это напряжение пропорционально величине отклонения параметра от номинального значения. Поэтому, зная градуировочную характеристику  $R=f(U_{\text{изм}})$  измерителя, по измеренному значению  $U_{\text{изм}}$  можно определить сопротивление  $R$ . Эта зависимость не является строго линейной. Она является довольно близкой к линейной в области малых отклонений  $R$  от номинала и может быть в некотором диапазоне заменена линейной зависимостью  $R=A \cdot U_{\text{изм}} + R_{\text{ном}}$  при заданной допустимой методической погрешности.

Разумеется, что все сказанное выше относится и к мостам переменного тока. При помощи неуравновешенных мостов переменного тока выполняется измерение не только сопротивлений, но и измерение емкости или индуктивности. Тогда градуировочная характеристика измерителя имеет вид  $R=f(U_{\text{изм}})$ ,  $C=f(U_{\text{изм}})$  или

$L=f(U_{\text{изм}})$  соответственно (при условии, что меняется только один параметр в одном плече моста:  $R$ ,  $C$  или  $L$ ).

Например, для включения дифференциального емкостного преобразователя может быть использована мостовая цепь (рис. 3), работающая в неравновесном режиме.

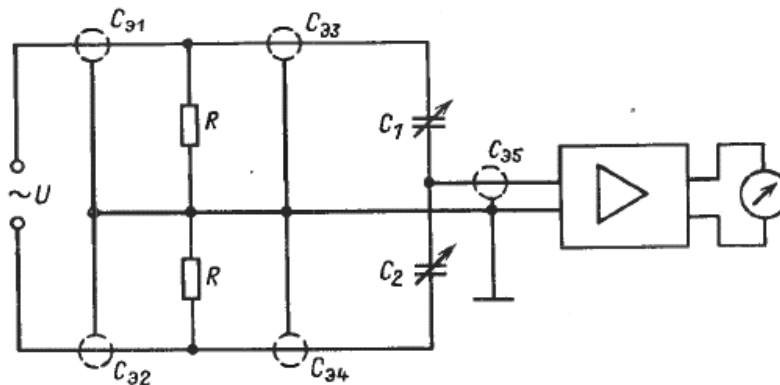


Рис. 3 – Мостовая цепь в неравновесном режиме

В этой цепи емкости  $C_1$  и  $C_2$  – дифференциальный преобразователь. На схеме показано также экранирование соединительных проводов и диагоналей мостовой цепи.  $C_{31}$ ,  $C_{32}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{34}$  – емкости соответствующих экранов. Эти емкости включены параллельно активным сопротивлениям и входят в полные сопротивления плеч моста. Эквивалентные емкости экранов могут несколько изменяться при работе прибора. Для того чтобы их изменения мало влияли на выходное напряжение моста, сопротивления резисторов  $R$  должны быть малыми. Емкость  $C_{35}$  не входит в уравнение равновесия моста, и ее изменение значительно меньше влияет на его выходное напряжение.

### **Использование библиотеки Simscape**

В состав пакета Simulink системы MATLAB входит библиотека блоков Simscape. Simscape отличается от всех остальных библиотек Simulink. Это – не просто библиотека. Simscape – это среда, целый комплекс для моделирования физических объектов. Simscape предоставляет окружение для создания моделей и проведения симуляции физических систем, содержащих компоненты из различных инженерных сфер деятельности: механических, электрических, гидравлических и других. Библиотека Simscape предоставляет фундаментальные блоки для построения объектов и систем, относящихся к этим областям знаний. При помощи фундаментальных блоков, в частности, можно создавать модели различных датчиков и исследовать их свойства. На основе электрических схем можно создавать модели компонентов измерительных систем, и путем моделирования определять оптимальные параметры измерительных цепей. Модели Simscape используются для разработки систем измерения, управления и контроля, а также их тестирования на системном уровне.

Построение моделей Simscape выполняется точно также, как и всех других моделей в пакете Simulink. Но есть и некоторые особенности:

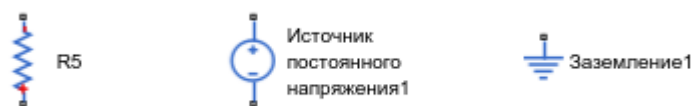


1. Связи между электрическими компонентами отражаются как минимум двумя линиями, что соответствует соединительным проводам электрических цепей (в Simulink используются соединения в виде одной линии, по которой проходит сигнал).
2. К модели в обязательном порядке должен быть подсоединен блок Solver (Решатель). Это объясняется тем, что фактически моделирование систем в Simulink выполняется путем решения систем дифференциальных уравнений, вид которых задается средствами визуального программирования: выбором блоков, введением линий связи между блоками и заданием параметров блоков. Поэтому для проведения моделирования к моделям, созданным из блоков библиотеки Simscape, обязательно должен быть подсоединен блок Solver (Решатель), который задает метод решения этих дифференциальных уравнений, шаг времени и другие параметры моделирования.
3. Модели Simscape отличаются по своему внутреннему построению от всех других моделей системы Simulink, и они не могут быть напрямую состыкованы с какими-либо блоками, не относящимися к библиотеке Simscape. Поэтому, когда возникает необходимость в применении блоков Simulink совместно с моделями, состоящими из блоков Simscape, то между блоками разных подсистем необходимо вставить специальные блоки, которые переводят сигналы из модели Simscape в модель Simulink. Таким блоком является блок PS-Simulink Convertor. Обратную задачу – передачу сигналов из Simulink в Simscape обеспечивает блок Simulink-PS Convertor.

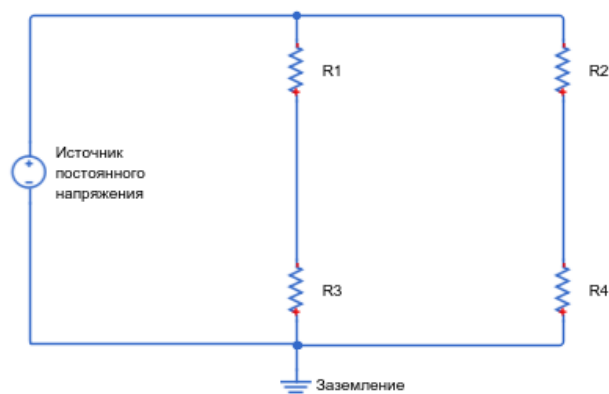
## Порядок выполнения работы

### Построение модели

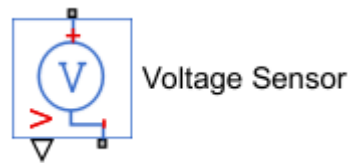
1. Используя следующие блоки библиотек **Simscape>Foundation Library>Electrical>Electrical Elements** и **Simscape>Foundation Library>Electrical>Electrical Sources**



создайте модель электрического моста постоянного тока:



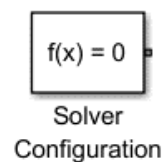
2. Введіть в схему вольтметр для вимірювання напруги в вимірній діагоналі моста



який знаходиться в бібліотеці **Simscape>Foundation Library>Electrical>Electrical Sensors**. Для повороту і зворотного відображення зображення вольтметра користуйтеся опціями **Rotate & Flip** (Повернути/Відобразити) випадаючого меню, яке з'являється при виділенні елемента і натисненні правої кнопки миші.

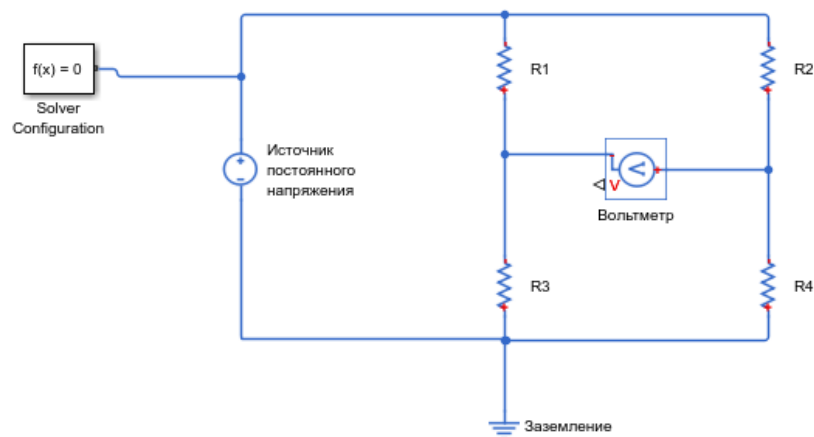
3. Моделювання систем в **Simulink** виконується шляхом рішення систем диференціальних рівнянь, вигляд яких задається засобами візуального програмування, а саме вибором блоків, введенням ліній зв'язу між блоками і заданням параметрів блоків. Для проведення моделювання к моделям, створеним з блоків бібліотеки **Simscape**, обов'язково повинен бути підключений блок **Solver** (Решальник), який задає метод рішення диференціальних рівнянь, крок часу і інші параметри моделювання.

Блок Solver знаходиться в бібліотеці **Simscape>Utilities** він має наступний вигляд:



Він підключається шляхом проведення лінії від вихідного порту блоку **Solver** і підключення цієї лінії до будь-якої з ліній моделі.

В результаті отримуємо схему приблизно такого вигляду:



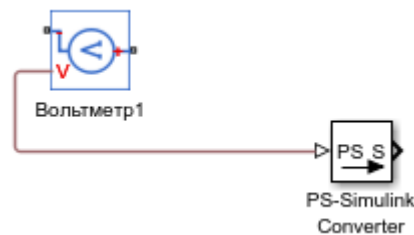
4. Модели **Simscape** отличаются по своему внутреннему построению от всех других моделей системы **Simulink**, и они не могут быть напрямую состыкованы со какими-либо блоками, не относящимися к **Simscape**. Поэтому, когда возникает необходимость в применении этих блоков, то между блоками **Simscape** и **Simulink** необходимо вставить специальные блоки, которые переводят сигналы из модели **Simscape** в модель **Simulink**:



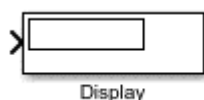
Данный блок находится в библиотеке **Simscape>Utilities**.

*Примечание:* в системе **Simulink** также существуют блоки **Simulink-PS Converter**, которые выполняют и обратную задачу – передачу сигналов из **Simulink** в **Simscape**.

5. Для обеспечения считывания показаний вольтметра в модель необходимо внести дисплей. Дисплеи находятся вне библиотеки **Simscape**, поэтому для их применения необходимо организовать связь через блок **PS-Simulink Converter**. Для этого необходимо связать порты, имеющие форму треугольника, блоков **Voltage Sensor** и **PS-Simulink Converter**. Линия приобретет коричневый цвет:

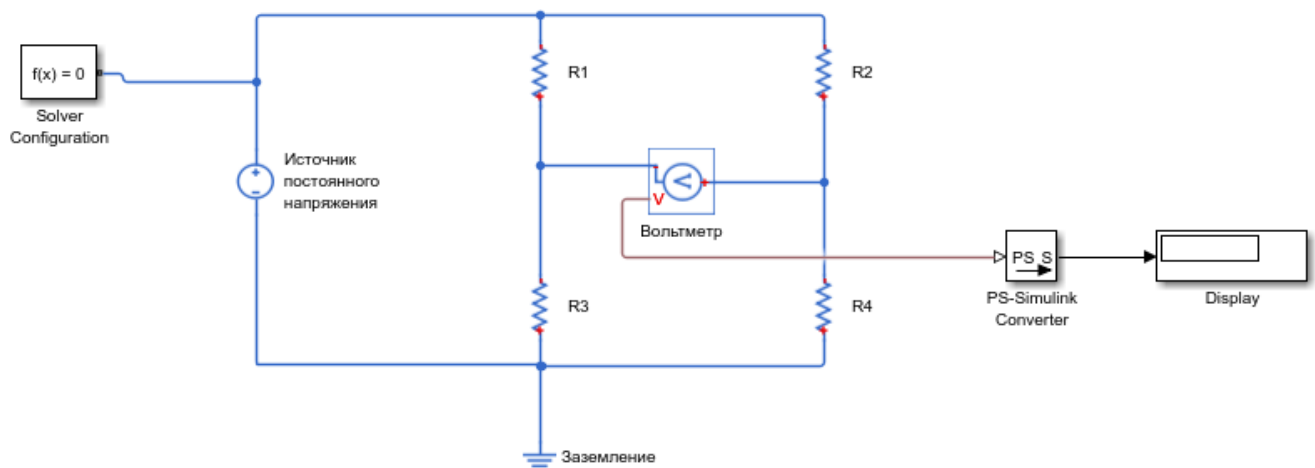


Дисплей



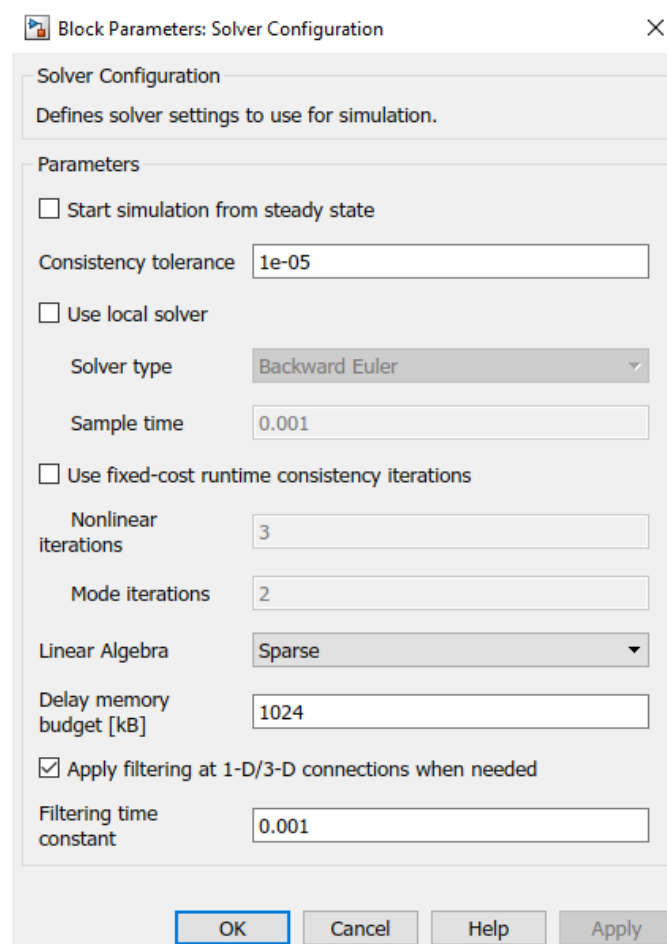
находится в библиотеке **Simulink>Sinks**.

6. После выполнения указанных выше построений модель приобретает примерно такой вид:



## 7. Производим настройку параметров модели.

- а) Параметры  $R1 - R4$  соответствующих блоков вводим из таблицы 1.
- б) Величину напряжения источника питания постоянного тока устанавливаем 10В.
- в) Параметры блока **Solver** не изменяем. Установленные по умолчанию параметры представлены на следующем рисунке.



- г) Продолжительность моделирования установить 0,1с.

**Проведение моделирования**

1. Для получения градуировочной характеристики измерителя  $R=f(U_{\text{изм}})$  необходимо при различных значениях сопротивления  $R1$  произвести моделирование работы схемы и зафиксировать величину измеряемого напряжения  $U_{\text{изм}}$ . Данные измерений занести в таблицу и построить график  $R1=f(U_{\text{изм}})$ . Диапазон изменения  $R1$  не менее от  $0.3R1_{\text{ном}}$  до  $3.0R1_{\text{ном}}$ .

2. Построить линейную зависимость  $R1=A \cdot U_{\text{изм}} + R1_{\text{ном}}$  для области значений  $R1$ , близкой к номинальному значению  $R1_{\text{ном}}$ . Для построения указанной зависимости можно воспользоваться уравнением прямой, проходящей через две точки:

$$(y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y + (x_1y_2 - x_2y_1) = 0$$

В качестве первой точки выбираем начальную точку  $RI_{\text{ном}}$ . В качестве второй выбираем точку достаточно близко приближенную к  $RI_{\text{ном}}$ . Обозначим сопротивление в этой точке  $RI_1$ , а напряжение  $U_{\text{изм1}}$ . Тогда коэффициент  $A$  в линейной зависимости можно рассчитать по формуле:  $A = \frac{RI_1 - RI_{\text{ном}}}{U_{\text{изм1}}}$ .

3. Найти диапазон изменения  $RI$ , в котором относительная методическая погрешность измерения  $\delta = \frac{\Delta}{RI}$ , которая появляется вследствие замены действительной градуировочной зависимости  $RI=f(U_{\text{изм}})$  линейной зависимостью  $RI=A \cdot U_{\text{изм}} + RI_{\text{ном}}$  составляет менее 1%. Здесь  $\Delta$  – разность между действительным значением сопротивления  $RI$  и значением, полученным по линейной зависимости  $RI=A \cdot U_{\text{изм}} + RI_{\text{ном}}$  на основе измеренного значения напряжения  $U_{\text{изм}}$ .

Для нахождения данного диапазона необходимо будет выполнить дополнительные циклы моделирования в соответствии с пунктом 1 в области сопротивлений, близких к  $RI_{\text{ном}}$ .

### Данные для проведения моделирования

В таблице 1 приведены значения сопротивлений плеч моста. Номера вариантов соответствуют порядковому номеру фамилии студента в журнале группы.

Таблица 1

Сопротивления плеч моста (по вариантам)

№ варианта	$RI_{\text{ном}}$ , Ом	$R1, R2, R3$ , Ом
1	10000	10000
2	100	100
3	500	500
4	1500	1500
5	1000	1000

### Оформление результатов

Результаты оформить в виде отчета. В отчете необходимо привести результаты моделирования в виде таблиц и графиков. Привести формулы и график линейной градуировочной характеристики, а также ее расчет. На основе экспериментальных данных и расчета погрешности привести обоснование выбора диапазона измерений, на котором можно применять линейную градуировочную характеристику.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО КУРСУ "КОМП'ЮТЕРНО-ИНТЕГРОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ" № KI-04

**Тема:** Получение градуировочной характеристики термоэлектрического термометра

**Цель:** Изучить работу термоэлектрического термометра путем моделирования процессов передачи тепла и термоэлектрического эффекта.

**Задача исследования:** В ходе выполнения лабораторной работы необходимо:

- а) получить градуировочную характеристику термоэлектрического платинородий-платинового ( Pt-10%Rh / Pt) термометра (тип S);
- б) построить линеаризованную градуировочную характеристику исследуемого термоэлектрического термометра;
- в) определить наибольшее значение методической погрешности, появляющейся в измерениях в случае замены действительной градуировочной характеристики линеаризованной характеристикой в исследуемом диапазоне температур.

Лабораторная работа выполняется по вариантам. Номера вариантов соответствуют порядковому номеру фамилии студента в журнале группы.

### Общие сведения

#### *Принцип действия термоэлектрических преобразователей*

Явление термоэлектричества заключается в следующем. Если электрическая цепь состоит из двух различных металлов или сплавов и точки их соединения (спай) находятся при различных температурах, то в цепи должен протекать ток (рис. 1). При размыкании цепи на ее концах можно измерить разность потенциалов – так называемую термоэлектродвижущую силу (термо-э.д.с.).

Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразователем или иначе термопарой; проводники, составляющие термопару, – термоэлектродами, а места их соединения – спаями.

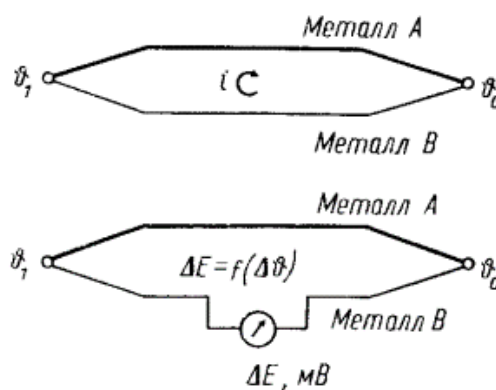


Рис.1 – Проявление термоэлектрического эффекта

Если температура одной точки соединения (спая)  $\Theta_0$  известна, то получаемая термо-э.д.с. будет мерой разности между измеряемой температурой  $\Theta_1$  и контрольной температурой  $\Theta_0$  (холодного спая). Оба места соединения называют также рабочим («горячим») и свободным («холодным») спаем.

$$E_{AB}(\Theta_1, \Theta_0) = f(\Theta_1) - f(\Theta_0)$$

Опыт показывает, что у любой пары однородных проводников, подчиняющихся закону Ома, величина термо-э.д.с. зависит только от природы проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температур между спаями. Зависимость между термо-э.д.с. и разностью температур в общем случае нелинейна и может быть выражена уравнением третьей степени. Однако в области температур, обычных при промышленных измерениях, обычно вполне достаточно принять квадратичную зависимость:

$$\Delta E = a + b\Delta\Theta + c\Delta\Theta^2$$

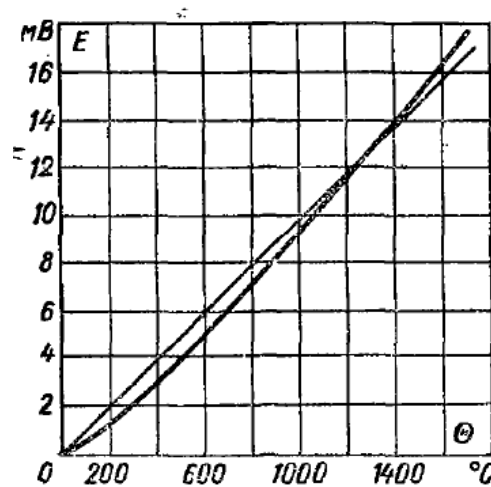


Рис. 2 – Зависимость величины термо-э.д.с. от разности температур

Постоянные  $a$ ,  $b$  и  $c$  зависят в первую очередь от природы обоих металлов или сплавов. Их можно определить путем градуировки в реперных точках. При малых изменениях температур характеристики многих термопар могут быть линеаризованы без большого ущерба для точности:

$$\Delta E = k \Delta\Theta \text{ [мВ]},$$

где  $k$  – коэффициент термо-э.д.с., зависящий также и от уровня температуры, мВ/К.

Используя уравнение для термо-э.д.с., можно для каждой комбинации материалов термопары построить график зависимости термо-э.д.с. термопары от измеряемой температуры (температуры рабочего спая), полагая, что температура ее свободного спая  $\Theta_0$  равна  $0^\circ\text{C}$  (рис. 2а). Если контрольная температура не равна  $0^\circ\text{C}$ , а поддерживается постоянной, как это часто бывает, равной 20, 50 или  $60^\circ\text{C}$  или даже вообще непостоянна (как при измерении разности температур), то в измеренное значение термо-э.д.с.  $\Delta E_M$  нужно внести поправку  $\Delta E_K$ , которая соответствует отклонению контрольной температуры  $\Theta_0$  от  $0^\circ\text{C}$ :

$$\Delta E = \Delta E_M + \Delta E_K$$

Значения термо-э.д.с. в зависимости от измеряемой температуры, а также допустимые отклонения при поставке регламентируются для основных комбинаций материалов фирмами-изготовителями и национальными

управліннями по стандартизації и указываются в специальных таблицах (при  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ ). Эти допуски считаются гарантированными при поставках, но к погрешностям при последующих измерениях они не относятся.

Полярность термо-э.д.с. считается положительной, если температура в месте измерения выше контрольной. При обозначении материалов термоэлектрических элементов на первом месте перед тире ставят условный символ положительного термоэлектрода, а на втором месте после тире – символ отрицательного термоэлектрода (потенциала).

### **Материалы термоэлектродов**

Выбирать подходящую термопару для измерения определенной температуры следует с учетом различных требований, причем в отношении некоторых требований приходится принимать компромиссные решения. Однако к термоэлектродам наряду с приемлемой ценой и надежностью предъявляют следующие требования: высокая чувствительность к изменениям температуры (высокий коэффициент термо-э.д.с.), линейность характеристики термо-э.д.с., благоприятные динамические свойства (малая инерционность), достаточная механическая прочность при высоких и низких температурах, стойкость против коррозии, стабильность термоэлектрических свойств во времени.

С течением времени из большого числа возможных комбинаций материалов термоэлектродов получили применение на практике лишь некоторые, причем каждая пара, как правило, имеет свою специфическую область применения. Все материалы для термопар делят на две группы: пары благородных металлов и пары неблагородных металлов.

#### Термопары из благородных металлов

Термопары из благородных металлов, преимущественно из платины и ее сплава с родием (Pt10Rh – Pt и Pt13Rh – Pt6Rh), обладают высокой точностью и отличаются воспроизводимостью термоэлектрической характеристики. Поэтому платинородий-платиновая термопара Pt10Rh – Pt используется для воспроизведения Международной практической температурной шкалы (МПТШ) в интервале температур от 630,7 до 1064,4 °C. Эти термопары более устойчивы к коррозии и окислению, чем термопары из неблагородных металлов, и поэтому могут быть использованы при более высоких температурах. Так, термопары Pt10Rh – Pt используют для измерения температур от 0 до 1600 °C а термопары Pt13Rh – Pt6Rh – от 0 до 1700 °C. Термопары из благородных металлов имеют, как правило, низкую чувствительность к изменениям температуры; к тому же они довольно дороги.

#### Термопары из неблагородных металлов

Термопары из неблагородных металлов применяют преимущественно для измерения более низких температур. Они дешевле термопар из благородных металлов, и на их долю приходится абсолютное большинство всех применяемых термопар; во многих странах они отчасти стандартизированы. К таким стандартизированным термопарам относятся медь–константан, железо–константан и нихром–никель (хромель–алюмель).



Термопары *медь – константан* (Cu–Konst, константан – сплав меди, никеля и марганца) особенно пригодны для измерения низких температур от  $-250$  до  $400$  °С. При более высоких температурах медь не обладает достаточной стойкостью к кислороду воздуха. Эти термопары наряду с железо-константановыми имеют наиболее крутую температурную характеристику, но их характеристика недостаточно линейна.

*Железо-константановые* термопары (Fe–Konst) допускают более широкий диапазон измерения от  $-250$  до  $700$  °С, если коррозионно-активная среда не препятствует их применению (при некоторых условиях железо сильно ржавеет и покрывается окалиной). Постоянство термоэлектрических свойств во времени тоже надежно не обеспечивается.

Термопары *нихром–никель* (почти то же, что хромель–алюмель) имеют среди термопар из неблагородных металлов самый высокий температурный диапазон измерения: от  $-200$  до  $1300$  °С. Эти термопары отличаются точностью и устойчивостью, однако их температурный коэффициент термо-э.д.с. меньше, чем термопар медь–константан и железо–константан. Характеристика их в достаточной степени линейна. Окалинообразование вследствие окисления становится заметным при температурах выше  $600$  °С, что ограничивает время использования термопар в верхней области их температурного диапазона.

### ***Градуировочная характеристика средства измерений***

Градуировочной характеристикой средства измерений называется зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений, составленная в виде таблицы, графика или формулы. Применительно к термоэлектрическому термометру градуировочной характеристикой следует считать зависимость  $T=f(U_{\text{изм}})$ , где  $U_{\text{изм}}$  – измеренная вольтметром величина термо-ЭДС (выход), а  $T$  – температура рабочего спая термоэлектрического термометра (вход).

### ***Чувствительность измерительного прибора***

Чувствительность измерительного прибора – это отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины.

*Примечание.* Различают абсолютную и относительную чувствительность. Абсолютная чувствительность определяется формулой:

$$S = \Delta l / \Delta x$$

Относительная чувствительность определяется формулой:

$$S = \Delta l / (\Delta x / x)$$

где  $\Delta l$  – изменение сигнала на выходе,  $x$  – измеряемая величина,  $\Delta x$  – изменение измеряемой величины

### ***Использование библиотеки Simscape***

В состав пакета Simulink системы MATLAB входит библиотека блоков Simscape. Simscape отличается от всех остальных библиотек Simulink. Это – не просто библиотека. Simscape – это среда, целый комплекс для моделирования физических объектов. Simscape предоставляет окружение для создания моделей и проведения симуляции физических систем, содержащих компоненты из различных инженерных сфер деятельности: механических, электрических, гидравлических и других. Библиотека Simscape предоставляет фундаментальные блоки для построения объектов и систем, относящихся к этим областям знаний. При помощи фундаментальных блоков, в частности, можно создавать модели различных датчиков и исследовать их свойства. На основе электрических схем можно создавать модели компонентов измерительных систем, и путем моделирования определять оптимальные параметры измерительных цепей. Модели Simscape используются для разработки систем измерения, управления и контроля, а также их тестирования на системном уровне.

Построение моделей Simscape выполняется точно также, как и всех других моделей в пакете Simulink. Но есть и некоторые особенности:

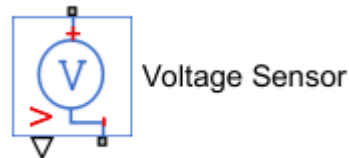
1. Связи между электрическими компонентами отражаются как минимум двумя линиями, что соответствует соединительным проводам электрических цепей (в Simulink используются соединения в виде одной линии, по которой проходит сигнал).
2. К модели в обязательном порядке должен быть подсоединен блок Solver (Решатель). Это объясняется тем, что фактически моделирование систем в Simulink выполняется путем решения систем дифференциальных уравнений, вид которых задается средствами визуального программирования: выбором блоков, введением линий связи между блоками и заданием параметров блоков. Поэтому для проведения моделирования к моделям, созданным из блоков библиотеки Simscape, обязательно должен быть подсоединен блок Solver (Решатель), который задает метод решения этих дифференциальных уравнений, шаг времени и другие параметры моделирования.
3. Модели Simscape отличаются по своему внутреннему построению от всех других моделей системы Simulink, и они не могут быть напрямую состыкованы с какими-либо блоками, не относящимися к библиотеке Simscape. Поэтому, когда возникает необходимость в применении блоков Simulink совместно с моделями, состоящими из блоков Simscape, то между блоками разных подсистем необходимо вставить специальные блоки, которые переводят сигналы из модели Simscape в модель Simulink. Таким блоком является блок PS-Simulink Convertor. Обратную задачу – передачу сигналов из Simulink в Simscape обеспечивает блок Simulink-PS Convertor.

## Порядок выполнения работы

### Построение модели

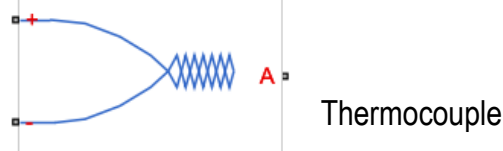
1. В данной работе моделируется два разных типа физических процессов: тепловой процесс и электрический процесс. Построение начнем с модели электрического процесса. Для снятия градуировочной характеристики достаточно вольтметра и, собственно, термоэлектрического термометра.

Блок вольтметра



находится в библиотеке **Simscape>Foundation Library>Electrical>Electrical Sensors**.

Блок термоэлектрического термометра (Thermocouple)



находится в библиотеке **Simscape>Electronics>Sensors**.

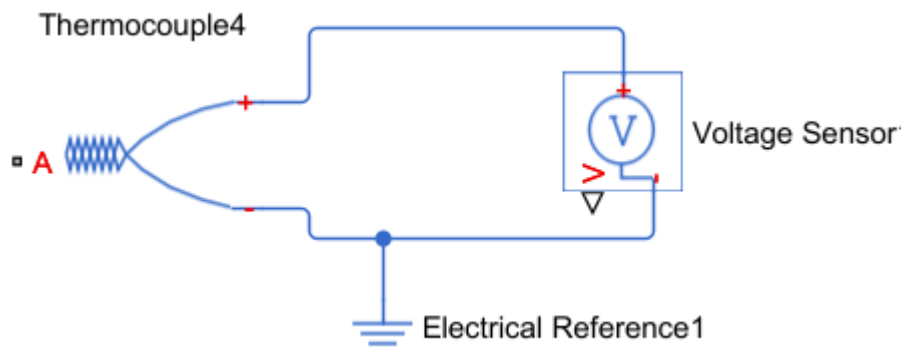
Соединяем указанные элементы и обязательно добавляем к контуру заземление



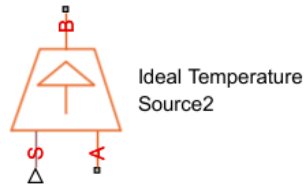
которое представлено соответствующим блоком в библиотеке **Simscape>Foundation Library>Electrical>Electrical Elements**.

Обратите внимание, что «+» термометра должен соединяться с входом «+» вольтметра. Точно также и для «-». Для поворота и зеркального отображения изображения блока пользуйтесь опциями **Rotate & Flip** (Повернуть/Отразить) выпадающего меню, которое появляется при выделении элемента и нажатии правой клавиши мыши.

В результате получаем модель электрической цепи такого вида:



2. Переходим к моделированию процесса передачи тепла. Источник тепла в среде Simscape представляется блоком «Идеальный источник температуры» (**Ideal Thermal Sources**)



который находится в библиотеке **Simscape>Foundation Library>Thermal>Thermal Sources**.

Блок «Идеальный источник температуры» (**Ideal Thermal Sources**) представляет собой идеальный источник тепловой энергии, достаточно мощный для поддержания заданной температуры на выходе независимо от теплового потока, потребляемого системой.

Точки аоединения А и В являются портами, соответствующими входу и выходу источника соответственно. Порт S является физическим сигнальным портом; через него подается управляющий сигнал, который управляет источником. Вы можете использовать все разнообразие источников сигналов Simulink для создания желаемого профиля изменения теплового потока. Разница температур в источнике прямо пропорциональна сигналу, подаваемому на управляющий вход S.

Положительное направление передачи тепла блоком – от порта А к порту В. Это означает, что разность температур определяется как  $(T_B - T_A)$ , где  $T_B$  и  $T_A$  – температуры на указанных портах источника.

В данной модели будем использовать точку отсчета в виде абсолютного нуля температур. То есть, будем считать, что идеальный источник температуры производит нагрев от абсолютного нуля. Исходя из этого, на вход А подсоединяем точку отсчета в виде абсолютного нуля температур, которая представляется блоком **Thermal Reference** (Точка отсчета температуры):



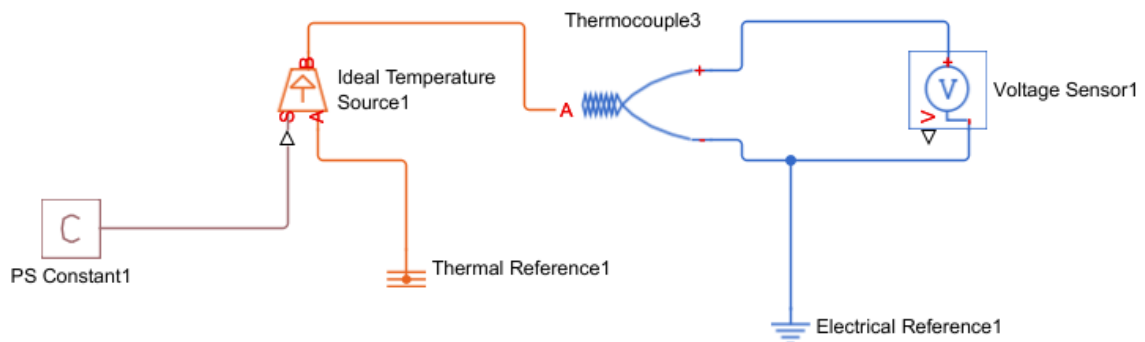
Этот блок находится в библиотеке **Simscape>Foundation Library>Thermal>Thermal Elements**. Его роль в тепловой модели аналогична роли блока «Заземление», который представляет нулевой потенциал в моделях электрических цепей.

Выход В источника тепла подсоединяем ко входу А термоэлектрического термометра. На вход S источника тепла подаем постоянный сигнал, который будет задавать величину температуры на выходе В. Это и есть та температура среды, в которой находится рабочий спай термодпары. Термоэлектрическим термометром измеряется разность температур между этой температурой рабочего спая и температурой холодного спая. При моделировании температура холодного спая

задається в настройках блока термоэлектрического термометра. Постоянный сигнал создаем при помощи блока **PS Constant** библиотеки **Simscape>Foundation Library>Physical Signals>Sources**. В процессе моделирования путем изменения данной константы будем задавать температуру рабочего сая в абсолютной шкале температур.

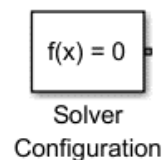


В результате модель приобретает примерно такой вид:



3. Моделирование систем в **Simulink** выполняется путем решения систем дифференциальных уравнений, вид которых задается средствами визуального программирования, а именно выбором блоков, введением линий связи между блоками и заданием параметров блоков. Для проведения моделирования к моделям, созданным из блоков библиотеки **Simscape**, обязательно должен быть подсоединен блок **Solver** (Решатель), который задает метод решения дифференциальных уравнений, шаг времени и другие параметры моделирования.

Блок **Solver** находится в библиотеке **Simscape>Utilities** он имеет следующий вид:



Он подключается путем проведения линии от выходного порта блока **Solver** и присоединения этой линии к любой из линий модели.

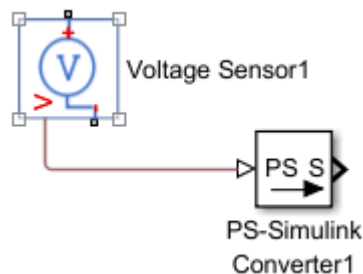
4. Модели **Simscape** отличаются по своему внутреннему построению от всех других моделей системы **Simulink**, и они не могут быть напрямую состыкованы со какими-либо блоками, не относящимися к **Simscape**. Поэтому, когда возникает необходимость в применении этих блоков, то между блоками **Simscape** и **Simulink** необходимо вставить специальные блоки, которые переводят сигналы из модели **Simscape** в модель **Simulink**:



Данный блок находится в библиотеке **Simscape>Utilities**.

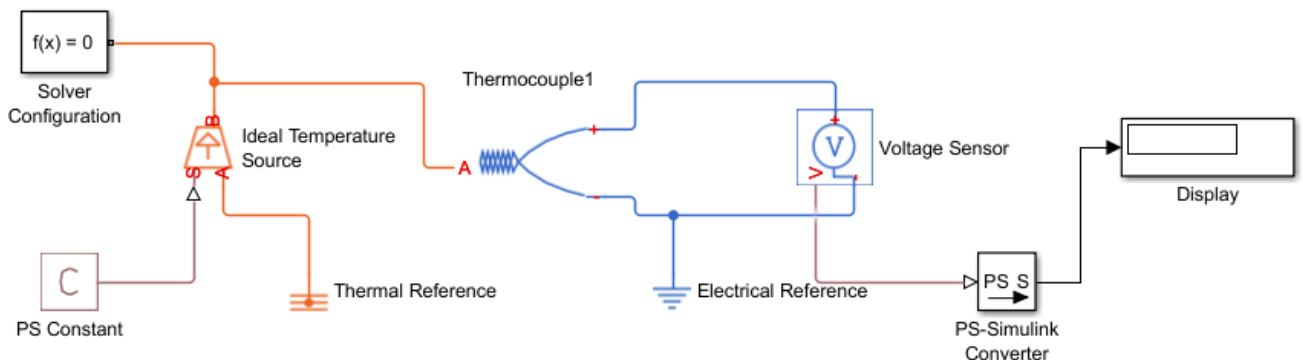
*Примечание:* в системе **Simulink** также существуют блоки **Simulink-PS Converter**, которые выполняют и обратную задачу – передачу сигналов из **Simulink** в **Simscape**.

5. Для обеспечения считывания показаний вольтметра в модель необходимо внести дисплей. Дисплеи находятся вне библиотеки **Simscape**, поэтому для их применения необходимо организовать связь через блок **PS-Simulink Converter**. Для этого необходимо связать порты, имеющие форму треугольника, блоков **Voltage Sensor** и **PS-Simulink Converter**. Линия приобретет коричневый цвет:



Дисплей  находится в библиотеке **Simulink>Sinks**.

6. После выполнения указанных выше построений модель приобретает примерно такой окончательный вид:

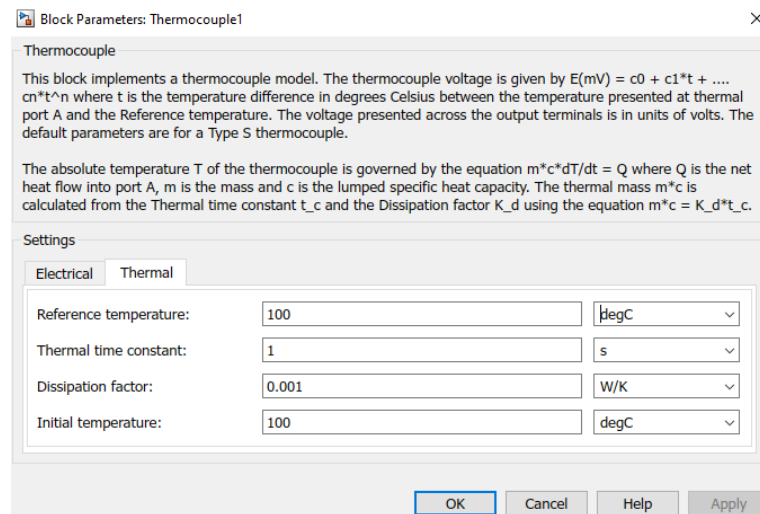


7. Производим настройку параметров модели.

а) Для имитации работы платиноводородий-платинового (Pt-10%Rh / Pt) термоэлектрического термометра (тип S) в поле **Coefficients** вкладки **Electrical** блока **Thermocouple** вносим следующие коэффициенты в строго указанном формате:

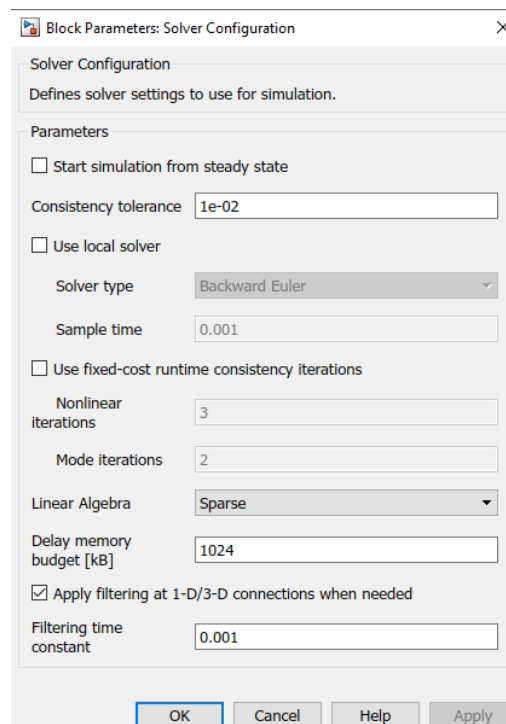
[ 0 0.0054031 1.2593e-5 -2.3248e-8 3.2203e-11 -3.3147e-14 2.5574e-17 -1.2507e-20 2.7144e-24 ]

- б) В поля **Reference temperature** и **Initial temperature** вкладки **Thermal** блока **Thermocouple** вносим значение температуры холодного спая из таблицы 1.



Остальные параметры блока **Thermocouple** оставляем без изменения (по умолчанию).

- в) Параметры блока **Solver** не изменяем. Установленные по умолчанию параметры представлены на следующем рисунке.



- г) Продолжительность моделирования установить 1с.

### **Проведение моделирования**

1. Для получения градуировочной характеристики измерителя  $T=f(U_{\text{изм}})$  необходимо при различных значениях  $T$  произвести моделирование и зафиксировать величину генерируемой ЭДС в виде измеряемого вольтметром напряжения  $U_{\text{изм}}$ . Данные измерений занести в таблицу и построить график

$T=f(U_{\text{изм}})$ . Диапазон  $[T_{\text{н}}, T_{\text{в}}]$ , а также шаг  $\Delta T$  изменения температуры для снятия градуировочной характеристики приведены в таблице 1.

2. Построить линейную зависимость  $T=A \cdot U_{\text{изм}}+B$  по двум крайним точкам диапазона:

- верхней с температурой  $T_{\text{в}}$  и термо-ЭДС  $U_{\text{изм}}^{\text{в}}$
- нижней с температурой  $T_{\text{н}}$  и термо-ЭДС  $U_{\text{изм}}^{\text{н}}$

Для построения указанной зависимости можно воспользоваться уравнением прямой, проходящей через две точки:

$$(y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y + (x_1y_2 - x_2y_1) = 0$$

На основе данного уравнения прямой значение коэффициентов  $A$  и  $B$  можно определить по следующим формулам:

$$A = \frac{T_{\text{в}} - T_{\text{н}}}{U_{\text{изм}}^{\text{в}} - U_{\text{изм}}^{\text{н}}} \quad B = \frac{U_{\text{изм}}^{\text{н}} T_{\text{в}} - U_{\text{изм}}^{\text{в}} T_{\text{н}}}{U_{\text{изм}}^{\text{н}} - U_{\text{изм}}^{\text{в}}}$$

3. В исследуемом диапазоне изменения температур  $[T_{\text{н}}, T_{\text{в}}]$  найти наибольшее значение относительной методической погрешности  $\delta = \frac{\Delta}{T}$ , которая появляется вследствие замены действительной градуировочной зависимости  $T=f(U_{\text{изм}})$  линейной зависимостью  $T=A \cdot U_{\text{изм}}+B$ . Здесь  $\Delta$  – разность между действительным значением температуры рабочего спая  $T$  и значением, полученным по линейной зависимости  $T=A \cdot U_{\text{изм}}+B$  на основе измеренного значения напряжения  $U_{\text{изм}}$

4. Определить абсолютную чувствительность термоэлектрического термометра  $\Delta U_{\text{изм}}/\Delta T$  в исследуемом диапазоне температур.

### Исходные данные для моделирования

В таблице 1 приведены исходные данные для проведения моделирования. Номера вариантов соответствуют порядковому номеру фамилии студента в журнале группы.

Таблица 1

Данные для проведения моделирования

№ варианта	Температура холодного спая	Исследуемый диапазон температур $[T_{\text{н}}, T_{\text{в}}]$	Шаг изменения температуры $\Delta T$
1	0 <sup>0</sup> С	от -150 <sup>0</sup> С до 150 <sup>0</sup> С	50 <sup>0</sup> С
2	0 <sup>0</sup> С	от 200 <sup>0</sup> С до 800 <sup>0</sup> С	100 <sup>0</sup> С
3	100 <sup>0</sup> С	от 200 <sup>0</sup> С до 800 <sup>0</sup> С	100 <sup>0</sup> С
4	0 <sup>0</sup> С	от 100 <sup>0</sup> С до 400 <sup>0</sup> С	50 <sup>0</sup> С
5	100 <sup>0</sup> С	от 100 <sup>0</sup> С до 400 <sup>0</sup> С	50 <sup>0</sup> С

### Оформление результатов

Результаты оформить в виде отчета. В отчете необходимо привести результаты моделирования в виде таблиц и графиков. Привести формулы и график линейной градуировочной характеристики, а также ее расчет. Указать наибольшее значение относительной методической погрешности и абсолютную чувствительность термоэлектрического термометра, рассчитанных по экспериментальным данным.



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО КУРСУ "КОМП'ЮТЕРНО-ИНТЕГРОВАНІ  
СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ"  
№ КІ-05

**Тема:** Резонансный метод измерения емкости

**Цель:** Изучить резонансный метод измерения путем моделирования работы измерителя емкости, функционирующего на основе резонансного метода.

**Задача исследования:** В ходе выполнения лабораторной работы необходимо:

- а) получить градуировочную характеристику измерителя емкости, функционирующего на основе резонансного метода;
- б) построить линеаризованную градуировочную характеристику исследуемого измерителя емкости;
- в) определить наибольшее значение методической погрешности, появляющейся в измерениях в случае замены действительной градуировочной характеристики линеаризованной характеристикой в исследуемом диапазоне емкостей.

Лабораторная работа выполняется по вариантам. Номера вариантов соответствуют порядковому номеру фамилии студента в журнале группы.

### Общие сведения

#### Резонансный метод измерения емкости

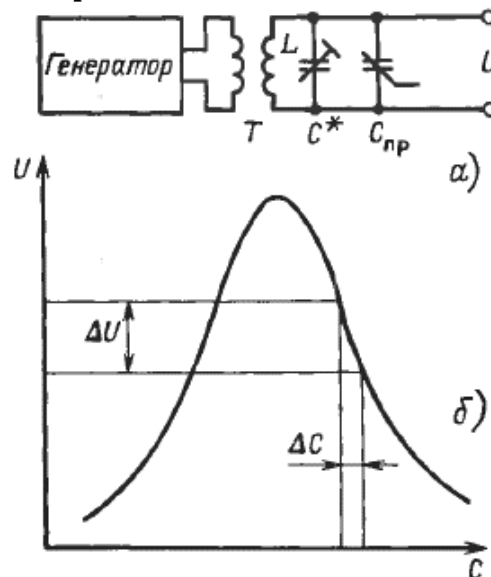


Рис. 1 – Резонансный метод измерения емкости

Для измерения емкости датчика может использоваться резонансная цепь (рис.1а). Генератор через разделительный трансформатор  $T$  питает резонансный  $RC$ -контур. Емкость контура состоит из емкости преобразователя  $C_{пр}$  и подстроечного конденсатора емкостью  $C^*$ , частота и значение напряжения генератора постоянны. При изменении емкости датчика напряжение на контуре изменяется по резонансной кривой, как показано на рис. 1б. При изменении

емкости преобразователя на  $\Delta C$  напряжение на контуре изменяется на  $\Delta U$ . Подстроечный конденсатор служит для настройки контура так, чтобы чувствительность измерительной цепи  $Q = \Delta U / \Delta C$  была максимальной.

Чувствительность резонансной цепи довольно высока и увеличивается с увеличением добротности контура.

### ***Градуировочная характеристика средства измерений***

Градуировочной характеристикой средства измерений называется зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений, составленная в виде таблицы, графика или формулы. Применительно к измерителю емкости градуировочной характеристикой следует считать зависимость  $C = f(U_{\text{изм}})$ , где  $U_{\text{изм}}$  – измеренная вольтметром величина напряжения (выход), а  $C$  – измеряемая емкость (вход).

### ***Чувствительность измерительного прибора***

Чувствительность измерительного прибора – это отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины.

*Примечание.* Различают абсолютную и относительную чувствительность. Абсолютная чувствительность определяется формулой:

$$S = \Delta l / \Delta x$$

Относительная чувствительность определяется формулой:

$$S = \Delta l / (\Delta x / x)$$

где  $\Delta l$  – изменение сигнала на выходе,  $x$  – измеряемая величина,  $\Delta x$  – изменение измеряемой величины

### ***Использование библиотеки Simscape***

В состав пакета Simulink системы MATLAB входит библиотека блоков Simscape. Simscape отличается от всех остальных библиотек Simulink. Это – не просто библиотека. Simscape – это среда, целый комплекс для моделирования физических объектов. Simscape предоставляет окружение для создания моделей и проведения симуляции физических систем, содержащих компоненты из различных инженерных сфер деятельности: механических, электрических, гидравлических и других. Библиотека Simscape предоставляет фундаментальные блоки для построения объектов и систем, относящихся к этим областям знаний. При помощи фундаментальных блоков, в частности, можно создавать модели различных датчиков и исследовать их свойства. На основе электрических схем можно создавать модели компонентов измерительных систем, и путем моделирования определять оптимальные параметры измерительных цепей. Модели Simscape используются для разработки систем измерения, управления и контроля, а также их тестирования на системном уровне.

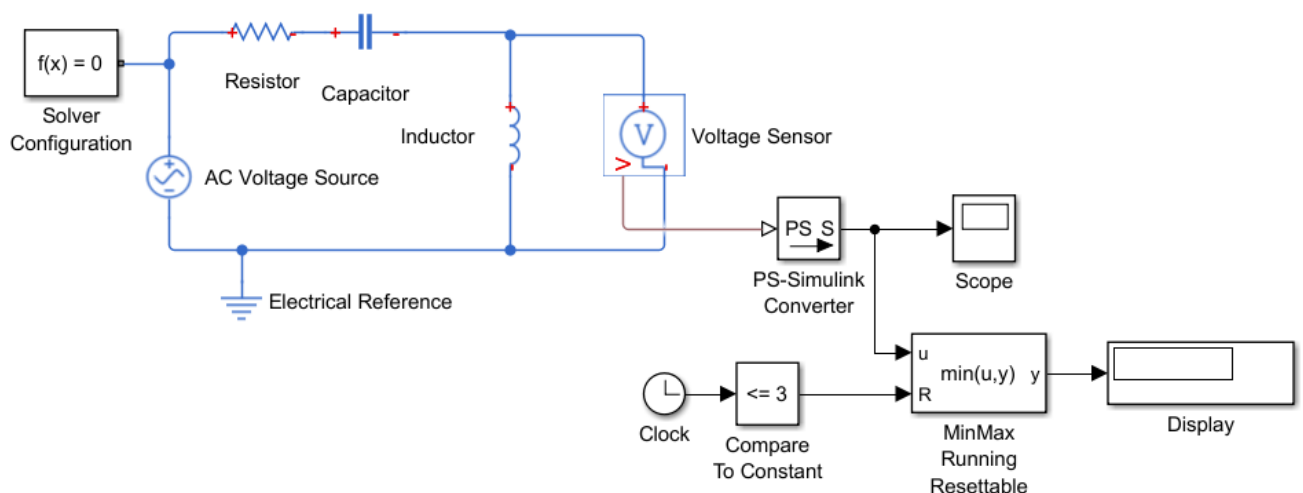
Построение моделей Simscape выполняется точно также, как и всех других моделей в пакете Simulink. Но есть и некоторые особенности:

1. Связи между электрическими компонентами отражаются как минимум двумя линиями, что соответствует соединительным проводам электрических цепей (в Simulink используются соединения в виде одной линии, по которой проходит сигнал).
2. К модели в обязательном порядке должен быть подсоединен блок Solver (Решатель). Это объясняется тем, что фактически моделирование систем в Simulink выполняется путем решения систем дифференциальных уравнений, вид которых задается средствами визуального программирования: выбором блоков, введением линий связи между блоками и заданием параметров блоков. Поэтому для проведения моделирования к моделям, созданным из блоков библиотеки Simscape, обязательно должен быть подсоединен блок Solver (Решатель), который задает метод решения этих дифференциальных уравнений, шаг времени и другие параметры моделирования.
3. Модели Simscape отличаются по своему внутреннему построению от всех других моделей системы Simulink, и они не могут быть напрямую состыкованы с какими-либо блоками, не относящимися к библиотеке Simscape. Поэтому, когда возникает необходимость в применении блоков Simulink совместно с моделями, состоящими из блоков Simscape, то между блоками разных подсистем необходимо вставить специальные блоки, которые переводят сигналы из модели Simscape в модель Simulink. Таким блоком является блок PS-Simulink Converter. Обратную задачу – передачу сигналов из Simulink в Simscape обеспечивает блок Simulink-PS Converter.

## Порядок выполнения работы

### Построение модели

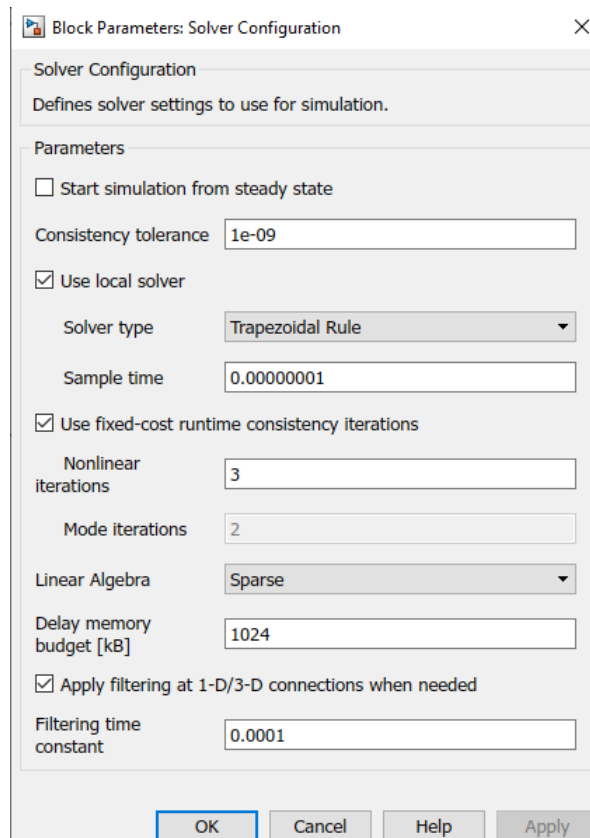
1. В качестве модели измерителя емкости используем модель резонансного контура, построенную при выполнении лабораторной работы KI-02:



2. Производим настройку параметров модели.

- а) Параметры  $L$ ,  $R$  и  $C$  соответствующих блоков вводим из таблицы 1. Остальные параметры блоков не меняем (оставляем те, что указаны по умолчанию).

- b) Амплитуду напруги синусоїдального тока от источника питания устанавливаем 1В. Значение емкости для получения градуировочной характеристики варьируем в соответствии с таблицей 2.
- c) В параметрах блока **Solver** установить «галочку» в окошке **Use local solver**. Выбрать в поле **Solver type** метод **Trapezoidal Rule**. Шаг дискретизации (**Sample time**) установить в соответствии с рекомендациями таблицы 1.



- d) Продолжительность моделирования установить в соответствии с рекомендациями таблицы 1.
- e) Параметр **Decimation** блока **Clock** установить в единицу.
- f) Константу сравнения времени в блоке **Compare to Constant** рекомендуется установить равной 0,7 продолжительности времени моделирования. Знак сравнения установить < (меньше). В этом случае все показания блока **MinMax Running Resettable** в первую половину моделирования будут сбрасываться в нуль. В течение второй половины моделирования блок **MinMax Running Resettable** будет фиксировать максимальное значение выходного сигнала, то есть его максимальную амплитуду. Это значение и будет отражено на экране дисплея после окончания моделирования.

### **Проведение моделирования**

1. Устанавливаем частоту генератора на 3% ниже резонансной частоты контура, которая соответствует номинальному значению измеряемой емкости  $C_{ном}$ .

2. Для получения зависимости  $U_{изм}=f(C)$  при данной частоте генератора необходимо при различных значениях  $C$  произвести моделирование и

зафіксувати вимірюване вольтметром напруга  $U_{\text{изм}}$ . Дані вимірювань занести в таблицю і побудувати графік  $U_{\text{изм}}=f(C)$ . Номинальне значення ємкості  $C_{\text{ном}}$  приведено в таблиці 1. Діапазон, а також крок зміни ємкості для зняття залежності  $U_{\text{изм}}=f(C)$  і градуировочної характеристики приведені в таблиці 2. Проаналізувати залежність і пояснити вид одержаної кривої.

3. По даним одержаним, при виконанні попереднього пункту, побудувати градуировочную характеристику вимірювача ємкості  $C=f(U_{\text{изм}})$  в діапазоні зміни ємкості  $C_{\text{ном}} \pm 5\% C_{\text{н}}$ .

4. В діапазоні  $C_{\text{ном}} \pm 5\% C_{\text{н}}$  побудувати лінійну залежність  $C=A \cdot U_{\text{изм}}+B$  по двом крайнім точкам діапазона:

- верхньої  $C_{\text{в}}=C_{\text{ном}} + 5\% C_{\text{н}}$

- нижньої  $C_{\text{н}}=C_{\text{ном}} - 5\% C_{\text{н}}$

Для побудови вказаної залежності можна воспользуватися рівнянням прямої, що проходить через дві точки:

$$(y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y + (x_1y_2 - x_2y_1) = 0$$

На основі даного рівняння прямої значення коефіцієнтів А і В можна визначити по наступним формулам:

$$A = \frac{C_{\text{в}} - C_{\text{н}}}{U_{\text{изм}}^{\text{в}} - U_{\text{изм}}^{\text{н}}} \quad B = \frac{U_{\text{изм}}^{\text{н}} C_{\text{в}} - U_{\text{изм}}^{\text{в}} C_{\text{н}}}{U_{\text{изм}}^{\text{н}} - U_{\text{изм}}^{\text{в}}}$$

5. В діапазоні зміни ємкостей  $C_{\text{ном}} \pm 5\% C_{\text{н}}$  знайти найбільше значення відносної методическої похибки  $\delta = \frac{\Delta}{C}$ , яка виникає внаслідок заміни дійсної градуировочної залежності  $C=f(U_{\text{изм}})$  лінійною залежністю  $C=A \cdot U_{\text{изм}}+B$ . Тут  $\Delta$  – різниця між дійсним значенням ємкості  $C$  і значенням, одержаним по лінійній залежності  $C=A \cdot U_{\text{изм}}+B$  на основі виміряного значення напруги  $U_{\text{изм}}$

6. Визначити абсолютну чутливість вимірювача ємкості  $\Delta U_{\text{изм}}/\Delta T$  в досліджуваному діапазоні  $C_{\text{ном}} \pm 5\% C_{\text{н}}$ .

7. Встановлюємо частоту генератора на 3% вище резонансної частоти контура при номінальному значенні вимірюваної ємкості  $C_{\text{ном}}$ . Повторити роботи по пунктам 1-6.

### Данные для проведения моделирования

В таблицах 1-2 приведены параметры резонансного контура, рекомендуемые параметры моделирования, диапазон и шаг изменения емкости. Номера вариантов соответствуют порядковому номеру фамилии студента в журнале группы.

Таблица 1

Параметры резонансного контура и моделирования (по вариантам)

№ вар	Параметры контура			Рекомендуемые параметры моделирования	
	$L$	$C_{\text{НОМ}}$	$R, \text{ Ом}$	Шаг, сек	Продолжительность моделирования, сек
1	10 мкГн	1000 пФ	3	$3 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-5}$
2	10 мкГн	100 пФ	10	$1 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
3	1 мкГн	100 пФ	3	$3 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-6}$
4	0.1 Гн	1.0 мкФ	10	$1 \cdot 10^{-6}$	0.15
5	0.1 мГн	0.1 мкФ	1	$1 \cdot 10^{-8}$	0.0015

Таблица 2

Диапазон и шаг изменения емкости

№ испытания	Частота	№ испытания	Частота
1	$0,68 C_{\text{НОМ}}$	10	$1,01 C_{\text{НОМ}}$
2	$0,84 C_{\text{НОМ}}$	11	$1,02 C_{\text{НОМ}}$
3	$0,92 C_{\text{НОМ}}$	12	$1,03 C_{\text{НОМ}}$
4	$0,95 C_{\text{НОМ}}$	13	$1,04 C_{\text{НОМ}}$
5	$0,96 C_{\text{НОМ}}$	14	$1,05 C_{\text{НОМ}}$
6	$0,97 C_{\text{НОМ}}$	15	$1,08 C_{\text{НОМ}}$
7	$0,98 C_{\text{НОМ}}$	16	$1,16 C_{\text{НОМ}}$
8	$0,99 C_{\text{НОМ}}$	17	$1,32 C_{\text{НОМ}}$
9	$C_{\text{НОМ}}$	—	

### Оформление результатов

Результаты оформить в виде отчета. В отчете необходимо привести результаты моделирования в виде таблиц и графиков. Привести формулы и график линейной градуировочной характеристики, а также ее расчет. Указать наибольшее значение относительной методической погрешности и абсолютную чувствительность измерителя емкости, рассчитанных по экспериментальным данным.