

Управление в технических системах

УДК 621.31 + 004.02

DOI: 10.14529/ctcr200103

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ПАКЕТАХ MATLAB

Н.В. Бильфельд, Ю.И. Володина

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Березниковский филиал, г. Березники, Россия*

Введение. Пакеты *Simulink* и *SimPowerSystem* большинством исследователей используются отдельно из-за проблем с взаимной передачей данных между функциональными блоками. В частности, вопросы, касающиеся имитационного моделирования и построения динамических моделей различных систем, решаются с помощью пакета *Simulink*, а моделирование электроэнергетических, электросиловых систем и систем электропривода – с помощью *SimPowerSystem*. **Цель работы:** разработать способы их совместного применения как в учебном процессе, так и на производстве для проектирования узлов и исследования поведения отдельных участков электрических цепей с целью их дальнейшего совершенствования, выявления причин наиболее часто встречающихся неисправностей, определения возможности замены одних узлов на другие и т. д. **Материалы и методы.** На практике исследования электрических и электронных схем проводятся аналитическими расчетами, на которые затрачивается значительно больше времени, чем на имитационное моделирование. Показана невозможность непосредственной коммутации сигналов пакетов *Simulink* и *SimPowerSystem* в среде MATLAB. На конкретных примерах показано, как можно совместно использовать данные пакеты, выходные сигналы, полученные в одном пакете, использовать в качестве входных сигналов в другом пакете и наоборот. Процесс объединения двух схем, смоделированных в различных пакетах, поэтапно описан на следующих примерах: передача значений из *Simulink*-модели в MATLAB, передача значений из MATLAB в *Simulink*-модель, передача значений из *Simulink* в *SimPowerSystem*. **Результаты.** Примеры даны в доступной, понятной форме, с соответствующими схемами, графиками, алгоритмом действий, кодом, ожидаемыми результатами, чтобы читатель мог понять их принцип и при необходимости повторить. Описаны возможные проблемы при выполнении примеров и их возможные решения. **Заключение.** Совместное использование блоков *Simulink* и *SimPowerSystem* позволяет моделировать и очень сложные динамические системы, повышая при этом их функциональность и наглядность, особенно при моделировании электротехнических систем.

Ключевые слова: моделирование, MATLAB, Simulink, SimPowerSystem, система управления, электрическая схема.

Введение

Пакет *Simulink* – это графическая среда имитационного моделирования, встроенная в MATLAB. Данная среда позволяет строить динамические модели различных систем. Наиболее часто *Simulink* используется для моделирования систем управления [1].

Пакет *SimPowerSystem* – это инструмент, специально разработанный для моделирования электроэнергетических, электросиловых систем и систем электропривода.

Сегодня указанные пакеты используются все чаще не только в учебном процессе, но и на производстве как для проектирования дополнительных узлов, так и для исследования поведения отдельных участков электрических цепей, с целью их дальнейшего совершенствования, выявления причин наиболее часто встречающихся неисправностей, определения возможности замены одних узлов на другие и т. д. [2]. Моделирование в данных пакетах также дает ответы на вопросы, связанные с устойчивостью и запасом устойчивости исследуемых систем, а также их надежности.

Для электрических и электронных схем исследования, как правило, связаны с получением значений текущих токов в тех или иных участках цепи при коммутации или замене вышедших из строя деталей на существующие аналоги, выяснением вопросов о причинах самовозбуждения и многих других [3].

Два альтернативных варианта получения ответов на перечисленные вопросы – это аналитические расчеты и моделирование на реальных элементах [4].

В первом случае на порядки увеличивается время расчетов по сравнению с имитационным моделированием. Для второго случая нужна еще и материальная база, а экспериментировать на работающем оборудовании недопустимо, так как это может привести к аварийным ситуациям и травмам.

В литературе, как правило, пакеты *Simulink* и *SimPowerSystem* рассматриваются отдельно. В частности, в [5, 6] рассматриваются вопросы, связанные с работой непосредственно в MATLAB, в [7] и [8] подробно рассматривается моделирование в *Simulink*, в области радиотехники и автоматизации. В [9] подробно описаны вопросы моделирования в *SimPowerSystem*.

Цель данной статьи – показать на простейших примерах, как можно совместно использовать пакеты *Simulink*, *SimPowerSystem* и MATLAB. Под совместным использованием в первую очередь имеется в виду, как выходные сигналы, полученные в одном пакете, использовать в качестве входных сигналов в другом пакете, и наоборот.

Допустим, нам необходимо на выходе регулятора в одноконтурной схеме управления использовать корректирующую RLC-цепь, как показано на рис. 1. Но соединить непосредственно элементы модели не представляется возможным (места схемы, обведенные кружками). Среда MATLAB не допускает непосредственную коммутацию сигналов пакетов *Simulink* и *SimPowerSystem*.

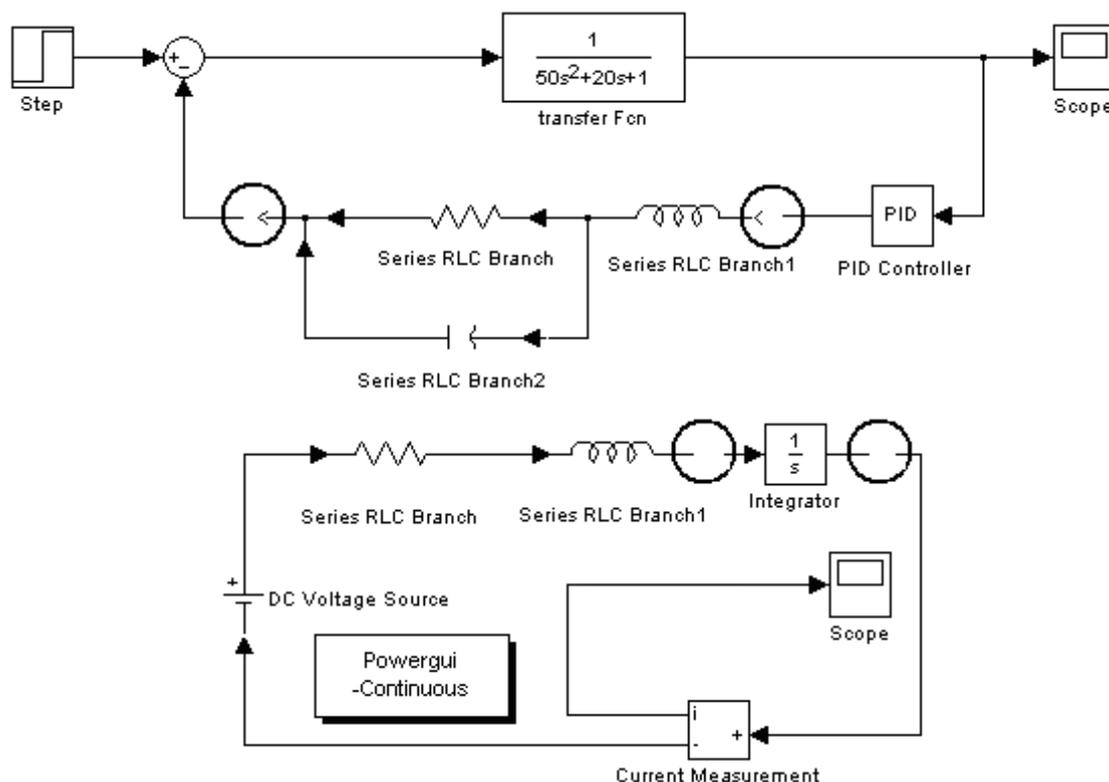


Рис. 1. Использование RLC-цепи на выходе регулятора и интегратора в модели электрической схемы

Fig. 1. Use of RLC circuit at regulator and integrator output in electrical circuit model

Аналогично не удастся использовать непосредственно в электрической схеме блок интегратора пакета *Simulink*, как показано на рис. 1.

Допустим, мы исследуем работу релейной схемы сигнализации при нарушении нескольких технологических параметров [10]. Так как обмотки реле обладают индуктивностью, то, если не-

сколько параметров одновременно придет в «норму», в цепи могут возникнуть большие коммутационные токи, которые приводят к сгоранию используемых в схеме светодиодов.

В этой же схеме необходимо предусмотреть, что в момент срабатывания светодиода должны гореть мигающим светом, для чего используется специальный генератор прямоугольных или треугольных импульсов.

Необходимо предусмотреть такую синхронизацию работы генератора, чтобы в моменты нарастания тока он бы отключал светодиод, т. е. автоматически сдвигал скважность генерируемых импульсов.

Смоделировать релейную схему в *SimPowerSystem* очень легко и быстро. Смоделировать сложный генератор пилообразного напряжения, включающий элементы логики и сравнения, намного проще на элементах Simulink. Весь вопрос в том, как объединить эти две схемы.

1. Передача значений из *Simulink*-модели в MATLAB

Итак, начнем с самого простого: как значения из пакета *Simulink* передать в среду MATLAB. Рассмотрим простейшую систему регулирования, приведенную на рис. 2.

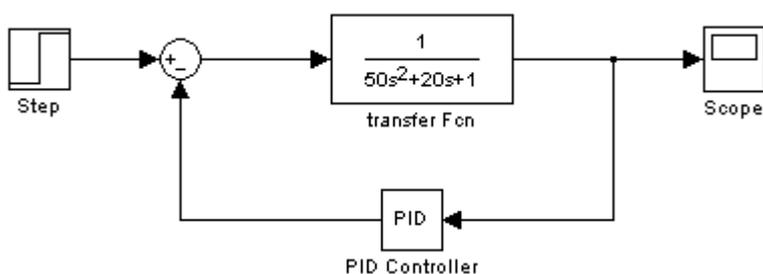


Рис. 2. Модель одноконтурной системы регулирования (model 1.mdl)
Fig. 2. Single loop control system model (model 1.mdl)

Названия блоков в данной модели не изменены, чтобы читателю было проще ее воспроизвести. Если кликнуть по блоку *Scope*, то мы увидим график переходного процесса, приведенный на рис. 3.

Нам необходимо рассчитать показатели качества данного переходного процесса, такие как динамическая ошибка, степень затухания и другие [11].

Тогда встает вопрос, как передать массив точек данного графика в среду MATLAB. Если у нас будет такой массив, построить график с помощью команд MATLAB и рассчитать показатели качества переходного процесса не составит труда [12, 13].

Для передачи массивов в среду MATLAB можно воспользоваться блоком *Scope*. Для этого кликнем по блоку и активизируем пиктограмму *Parameters* (п. 1 на рис. 3).

В открывшемся окне выберем вкладку *Data History*. Настроим поля вкладки, как показано на рис. 4.

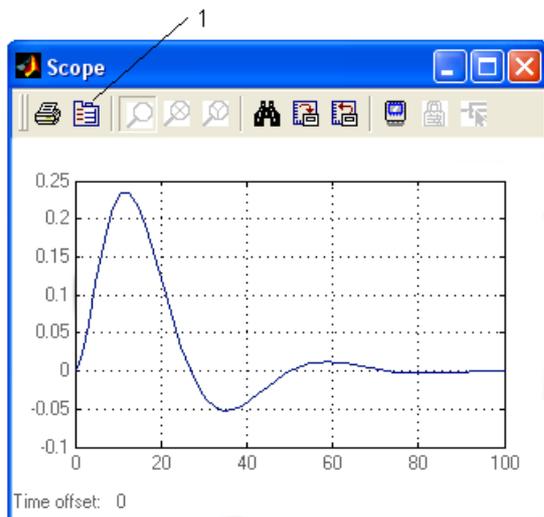


Рис. 3. График переходного процесса
Fig. 3. Schedule of transition process

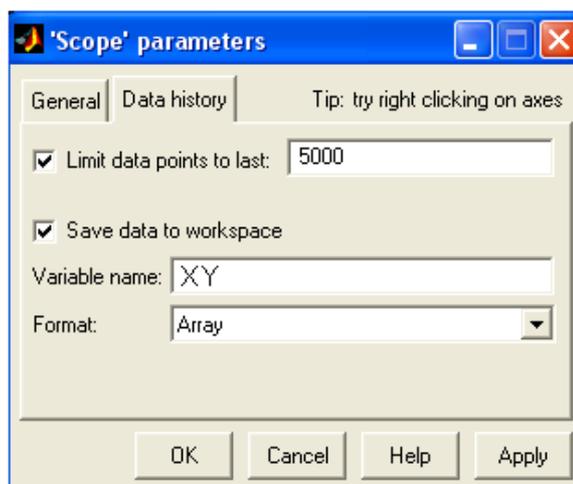


Рис. 4. Вкладка Data History
Fig. 4. Menu tab Data History

В результате по окончании работы модели в среде MATLAB появится матрица XY . Первый столбец матрицы содержит текущее время, а второй является массивом значений переходного процесса.

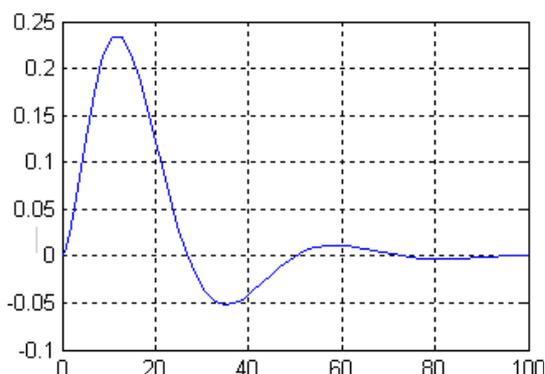


Рис. 5. График переходного процесса, построенный средствами MATLAB
Fig. 5. MATLAB Transient Schedule

Теперь, чтобы построить график и получить значение динамической ошибки и соответствующий ей момент времени, необходимо выполнить ряд команд в командном окне MATLAB.

```
Фрагмент mf01.m:
clc;
L=length(XY); T=XY(1:L,1:1);
Y=XY(1:L,2:2); plot(T,Y),grid;
[D,TD]=max(Y)
```

В результате получим график, приведенный на рис. 5. Расчетное значение динамической ошибки составляет 0,2340, при времени 14 с. Полученные значения соответствуют приведенному графику.

Итак, как получать значения из моделей *Simulink* в среду MATLAB, мы разобрались. Необходимо отметить, что для этих целей в *Simulink* имеется специальный блок *To Workspace*, который настраивается аналогичным образом, но данный блок не позволяет отображать графики непосредственно в модели.

2. Передача значений из MATLAB в Simulink-модель

Получать значения из среды MATLAB в модели *Simulink* можно несколькими способами. Если это константы, то их необходимо просто инициализировать в среде MATLAB, а затем использовать в блоках *Simulink*.

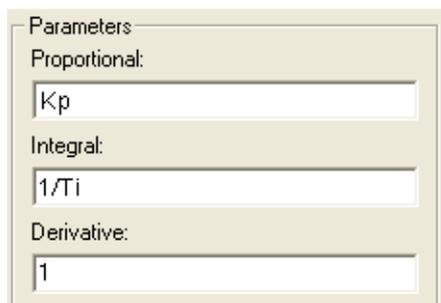


Рис. 6. Использование переменных в настройках регулятора
Fig. 6. Using Variables in Regulator Settings

Допустим, что настройки нашего регулятора имеют значения $Kp = 8,3$ и $Ti = 0,9$.

Тогда введем эти значения в командном окне MATLAB, а в настройках регулятора укажем их, как показано на рис. 6.

Сложнее обстоит дело, когда сигнал в модели необходимо изменять в соответствии со специальной функцией, разработанной пользователем. Для этого существуют блоки *S-function* и MATLAB *Fcn*. Формат функции, используемой в блоке *S-function*, достаточно сложный и здесь не рассматривается. Дело в том, что в данном блоке можно использовать не только функции на языке MATLAB, но и на других языках, в частности на C++, Fortran и Ada. Этот

блок считается универсальным и используется в том случае, когда функции планируется компилировать в соответствующие динамические библиотеки.

Функции для блока MATLAB *Fcn* – это обычные функции, представляющие М-файлы и написанные на языке MATLAB.

Напишем простейшую функцию:

```
%mfun2
function y=mfun2(k);
y=cos(k);
```

Сохраним функцию в файле *mfun2.m*. Обратимся к ней, как показано на рис. 7.

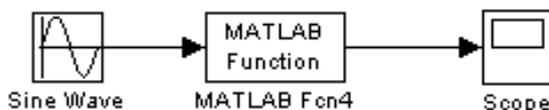


Рис. 7. Модель с использованием блока MATLAB Fcn (model2.mdl)
Fig. 7. Model with MATLAB Fcn unit (model2.mdl)

Настройка блока приведена на рис. 8.

В результате работы модели получим графики, приведенные на рис. 9.

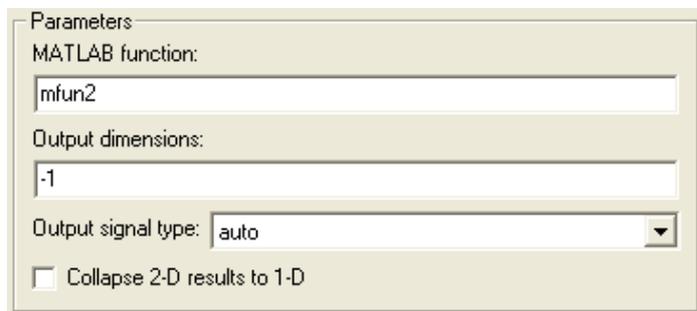


Рис. 8. Настройка блока MATLAB Fcn
Fig. 8. MATLAB Fcn unit configuration

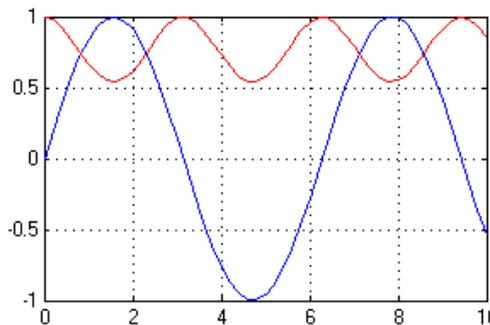


Рис. 9. Результат работы модели
Fig. 9. Result of work of model

3. Передача значений из SimPowerSystem в Simulink

Рассмотрим простейшую модель в SimPowerSystem, приведенную на рис. 10 [14].

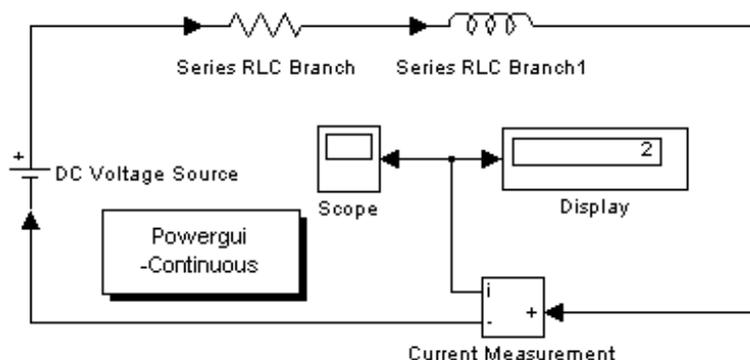


Рис. 10. Модель RL-цепи (model3.mdl)
Fig. 10. Model of a RL chain (model3.mdl)

Названия элементов в данной модели оставлены по умолчанию, как их присвоила среда моделирования. Настройка элемента *DC Voltage Source* (источник постоянного напряжения) приведена на рис. 11.

Настройка элемента *Series RLC Branch* (последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости) приведена на рис. 12. В результате такой настройки мы получим только активное сопротивление. Аналогичным образом настроим блок *Series RLC Branch1*, только укажем значение сопротивления равным нулю, а значение индуктивности – равным 20 Гн.

Как видно из рис. 10, на дисплее мы видим установленное значение тока в цепи (блок *Current Measurement* является амперметром).

Если кликнуть по блоку *Scope*, то мы увидим прямую линию на уровне 2 А. Если нам нужно увидеть график изменения тока в цепи, то необходимо установить нулевые начальные условия. Для этого кликнем по блоку *PowerGui*. В открывшемся окне нажмем кнопку *Initial States Setting* и в поле *Set Selected* вместо текущего значения, равного 2, установим значение, равное 0.

В результате, кликнув по блоку *Scope*, увидим график изменения тока в цепи. Мы уже знаем, как передавать значения из блока *Scope* в среду MATLAB, поэтому построим график приведенным выше способом (рис. 13).



Рис. 11. Настройка элемента DC Voltage Source
Fig. 11. Configuring of element DC Voltage Source

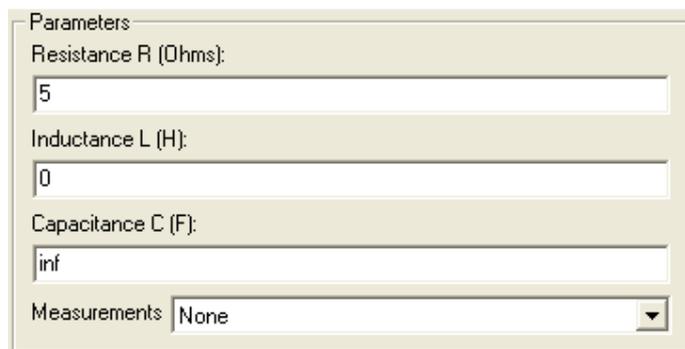


Рис. 12. Настройка элемента Series RLC Branch
Fig. 12. Configuring of element Series RLC Branch Element

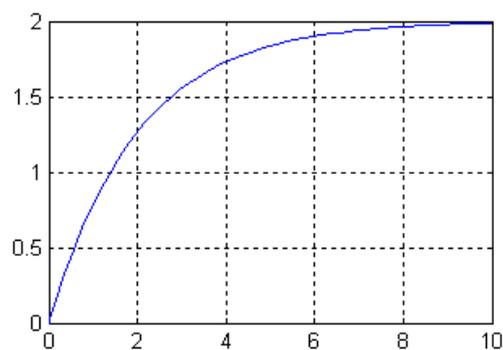


Рис. 13. График изменения тока в цепи
Fig. 13. Circuit Current Change Graph

А теперь допустим, что нам нужно проинтегрировать полученный сигнал. Это удобно сделать с помощью *Simulink*-блока *Integrator*. Как было сказано ранее, непосредственно использовать блок *Integrator* в схеме нельзя. Но, как видно из рис. 10, для передачи в *Simulink*-блоки значений токов используется блок *Current Measurement* (амперметр). Аналогично для передачи напряжений используется блок *Voltage Measurement* (вольтметр).

Тогда модель для интегрирования значения тока будет иметь вид, приведенный на рис. 14.

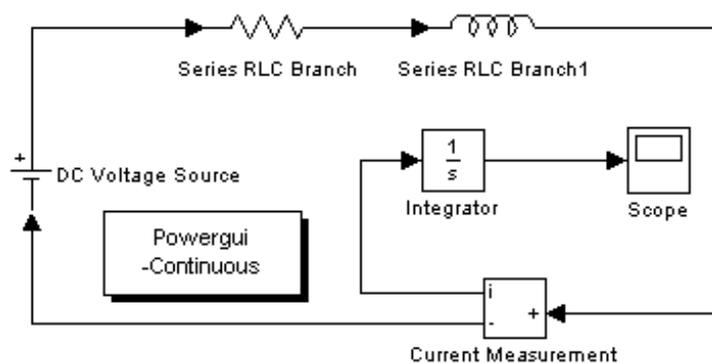


Рис. 14. Передача сигналов из элементов SimPowerSystem в блоки Simulink (model4.mdl)
Fig. 14. Sending signals from SimPowerSystem elements to Simulink units (model4.mdl)

В библиотеке *Simulink* имеется большой набор математических блоков, позволяющих осуществлять обработку сигналов и преобразование сигналов. Обработанные сигналы можно снова использовать в электрических схемах как источники напряжений или токов, создавая, таким образом, достаточно сложные динамические модели.

Итак, для передачи сигналов из *Simulink*-моделей в модели *SimPowerSystem* используются блоки *Current Measurement* и *Voltage Measurement*.

4. Передача значений из *Simulink* в *SimPowerSystem*

Остается разобраться, как передавать сигналы из *Simulink*-блоков в элементы *SimPowerSystem*. Если для передачи сигналов из *SimPowerSystem* в *Simulink* используются измерительные приборы, то для обратной передачи используются специальные источники.

Для этого в *SimPowerSystem* имеется два блока: *Controlled Voltage Source*, который является регулируемым источником напряжения и *Controlled Current Source*, который является регулируемым источником тока. На входы этих блоков можно подавать сигналы из *Simulink*-моделей.

Поставим обратную задачу: для пинания электрической схемы необходим источник пилообразного напряжения. Сформировать такое напряжение на базе блоков *SimPowerSystem* нельзя. Но в библиотеке *Simulink* имеется блок *Repeating Sequence*, выходом которого является сигнал пилообразной формы. Схема такой модели приведена на рис. 15.

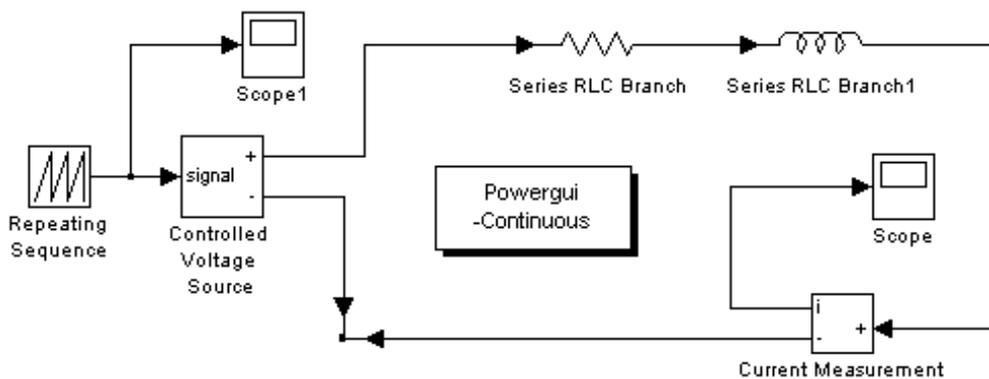


Рис. 15. Передача сигналов из блоков Simulink в элементы SimPowerSystem (model5.mdl)
 Fig. 15. Transmission of signals from Simulink units to SimPowerSystem elements (model5.mdl)

В настройках блока *Controlled Voltage Source* можно указать начальные условия, от которых начнет меняться напряжение. В нашем случае они нулевые.

График изменения тока в этом случае приведен на рис. 16.

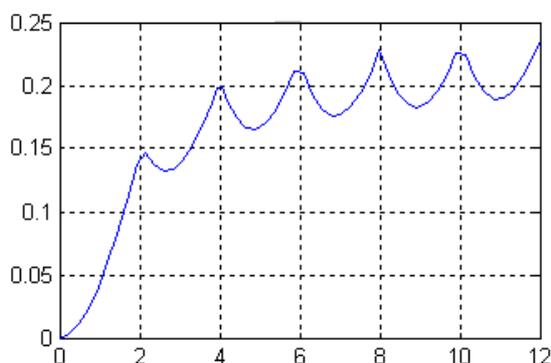


Рис. 16. График изменения тока при напряжении пилообразной формы на входе схемы
 Fig. 16. Diagram of current change at sawtooth voltage at circuit input

5. Нюансы совместного моделирования

При моделировании переходных процессов электрических схем на вход схемы необходимо подать единичный скачок изменения напряжения, что можно реализовать с помощью *Simulink*-блока *Step*.

Пример такой модели по исследованию *RC*-цепи приведен на рис. 17.

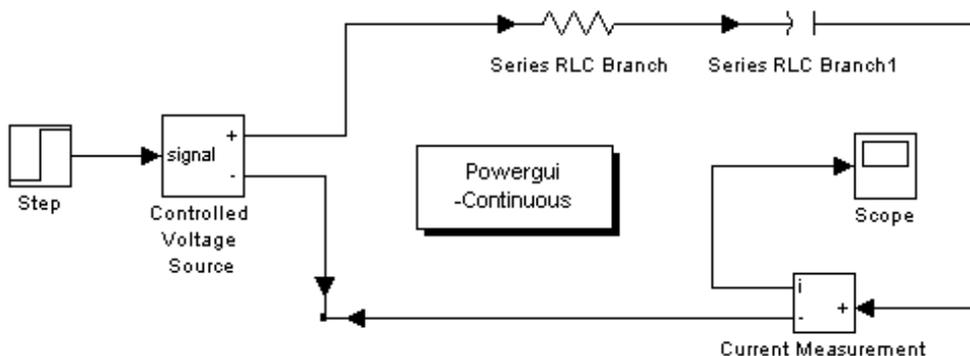


Рис. 17. Модель для исследования RC-цепи (model6.mdl)
 Fig. 17. Model for RC ceria study (model6.mdl)

На выходе такой *RC*-цепи сформируется импульс, приведенный на рис. 18.

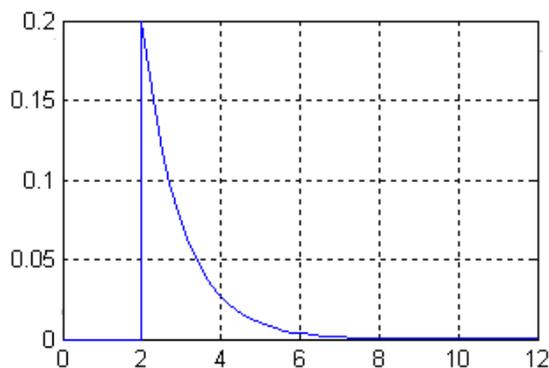


Рис. 18. Импульс на выходе RC-цепи
Fig. 18. RC circuit output pulse

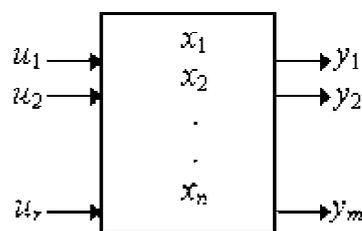


Рис. 19. Векторное представление динамической системы
Fig. 19. Vector representation of a dynamic system

Часто используется исследование динамики системы в пространстве состояний [15]. Структура такой системы приведена на рис. 19.

Уравнения состояния и выхода такой системы записываются как:

$$\dot{x} = Ax + Bu;$$

$$y = Cx + Du.$$

Строчные буквы обозначают векторы, а заглавные – матрицы.

- Матрица A – матрица состояния системы, размером $n \times n$;
- Матрица B – матрица управления (входа), $n \times r$;
- Матрица C – матрица выхода по состоянию, $m \times n$;
- Матрица D – матрица выхода по управлению, $m \times r$.

Имея такие матрицы, можно исследовать систему на устойчивость, полноту наблюдаемости и управляемости и другие факторы.

Рассмотрим пример. Необходимо получить описание схемы, представленной на рис. 20, в пространстве состояний, в частности получить матрицы A и B .

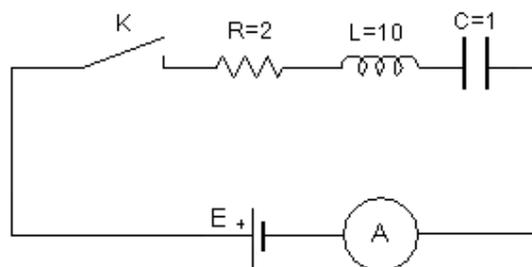


Рис. 20. Принципиальная схема RLC-цепи
Fig. 20. Circuit RLC schematic diagram

Аналитически описать эту цепь в виде передаточной функции можно следующим образом:

$$Z(s) = R + Ls + 1/Cs = (2s + 10s^2 + 1)/s;$$

$$I(s) = U/Z(s) = 10s/(10s^2 + 2s + 1),$$

где s – оператор Лапласа; $Z(s)$ – полное сопротивление цепи в операторной форме; $I(s)$ – ток в цепи в операторной форме.

Создадим модель, приведенную на рис. 21, и сохраним ее в файл *model7.mdl*.

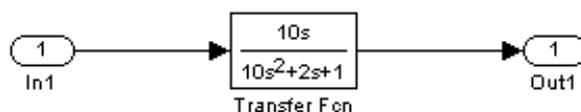


Рис. 21. Модель, имитирующая изменение тока в RLC-цепи (model7.mdl)
Fig. 21. Model simulating current change in RLC circuit (model7.mdl)

Для получения матриц пространства состояний из модели используется команда:

```
[A B C D]=linmod('имя модели');
Напишем M-файл (mf2.m)
% получаем матрицы из модели Simulink
[A B C D]=linmod('model7');
% формируем описание модели в пространстве
стояний (формат ss)
W=ss(A,B,C,D);
% строим график изменения тока
step(W),grid
В результате получим матрицы:
```

$$A = \begin{bmatrix} -0,2 & -0,1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

и переходный процесс, представленный на рис. 22.

А теперь попробуем получить те же матрицы из SimPowerSystem. Для этого соберем модель схемы, приведенной на рис. 20. Модель должна выглядеть, как показано на рис. 23.

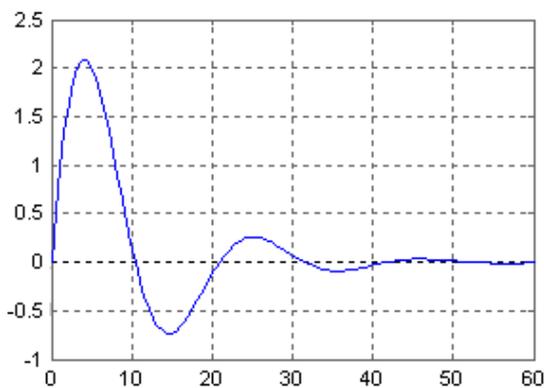


Рис. 22. График изменения тока в цепи
Fig. 22. Circuit Current Change Graph

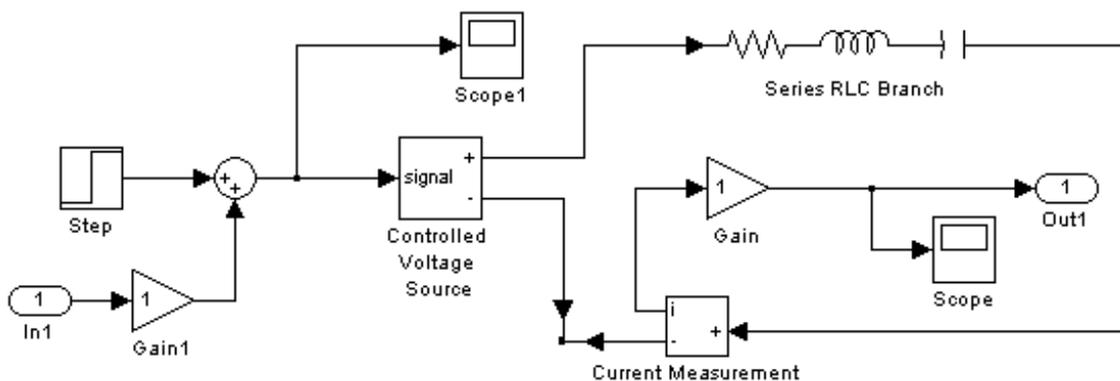


Рис. 23. Модель RLC-цепи (model8.mdl) в SimPowerSystem
Fig. 23. RLC circuit model (model8.mdl) in SimPowerSystem

В качестве скачка подадим на вход 10 условных единиц, что соответствует 10 вольтам. Запустим модель и кликнем по блоку Scope. В результате получим аналогичный график, как и на рис. 22.

Но если выполнить M-файл (mf2.m), изменив в нем имя модели на model8.mdl, то получим матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} -0,2 & -0,1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

и график изменения тока, приведенный на рис. 21.

Как видно из графика, максимальное значение тока стало в 10 раз меньше действительного значения, полученного в модели, приведенной на рис. 24. Так же изменилась матрица управления B. Система не понимает, что на вход модели поступает скачок в 10 вольт, а воспринимает это как единичный скачок. Это один из нюансов совместного использования пакетов, который в отдельных случаях необходимо учитывать.

Чтобы устранить данную проблему, необходимо на входе или выходе модели в одном из блоков Gain установить коэффициент, равный 10, и мы получим достоверные значения.

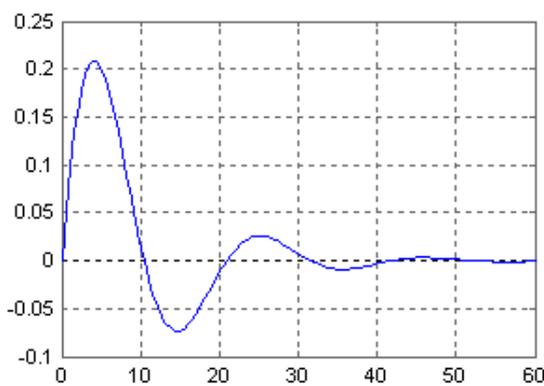


Рис. 24. График изменения тока в цепи при моделировании в SimPowerSystem
Fig. 24. Diagram of current change in the circuit, during simulation in SimPowerSystem

В данной статье приведены максимально простые модели, чтобы читатель мог понять их принцип работы и при желании повторить.

Совместное использование блоков *Simulink* и *SimPowerSystem* позволяет моделировать и очень сложные динамические системы, повышая при этом их функциональность и наглядность, особенно при моделировании электротехнических систем. В частности в модели на рис. 23 присутствует явная электрическая схема, по сравнению с моделью на рис. 21, где используется только передаточная функция этой схемы, которую к тому же необходимо сначала получить аналитически.

Литература

1. Бильфельд, Н.В. Управление *Simulink*-моделями из программ верхнего уровня / Н.В. Бильфельд // *Новый университет. Серия: Технические науки.* – 2013. – № 3. – С. 3–7.
2. Затонский, А.В. Программные средства глобальной оптимизации систем автоматического регулирования / А.В. Затонский. – М.: ИЦ РИОР, 2013. – 136 с.
3. Бычков, Ю.А. Основы теории электрических цепей / Ю.А. Бычков, В.М. Золотницкий, Э.П. Чернышев. – СПб.: Лань, 2002. – 464 с.
4. Фриск, В.В. Основы теории цепей / В.В. Фриск. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 160 с.
5. Затонский, А.В. Моделирование объектов управления в *MatLab* / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова. – СПб.: Лань, 2019. – 144 с.
6. Ануфриев, И.Е. Самоучитель *MATLAB 5.3/6.x* / И.Е. Ануфриев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 710 с.
7. Затонский, А.В. Моделирование статического режима процесса ректификации с идентификацией состава и свойств нефти / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* – 2015. – № 6. – С. 109–116. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-6-109-116
8. Бильфельд, Н.В. Многокритериальное исследование систем управления / Н.В. Бильфельд. – Пермь: ПНИПУ, 2015. – 436 с.
9. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в *MATLAB SimPowerSystems* и *Simulink* / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
10. Кирин, Ю.П. Построение моделей динамики сложных технологических объектов в позиционных системах управления / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* – 2009. – № 3 (27). – С. 25–28.
11. Бильфельд, Н.В. Переходные процессы в цепях постоянного тока / Н.В. Бильфельд. – Пермь: ПНИПУ, 2010. – 53 с.
12. Качественный анализ динамики позиционного регулирования температуры процесса восстановления титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, Н.В. Бильфельд // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* – 2008. – № 10. – С. 54–56.
13. Бильфельд, Н.В. Особенности получения массивов частотных характеристик в *MATLAB* / Н.В. Бильфельд // *Новый университет. Серия: Технические науки.* – 2014. – № 3–4 (25–26). – С. 17–22. DOI: 10.15350/2221-9552.2014.3-4.00023
14. Бильфельд, Н.В. Моделирование цепей постоянного и переменного тока в *SimPowerSystems* и *Simulink* / Н.В. Бильфельд. – Пермь: ПНИПУ, 2010. – 50 с.
15. Бильфельд, Н.В. Программа исследования динамики систем управления / Н.В. Бильфельд // *Программные продукты и системы.* – 2010. – № 3 (91). – С. 118–120.

Бильфельд Николай Валентинович, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; bilfeld@mail.ru.

Володина Юлия Игоревна, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; julia_volodina@mail.ru.

Поступила в редакцию 21 ноября 2019 г.

MODELING OF ELECTRICAL SYSTEMS AND CONTROL SYSTEMS BY MODERN MATLAB PACKAGES

N.V. Bilfeld, bilfeld@mail.ru,

Yu.I. Volodina, julia_volodina@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russian Federation

Introduction. Packages Simulink and SimPowerSystem are used by most researchers separately due to problems with the mutual transfer of data between functional blocks. In particular, issues of simulation and construction of dynamic models of various systems are solved using the Simulink package, modeling of electrical, electrical systems and electric drive systems are solved using SimPowerSystem. **Aim:** to develop methods of their mutual application both in the educational process and in production for the design of nodes and research etc. **Materials and methods.** In practice, research in the field of electronic and electronic circuits is carried out by analytical calculations. The impossibility of direct routing of signals from Simulink and SimPowerSystem packages in MATLAB is shown. In some cases, only data packets, output signals and vice versa are used. The process of combining two circuits modeled in different packages is described in stages using the following examples: transferring values from Simulink models to MATLAB, transferring values from MATLAB to a Simulink model, transferring values from Simulink to SimPowerSystem. **Results.** All examples are given in an accessible, understandable form, with diagrams, graphs, algorithm of actions, code, expected results, so that the reader can understand their principle. Possible problems when executing the examples and their possible solutions are discussed. **Conclusion.** The joint use of the Simulink and SimPowerSystem blocks allows you to simulate very complex dynamic systems, while increasing their functionality and visibility, especially when modeling electrical systems.

Keywords: modeling, MATLAB, Simulink, SimPowerSystem, control system, electrical scheme.

References

1. Bil'fel'd N.V. [Control of Simulink Models from Top-Level Software]. *New University. Series: Technical Sciences*, 2013, no. 3, pp. 3–7. (in Russ.)
2. Zatonskiy A.V. *Programmnye sredstva global'noy optimizatsii sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Software Tools for Global Optimization of Automatic Control Systems]. Moscow, IC RIOR Publ., 2013, 136 p.
3. Bychkov Ju.A., Zolotnitskiy V.M., Chernyshev E.P. *Osnovy teorii elektricheskikh tsepey* [Fundamentals of the Theory of Electrical Circuits]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2002, 464 p.
4. Frisk V.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of Circuit Theory]. Moscow, Solon-Press Publ., 2004, 160 p.
5. Zatonskiy A.V., Tugashova L.G. *Modelirovanie ob'ektov upravleniya v MatLab* [Control Objects Modeling by MatLab]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019, 144 p.
6. Anufriev I.E. *Samouchitel' MATLAB 5.3/6.h* [Matlab Self-Learning]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2002, 710 p.
7. Zatonskiy A.V., Tugashova L.G. [Modeling of Static Mode of Rectification Process with Identification of Oil Composition and Properties]. *News of Higher Educational Institutions. Oil and Gas*, 2015, no. 6, pp. 109–116. (in Russ.) DOI: 10.31660/0445-0108-2015-6-109-116
8. Bil'fel'd N.V. *Mnogokriterial'noe issledovanie sistem upravleniya* [Multicriteria Study of Control Systems]. Perm, PNRPU, 2015, 436 p.
9. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of Electrical Devices in MATLAB SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008, 288 p.
10. Kirin Yu.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F. [Design of Dynamic Models of Complex Technological Objects with Positional Control Systems]. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*, 2009, no. 3 (27), pp. 25–28. (in Russ.)

11. Bil'fel'd N.V. *Perekhodnye protsessy v tsepyakh postoyannogo toka* [Transients in DC Circuits]. Perm, PNRPU, 2010, 53 p.

12. Kirin Ju.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F., Bil'fel'd N.V. [Qualitative Analysis of the Dynamics of Positional Regulation of the Temperature of the Titanium Reduction Process]. *Instruments and Systems. Management, Control, Diagnostics*, 2008, no. 10, pp. 54–56. (in Russ.)

13. Bil'fel'd N.V. [Features of Obtaining Arrays of Frequency Characteristics in MATLAB]. *New University. Series: Technical Sciences*, 2014, no. 3–4 (25–26), pp. 17–22. (in Russ.) DOI: 10.15350/2221-9552.2014.3-4.00023

14. Bil'fel'd N.V. *Modelirovanie tsepej postoyannogo i peremennogo toka v SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of DC and AC Circuits by SimPowerSystems and Simulink]. Perm, PNRPU Publ., 2010, 50 p.

15. Bil'fel'd N.V. [Software for Control Systems Dynamics Research]. *Software Products and Systems*, 2010, no. 3 (91), pp. 118–120. (in Russ.)

Received 21 November 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Бильфельд, Н.В. Моделирование электрических систем и систем управления в современных пакетах MATLAB / Н.В. Бильфельд, Ю.И. Володина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 27–38. DOI: 10.14529/ctcr200103

FOR CITATION

Bilfeld N.V., Volodina Yu.I. Modeling of Electrical Systems and Control Systems by Modern MATLAB Packages. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 27–38. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200103
