

Школа MATLAB

Урок 2. Библиотека SimPowerSystems

Предлагаемая статья продолжает цикл публикаций, начатый в предыдущем выпуске приложения. Цель второго урока — знакомство с основными разделами библиотеки SimPowerSystems и с азами построения и отладки функциональных и виртуальных моделей устройств и систем силовой электроники. Перед изучением данного материала рекомендуется ознакомиться с основными разделами урока 1.

**Владимир Худяков,
д. т. н.**

kaf21@aanet.ru

Назначение и особенности пакета SimPowerSystems

Пакет SimPowerSystems (в версии MATLAB 6.1 и ранее — **Power System Blockset**) содержит набор блоков для построения виртуальных моделей электротехнических устройств и устройств силовой электроники. Используя библиотеки **Simulink** и **SimPowerSystems**, а также применяя функции и команды **MATLAB**, пользователь может не только имитировать работу устройств во временной области, но и изучать их частотные свойства, оценивать динамические параметры и осуществлять гармонический анализ токов и напряжений.

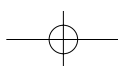
Несомненным достоинством **SimPowerSystems** является то, что при моделировании сложных систем силовой электроники можно использовать функциональные (отражающие функции S-блоков), виртуальные (из элементов или SPS-блоков) и структурные модели. Так, силовой блок полупроводникового преобразователя электрической энергии строится на основе виртуальных блоков **SimPowerSystems**, а система управления — с помощью функциональных блоков **Simulink**, отражающих лишь алгоритм ее работы без электрической схемы. Такой подход значительно упрощает саму модель и, как следствие, повышает скорость ее работы. Важно заметить, что библиотека **SimPowerSystems** имеет относительно большое количество блоков, а также дает возможность создавать новые подсистемы из блоков, имеющихся в библиотеке, и привлекать функции **MATLAB**. Все это значительно расширяет возможности **SimPowerSystems** при использовании его совместно с **Simulink**.

Построение SPS-моделей мало отличается от построения S-моделей. Для их создания необходимо открыть окно модели и окно библиотеки и путем перетаскивания («drag-and-drop» — «перетащи и оставь») составить модель из блоков с выполнением соединений между ними. В то же время в создании SPS-моделей имеется своя специфика.

1. Входы и выходы SPS-блоков (в **SimPowerSystems** версии 2.3 и более ранних) критичны к направлению тока, а соединительные линии между блока-


ми являются аналогами электрических проводов, по которым ток протекает в определенном направлении (по стрелкам).

2. При подключении к соединительным линиям можно использовать правую кнопку мыши (ПКМ), но при условии учета направления протекания тока. Если соединение из-за указанных направлений невозможно (стрелки направлены навстречу), то для выполнения соединения необходимо применять специальные блоки — соединители, находящиеся в разделе **Connectors** библиотеки SPS.
3. Непосредственное соединение друг с другом блоков из библиотеки **Simulink** и блоков из библиотеки **SimPowerSystems** недопустимо. Передавать сигнал от S-блока к SPS-блоку можно через управляемые источники тока или напряжения, а в обратную сторону — через измерители тока или напряжения.
4. В виртуальных моделях обязательно задаются начальные условия либо с помощью специального блока **Powergui**, либо с помощью функции **powerinit**.
5. При анализе виртуальных моделей совместно с функциональными моделями целесообразно использовать следующие решатели дифференциальных уравнений (см. урок 1):
 - **ode15s** — неявный многошаговый разностный метод переменного порядка (от 1 до 5) для жестких систем;
 - **ode23s** — модифицированный метод Розенброка с постоянным шагом и фиксированным порядком точности, предназначенный для интегрирования умеренно жестких систем при низких требованиях к точности, но имеющий обычно большую скорость, чем **ode15s**;
 - **ode23t** — метод трапеций с разностными уравнениями для умеренно жестких систем, обладающий повышенной скоростью интегрирования;
 - **ode23tb** — модифицированный метод трапеций в начале решения и метод, использующий обратное дифференцирование на последующих этапах; имеет более низкую точность при меньшей скорости интегрирования, чем **ode23t**.



Выбор решателя осуществляется по результатам сравнения эффективности работы указанных выше решателей в процессе моделирования после запуска конкретной модели с учетом удовлетворительной скорости решения и получаемой картины процессов (отсутствие необъяснимых выбросов или разрывов на временных диаграммах). Как правило, устанавливаемый по умолчанию решатель **ode45** использовать для анализа SPS-моделей нежелательно по причине его недопустимо медленной работы — эта рекомендация дается самим пакетом при запуске модели.

Состав библиотеки SimPowerSystems

Откроем окно MATLAB, а из него кнопкой  — окно обозревателя библиотеки **Simulink Library Browser** (рис. 1). Закроем в левой части окна открывшееся дерево **Simulink**, щелкнув левой кнопкой мыши (ЛКМ) по значку «←», а затем откроем дерево **SimPowerSystems** щелчком по значку «+» и щелчком по строчке — правую часть окна.

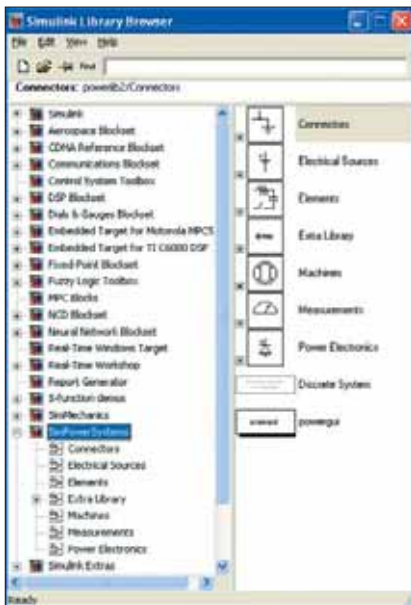


Рис. 1. Окно обозревателя библиотеки Simulink с открытым деревом SimPowerSystems

Из рис. 1 видно, что библиотека **SimPowerSystems** имеет следующие основные разделы:

1. **Connectors** — соединители.
2. **Electrical Sources** — источники электрической энергии.
3. **Elements** — электротехнические элементы.
4. **Extra Library** — дополнительные электротехнические устройства.
5. **Machines** — электрические машины.
6. **Measurements** — измерительные и контрольные устройства.
7. **Power Electronics** — устройства силовой электроники.

Кроме того, в этом окне имеются блок **Powergui** для проведения анализа свойств исследуемой модели. На основе блоков из пере-

численных разделов имеется возможность создавать виртуальные модели довольно сложных устройств силовой электроники.

Источники электрической энергии (Electrical Sources)

В этот раздел входят неуправляемые и управляемые источники электрической энергии (рис. 2).

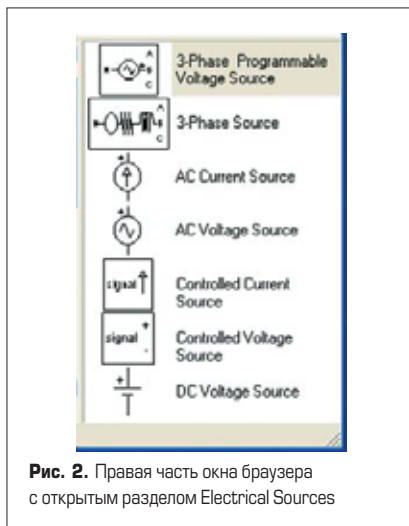
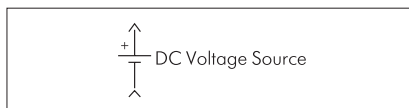


Рис. 2. Правая часть окна браузера с открытым разделом Electrical Sources

Идеальный источник постоянного напряжения (DC Voltage Source)



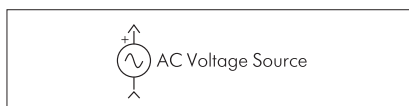
Назначение: получение постоянного по уровню напряжения.

Параметры блока (окно для настройки параметров блока вызывается двойным щелчком ЛК мыши по пиктограмме блока): **Amplitude (V)** — амплитуда (В). Задается уровень выходного напряжения источника. **Measurements** — измеряемые переменные. Задаются переменные, передаваемые для измерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значение параметра выбирается из списка:

- **None** — переменные не отображаются;
- **Voltage** — отображается выходное напряжение источника.

Поскольку блок является идеальным источником напряжения, то его внутреннее сопротивление является нулевым.

Идеальный источник переменного напряжения (AC Voltage Source)



Назначение: получение синусоидального напряжения с постоянной амплитудой.

Параметры блока: **Peak Amplitude (V)** — амплитуда (В). Задается амплитуда выходного напряжения источника. **Phase (deg)** — фаза (град). Устанавливается начальный фазовый сдвиг. **Frequency (Hz)** — частота (Гц).

Задается частота переменного напряжения источника. **Sample time** — шаг дискретизации. С помощью этого параметра задается шаг дискретизации по времени выходного напряжения источника при создании дискретных моделей. **Measurements** — измеряемые переменные. Задаются переменные, передаваемые для измерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значение параметра выбирается из списка:

- **None** — переменные не отображаются;
- **Voltage** — отображается выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения и имеет нулевое внутреннее сопротивление.

Идеальный источник переменного тока (AC Current Source)



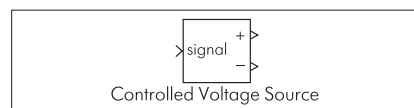
Назначение: получение синусоидального тока с постоянной амплитудой.

Параметры блока: **Peak Amplitude (A)** — амплитуда (А). Задается амплитуда выходного тока источника. **Phase (deg)** — фаза (град). Устанавливается начальный фазовый сдвиг. **Frequency (Hz)** — частота (Гц). Задается частота переменного тока источника. **Sample time** — шаг дискретизации. С помощью этого параметра задается шаг дискретизации по времени выходного тока источника при создании дискретных моделей. **Measurements** — измеряемые переменные. Задаются переменные, передаваемые для измерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значение параметра выбирается из списка:

- **None** — переменные не отображаются;
- **Current** — отображается выходной ток источника.

Блок является идеальным источником тока и имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление.

Управляемый источник напряжения (Controlled Voltage Source)



Назначение: получение напряжения, соответствующего по форме сигналу управления.

Параметры блока: **Initialize** — инициализация. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами — амплитудой, фазой и частотой. **Source type** — тип источника. Тип источника указывается при необходимости инициализации источника. Если инициализация источника не задается, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- **AC** — источник переменного напряжения;
- **DC** — источник постоянного напряжения.

Initial amplitude (V) — начальная амплитуда (В). Устанавливается начальное значение выходного напряжения источника. Параметр доступен, если задана инициализация источ-

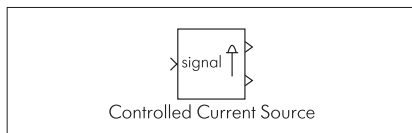
ника. *Phase (deg)* — начальная фаза (град). Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного напряжения. *Initial frequency (Hz)* — начальная частота (Гц). Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного напряжения. *Measurements* — измеряемые переменные. Задаются переменные, передаваемые для измерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значение параметра выбирается из списка:

- *None* — переменные не отображаются;
- *Voltage* — отображается выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения и имеет нулевое внутреннее сопротивление.

Управляемый источник тока (Controlled Current Source)

Назначение: получение напряжения, соответствующего по форме сигналу управления.



Параметры блока: *Initialize* — инициализация. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами — амплитудой, фазой и частотой. *Source type* — тип источника. Тип источника указывается после инициализации источника. Если инициализация источника не задается, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- *AC* — источник переменного тока;
- *DC* — источник постоянного тока.

Initial amplitude (A) — начальная амплитуда (А). Устанавливается начальное значение выходного тока источника. Параметр доступен, если задана инициализация источника. *Phase (deg)* — начальная фаза (град). Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного тока. *Initial frequency (Hz)* — начальная частота (Гц). Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного тока. *Measurements* — измеряемые переменные. Задаются переменные, передаваемые для измерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значения параметра выбираются из списка:

- *None* — переменные не отображаются;
- *Current* — отображается выходной ток источника.

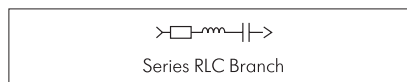
Блок является идеальным источником тока и имеет бесконечное внутреннее сопротивление.

Трехфазный источник напряжения **3-Phase Source** и трехфазный программируемый источник напряжения **3-Phase Programmable Voltage Source** предназначены для получения соответственно трехфазного напряжения и трехфазного напряжения с программируемыми во времени изменениями амплитуды, фазы, частоты и гармонического состава. Параметры указанных двух источников не приводятся, а будут рассмотрены по мере необходимости.

Электротехнические элементы (Elements)

Пиктограммы всех элементов этого раздела библиотеки представлены в окне **Library: powerlib2/Elements** (рис. 3, вызывается щелчком ПКМ по строке **Elements** дерева **SimPowerSystems**) или в правой части окна обозревателя **Simulink Library Browser** (эта конфигурация раздела не приводится, так как все элементы разместить в окне одновременно не удастся из-за ограниченности площади окна). В разделе содержатся пассивные электротехнические элементы, магнитосвязанные цепи, трансформаторы и т. п.

Последовательная RLC-цепь (Series RLC Branch)



Назначение: модель цепи из резистора, индуктивности и конденсатора, соединенных последовательно.

Параметры блока (окно настройки параметров блока вызывается двойным щелчком ЛКМ по пиктограмме блока): *Resistance R (Ohms)* — сопротивление (Ом). Величина активного сопротивления. Для того чтобы исключить резистор из цепи, значение сопротивления в окне параметров блока нужно задать равным нулю. При этом на пиктограмме блока резистор отображаться не будет. *Inductance L (H)* — индуктивность (Гн). Величина индуктивности. Для исключения индуктивности из цепи ее значение следует задать в окне параметров блока равным нулю. При этом на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет. *Capacitance C (F)* — емкость (Ф). Величина емкости. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости следует задать равным нулю. При этом конденсатор на пиктограмме блока отображаться не будет. *Measurements* — измеряемые переменные.

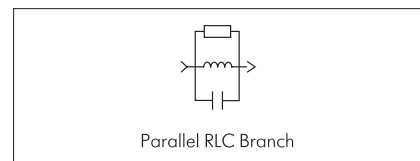
Задаются переменные, передаваемые для измерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значение параметра выбирается из списка:

- *None* — нет переменных для отображения;
- *Branch voltage* — напряжение на зажимах цепи;
- *Branch current* — ток цепи;
- *Branch voltage and current* — напряжение и ток цепи.

Отображаемым сигналам в блоке **Multimeter** присваиваются обозначения:

- *Ib* — ток цепи;
- *Ub* — напряжение цепи.

Параллельная RLC-цепь (Parallel RLC Branch)



Назначение: модель цепи из резистора, индуктивности и конденсатора, соединенных параллельно.

Параметры блока: *Resistance R (Ohms)* — сопротивление (Ом). Величина активного сопротивления. Для исключения резистора из цепи значение сопротивления в окне параметров блока нужно задать равным inf (бесконечность). При этом на пиктограмме блока резистор отображаться не будет. *Inductance L (H)* — индуктивность (Гн). Величина индуктивности. Для исключения индуктивности из цепи ее значение следует задать в окне параметров блока равным inf (бесконечность). При этом на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет. *Capacitance C (F)* — емкость (Ф). Величина емкости. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости следует задать равным нулю. При этом конденсатор на пиктограмме блока отображаться не будет. *Measurements* — измеряемые переменные. Задаются переменные, передаваемые для из-

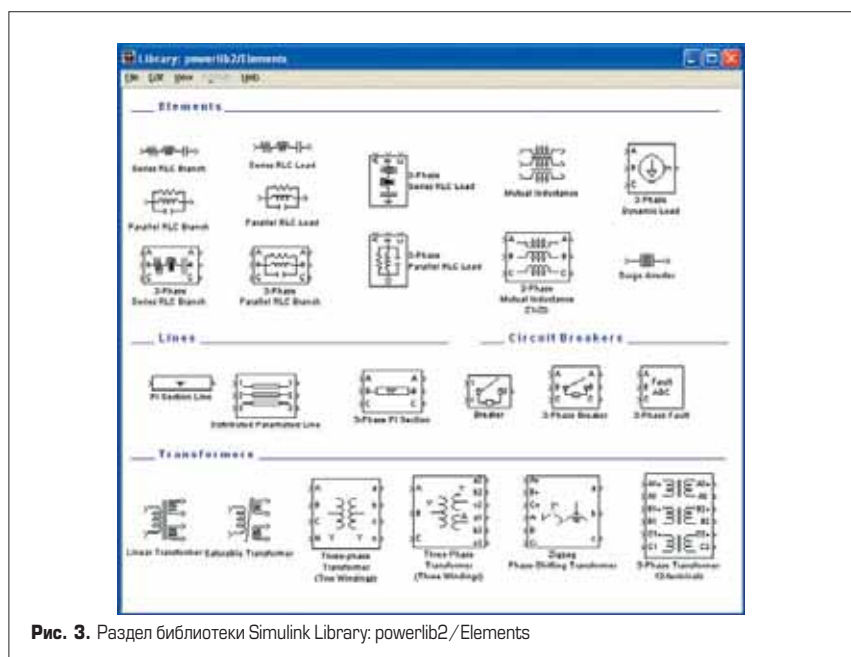
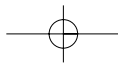


Рис. 3. Раздел библиотеки Simulink Library: powerlib2/Elements



мерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значение параметра выбирается из списка:

- *None* — нет переменных для отображения;
- *Branch voltage* — напряжение на зажимах цепи;
- *Branch current* — ток цепи;
- *Branch voltage and current* — напряжение и ток цепи.

Отображаемым сигналам в блоке **Multimeter** присваиваются обозначения:

- *Ib* — ток цепи;
- *Ub* — напряжение цепи.

Такие блоки, как последовательная RLC-цепь **Series RLC Load** и параллельная RLC-цепь **Parallel RLC Load**, аналогичны рассмотренным выше двум блокам, а их отличие заключается в установке параметров. Параметры этих цепей задаются через мощности элементов при номинальном напряжении и частоте. Остальные блоки будут рассматриваться ниже по мере необходимости.

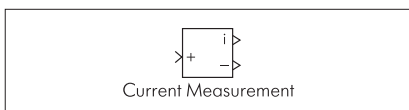
Измерительные и контрольные устройства (Measurements)

Пиктограммы блоков для выполнения измерительных и контрольных функций расположены в разделе **Measurements** (рис. 4), открываемом ЛКМ путем активизации одноименной строки в дереве **SimPowerSystems**.



Рис. 4. Правая часть окна браузера с открытым разделом «Измерительные и контрольные устройства» — Measurements

Измеритель тока (Current Measurement)



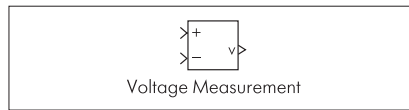
Назначение: измеряет мгновенное значение тока, протекающего через соединительную линию (провод). Выходным сигналом блока является сигнал, который может использоваться любым Simulink-блоком.

Параметры блока: *Output signal* — выходной сигнал. Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен только тогда, когда с помощью блока **Powergui** установлен режим расчета на переменном токе (**Phasor simulation**). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- *Magnitude* — амплитуда (скалярный сигнал);
- *Complex* — комплексный сигнал;
- *Real-Imag* — вектор, состоящий из двух элементов — действительной и мнимой составляющих сигнала;

• *Magnitude-Angle* — вектор, состоящий из двух элементов — амплитуды и аргумента сигнала.

Измеритель напряжения (Voltage Measurement)

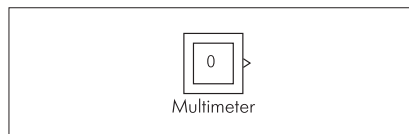


Назначение: измеряет мгновенное значение напряжения между двумя узлами цепи. На выходе блока имеется сигнал, который может использоваться любым блоком из **Simulink**.

Параметры блока: *Output signal* — выходной сигнал. Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен только тогда, когда с помощью блока **Powergui** установлен режим расчета на переменном токе (**Phasor simulation**). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- *Magnitude* — амплитуда (скалярный сигнал);
- *Complex* — комплексный сигнал;
- *Real-Imag* — вектор, состоящий из двух элементов — действительной и мнимой составляющих сигнала;
- *Magnitude-Angle* — вектор, состоящий из двух элементов — амплитуды и аргумента сигнала.

Мультиметр (Multimeter)



Назначение: измеряет токи и напряжения блоков библиотеки **SimPowerSystem**, для которых в их окне настройки параметров устанавливается параметр Measurements — «измеряемые переменные» (рис. 5).

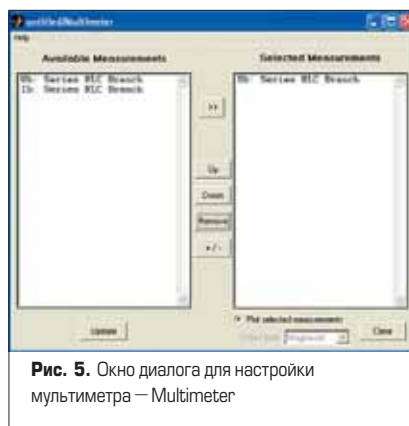


Рис. 5. Окно диалога для настройки мультиметра — Multimeter

Параметры блока: *Available Measurements* — переменные (в левом окне), доступные для измерения. Это токи и напряжения блоков схемы, для которых в окне настройки параметров блока установлен параметр Measurements (измеряемые переменные). Обновление списка переменных можно выполнить с помощью клавиши Update, но предварительно надо внести изменения в окно настройки параметров блока. *Selected Measurements* — измеряемые переменные (в правом окне). Указываются переменные, которые будут передаваться на вы-

ход блока **Multimeter**. Для управления списком измеряемых переменных можно использовать следующие клавиши (между окнами):

- *>>* — добавить выделенную переменную в правый список;
- *Up* — передвинуть вверх выделенную переменную в правом списке;
- *Down* — передвинуть вниз выделенную переменную в правом списке;
- *Remove* — удалить выделенную переменную из правого списка;
- *+/-* — изменить знак выделенной переменной.

Output signal — выходной сигнал. Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен при условии, что с помощью блока **Powergui** установлен режим расчета на переменном токе (**Phasor simulation**). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- *Magnitude* — амплитуда (скалярный сигнал);
- *Complex* — комплексный сигнал;
- *Real-Imag* — вектор, состоящий из двух элементов — действительной и мнимой составляющих сигнала;
- *Magnitude-Angle* — вектор, состоящий из двух элементов — амплитуды и аргумента сигнала.

Блок может использоваться для измерения напряжений и токов вместо обычных измерителей — **Current Measurement** и **Voltage Measurement**. Выходным сигналом блока является вектор всех сигналов, соответствующих измеряемым переменным. Другие измерители, пиктограммы которых располагаются в этом разделе, будут рассмотрены ниже по мере необходимости.

Пиктограммы блоков остальных трех разделов библиотеки **SimPowerSystems** приведены на рис. 6 (раздел «Устройства силовой электроники» — **Power Electronics**), рис. 7 (раздел «Электрические машины» — **Machines**) и рис. 8 (раздел «Соединители» — **Connectors**).

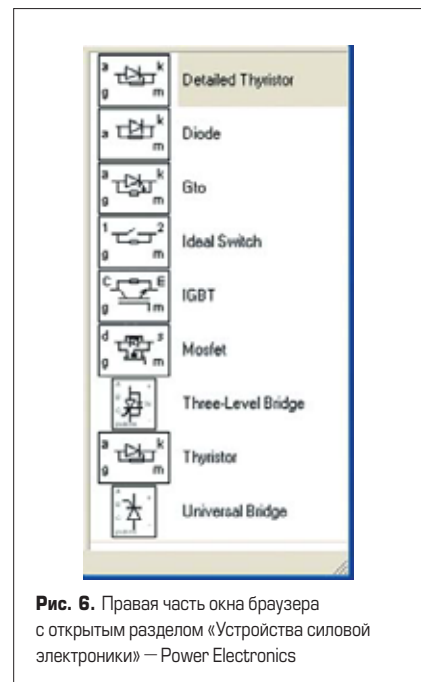
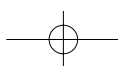


Рис. 6. Правая часть окна браузера с открытым разделом «Устройства силовой электроники» — Power Electronics



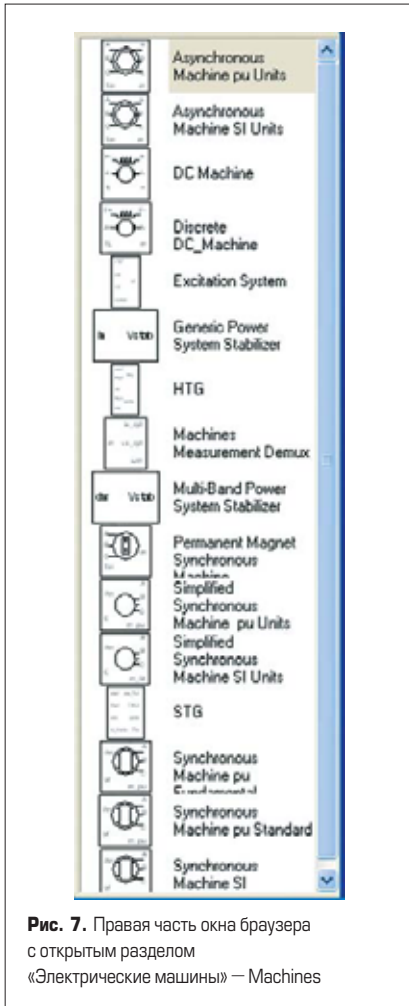


Рис. 7. Правая часть окна браузера с открытым разделом «Электрические машины» — Machines

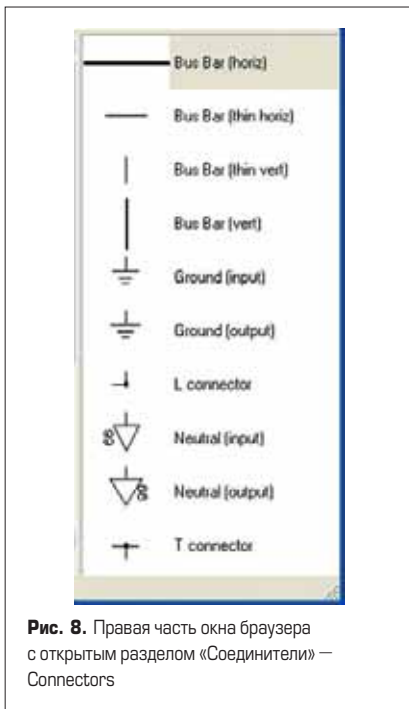


Рис. 8. Правая часть окна браузера с открытым разделом «Соединители» — Connectors

Теперь приведем несколько относительно простых примеров построения моделей из блоков библиотеки **SimPowerSystems**.

Построение SPS-моделей

Продемонстрируем порядок действий при построении SPS-модели. Вызываются два окна: окно обозревателя библиотеки **Simulink Library Browser** (рис. 1) и через **File/New/Model** — окно модели. Расположим окна рядом на рабочем столе.

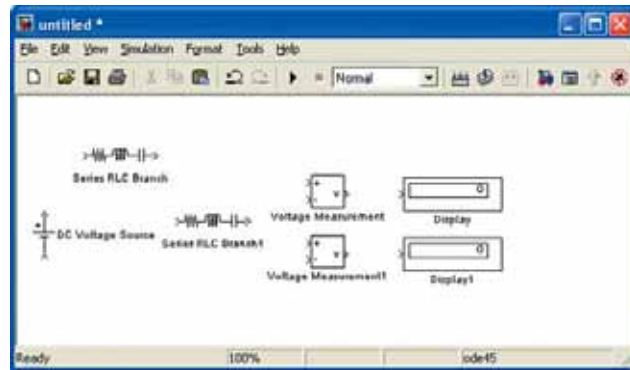
Пример 1. Выполнить модель резистивного делителя постоянного напряжения и измерить его входное и выходное напряжения.

Исходные данные для модели: питающее постоянное напряжение 10 В; коэффициент деления 2; входное сопротивление делителя 20 Ом.

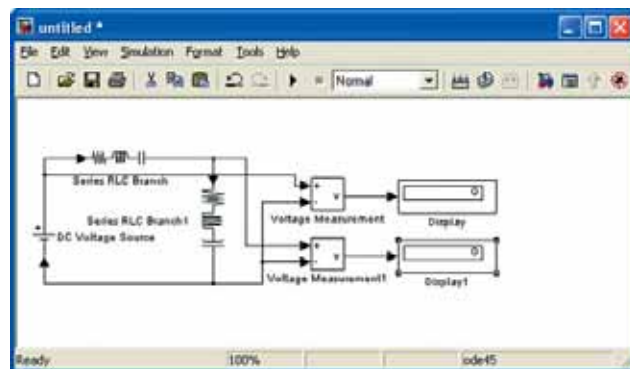
В левой части окна обозревателя закрываем дерево **Simulink**, открываем дерево **SimPowerSystems** и активируем строку дерева **Electrical Sources** (источники электрической энергии). В правой части окна обозревателя открывается этот раздел **Electrical Sources** (рис. 2). С помощью ЛКМ перетаскиваем пиктограмму источника постоянного напряжения **DC Voltage Source** в окно модели (рис. 9а). Действуя аналогично, в окно модели пооче-

редно перетаскиваются две пиктограммы последовательной RLC-цепи **Series RLC Branch** (раздел **Elements**), две пиктограммы измерителя напряжения **Voltage Measurement** (раздел **Measurements**) и две пиктограммы **Display** из раздела **Sinks** (приемники и измерители сигналов), но уже из библиотеки **Simulink**. Заметим, что у двух одинаковых пиктограмм названия отличаются наличием номера 1 (рис. 9а).

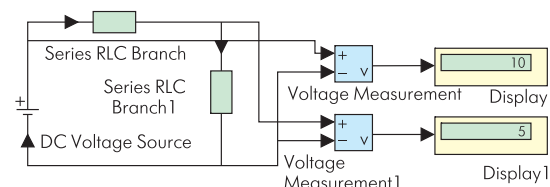
Для удобства соединения повернем на плоскости пиктограмму блока **Series RLC Branch 1** на угол 90°. Для этого ПКМ активируем указанную пиктограмму, по выпадающему меню поочередно выполним действия **Format/Rotate Block** и в результате осуществим ее поворот на указанный угол по часовой стрелке (опция **Flip-Block** обеспечивает разворот пиктограммы на 180°). После поворота пиктограмма оканчивается «сплюснутой», так как ее горизонтальный размер превращается в вертикальный. Нужные размеры пиктограммы выставляются после ее активации растягиванием за нижний правый угол ЛКМ после превращения указателя в двунаправленную стрелку.



а)

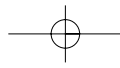


б)



в)

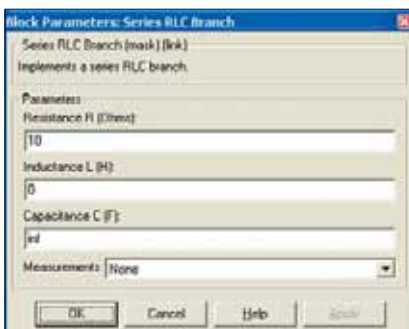
Рис. 9. Подготовка блоков (а), их соединение друг с другом (б) и SPS-модель после настройки и запуска (в)



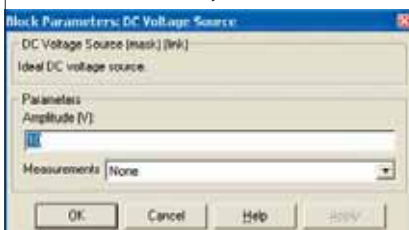
Теперь поочередно производятся соединения. Для этого к выходу пиктограммы подводится указатель, который превращается в крест. Нажимаем ЛКМ, а получаемую линию протягиваем до входа подсоединяемой пиктограммы. После отпущения ЛКМ на конце соединительной линии (на входе соседней пиктограммы) образуется стрелка (рис. 9б). Напомним, что ответвления от соединительного провода выполняются с помощью ПКМ. Измеритель напряжения **Voltage Measurement** подключается параллельно участку, на котором производится измерение.

Следующий этап — настройка блоков. Начнем с блока **Series RLC Branch**. Щелкнем дважды по пиктограмме этого блока — и появится окно для настройки его параметров (рис. 10а). Устанавливаем значения сопротивления резистора 10 Ом, индуктивности — 0 Гн и емкости конденсатора — inf (бесконечность), а в текстовом окне оставляем строчку **None**, так как прибор **Multimeter** не используется. Закрываем окно кнопкой **Ok**, и на пиктограмме исчезают изображения индуктивности и емкости (рис. 9в). Аналогично настраиваем блок **Series RLC Branch 1**, установив такие же значения всех параметров.

Настройка блока **DC Voltage Source** заключается в установке в вызванном окне настройки параметров значения напряжения (в нашем примере равного 10 В, рис. 10б). При измерении постоянного напряжения блок **Voltage Measurement** не требует настройки, а в блоке **Display** при необходимости увеличения числа значащих цифр в получаемом результате следует вызвать окно настройки параметров и заменить в его выпадающем меню **Format** короткий формат **Short** на длинный формат **Long**. Оставим формат **Short**. После запуска модели, которая достаточно проста и по этой причине нет смысла заменять решатель **ode45**



а)



б)

Рис. 10. Окна настройки параметров последовательной RLC-цепи **Series RLC Branch** (а) и источника постоянного напряжения **DC Voltage Source** (б)

на более быстрый, получаем результат — напряжение на входе делителя 10 В и на выходе — 5 В (рис. 9в).

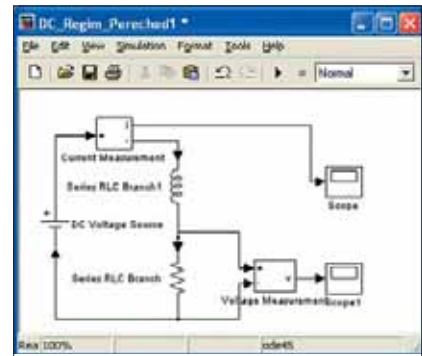
Пример 2. Произвести моделирование переходного процесса в интегрирующей RL-цепи с измерением ее тока и напряжения на выходе (на резисторе).

Исходные данные для модели: питающее постоянное напряжение 50 В; для RL-цепи сопротивление резистора 4 Ом, индуктивность катушки 0,5 Гн.

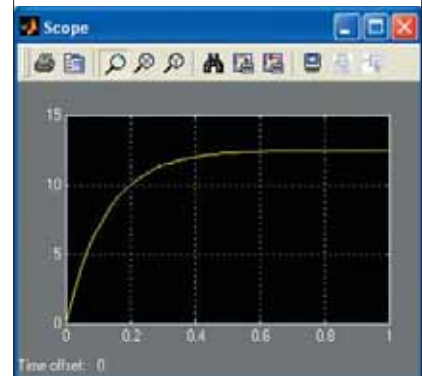
В соответствии с порядком, изложенным выше, соберем схему (рис. 11а), в которой напряжение питания 50 В (источник **DC Voltage Source**), сопротивление резистора 4 Ом, индуктивность 0,5 Гн в блоках **Series RLC Branch** выставляются в соответствующих окнах параметров. Отметим две особенности построенной модели. Первая состоит в применении измерителя тока **Current Measurement**, который включается последовательно с нагрузкой так, чтобы измеряемый ток входил в «+» и выходил из «-». К сигнальному выходу *i* этого блока подсоединен вход осциллографа **Scope**. Вторая особенность заключается в том, что выходное напряжение снимается с резистора RL-цепи. Но подключиться к средней точке последовательной цепи (точка внутри блока) не представляется возможным. По этой причине приходится использовать два блока **Series RLC Branch**, в первом из которых оставлен только резистор, а во втором — индуктивность.

Постоянная времени RL-цепи $\tau = L/R = 0,125$ с, и поэтому время моделирования должно составлять более 0,675 с (свыше 5τ). Выбирается это время (см. урок 1) в окне модели через меню **Simulation/Simulation Parameters**. Открывается окно **Simulation Parameters** и в нем задается время **Stop time** равным 1 с.

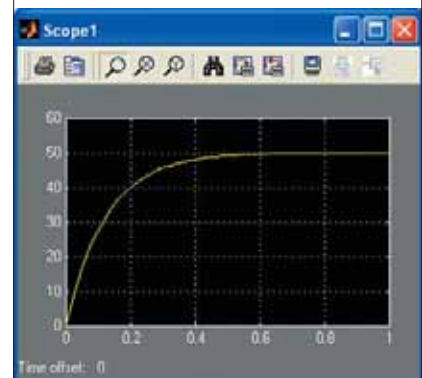
Сохраним модель в окне модели через меню **File/Save as...** под названием **DC_Regim_Perechod1**, которое автоматически присваивается окну модели (рис. 11а). Для установки начальных условий используем функцию **powerinit**. У этой функции возможные варианты записи аргумента находятся в справке (команда **help powerinit**). Для задания нулевых начальных условий в командном окне наберем команду **powerinit ('DC_Regim_Perechod1','reset')**, в которой в качестве аргумента заносится название модели в апострофах 'DC_Regim_Perechod1' и команда обнуления начальных условий 'reset' также в апострофах. Команда выполняется при нажатии на клавиатуре клавиши **Enter**, и начальные условия становятся нулевыми. После запуска процесса моделирования и после двойного щелчка ПКМ по пиктограммам **Scope** получим две осциллограммы (рис. 11б и 11в). Первая соответствует экспоненциально нарастающему току цепи, а вторая — напряжению на резисторе. Уместно напомнить, что окна осциллограмм следует настроить выбором соответствующего масштаба по вертикальной оси (см. урок 1). Для этого щелкнем ПКМ в поле осциллограммы, выберем в контекстном меню команду **Axes properties...** (свойства осей), а затем в появившемся окне **'Scope' properties: axis 1** (свойства графика) выставим максимальное и минимальные значения по оси координат Y.



а)



б)



в)

Рис. 11. Модель интегрирующей цепи (а), временные диаграммы ее тока (б) и напряжения на выходе (в)

Предположим, при наборе команды **powerinit** в командном окне **MATLAB** произведена ошибка в виде замены буквы *n* на *m*, то есть **powerimit**. Команда не будет выполнена и в командном окне появится запись:

```
??? Undefined function or variable 'powerimit'
```

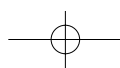
(неизвестная функция или переменная 'powerimit').

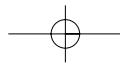
Если функция набрана правильно, но не заданы аргументы, то запись будет другой:

```
??? Error using ==> powerinit
Not enough input arguments
```

(Ошибка пользователя, недостаточное количество аргументов.)

О наличии ошибок в схеме модели в командном окне также появляется сообщение. Например, в рассматриваемой схеме отсутст-





вует соединение выхода измерителя тока **Current Measurement** с входом осциллографа **Scope**. В этом случае появятся два сообщения:

Warning: Output port 1 of block 'DC_Regim_Perechod1/Current Measurement' is not connected.
Warning: Input port 1 of block 'DC_Regim_Perechod1/Scope' is not connected.

(Предупреждение: Выход/вход порта 1 блока '...' не подключен).

Таким образом, MATLAB выполняет проверку правильности набора команд и сообщает пользователю об имеющихся ошибках с обязательным началом строки с трех знаков вопроса. Аналогично проверяется правильность собранных схем, а в окне дается сообщение. Любые остановки при наличии ошибок комментируются. По этой причине следует при всяких неожиданных остановках смотреть сообщения в командном окне.

Пример 3. Произвести моделирование прерывистого режима работы RL-цепи при питании переменным напряжением.

Исходные данные для модели: питающее напряжение переменного тока с амплитудой 100 В и частотой 50 Гц; прерывистый режим с периодом 0,15 с при относительной длительности импульсов 70% и фазовом сдвиге 0,02 с (указанные данные приведены к виду, удобному для настройки генератора); параметры RL-цепи — сопротивление 0,5 Ом и индуктивность 0,01 Гн. В модели в качестве прерывателя используется блок **Breaker** (раздел элементов **Elements** библиотеки **SimPowerSystem**).

Составленная модель (рис. 12а) содержит источник переменного напряжения **AC Voltage Source** (блок настройки параметров на рис. 12б), генератор прямоугольных импульсов **Pulse Generator** (блок настройки параметров на рис. 12в), блок **Breaker** (блок настройки параметров на рис. 12г). Также в нее входят уже знакомые нам измеритель тока **Current Measurement**, два осциллографа **Scope** и блок **Series RLC Branch**, настройку параметров которых мы уже рассматривали выше. Напомним, что пиктограмма **Source Generator** находится в разделе **Sources** библиотеки **Simulink**.

Основная трудность при подготовке модели состоит в ее настройке, а именно: выбор решателя, определение шага дискретизации и модельного времени **Stop time**. Хотя эти настройки уже выполнялись, проделаем все операции еще раз. В окне модели через меню **Simulation/Simulation Parameters** открываем окно **Simulation Parameters**. Как и рекомендовалось выше, выберем решатель **ode15s**. Считаем, что для наблюдения достаточно двух периодов низкочастотной составляющей сигнала по 0,15 с, то есть **Stop time** равно 0,3 с. Высокочастотная составляющая сигнала имеет период 0,02 с, и для него следует задать хотя бы 10 отсчетов, выбрав шаг дискретизации **Max step size** равным 0,002 с. После запуска модели получаем временные диаграммы процессов изменения тока в RL-цепи и сигнала на выходе генератора **Pulse Generator** (рис. 12д и 12е).

Теперь приведем краткою информацию о блоке выключателя переменного тока **Breaker**, моделирующем устройство включе-

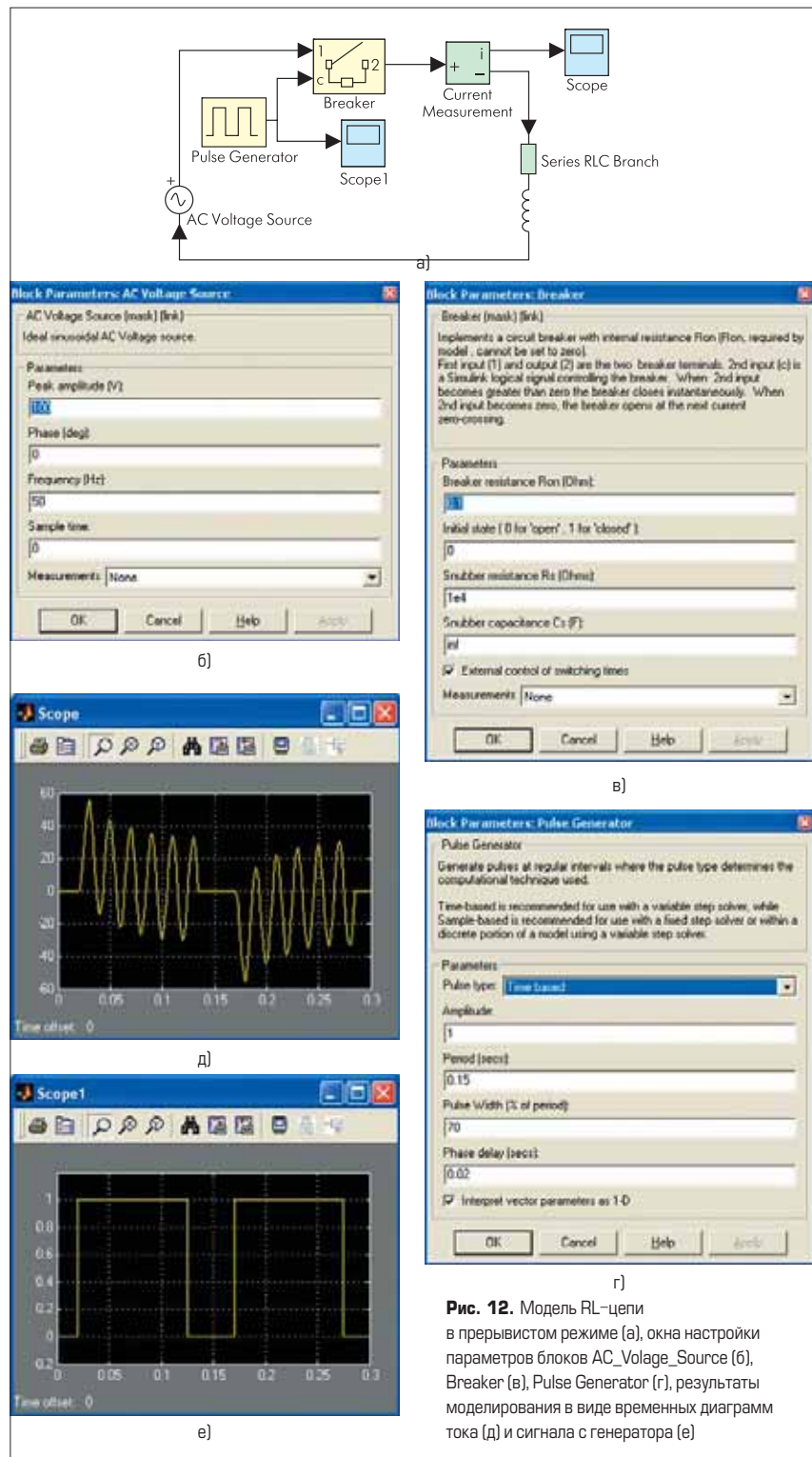
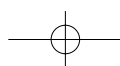


Рис. 12. Модель RL-цепи в прерывистом режиме (а), окна настройки параметров блоков AC_Voltage_Source (б), Breaker (в), Pulse Generator (г), результаты моделирования в виде временных диаграмм тока (д) и сигнала с генератора (е)

ния-выключения переменного тока. Управляется он внешним входным единичным сигналом или от встроенного таймера. Команда на выключение соответствует спаду сигнала на нулевой уровень, но при этом выключение устройства осуществляется только при уменьшении тока в силовой цепи до нуля (рис. 12д). Устройство снабжено искрогасящей RC-цепью, подключенной параллельно контактам выключателя и называемой **Snubber**.

Откроем окно настройки параметров.

Параметры блока (рис. 12в): **Breaker resistance Ron (Ohm)** — сопротивление выключателя в замкнутом состоянии (Ом). **Initial state (0 for 'open', 1 for 'closed')** — начальное состояние выключателя (0 — разомкнут, 1 — замкнут). **Snubber resistance Rs (Ohm)** — сопротивление искрогасящей цепи (Ом). **Snubber capacitance Cs (F)** — емкость искрогасящей цепи (Ф). **Switching times (s)** — время срабатывания выключателя (с). Параметр задается в виде вектора, каждая составляющая которого опреде-



ляет моменты времени срабатывания выключателя. Например, при разомкнутом начальном состоянии ключа значение параметра, заданное вектором [0.005 0.01 0.02 0.03], означает, что замыкание ключа будет выполняться в моменты времени 0,005 с и 0,02 с, а размыкание — в моменты времени 0,01 с и 0,03 с. *Sample time of the internal timer Ts (s)* — шаг дискретизации встроенного таймера. *External control of switching times* — внешнее управление временем срабатывания. При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключа, а нулевой уровень является командой на размыкание ключа, при этом разрыв цепи выполняется при достижении током нулевого уровня. *Measurements* — измеряемые переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- *None* — нет переменных для отображения;
- *Branch voltage* — напряжение на зажимах элемента;
- *Branch current* — ток элемента;
- *Branch voltage and current* — напряжение и ток элемента.

В соответствии с приведенными рекомендациями выполнена настройка параметров блока **Breaker** (см. рис. 12в). Особенность подбора параметров элементов искрогазящей цепи состоит в том, чтобы исключить появление колебаний тока в RL-цепи на интервале, когда ключ разомкнут.

Пример 4. Произвести моделирование интегратора из RC-цепи при воздействии импульсного напряжения прямоугольной формы, имеющего постоянную составляющую.

Исходные данные для модели: импульсное напряжение на входе с амплитудой 50 В и частотой 60 Гц; постоянная составляющая 15 В; параметры интегратора — емкость 0,01 Ф, сопротивление параллельного резистора 25 Ом, сопротивление последовательного резистора 1 Ом.

В модели используются генераторы прямоугольных импульсов **Signal Generator** и постоянного напряжения **Constant** (раздела **Sources**) и сумматор **Sum** (раздела **Math Operations**) библиотеки **Simulink**, управляемый источник напряжения **Controlled Voltage Source** (раздел **Electrical Sources**), два блока **Parallel RLC Branch** (раздел **Elements**), измеритель напряжения **Voltage Measurement** (раздел **Measurements**) библиотеки **SimPowerSystems**, известный читателю измерительный блок **Scope** и новый — мультиплексор **Mux** (раздел **Signal Routing**) библиотеки **Simulink**. Соединение указанных блоков выполнено в соответствии со схемой на рис. 13а, но имеется одна особенность — подключение блока **Parallel RLC Branch** к источнику **Controlled Voltage Source**. Поскольку оказалось, что надо соединить в одну точку два провода со стрелками навстречу друг другу, что недопустимо, то пришлось использовать соединитель типа **L connector** (раздел **Connectors**).

Настройка параметров новых для нас блоков осуществлена в соответствии с окнами, приведенными на рис. 13. Установка параметров бло-

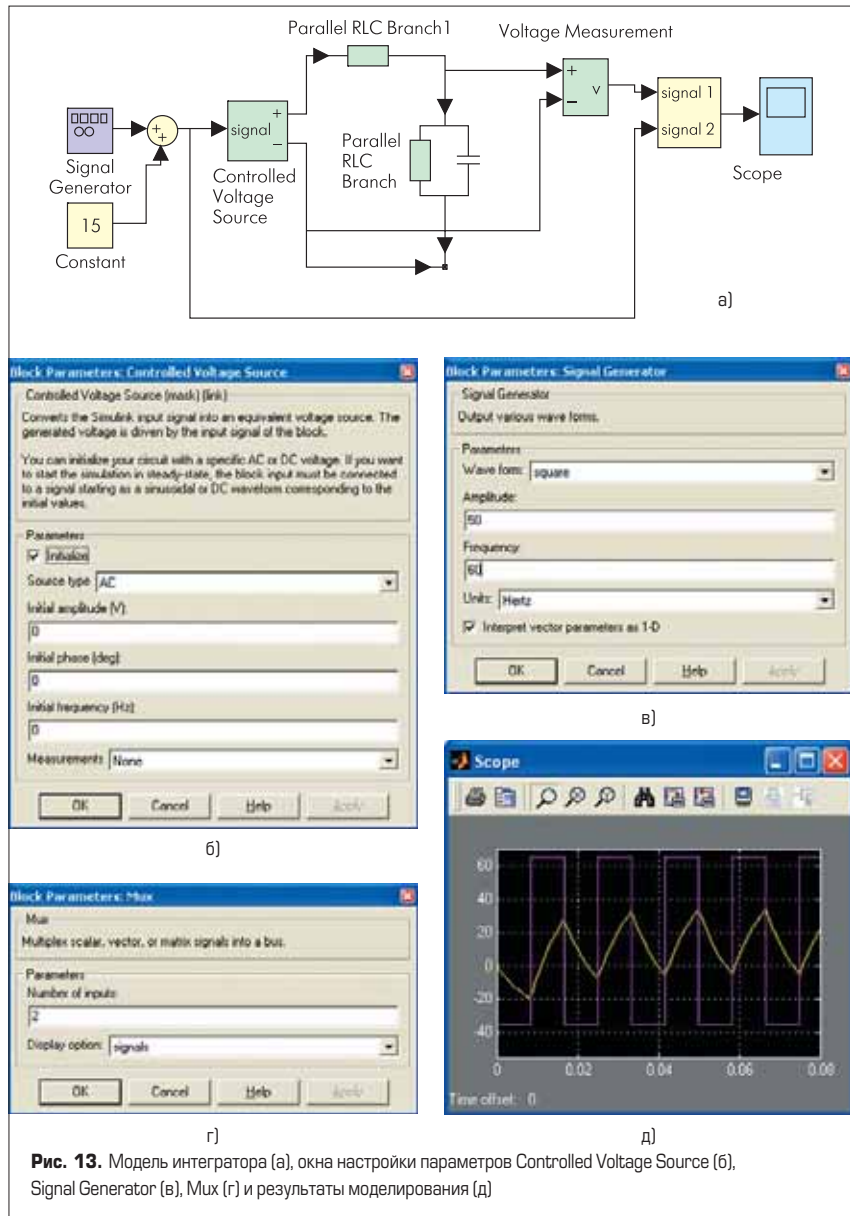


Рис. 13. Модель интегратора (а), окна настройки параметров Controlled Voltage Source (б), Signal Generator (в), Mux (г) и результаты моделирования (д)

ка **Controlled Voltage Source** не вызовет трудностей (рис. 13б). У генератора **Signal Generator** выставляется форма сигнала прямоугольная (square), амплитуда 50 В, частота 60 Гц (рис. 13в). У мультиплексора **Mux** выставляются число входов *Number of inputs* — 2 и способ отображения *Display option* — **signals**, тогда получаем пиктограмму в виде прямоугольника с белым фоном и отображением меток входных сигналов, которую надо растянуть до приемлемых размеров (рис. 13г). У блока **Sum** основные настройки — число входов со знаками **++**.

Длительность процесса моделирования **Stop times** выбирается 0,08 с, а максимальный шаг дискретизации **Max step size** — 0,001 с. Результат моделирования после запуска модели представлен на рис. 13д. За счет мультиплексора входные сигналы объединяются в вектор, что позволяет вывести на экран осциллографа сразу два сигнала, наложенных друг на друга. Видно, что переходный процесс, обусловленный наличием постоянной составляющей, заканчивается на вто-

ром периоде прямоугольных импульсов, а выходные треугольные импульсы имеют нелинейный характер нарастания и спада напряжения.

Для демонстрации использования различных типов соединителей из раздела **Connectors** построены две модели (рис. 14), аналогичные модели, приведенной на рис. 13а. Соединитель первого типа **T connector** (на рис. 14а он выделен в результате активации четырьмя маркерами), предназначен для соединения двух входящих и одного выходящего проводов в отличие от использовавшегося выше соединителя **L connector**, осуществляющего соединение двух входящих проводов. Второй вариант соединителя реализован на блоках нейтраль **Neutral** (рис. 14б). Блок позволяет соединять несколько электрических узлов без видимых линий связи (проводов) при условии, что их номера, устанавливаемые в окне настройки параметров, одинаковы. Работа же всех трех указанных моделей протекает аналогично.

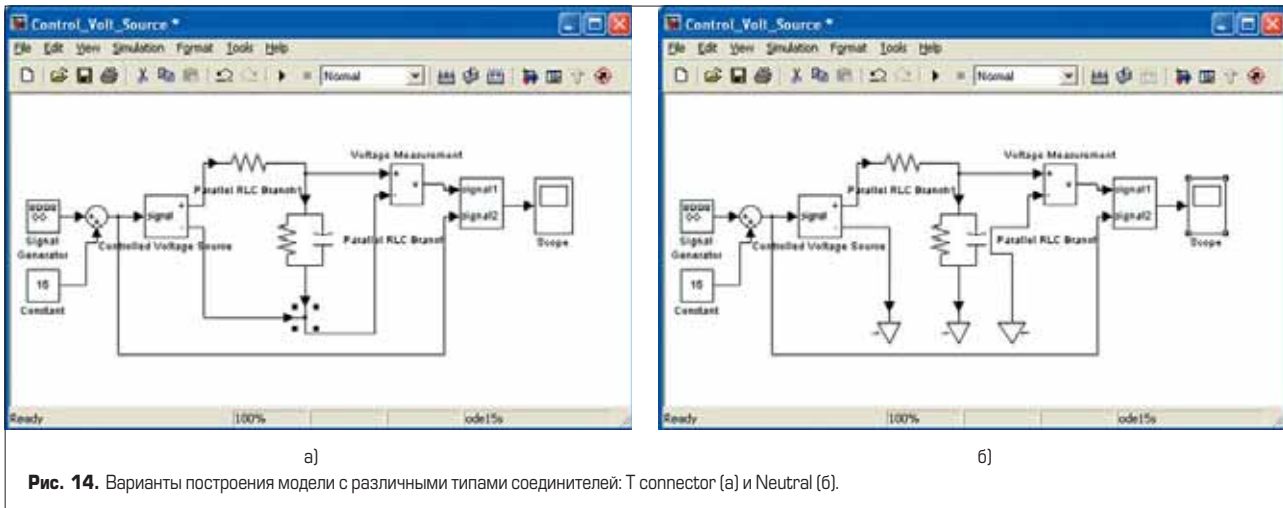


Рис. 14. Варианты построения модели с различными типами соединителей: T connector (a) и Neutral (б).

Подведем итоги урока 2:

1. Пакет SimPowerSystems обладает библиотекой, состоящей из 7 разделов, включающих:
 - источники электрической энергии в виде генераторов тока и напряжения;
 - пассивные и активные (управляемые) элементы;
 - средства измерения и контроля;
 - различные дополнительные устройства.
2. Наборы блоков из библиотек **Simulink** и **SimPowerSystems** являются основой для построения моделей устройств, состоящих из цепи, включающей в себя пассивные и активные элементы и источники энергии, из системы управления на базе функцио-

- нальных блоков и из системы контроля, включающей средства измерения.
3. При соединении пассивных и активных элементов, источников и измерителей необходимо учитывать направление тока в соединительных проводах и при отсутствии возможности их соединения применять специальные соединители — коннекторы (**Connectors**).
4. Созданная SPS-модель при запуске исключает необходимость составления и решения дифференциальных уравнений цепи, что существенно упрощает процесс моделирования.
5. Настройка блоков SPS-модели осуществляется через специальные окна установки зна-

- чений параметров и дополнительно включает задание начальных условий (значений тока и напряжения).
6. Настройка процесса моделирования заключается в выборе решателя дифференциальных уравнений и расчете максимального шага дискретизации и времени моделирования с учетом минимальной и максимальной частот анализируемых сигналов.
7. Программа MATLAB автоматически выполняет проверку набираемых в командном окне команд и собираемых в окне модели схем, выявляет допущенные пользователем ошибки и письменно сообщает о характере выявленных ошибок, что существенно облегчает процесс настройки моделей.