

MATLAB 8.0 (R2012b) — схемотехническое моделирование в Simscape и SimElectronics

Владимир ДЬЯКОНОВ,
д. т. н., профессор
vpdyak@yandex.ru

Новая матричная система компьютерной математики MATLAB 8.0 (R2012b) превратилась в удобную систему блочного схемотехнического моделирования электрических и электронных схем с открытым программным кодом и понятной математической и физической ориентацией. Этим она выгодно отличается от известных программ схемотехнического моделирования PSPICE, MicroCAP, Electronics Workbench и других. Средства схемотехнического моделирования вошли в пакеты расширения Simulink, Simscape и SimElectronics, последние реализации которых впервые описаны в статье на многих примерах их практического применения. Автор благодарит корпорацию The MathWorks Inc. [1] за предоставленную систему MATLAB 8.0 + Simulink 8.0, использованную для подготовки данной серии материалов.

Библиотека электрических компонентов пакета Simscape Toolbox

Пакет расширения Simscape Toolbox ориентирован на математическое и физическое блочное моделирование в конкретных, но довольно широких областях науки и техники — электричестве, электронике, механике, электромагнетизме, пневматике, гидравлике и термодинамике [2–5]. Моделирование происходит скорее на уровне фундаментальных физических процессов, чем конкретных технических устройств. Библиотека паке-

та Simscape находится в библиотеке пакета блочного имитационного моделирования Simulink (рис. 1).

На рис. 1 открыт раздел фундаментальных блоков электрических элементов, в число которых входят наиболее распространенные электрические элементы; резистор R, конденсатор C, индуктивность L, идеальный и насыщающийся трансформаторы, гиратор, порты открытия схемы и «земли», идеальный ключ, диод и др. Активные (усиливающие сигналы) устройства представлены лишь идеальным операционным усилителем. Все они описываются уравнениями теоретических основ электротехники [6–9].

Основная задача пакета Simscape заключается в переходе от безразмерных Simulink-блоков к размерным. Например, входами виртуального осциллографа при моделировании электрических схем должны быть токи или напряжения, тогда как блоки Simulink-осциллографов воспринимают безразмерные сигналы. Поэтому в разделе

Electrical Sensors представлены лишь два блока — сенсор тока и сенсор напряжения. В разделе источников (рис. 2) показаны управляемые и управляемые источники напряжения и тока (в Simulink источники тоже безразмерные).

Моделирование простейших электрических цепей

Даже такой скромный набор позволяет моделировать простые электрические и электронные цепи. На рис. 3 показан демонстрационный пример моделирования переходного процесса в RC-цепи при заряде конденсатора через резистор от источника единичного перепада Step. Сенсор напряжения превращает этот перепад в перепад напряжения. Окно параметров конденсатора представлено в левом нижнем углу окна диаграммы. Виртуальный Simulink-осциллограф показывает график заряда (экспоненту с начала перепада) благодаря при-

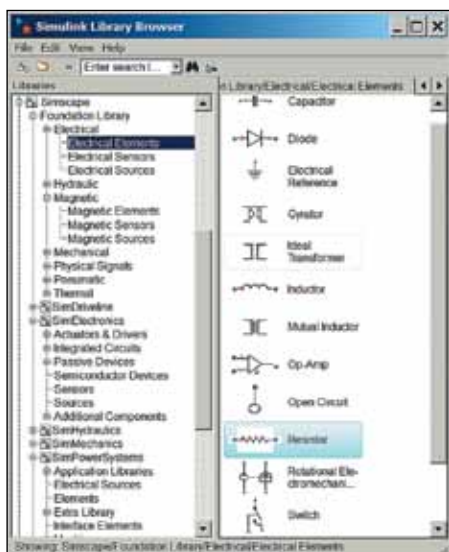


Рис. 1. Окно браузера библиотек Simulink с открытым списком разделов библиотек пакета расширения Simscape

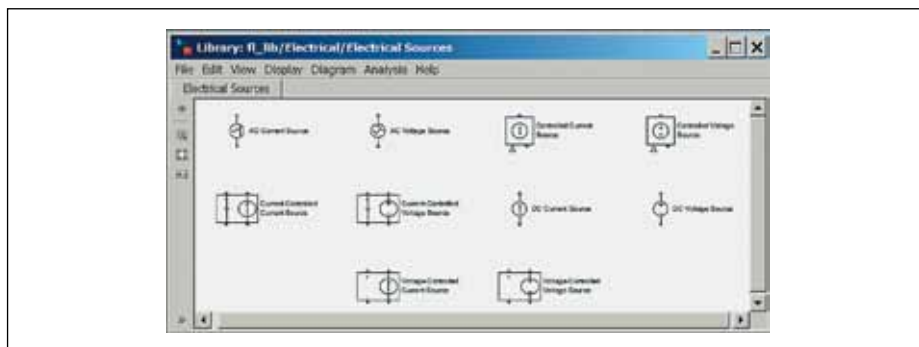


Рис. 2. Окно с разделом библиотеки по источникам

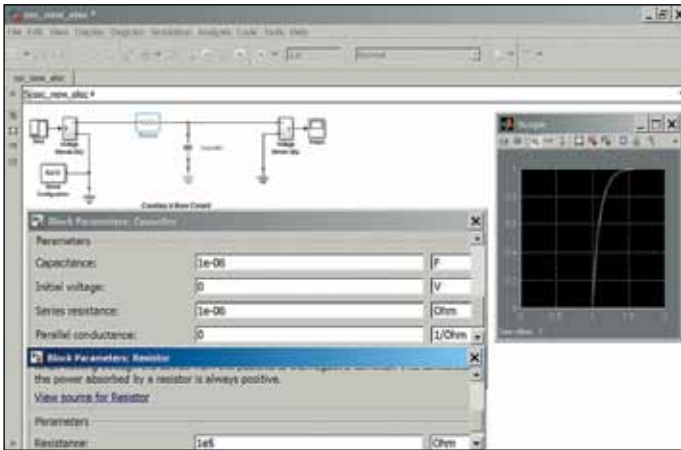


Рис. 3. Диаграмма моделирования RC-цепи, питаемой от перепада напряжения

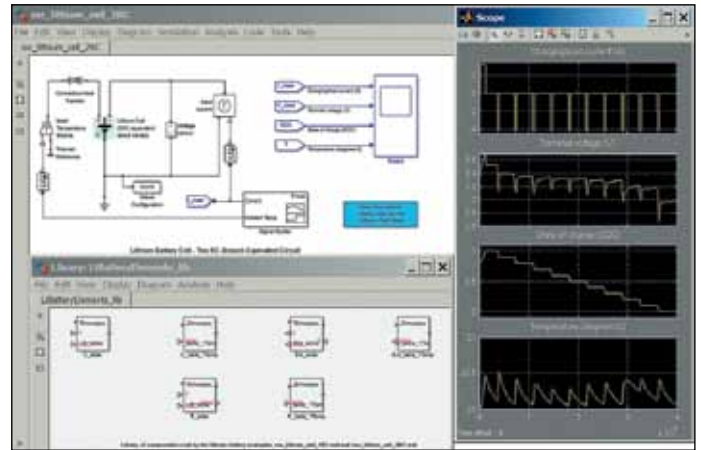


Рис. 4. Управление зарядом/разрядом литиевой аккумуляторной батареи

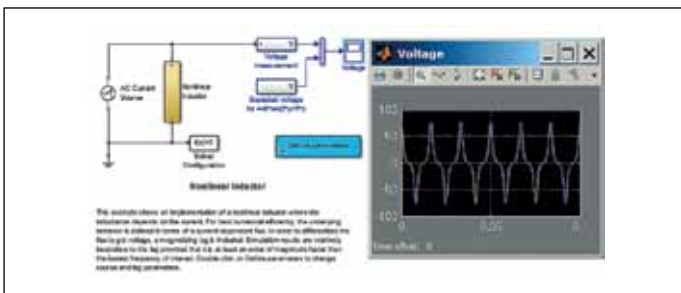


Рис. 5. Моделирование нелинейной индуктивности

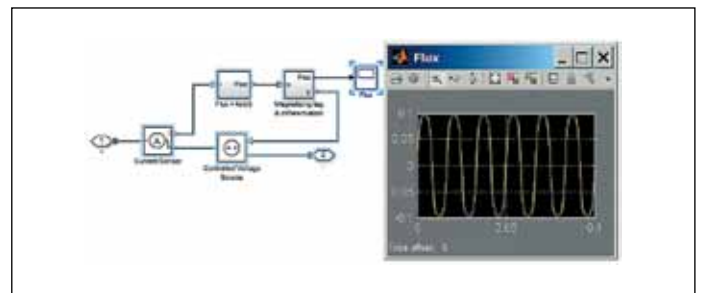


Рис. 6. Контроль магнитного потока в нелинейной индуктивности

менению сенсора преобразования напряжения в безразмерную величину. Хотя сенсоры немного усложняют моделируемую схему, она вполне понятна специалисту-электрику. И набирается по правилам, принятым в Simulink.

Спецификой математического моделирования электротехнических и электронных устройств является дополнение дифференциальных уравнений алгебраическими уравнениями для расчета статического режима работы схем. Этот процесс автоматизирован, но требуется специальное указание на его применение. Такое указание задается включением особого блока Solver Configuration с надписью $f(x)=0$ внутри блока. Этот блок может подключаться к любой точке схемы, чаще всего к «земле».

На рис. 4 показана диаграмма моделирования процесса заряда и разряда литиевой аккумуляторной батареи импульсным током различной полярности (положительной при заряде и отрицательной при разряде). Под диаграммой показано окно раздела библиотеки с блоками моделей литиевых батарей. Моделирование других типов батарей также предусмотрено.

Моделирование нелинейных компонентов и устройств основано на решении нелинейных дифференциальных уравнений с помощью имеющегося в MATLAB набора их решателей численными методами. Простейший пример моделирования нелинейной индуктивности дан на рис. 5. Через индуктивность пропускается синусоидальный ток от источника AC Current Sours. Напряжение на катушке индуктивности, показанное виртуальным осциллографом, резко отличается от синусоидального.

Для контроля магнитного потока в катушке индуктивности используется субмодель этого компонента, показанная на рис. 6. Нетрудно заметить, что магнитный поток меняется во времени также по несинусоидальному закону, но характер нелинейности иной, чем для временной зависимости напряжения на индуктивности. Эта зависимость описана на языке системы MATLAB в описании примера.

Простые электрические и электронные схемы также могут моделироваться при задании их блоков из библиотеки электрических

компонентов пакета Simscape. На рис. 7 показана диаграмма моделирования типовой схемы мостового выпрямителя с трансформатором. Эта широко распространенная схема состоит из четырех диодов и работает на резистивную нагрузку и сглаживающий конденсатор. Окно блока параметров одного из диодов представлено на рис. 7. На осциллограмме выходного напряжения виртуального осциллографа отчетливо виден участок роста при подаче на выпрямитель переменного напряжения и почти пилообразные пульсации его выходного напряжения с удвоенной частотой сети.

Используя имеющиеся в библиотеке блоки, можно создавать субмодели различных устройств, которые затем могут включаться в состав библиотеки и расширять ее возможности. На рис. 8 показана диаграмма работы схемы прерывателя тока в нагрузке и результаты его моделирования. Субмодель открывается двойным щелчком правой клавиши мыши на модели основного блока и создается с окном установки параметров (рис. 8).

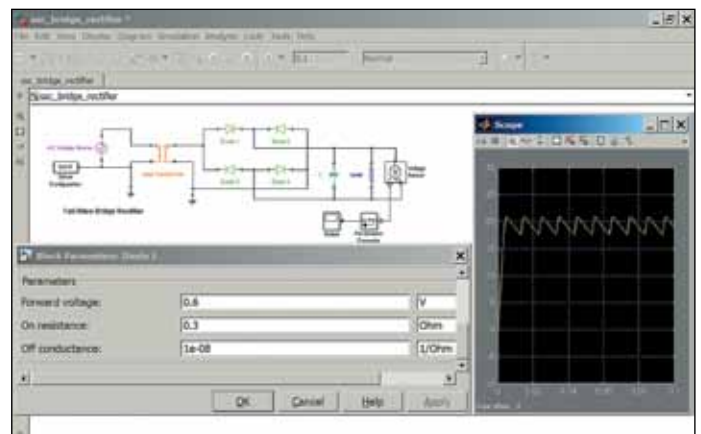


Рис. 7. Диаграмма моделирования мостового двухфазного выпрямителя

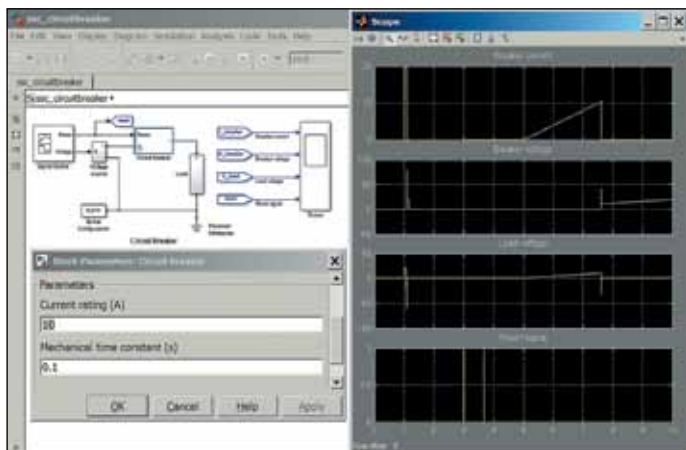


Рис. 8. Диаграмма моделирования блока прерывателя

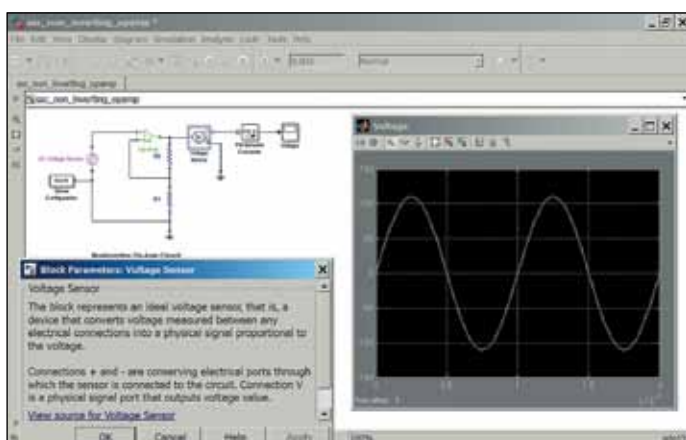


Рис. 9. Диаграмма моделирования не инвертирующего усилителя на идеальном операционном усилителе

Возможно моделирование и типовых устройств, выполненных на идеальном интегральном операционном усилителе. Например, на рис. 9 показана схема не инвертирующего усилителя, построенного на основе идеального операционного усилителя. Такой усилитель не имеет амплитудных и частотных искажений и обладает бесконечным коэффициентом усиления и бесконечным входным сопротивлением. С учетом охвата усилителя отрицательной обратной связью коэффициент усиления будет равен $(R1+R2)/R1$ (в данном примере 11).

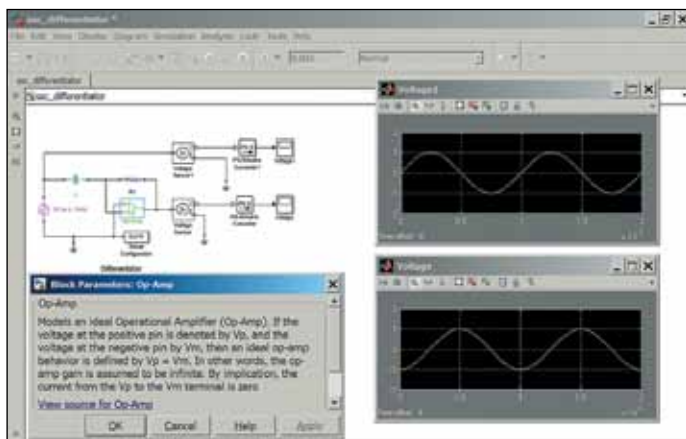


Рис. 10. Диаграмма моделирования дифференцирующего устройства на идеальном операционном усилителе

Реальный операционный усилитель имеет конечные уровни выходного напряжения, обычно не превышающие 15 В. В данном примере на вход усилителя подано большое напряжение (10 В) и амплитуда выходного сигнала достигает нереальной величины 110 В. Это говорит об идеализации модели операционного усилителя и отсутствии у него амплитудных искажений. Нетрудно проверить модель и на отсутствие частотных искажений.

Другой пример применения идеального операционного усилителя — построение инвертирующего дифференцирующего устройства — представлен на рис. 10. Осциллограммы подтверждают правильность моделирования — дифференцирование синусоиды дает инвертированную косинусоиду.

Каждый блок диаграммы имеет свои характеристики, которые устанавливаются в окне его параметров. Оно вызывается указанием блока мышью и двойным щелчком ее левой клавиши. На рис. 10 показано окно установки параметров блока сенсора напряжения. Если блок субмодель, то открывается окно ее диаграммы.

Моделирование схемы ШИМ и пуска трансформатора

В источниках питания с высоким КПД и в схемах управления двигателями и другими электрическими аппаратами часто используются схемы широтно-импульсных модуляторов (ШИМ). Диаграмма моделирования асинхронного источника напряжения PWM Voltage Source с широтно-импульсной модуляцией представлена на рис. 11. Работа этого блока вполне очевидна. Окно установки параметров блока находится справа от диаграммы.

Диаграмма моделирования включения идеального трансформатора представлена на рис. 12. Полученные результаты здесь также очевидны.

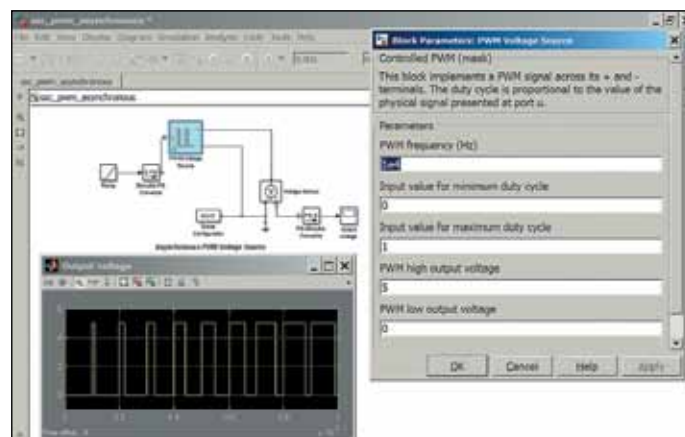


Рис. 11. Диаграмма моделирования асинхронного источника напряжения с широтно-импульсной модуляцией

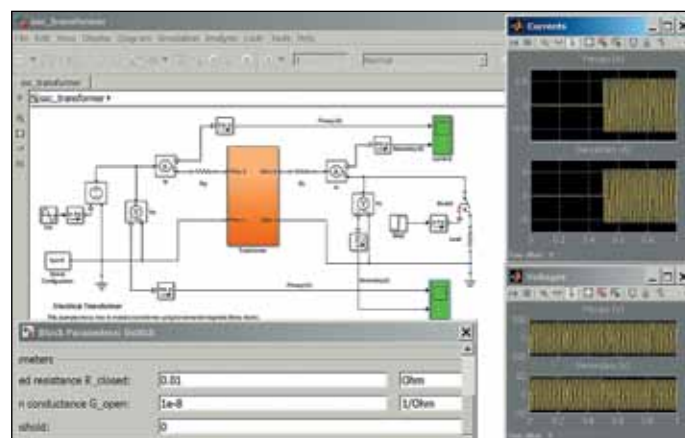


Рис. 12. Диаграмма моделирования включения трансформатора

Моделирование электродвигателей

Моделирование переходных процессов при включении и выключении маломощных двигателей рассматривается во многих демонстрационных примерах пакета расширения Simscare R2012. На рис. 13 показана диаграмма модели запуска электродвигателя с переменным магнитным сопротивлением. Двигатель запускается перепадом тока, создаваемым генератором перепада Step с преобразованием его в перепад тока. Поскольку сопротивление двигателя имеет индуктивную компоненту и он проявляет резонансные механические свойства, то как угол поворота, так и магнитный поток содержат колебательную компоненту. На рисунке представлены осциллограммы виртуального осциллографа и окно параметров двигателя.

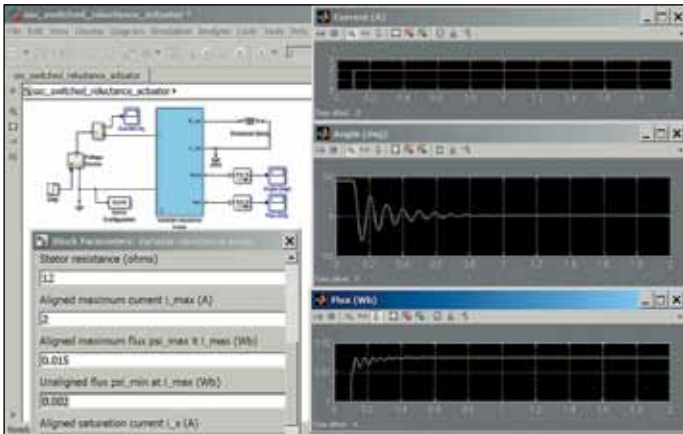


Рис. 13. Запуск двигателя с переменным магнитным сопротивлением перепадом напряжения

С позиций моделирования одним из самых простых является электродвигатель постоянного тока с постоянным магнитом. Переходные процессы его включения и выключения носят экспоненциальный характер, что показано на рис. 14. Отсутствие перерегулирования явно относится к достоинствам такого двигателя.

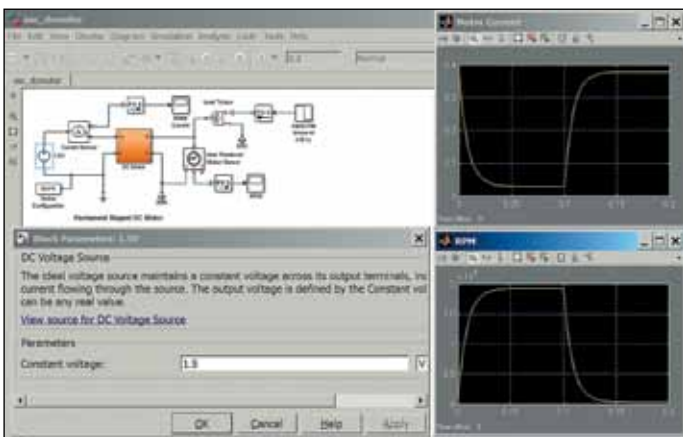


Рис. 14. Диаграмма моделирования включения/выключения электродвигателя постоянного тока с постоянным магнитом

Таким же достоинством обладает шунтовый электродвигатель постоянного тока. Диаграмма его модели, показанная на рис. 15, иллюстрирует процесс включения двигателя с его работой на переменную во времени нагрузку. Нетрудно заметить, что при скачкообразном изменении нагрузки переходные процессы остаются строго монотонными.

Пакет расширения Simscare позволяет моделировать и двигатели другой физической природы, в частности пневматические. Пример

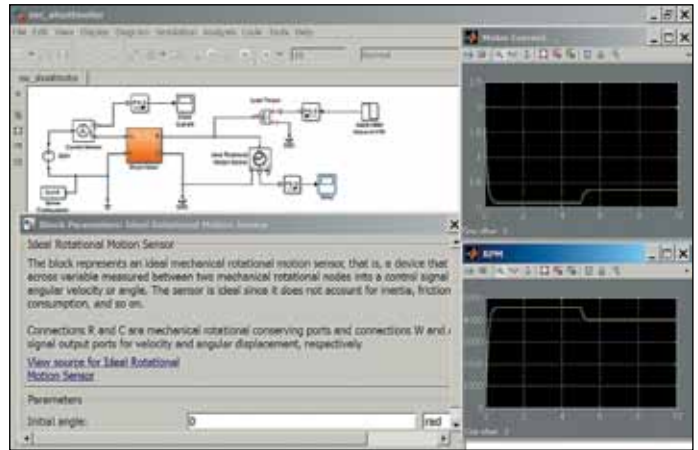


Рис. 15. Диаграмма моделирования переходных процессов шунтового электродвигателя

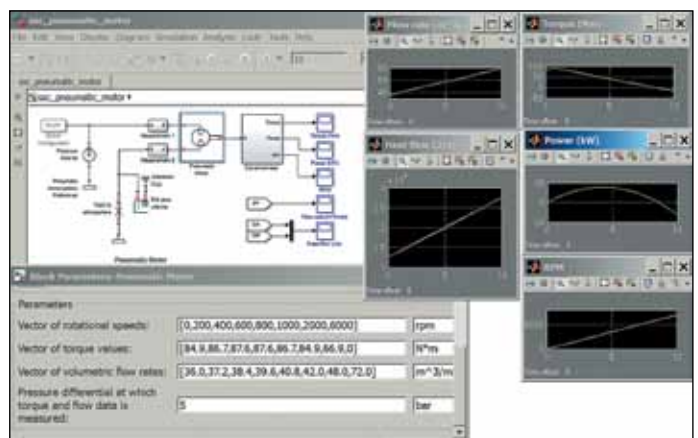


Рис. 16. Диаграмма моделирования пневматического двигателя

этого представлен диаграммой рис. 16. Приведенные осциллограммы свидетельствуют о сложных и довольно специфических процессах работы пневматического двигателя.

Библиотека электронных компонентов пакета SimElectronics

Гораздо больше возможностей в моделировании электрических и электронных схем предоставляет пакет расширения SimElectronics, входящий в пакет Simscare. Это обусловлено значительным расширением библиотеки его блоков и их ориентацией на моделирование электронных схем и устройств широкого применения. На протяжении последних лет библиотека компонентов SimElectronics постоянно совершенствовалась и пополнялась от одной версии системы MATLAB+Simulink к другой, постепенно превращая пакет SimElectronics во вполне полноценный пакет схемотехнического моделирования общего характера [3–10].

Последняя реализация SimElectronics R2012b впервые представлена в данной статье. Она содержит новые блоки нелинейной индуктивности и нелинейного трансформатора, новый блок термистора, ряд новых блоков преобразования неэлектрических величин в электрические, новый блок DC/DC-конвертера, новые примеры применения и т. д.

Окно с блоками пассивных элементов библиотеки пакета расширения SimElectronics (рис. 17) содержит модели переменных линейных резистора, конденсатора и катушки индуктивности, модели нелинейных индуктора и трансформатора, модели кварцевого резонатора, лампы накаливания, термистора, ключей и трехобмоточного трансформатора. Особо следует отметить модель линии передачи на основе LC-секций и с распределенными постоянными (например, на основе

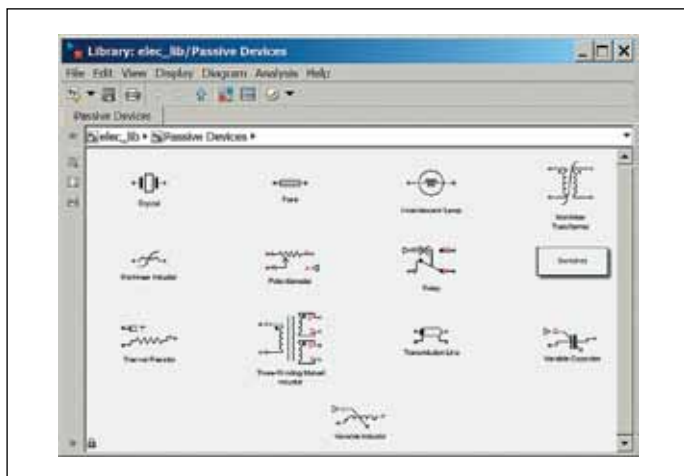


Рис. 17. Окно с блоками пассивных элементов библиотеки пакета SimElectronics

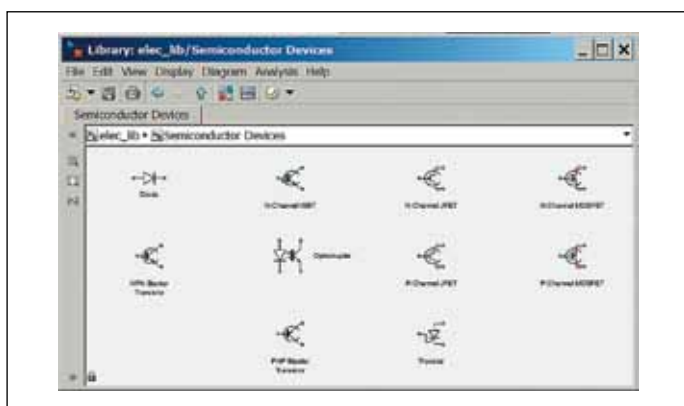


Рис. 18. Окно библиотеки Simulink R2012b с блоками полупроводниковых приборов общего применения пакета SimElectronics

отрезка коаксиального кабеля или микрополосковой линии). Она позволяет моделировать десятки устройств на линиях передачи [10].

Окно с блоками моделей полупроводниковых приборов общего применения пакета расширения SimElectronics показано на рис. 18. Представлены модели диода, n - и p -канальных полевых транзисторов с управляющим переходом и MOSFET-типа, p - n - p - и n - p - n -биполярных транзисторов, тиристора и даже оптопары светодиод-фототранзистор. Есть также множество моделей цифровых интегральных микросхем.

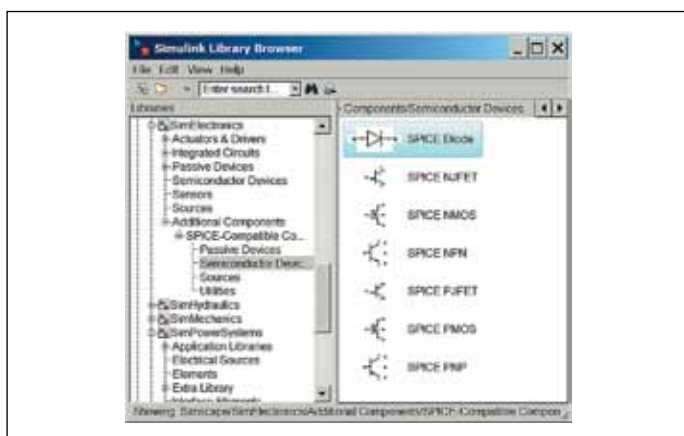


Рис. 19. Окно браузера библиотек с открытым разделом SPICE-совместимых моделей полупроводниковых приборов

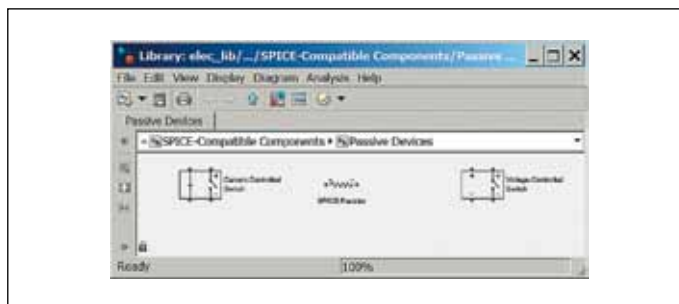


Рис. 20. Окно SPICE-совместимых пассивных компонентов

Математическое описание блоков базируется на широко распространенных моделях, например Эберса — Молла для биполярных транзисторов. В первом поколении моделей не учитывались тепловые эффекты, но затем их учет был введен и в полной мере присутствует в последней версии пакета SimElectronics R2012b. Все параметры моделей указываются в окнах установки параметров.

Между тем в области схемотехнического моделирования классикой являются программы класса SPICE и PSPICE, модели которых стали стандартными в полупроводниковой электронике. Учитывая это, в последних реализациях системы MATLAB+Simulink 7.xx (и, естественно, в новой реализации 8.0) библиотека компонентов была рас-

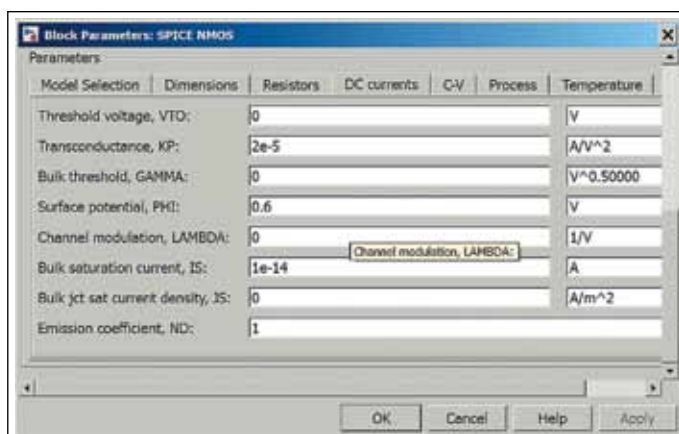


Рис. 21. Окно установки параметров SPICE-модели NMOS-транзистора

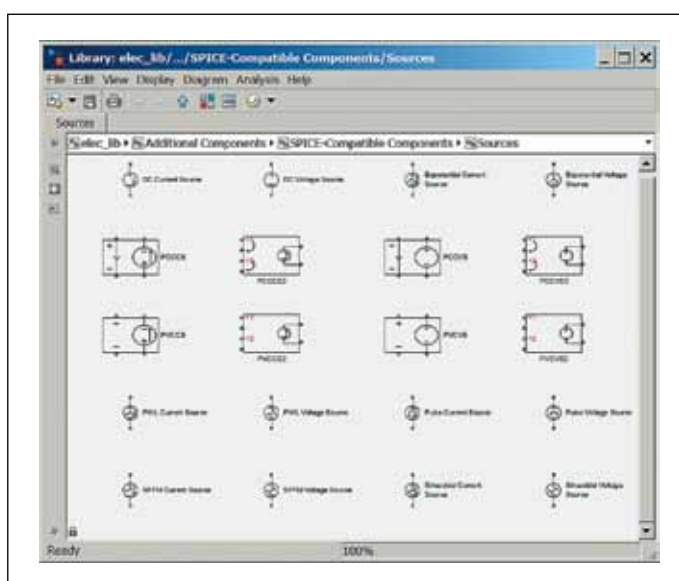


Рис. 22. Окно раздела SPICE-моделей источников

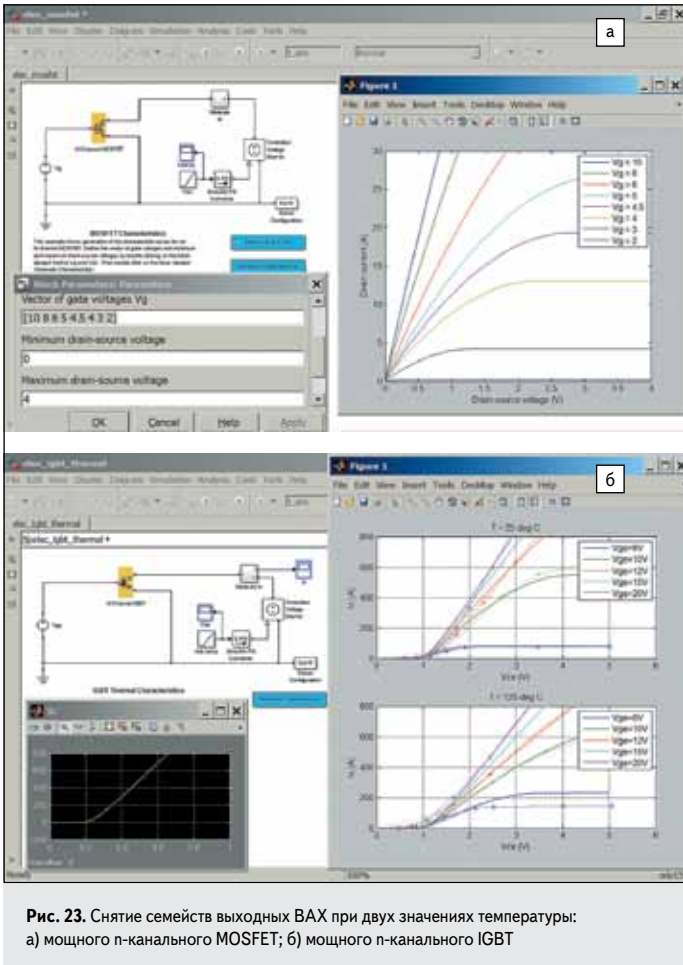


Рис. 23. Снятие семейств выходных ВАХ при двух значениях температуры: а) мощного p-канального MOSFET; б) мощного p-канального IGBT

ширена блоками SPICE-совместимых моделей. На рис. 19 можно видеть окно библиотеки Simulink R2012b с открытым разделом SPICE-моделей диода и транзисторов.

Существуют SPICE-совместимые модели и для пассивных компонентов. Окно с ними для пакета расширения SimElectronics показано на рис. 20. Таких компонентов немного — SPICE-резистор и управляемые ток и напряжением ключи. В этот раздел они попали явно по недоразумению, поскольку ключи обычно реализуются на активных приборах.

SPICE-модели характеризуются рядом новых величин, которые включены в окна установки параметров блоков (рис. 21). Усложнение системы параметров SPICE-блоков моделей вряд ли стоит относить к их достоинству, но иногда это позволяет повысить точность моделирования — особенно для схем, лежащих в основе интегральных микросхем.

Окно раздела SPICE-источников показано на рис. 22. Всего здесь присутствует 20 блоков SPICE-моделей, включая источники постоянного, переменного и импульсного тока и напряжения, источники с широтно-импульсным управлением и с частотной модуляцией.

Моделирование характеристики полупроводниковых приборов

У некоторых программ схемотехнического моделирования в библиотеке включены серийно выпускаемые компоненты, например транзисторы или диоды. Это резко увеличивает размеры библиотек и их приходится часто модернизировать по мере появления новых компонентов. Это особенно досажает пользователям из России и стран СНГ, где изготавливается множество своих приборов, отсутствующих в библиотеках. В системе MATLAB + Simulink пошли по иному пути [6–9]: в библиотеку включены компоненты общего

вида, но выбором их параметров можно задать любой тип конкретного компонента, даже если его выпуск лишь планируется.

Другим мощным полупроводниковым прибором является биполярно-полевой транзистор IGBT. Его модель была существенно улучшена, в частности, предусмотрены учет температуры внешней среды и саморазогрев прибора. Теперь модель характеристики IGBT позволяет получать семейства выходных ВАХ при разных температурах и сравнивать работу прибора при любой температуре (рис. 23б). Возможно моделирование сильноточных приборов с токами в сотни ампер.

Снятие ВАХ возможно для диодов (в том числе диодов Шоттки), биполярных транзисторов и полевых транзисторов с управляющим переходом.

Моделирование маломощных усилителей во временной и частотной областях

Элементарной ячейкой многих электронных устройств является усилительный каскад — схема на 1–3 транзисторах, которую нельзя разделить на более мелкие части. В каскад входят элементы стабилизации рабочей точки, отделения переменной составляющей сигнала от постоянной составляющей и другие цепи. Моделирование каскадов на различных полупроводниковых приборах — одна из задач, решаемых пакетом расширений SimElectronics.

На рис. 24 показана диаграмма модели типового усилительного каскада на полевом транзисторе с управляющим переходом (схема с общим истоком). На вход каскада подан достаточно большой синусоидальный сигнал, и диаграмма иллюстрирует появление заметных нелинейных искажений на выходе. Если уменьшить амплитуду входного сигнала, то каскад переходит практически в линейный режим, характерный для его нормальной работы.

Наряду с моделированием во временной области (рис. 24) часто требуется оценка работы каскадов в частотной области. Она определяется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) каскада и его фазочастотной характеристикой (нередко их называют логарифмическими из-за логарифмического масштаба характеристик по частоте).

Анализ линейных систем в частотной области, на основе решения их уравнений состояния, имеется в базовой системе MATLAB. Его можно использовать и для анализа линеаризованных моделей SimElectronics. Для этого в окне командного режима работы MATLAB надо исполнить простые команды:

```
>> [a,b,c,d] = linmod('имя_файла_схемы');
>> bode(a,b,c,d)
```

Первая команда создает в рабочем пространстве матрицы уравнений состояния (они указаны в квадратных скобках), а вторая строит по этим матрицам графики АЧХ и ФЧХ с логарифмической шкалой

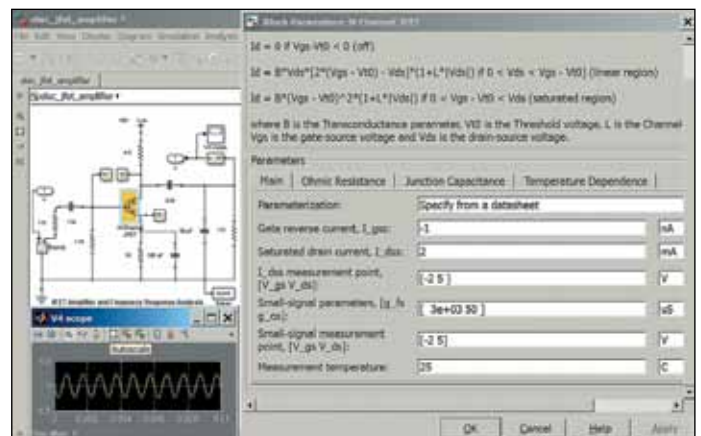


Рис. 24. Диаграмма модели усилительного каскада на полевом транзисторе

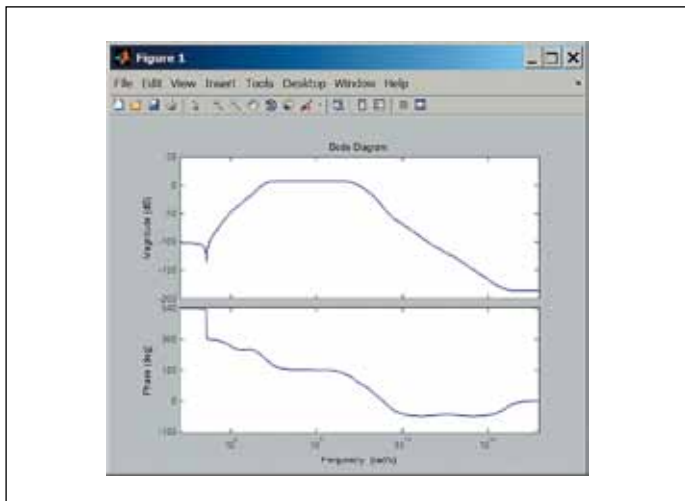


Рис. 25. Логарифмическая амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики каскада рис. 24

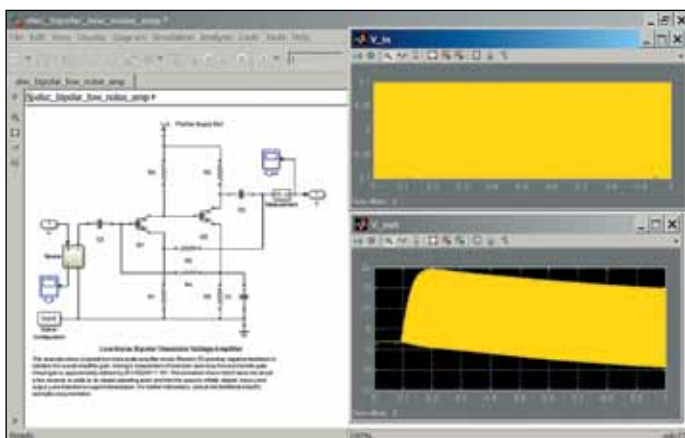


Рис. 26. Диаграмма модели двухкаскадного усилителя на биполярных транзисторах

частот — диаграммы Бодэ. На рис. 25 показаны эти характеристики для каскада рис. 24.

Аналогичным образом моделируются двухкаскадные усилители (рис. 26) и другие устройства. Усилитель на рис. 26 имеет сложную структуру с двумя цепями частотно-зависимой обратной связи. Его поведение без моделирования является далеко не очевидным и характеризуется длительным процессом установления стационарного режима.

Однако, выделив мышкой небольшую область желтой полоски сигнала, нетрудно получить осциллограмму сигнала в этой области (рис. 27). Можно заметить ограничения сигнала сверху и снизу, связанные с учетом нелинейности транзистора (отсечкой коллекторного тока закрытого и насыщением открытого транзистора). Они исчеза-

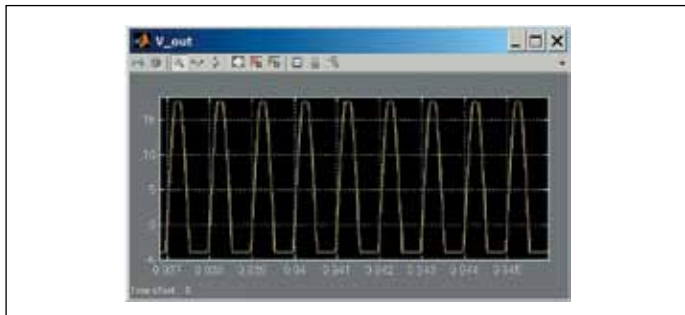


Рис. 27. Осциллограмма сигнала в стационарном режиме работы усилителя рис. 26

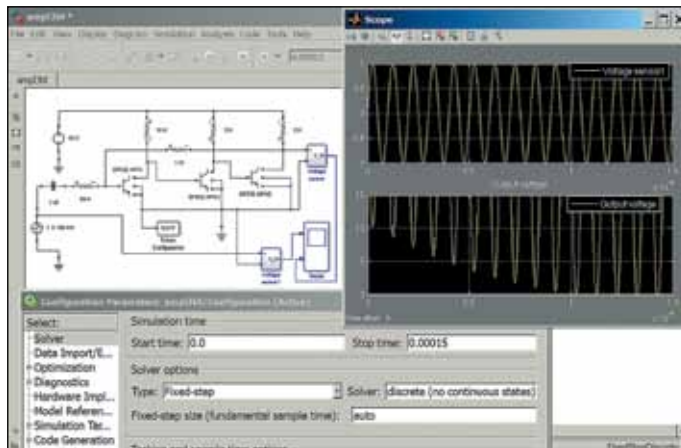


Рис. 28. Диаграмма моделирования трехкаскадного усилителя-формирователя, работающего в нелинейном режиме

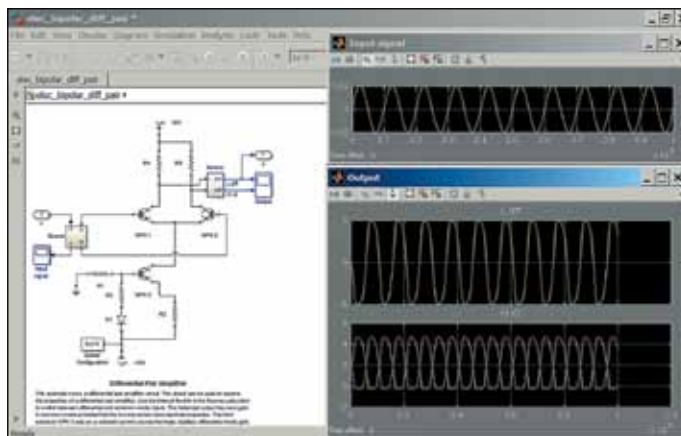


Рис. 29. Диаграмма модели дифференциального каскада на биполярных транзисторах

ют при уменьшении уровня сигналов на входе и с переходом усилителя в линейный режим работы.

Диаграмма моделирования резко нелинейного трехкаскадного усилителя-формирователя с гальваническими связями между транзисторами показана на рис. 28. В диаграмме этого усилителя использованы SPICE-модели всех компонентов, вплоть до резисторов. Выходной транзистор работает в резко нелинейном режиме, обеспечивая размах выходного напряжения почти от 0, при насыщении включенного транзистора, до напряжения питания 15 В в режиме отсечки. Для моделирования используется метод с фиксированным шагом. Переходный процесс установления выходного напряжения обусловлен наличием разделительного конденсатора на входе усилителя.

Осциллограммы выходного сигнала показывают, что модель является также нелинейной из-за нелинейности транзисторов. Но степень нелинейности в этой схеме обычно невелика.

Моделирование управляемого LC-генератора и мультивибратора

Нелинейные устройства с положительной обратной связью также могут моделироваться в пакете SimElectronics. На рис. 30а показана диаграмма модели управляемого напряжением генератора синусоидальных колебаний. Специфика таких схем состоит в медленном

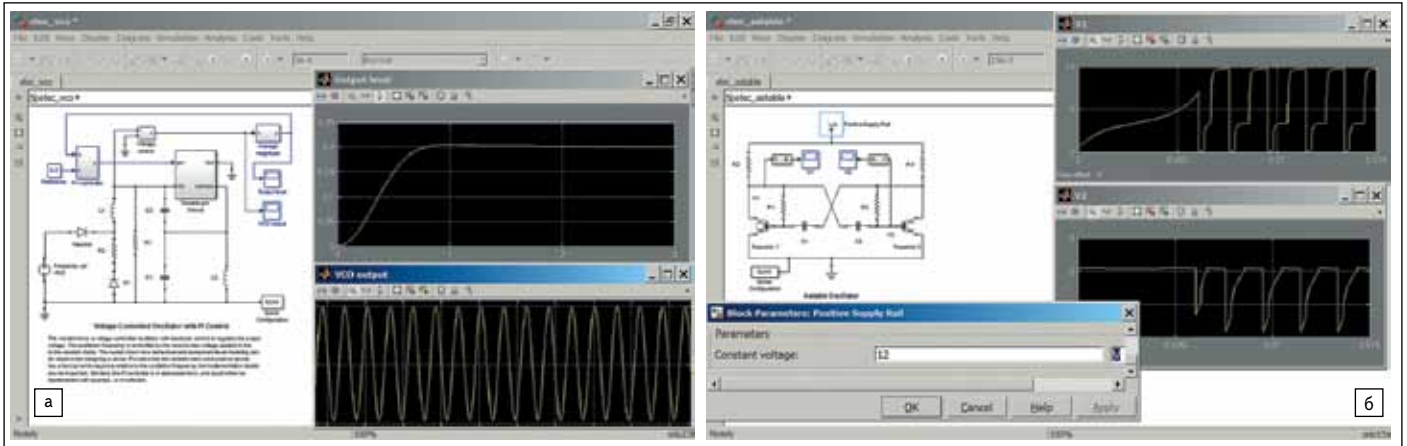


Рис. 30. Диаграмма модели: а) управляемого напряжением генератора синусоидальных колебаний с PI-контроллером; б) симметричного автоколебательного мультивибратора на биполярных транзисторах

процессе установления колебаний — в данном случае это вызвано высокой добротностью колебательного контура. Блок Average Magnitude позволяет получить зависимость от времени магнитуды сигнала генератора.

Определенные трудности вызывает моделирование импульсных устройств с положительной обратной связью — типа мультивибраторов. Описывающие их работу дифференциальные уравнения часто оказываются жесткими и требуют применения решателей таких уравнений. Они есть в составе решателей MATLAB+Simulink. На рис. 30б приведена диаграмма модели симметричного автоколебательного мультивибратора, осциллограммы переходных процессов модели и окно параметров блока питания.

Моделирование фильтров

Блоки моделей SimElectronics позволяют моделировать различные типы фильтров. На рис. 33 показана модель резонансного фильтра на трехобмоточном трансформаторе (рис. 31), на вход которого подается частотно-модулированный сигнал со средней частотой, близкой к частоте резонанса фильтра. В результате на выходе получается сигнал, похожий на амплитудно-модулированный.

Диаграмма модели активного НЧ-фильтра на двух операционных усилителях представлена на рис. 32а. Показана его реакция на короткий импульс и построенные в MATLAB сравнительные АЧХ идеального и реального фильтров.

Диаграмма модели фазосдвигающего устройства на двух операционных усилителях и результаты его моделирования представлены на рис. 32б в двух видах — осциллограмм виртуального осциллографа

и графиков, полученных при активизации синего прямоугольника Plot Characteristics. Они строятся средствами MATLAB.

Моделирование DC/DC-преобразователей

Наличие в библиотеке SimElectronics блоков моделей мощных диодов, полевых и биполярных транзисторов, IGBT и тиристоров открывает обширные возможности в простом и физически понятном блочном имитационном моделировании DC/DC-преобразователей

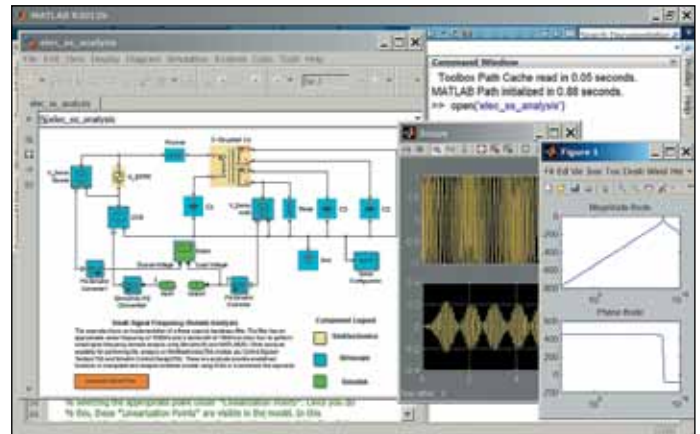


Рис. 31. Диаграмма работы пассивного резонансного фильтра на основе трехобмоточного трансформатора

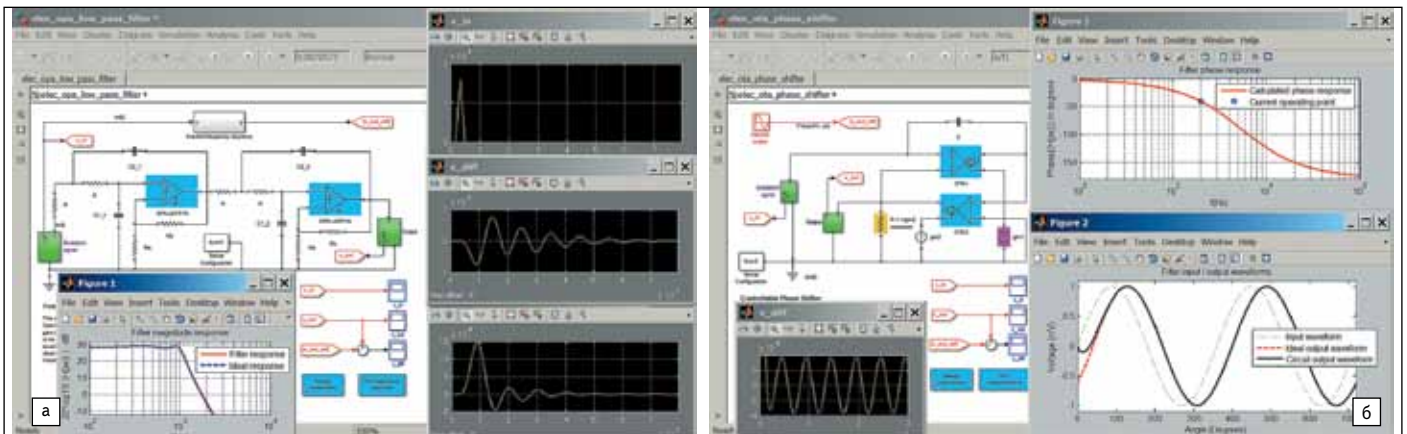


Рис. 32. Диаграмма модели: а) НЧ-фильтра на двух операционных усилителях; б) фазосдвигающего устройства на операционных усилителях

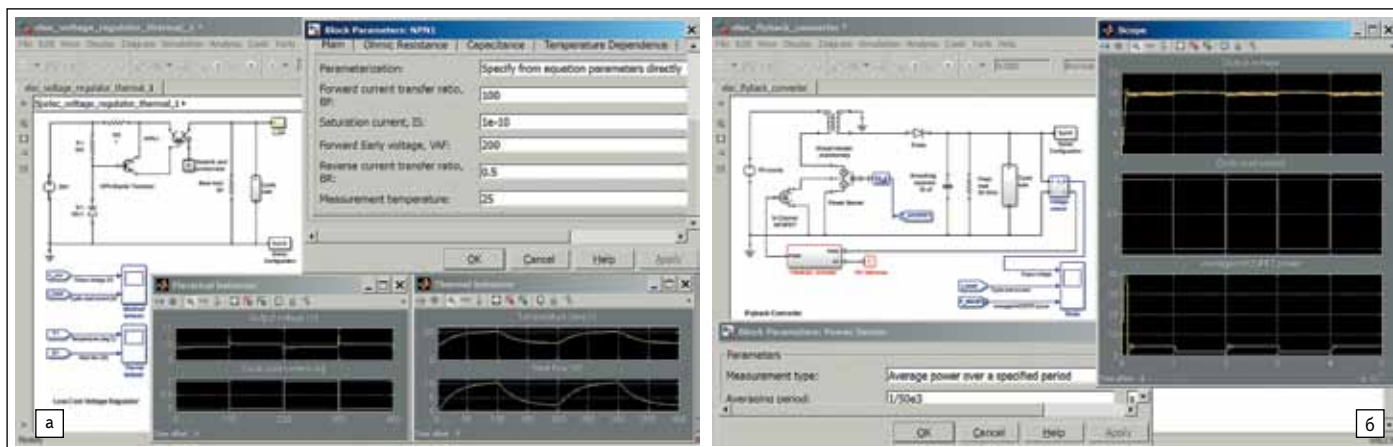


Рис. 33. Диаграмма модели:

а) стабилизатора (регулятора) на составном транзисторе, работающего на циклическую нагрузку; б) повышающего однотактного преобразователя на мощном полевом транзисторе

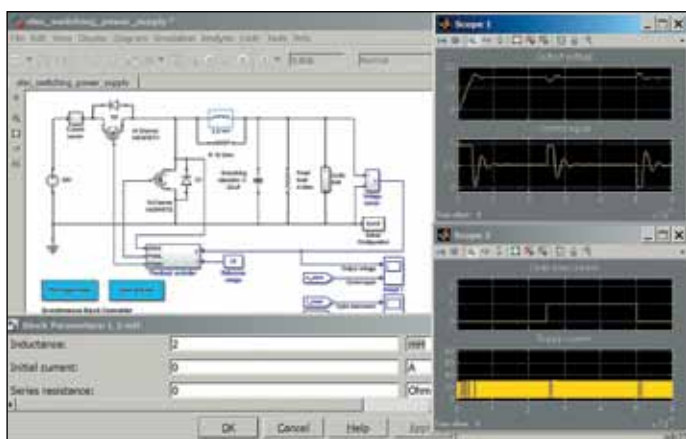


Рис. 34. Диаграмма работы понижающего преобразователя на мощных полевых транзисторах

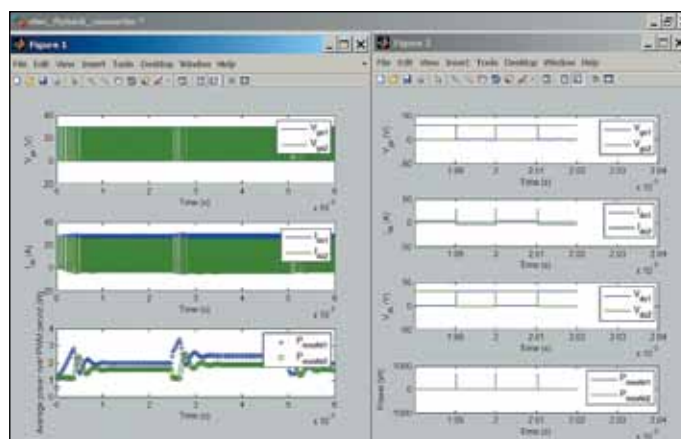


Рис. 35. Графическая иллюстрация работы преобразователя рис. 34

(постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня).

На рис. 33а показана диаграмма модели простого аналогового стабилизатора напряжения с регулирующим элементом на составном транзисторе (приборы типа $n-p-n$). Мощный транзистор оснащен термодатчиком, а регулятор работает на циклическую нагрузку. Осциллограммы одного виртуального осциллографа показывают временные зависимости выходного напряжения и тока нагрузки. Видно, что у такой простой схемы регулятора стабилизация выходного напряжения не высокая и напряжение заметно «проседает» при большом токе нагрузки. Осциллограммы второго осциллографа показывают временные зависимости температуры.

Для повышения КПД преобразователей в них используется ключевой метод регулирования с применением ключей на мощных полупроводниковых приборах. В преобразователях умеренной мощности перспективны ключи на быстро переключающихся мощных MOSFET без присущего биполярным транзисторам эффекта накопления зарядов при включении. На рис. 33б показана диаграмма модели типичного повышающего однотактного преобразователя на мощ-

ном полевом транзисторе. Преобразователь моделируется при циклической нагрузке с учетом температурных эффектов (нагрева при включении мощного полевого транзистора и его остывания при выключении). Осциллограммы дают наглядное представление о физике работы преобразователя.

На другой диаграмме (рис. 34) можно видеть модель понижающего преобразователя на двух мощных полевых транзисторах. Преобразователь работает на непрерывную и циклическую нагрузки.

С помощью базовой системы MATLAB можно получить дополнительные графические зависимости, описывающие работу моделируемых схем. Такой прием использован в модели рис. 34 (полученные зависимости приведены на рис. 35). При активизации синего прямоугольника Open Plot File в редакторе открывается файл-график, показанный на рис. 35.

Моделирование усилителей мощности с высокочастотной ШИМ

Высокая частота переключения мощных полевых транзисторов открывает перспективы построения на них усилителей мощности с ШИМ. Диаграмма модели одной из таких

схем с частотой преобразования около 1 МГц показана на рис. 36а. На вход схемы подан двухкомпонентный звуковой сигнал, биеция которого похожи на амплитудную модуляцию. Он воспроизводится на выходе почти без искажений, что указывает на достаточно большой динамический диапазон усилительных сигналов. Наряду с временными зависимостями сигналов на входе и на выходе показан сигнал ошибки (практически горизонтальная линия) и частотный спектр сигнала.

Ключевой режим работы с высоким КПД (до 0,95) лежит также в основе класса Е усилителей мощности. На рис. 36б показана диаграмма модели такого трансформаторного двухтактного усилителя мощности, выполненного на двух мощных MOSFET. Усилитель работает на частотах 80-метрового диапазона, выделенного для связи. Виртуальный осциллограф отображает входной сигнал (меандр), выходной сигнал (довольно чистая синусоида), а также временные зависимости напряжений на стоках и токов стока. Для получения синусоидальной формы выходного сигнала применяется фильтр на резонансных контурах и втором трехобмоточном трансформаторе (первый такой трансформатор используется в схеме самого усилителя).

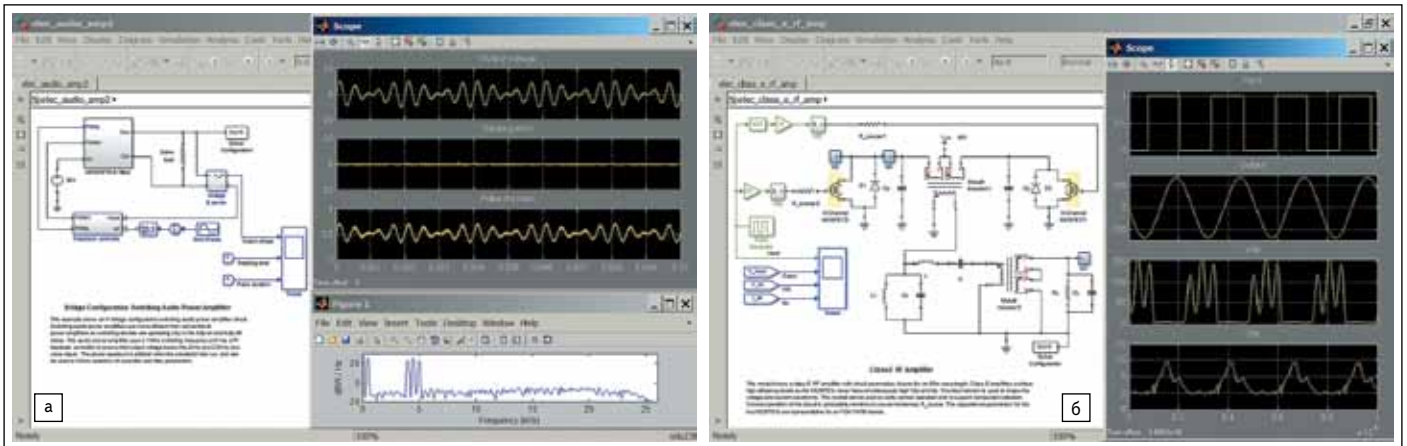


Рис. 36. Диаграмма модели: а) ключевого усилителя мощности звукового сигнала с частотой преобразования 1 МГц; б) усилитель мощности 80-метрового диапазона класса E

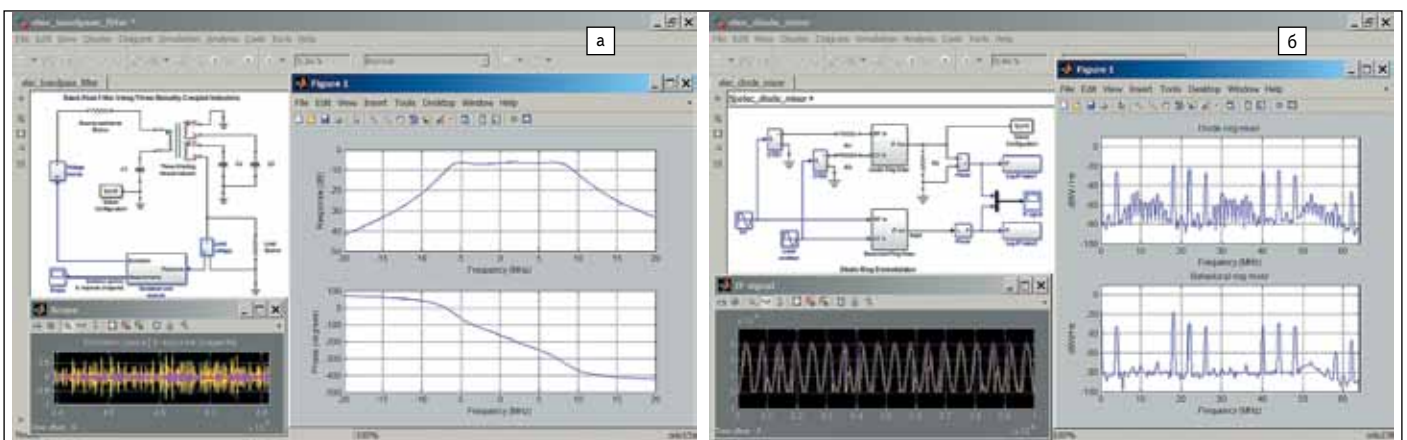


Рис. 37. Диаграмма модели: а) полосового фильтра на основе трехобмоточного трансформатора; б) диодного кольцевого демодулятора и результаты его моделирования

Моделирование некоторых схем коммуникационных устройств

В коммуникационных устройствах применяются некоторые из описанных выше устройств, например усилители, фильтры и др. Добавим к ним еще пару примеров. На рис. 37а показана диаграмма модели полосового фильтра на основе трехобмоточного трансформатора. Обмотки трансформатора и подключенные к ним конденсаторы обра-

зуют резонансные контуры, формирующие АЧХ с плоской вершиной (в отличие от фильтра на рис. 31). Намного более плавной получается и ФЧХ-фильтра. Это имеет важное значение в ряде коммуникационных устройств.

Диаграмма модели кольцевого диодного демодулятора показана на рис. 37б. Здесь интересно спектральное представление работы демодулятора с помощью спектров, получаемых от базовой системы MATLAB. Они видны на рисунке и помогают понять работу демодулятора.

Сенсоры температуры на основе термистора

В тексте и демонстрационных примерах SimElectronics довольно много внимания уделено описанию моделей различных сенсоров. Ограничимся примерами моделирования сенсоров температуры на основе термистора. Диаграмма модели сенсоров с термисторным мостом показана на рис. 38а. Работа сенсора вполне очевидна: выходной сигнал моста

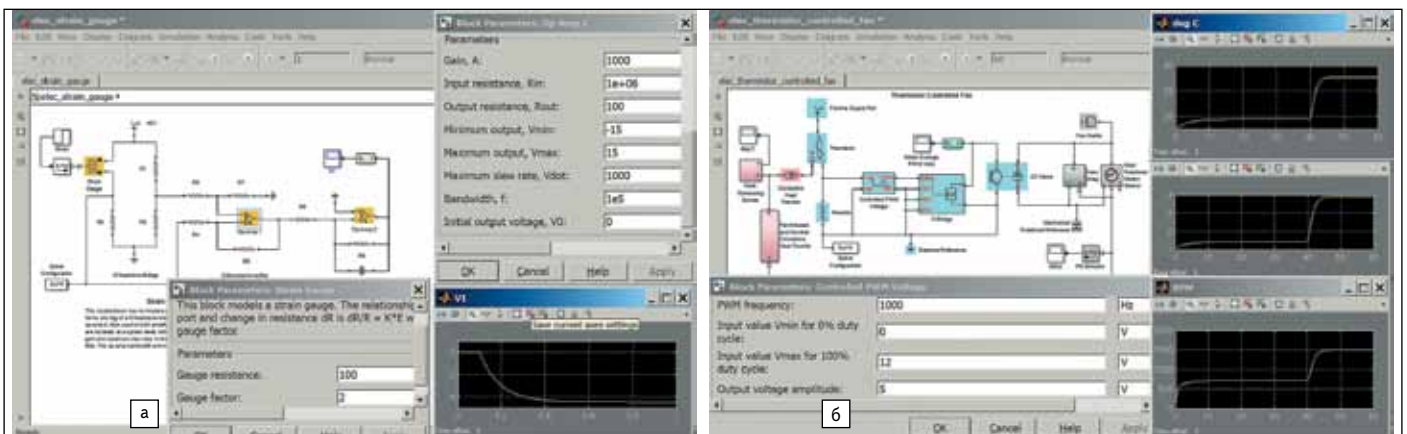


Рис. 38. Диаграмма модели: а) термисторного моста на входе операционного усилителя; б) управляемого термистором вентилятора

усиливается усилителем на операционном усилителе. Второй операционный усилитель используется в схеме реального интегратора, снижающего шумы и задающего постоянную времени сенсора.

Другая диаграмма — модели управляемого термистором двигателя для охлаждающего вентилятора — представлена на рис. 386. Здесь скорость двигателя управляется так, чтобы обеспечить постоянство температуры.

Заключение

Благодаря пакетам расширения Simscape и SimElectronics система MATLAB+Simulink R2012b приобрела основные возможности систем схемотехнического моделирования электрических и электронных схем обще-

го назначения, в частности электромеханических и пневматических. Это достигается обширной библиотекой моделей компонентов — пассивных, источников, сенсоров, диодов, биполярных и полевых транзисторов и т.д. Круг моделируемых устройств довольно обширен и иллюстрируется большим количеством примеров, в том числе описанных и в данной статье. ■

Литература

1. www.mathworks.com
2. Дьяконов В. П. MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6.7. Основы применения, 2-е издание, дополненное и переработанное. М.: СОЛОН-Пресс. 2008.
3. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК-Пресс. 2012.
4. Дьяконов В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров. М.: ДМК-Пресс.- 2011.
5. Дьяконов В. П., Пеньков А. А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. М.: Горячая линия – Телеком. 2009.
6. Дьяконов В. П. Моделирование в MATLAB+Simulink электронных компонентов и систем // Компоненты и технологии. 2011. № 4.
7. Дьяконов В. П. MATLAB и Simulink 2011a: что нового? // Компоненты и технологии. 2011. № 12.
8. Дьяконов В. П. MATLAB 2011b в обработке сигналов и моделировании электронных устройств // Компоненты и технологии. 2012. № 2.
9. Дьяконов В. П. Особенности новой реализации и Simulink 2012a // Компоненты и технологии. 2012. № 1.
10. Дьяконов В. П. Моделирование линий передачи в MATLAB 2012a // Компоненты и технологии. 2012. № 6.