

MATLAB + Simulink 8.0 (R2012b): проектирование и моделирование мощных компонентов, устройств и систем в пакете SimPowerSystems

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

В составе матричной системы MATLAB + Simulink 8.0 R2012b поставляется пакет расширения SimPowerSystems, предназначенный для проектирования и имитационного моделирования энергетических устройств и систем большой мощности. В статье описана последняя версия этого пакета, не отраженная в отечественной литературе. Особое внимание уделено макромоделированию на функциональном уровне, повышающем скорость данного процесса и предельную сложность задач. Автор благодарит корпорацию The MathWorks [1] за получение лицензионной версии системы MATLAB 8.0, использованной при подготовке данной серии статей.

Роль и назначение пакета расширения SimPowerSystems

Пакет расширения SimPowerSystems R2012b предназначен для проектирования, моделирования и макромоделирования мощных электротехнических и энергетических устройств, а также схем силовой электроники. Пакет входит в семейство пакетов расширения по физическому моделированию Simscape. Он полностью ориентирован на использование в составе пакета блочного имитационного моделирования Simulink.

Знакомство с возможностями SimPowerSystems R2012b начинаем, открыв окно его справки (рис. 1), в которой можно найти описание алгоритмов и программ моделирования, функций пакета и демонстрационных примеров. Буквального совпадения демонстрационных примеров с примерами данной статьи не гарантируется, поскольку демонстрационные примеры были доработаны для лучшей иллюстрации положений статьи.

Как видно из окна справки, пакет содержит следующие основные разделы:

- Electrical Sources and Elements — электрические источники и элементы;

- Motors and Generators — электродвигатели и генераторы;
- Power Electronics — мощная электроника;
- Sensors and Measurements — сенсоры и инструменты
- Signal Generation and Transformation — генерация и преобразование сигналов;
- Electric Drives — электрические драйверы;
- Power Electronics FACTS — мощная электроника Flexible AC Transmission Systems;
- Renewable Energy Systems — возобновляемые энергетические системы;
- Interface to Simscape — интерфейс с Simscape.

Библиотека блоков пакета SimPowerSystems

Моделирование и макромоделирование в SimPowerSystems основано на составлении из блоков и связей между ними диаграмм моделей, по которым автоматически формируются уравнения состояния моделируемых систем и устройств, а также системы описывающих их алгебраических и дифференциальных уравнений. Они решаются решателями указанных уравнений из основного пакета блочного имитационного моделирования Simulink [3–5].

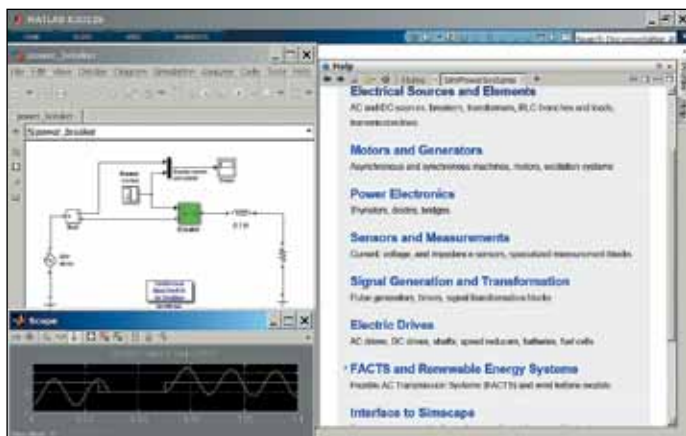


Рис. 1. Окно пакета SimPowerSystems и окно справки по пакету

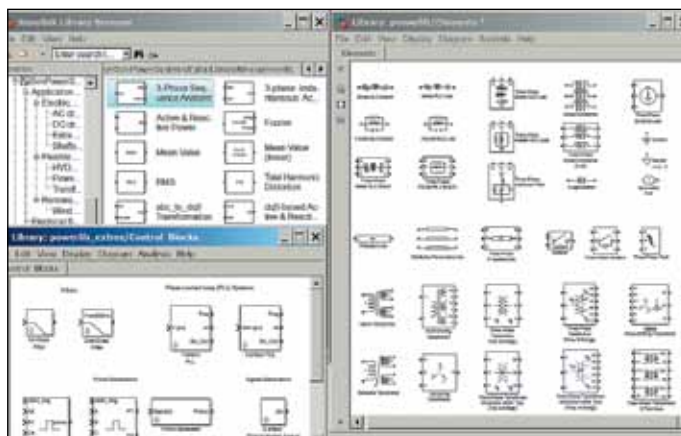


Рис. 2. Окно браузера библиотеки Simulink и окна блоков элементов и контроля

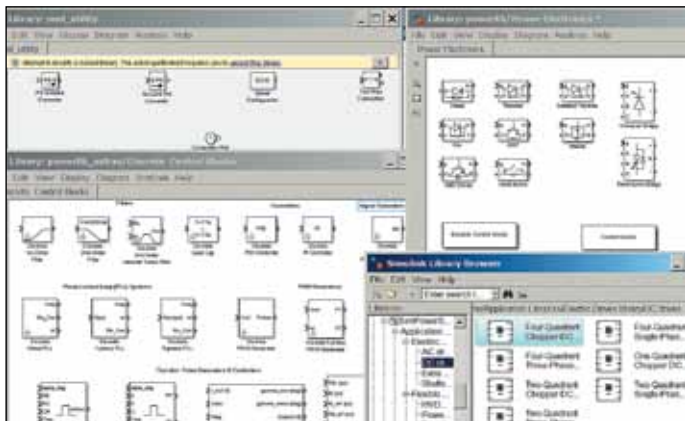


Рис. 3. Окна интерфейса с SimScape, мощных активных приборов, дискретных блоков контроля и измерения

Доступ к разделам библиотеки SimPowerSystems осуществляется из окна библиотеки блоков Simulink, показанного на рис. 2 (слева). Там же изображены окна с блоками аналогового контроля, измерений и элементов электрических схем. Окно библиотеки Simulink вызывается из панели инструментов (раздел Home расширенного интерфейса MATLAB 8.0).

Библиотека элементов содержит типичные электротехнические устройства. Отдельно элементов R , L и C нет, есть триады с их последовательным и параллельным соединением. Установив, к примеру, в последовательной триаде $C = \infty$ и $L = 0$, получим только резистор R (интересно, что обозначение блока меняется на изображение только резистора). В общем случае такая триада позволяет задать и паразитные параметры элементов.

Особенностью ряда элементов является учет их активной и реактивной мощности, что важно при проектировании энергетических устройств. В состав библиотеки входят нелинейные индуктивные компоненты и трансформаторы различного типа. Представлены отрезки линий передачи и отключающие устройства (breakers). Имеются порты «земли», нейтрали и порт подключения.

На рис. 3 представлены окна библиотеки с интерфейсом SimScape, мощными активными приборами, дискретными блоками контроля и драйверами постоянного тока. В библиотеке активных приборов есть диоды, обычные тиристоры, управляемые тиристоры GTO, биполярные транзисторы с полевым управлением IGBT (с шунтирующим диодом и без него), мощные полевые транзисторы MOSFET и идеальный ключ. Эквивалентная схема входа приборов заменена схемой логического управления. Блоков биполярных транзисторов в составе библиотеки нет. В блоках предусмотрены специальные порты для контроля внутренних параметров и упрощенные возможности для задания параметров.

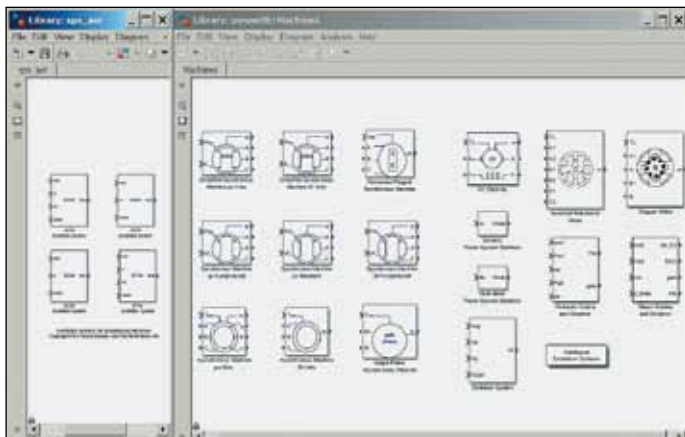


Рис. 5. Окна блоков моделей электрических машин

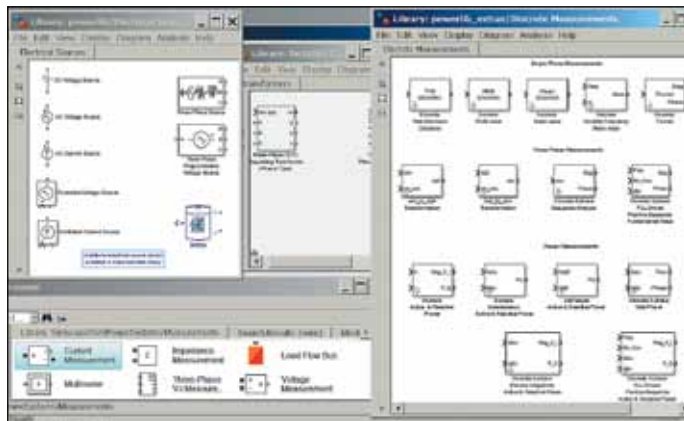


Рис. 4. Окна источников электрической энергии, основных и дискретных измерений

Все активные приборы имеют упрощенные модели на основе идеального ключа и источника остаточного напряжения [4–6]. Например, у диода учитывается остаточное напряжение, паразитная индуктивность во включенном состоянии и прямое и обратное сопротивление. У тиристоров учитывается временная задержка выключения. Можно задать и параметры цепей для подавления колебательных процессов. Все параметры указываются в окнах параметров приборов, которые вызываются двойным кликом мышки на конкретном блоке.

Фактически тем самым обеспечивается макро моделирование устройств на основе таких приборов, что вполне оправдано при анализе мощных устройств электроэнергетики — инверторов, конвертеров и т. д. на функциональном уровне и с повышенной скоростью моделирования и сложностью моделируемых устройств и систем.

Бытующая точка зрения, что такие упрощенные модели дают большую погрешность, ошибочна. Достаточно вспомнить, что многие параметры (особенно у полупроводниковых приборов) сами по себе известны с большой погрешностью, намного превосходящей 10%. Уточнение параметров моделей вовсе не повышает точность моделирования, особенно на функциональном уровне и на уровне макро моделирования.

Окна источников электрической энергии, основных и дискретных измерений показаны на рис. 4. В разделе источников представлены управляемые однофазные и трехфазные источники электрической энергии, а также блок топливного элемента.

Весьма содержательна и библиотека блоков мощных электрических машин (рис. 5) — генераторов и электродвигателей. В их числе машины постоянного тока, асинхронные и синхронные двигатели, стабилизаторы мощности и др. Они позволяют моделировать электромеханические устройства с мощностью от единиц ватт до многих мегаватт. Их параметры и характеристики рассматриваются довольно подробно, но это не входит в задачи нашей обзорной статьи. Для старых версий SimPowerSystems оно дано в [5, 8].

Моделирование линейных цепей во временной и частотной областях

Оценить возможности пакета SimPowerSystems можно уже при моделировании простейших компонентов электрических цепей и самих цепей. На рис. 6 изображена диаграмма моделирования простейшего фильтра на основе последовательного резонансного контура, настроенного на пятую гармонику основного входного сигнала — две синусоидальные компоненты с частотами 60 Гц (напряжение) и 300 Гц (ток). Отчетливо видно, что ток в контуре создается компонентой с частотой 300 Гц, тогда как напряжение на контуре — компонентой с частотой 60 Гц.

Блок Continues не только указывает на непрерывный режим моделирования, но и открывает окно специального приложения powergui для детального анализа моделируемой цепи. Окно этого приложения

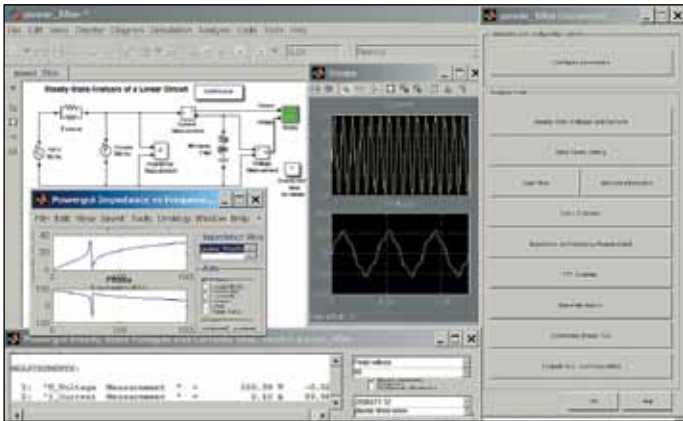


Рис. 6. Диаграмма моделирования линейной цепи

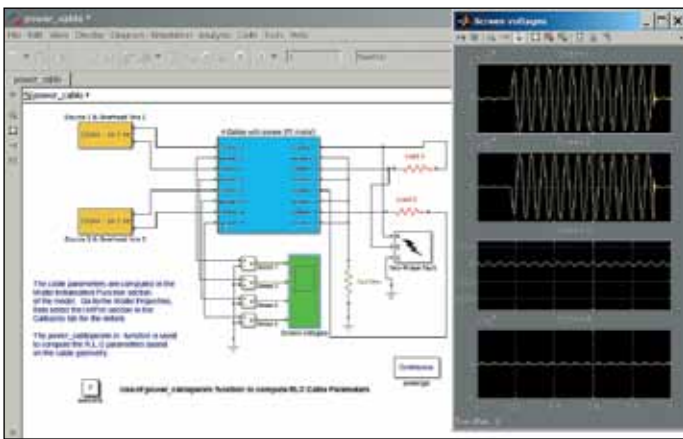


Рис. 7. Диаграмма модели измерения R-, L- и C-параметров кабеля

и возможных операций представлено в правой части окна диаграммы. Возможности данного приложения впечатляют и избавляют пользователя от программирования многих методов анализа.

Активизировав, например, клавишу **Steady-State Voltages and Currents** (установившиеся напряжения и токи), можно вычислить установившиеся значения напряжения на контуре и тока, протекающего через него (рис. 6, окно в самом низу окна диаграммы). А активизация кнопки **Impedance vs Frequency Measurement**

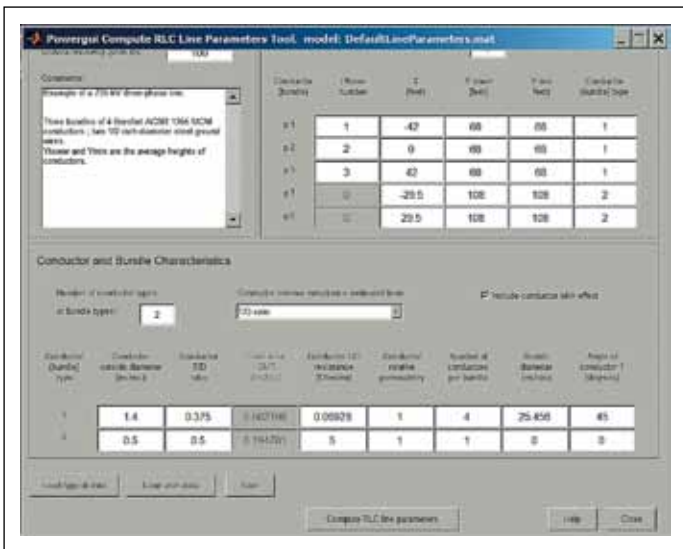


Рис. 8. Окно измерения R-, L- и C-параметров

(измерение частотной зависимости импеданса) позволяет построить частотную зависимость импеданса контура в функции от частоты. Она показана в окне под диаграммой и хорошо иллюстрирует явление резонанса при линейном масштабе графика (возможны и другие масштабы, указанные в меню графиков).

С помощью инструмента **powergui** возможно и измерение параметров R, L, C силового кабеля (рис. 7). Для этого активизируется кнопка **Compute RLC Line Parameters**, которая вызывает окно измерения этих параметров, показанное на рис. 8.

Моделирование линий передачи

В энергетике линии передачи имеют огромное значение, так как именно по ним передается электрическая энергия большой мощности. В отличие от СВЧ и измерительных импульсных устройств, линии передачи редко используются в режиме согласования, поскольку в этом режиме КПД передачи электрической энергии получается малым (50% при полном согласовании). При отсутствии согласования в моменты коммутации линий передачи наблюдаются большие искажения во временной области. Они немного отличаются у разных типов моделируемых линий передачи — **Distribute Parameters Line** и **Pi Section** (рис. 9).

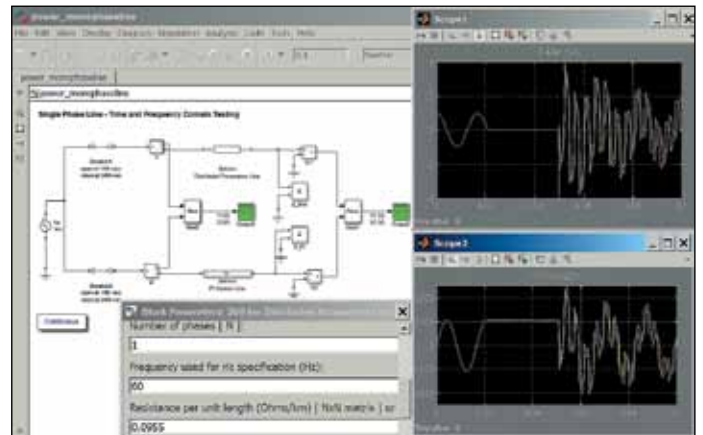


Рис. 9. Диаграмма сравнения двух моделей однофазных линий передачи во временной и в частотной областях работы

Зависимость импеданса и фазового сдвига от частоты показана на рис. 10. Заметим, что здесь речь идет о длинных линиях (порядка сотни км), характерных для электроэнергетики. Широкополосные коаксиальные кабели, линии типа «витая пара» и микрополосковые линии передачи в пакете **SimPowerSystems** не представлены. Они есть в других пакетах расширения, например **RF Toolbox**.

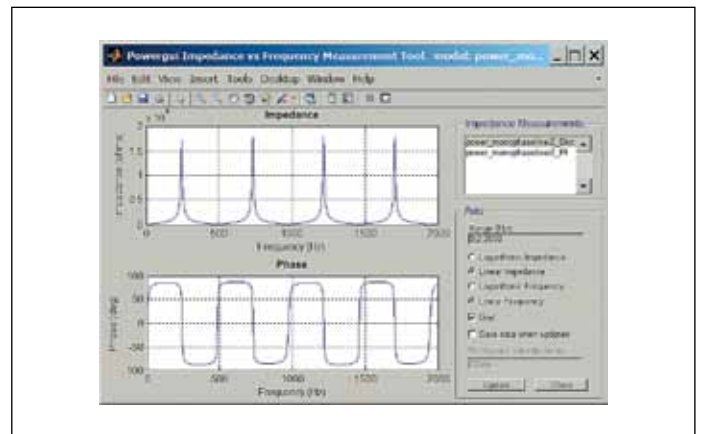


Рис. 10. Окно измерителя импеданса и фазы линии передачи

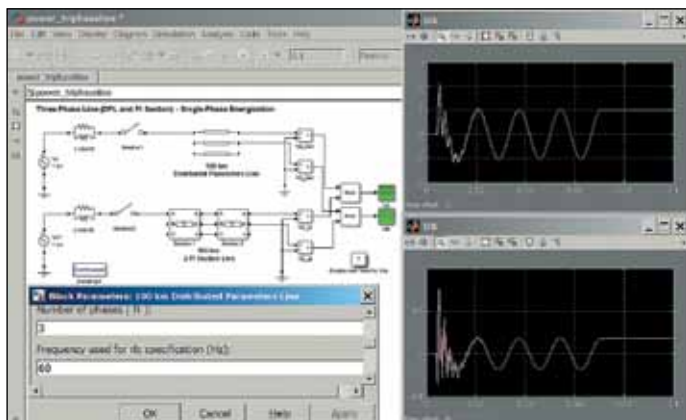


Рис. 11. Диаграмма модели одной фазы для двух трехфазных линий передачи

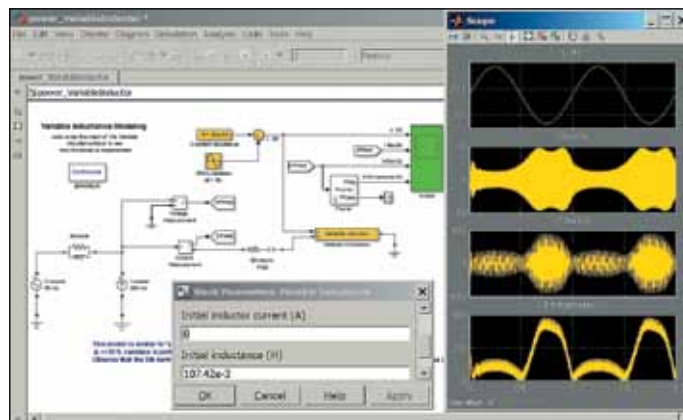


Рис. 13. Диаграмма модели переменной индуктивности

Сравнение двух моделей трехфазных линий передачи представлено на рис. 11. Результаты отличаются мало и приведены для одной фазы линий. Для двух других фаз они подобны. Переходные процессы включения напряжения на линию довольно сложны, что видно на осциллограммах.

LTI-вьювер

В состав пакета SimPowerSystems входит вьювер LTI (Linear Time-Invariant system), который линеаризует выделенный участок диаграммы и позволяет вычислить и построить его малосигнальные параметры и характеристики, например амплитудно-частотные характеристики в форме диаграмм Бode (рис. 12). Полный набор параметров довольно обширен и показан в открытом меню правой клавиши мыши, представленном на рис. 12.

Моделирование устройств с индуктивными элементами

Индуктивные элементы (как отдельные дроссели, так и трансформаторы) достаточно полно представлены в библиотеке SimPowerSystems. К примеру, рис. 13 демон-

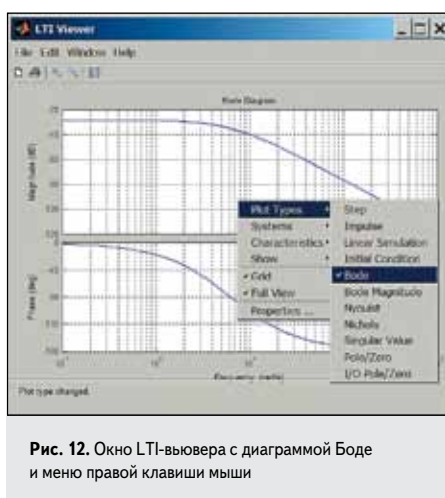


Рис. 12. Окно LTI-вьювера с диаграммой Бode и меню правой клавиши мыши

стрирует диаграмму модели переменной индуктивности. Окно параметров нелинейной индуктивности и осциллограммы, иллюстрирующие работу цепи с такой индуктивностью, можно увидеть в окне диаграммы.

Диаграмма модели мощного линейного 3-обмоточного трансформатора показана на рис. 14. Она позволяет судить о характере переходных процессов в трансформаторе при отключателе Breaker, вначале отключающем одну из нагрузок.

На рис. 15 дано сравнение двух моделей схем переключения напряжения от вторичных обмоток 3-обмоточного линейного трансформатора и временные диаграммы работы этих моделей.

Моделирование нелинейных индуктивных элементов

Определенную специфику имеет моделирование нелинейных индуктивных элементов. В этом случае дифференциальные уравнения, описывающие работу устройств с такими элементами, становятся нелинейными и аналитических решений не имеют. Впрочем, это не имеет определяющего значения, поскольку решатели таких уравнений в SimPowerSystems используют численные методы. Но выбор метода приобретает большее значение, так как при сильной нелинейности уравнения могут стать жесткими и может возникнуть неустойчивость вычислительного процесса. Наконец, большую роль играет характер нелинейности и наличие гистерезиса.

На рис. 16 показана диаграмма модели сильноточного (2000 А и 5 А) трансформатора тока, который насыщается при больших токах в первичной обмотке. Обычно ток в первичной обмотке ограничивают, чтобы

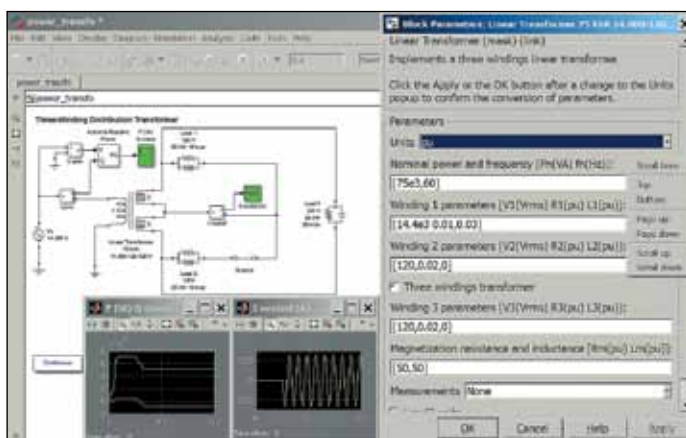


Рис. 14. Диаграмма модели мощного (75 кВт) линейного 3-обмоточного трансформатора

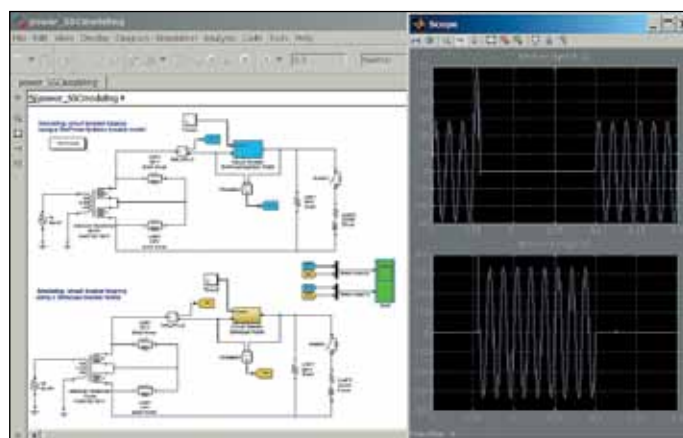


Рис. 15. Сравнение двух моделей схем переключения напряжения от 3-обмоточного трансформатора

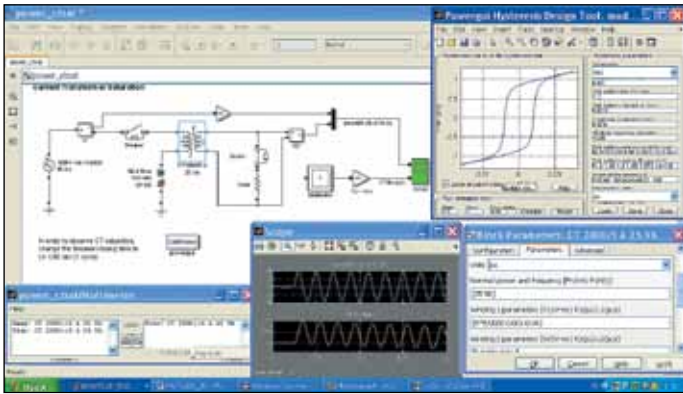


Рис. 16. Диаграмма модели нелинейного трансформатора тока

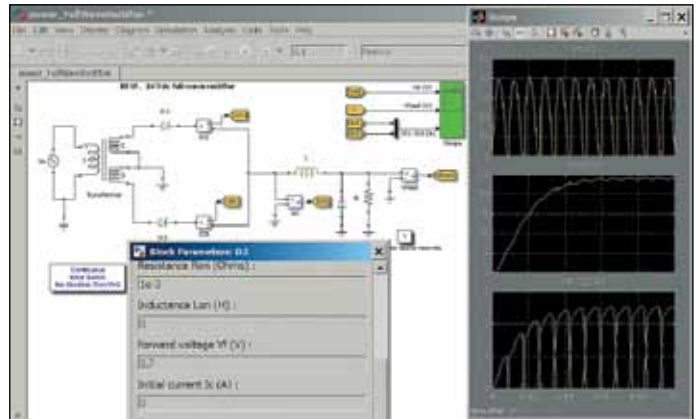


Рис. 18. Диаграмма модели полумостового выпрямителя

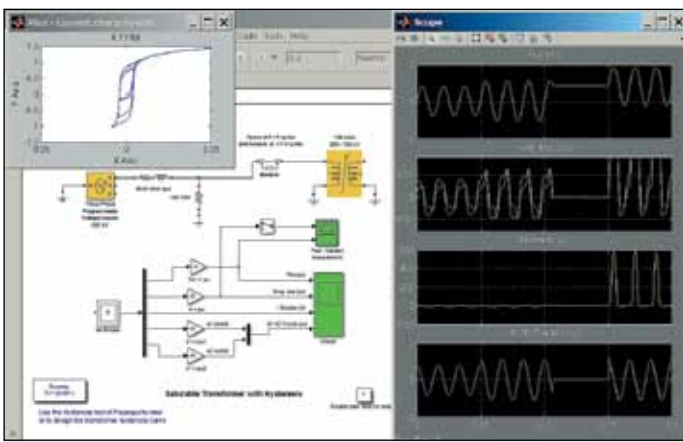


Рис. 17. Диаграмма модели нелинейного трансформатора с гистерезисом

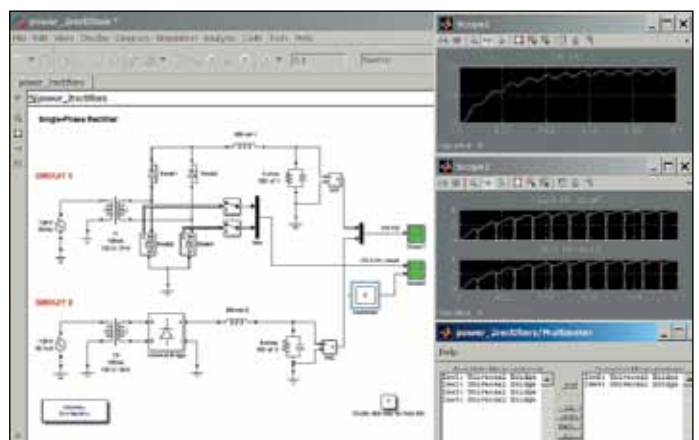


Рис. 19. Диаграммы двух моделей двухполупериодных мостовых выпрямителей

избежать сильного насыщения. С помощью блока `powergui` получена петля гистерезиса трансформатора, представлены также блоки параметров мультиметра и самого трансформатора.

Более сложный характер гистерезиса выявляет диаграмма на рис. 17. Подобная модель с учетом частотной зависимости гистерезиса описана в [4, 5].

Моделирование неуправляемых выпрямителей переменного напряжения

Выпрямители широко применяются в электро- и радиотехнических устройствах. Они обычно строятся на полупроводниковых диодах и сборках из них. В пакете `SimPowerSystems` есть упрощенная модель мощного диода с кусочно-линейной аппроксимацией его вольт-амперных характеристик. Она хорошо описывает поведение выпрямителей средней и большой мощности. Есть и модель силового модуля с такими диодами.

Однополупериодные выпрямители имеют большой уровень пульсаций и применяются при малых мощностях (единицы-десятки ватт). Лучшими характеристиками обладают двухполупериодные выпрямители, например полумостовые (рис. 18). Это типичная модель выпрямителя средней мощности, получившая массовое распространение. Она требует применения двухобмоточных силовых трансформаторов или трансформаторов с отводом от средней точки вторичной обмотки. Из рис. 18 видно, что время установления стационарного режима насчитывает несколько периодов, а частота пульсаций вдвое превосходит частоту питающей сети. Динамика выпрямителя определяется его LC-фильтром, ослабляющим пульсации выпрямленного напряжения.

На рис. 19 показаны диаграммы двух моделей двух схем двухполупериодных мостовых выпрямителей — с мостом на отдельных

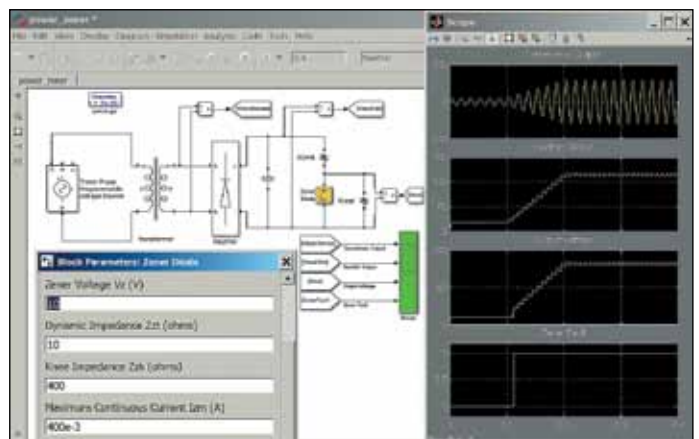


Рис. 20. Диаграмма модели однофазного мостового выпрямителя, питаемого от программируемого источника

диодах и универсальным мостом. Они не требуют обмотки силового трансформатора со средней точкой, и им для работы достаточно одна обмотка. Сравнение результатов их работы показывает полную идентичность обеих схем.

Переходные процессы в выпрямителях удобно исследовать с помощью программируемого источника питания. На рис. 20 видна диаграмма модели выпрямителя на перепад напряжения, создаваемого программируемым источником трехфазного напряжения (используется только одна его фаза).

Трехфазные неуправляемые выпрямители (рис. 21) обладают разными достоинствами: они имеют лучшие показатели по КПД, мень-

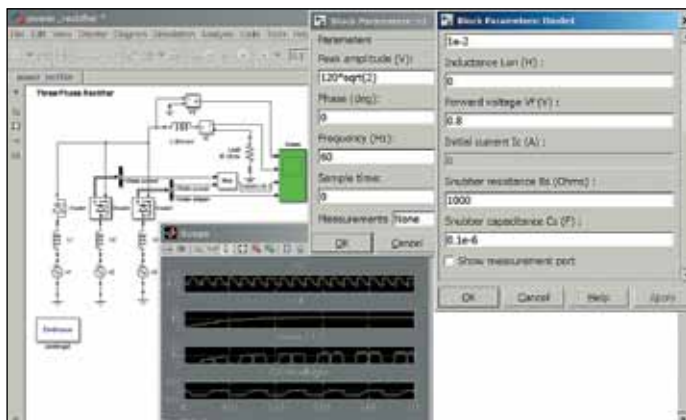


Рис. 21. Диаграмма модели трехфазного выпрямителя

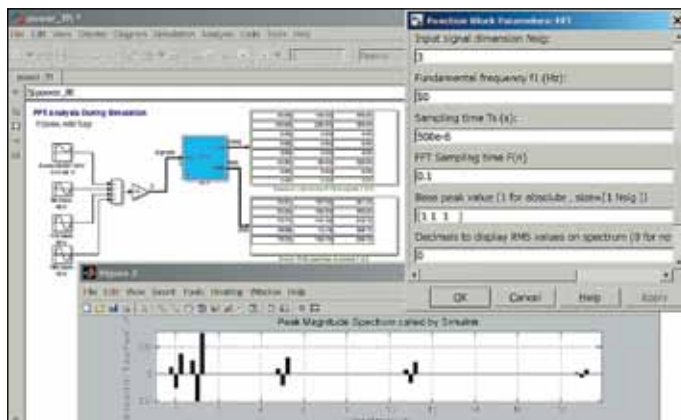


Рис. 23. Спектральный анализ многокомпонентного сигнала

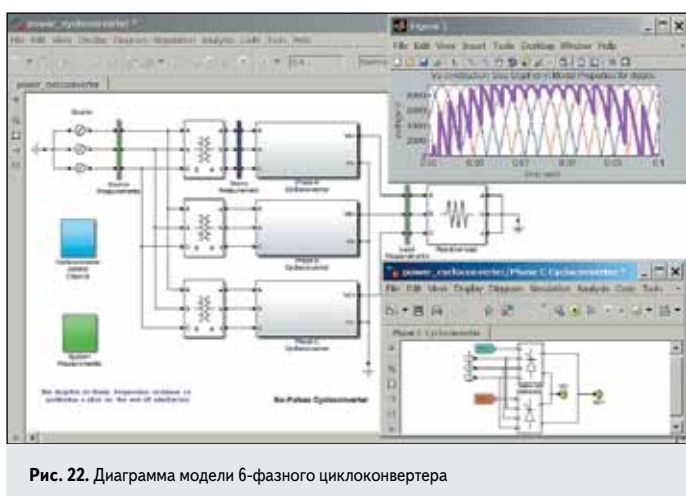


Рис. 22. Диаграмма модели 6-фазного циклоконвертера

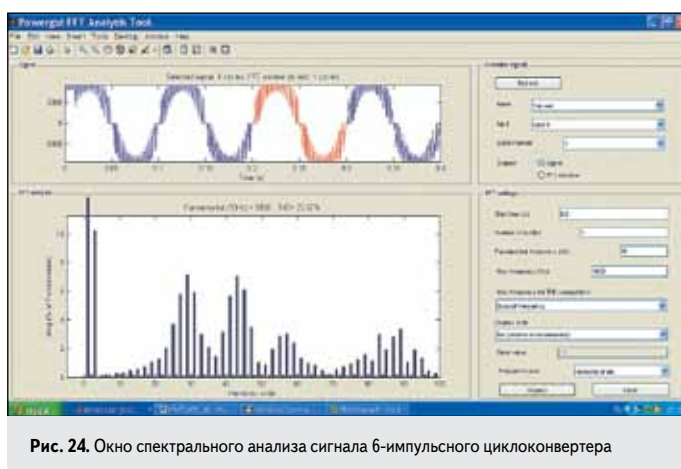


Рис. 24. Окно спектрального анализа сигнала 6-импульсного циклоконвертера

ший уровень пульсаций и их более высокую частоту (втрое превосходящую частоту сети) и т. д. Поэтому такие выпрямители получили массовое применение в промышленности, где широко распространена трехфазная сеть.

Иногда применяются и более сложные многофазные системы. Например, на рис. 22 представлена модель 6-импульсного циклоконвертера и осциллограммы, иллюстрирующие его работу. Обычно целью таких устройств является устранение или значительное облегчение фильтра выходного напряжения за счет роста частоты пульсаций и уменьшения их размаха.

Спектральный анализ

Будучи типично нелинейными устройствами, выпрямители создают несинусоидальные сигналы. Поэтому большое значение имеет анализ гармонического состава выходного напряжения — спектральный анализ. Для его реализации обычно используется метод быстрого преобразования Фурье (БПФ или FFT), входящий в состав блока powergui. На диаграмме рис. 23 показано формирование 4-компонентного пульсирующего напряжения и построение его спектра. Линии спектра строятся жирными прямоугольниками или линиями с высотой, указывающей уровень гармоник, и местом положения по горизонтали, соответствующим частоте входного сигнала или номеру гармоники.

Для проведения спектрального анализа сигнала, например сигналов схемы рис. 22, надо активизировать блок powergui и нажать кнопку FFT Analysis. Появится окно спектрального анализа, показанное на рис. 24. В нем важно выбрать анализируемый сигнал (или окно), стартовое время анализа, число периодов анализируемого сигнала, основную и предельную частоты спектра, тип спектра и масштаб по горизонтали (частоты гармоник или их номера). Сам спектр показан внизу окна рис. 24.

Преобразователи с широтно-импульсной модуляцией

Основным режимом работы энергетических устройств преобразования электрической энергии является ключевой режим, теоретический позволяющий достичь КПД до 100% (практически 90–95%). При этом для задания формы выходного напряжения (тока) используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) с необходимым законом модуляции. Библиотека SimPowerSystems содержит большой набор мощных ключевых приборов и блоков с ними, а также широтно-импульсных модуляторов и позволяет осуществлять проектирование и функциональное моделирование устройств с ШИМ.

Три основных способа применения ШИМ для преобразования постоянных напряжений представлены на рис. 25. Во всех случаях перво-

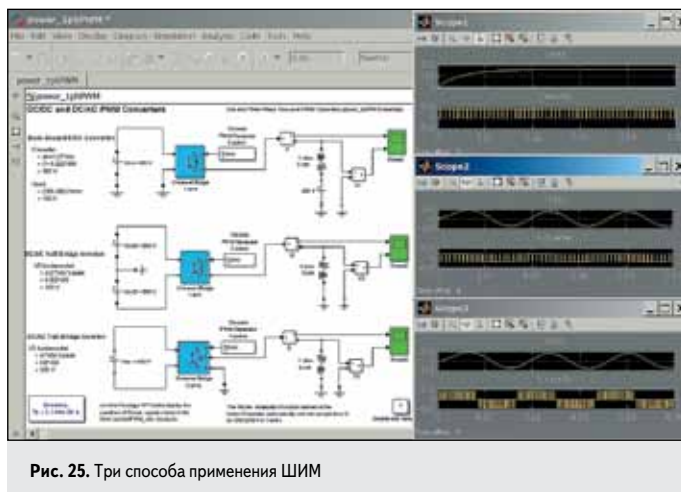


Рис. 25. Три способа применения ШИМ

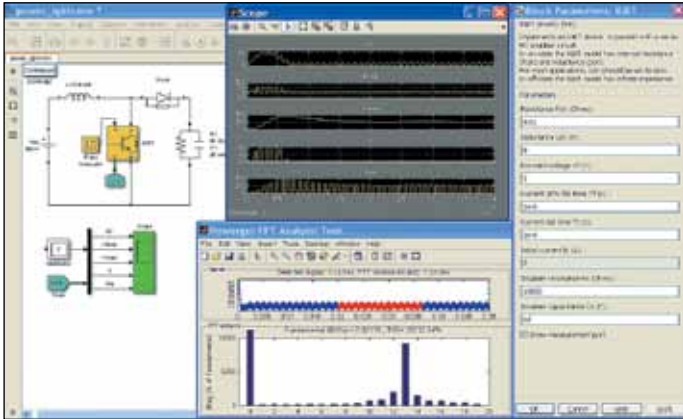


Рис. 26. Обратнойходовой GTO-преобразователь постоянного напряжения

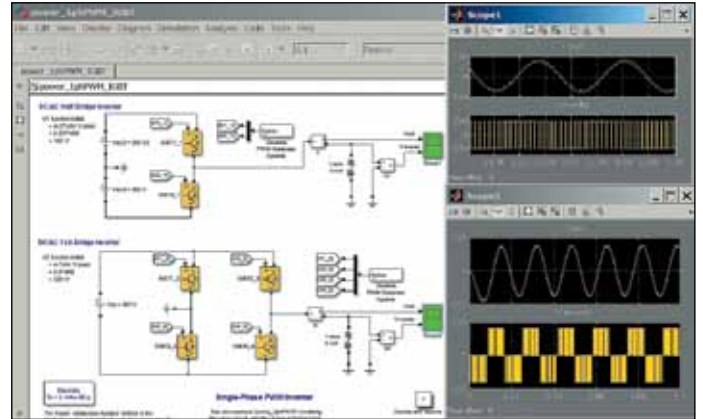


Рис. 28. Диаграммы моделей полумостового и мостового однофазных преобразователей постоянного напряжения в переменное

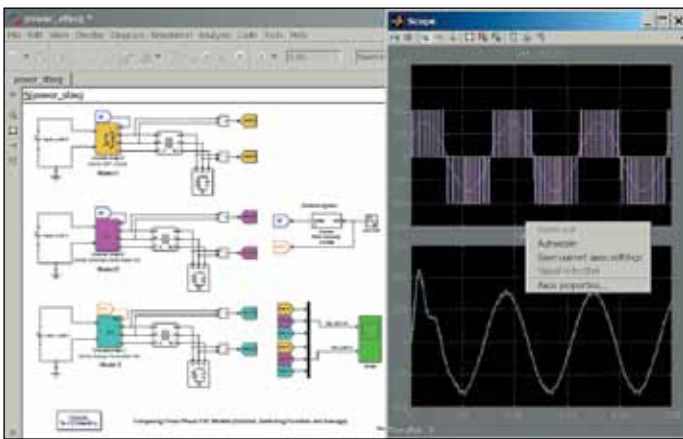


Рис. 27. Диаграммы моделей преобразователей постоянного напряжения в трехфазное переменное напряжение

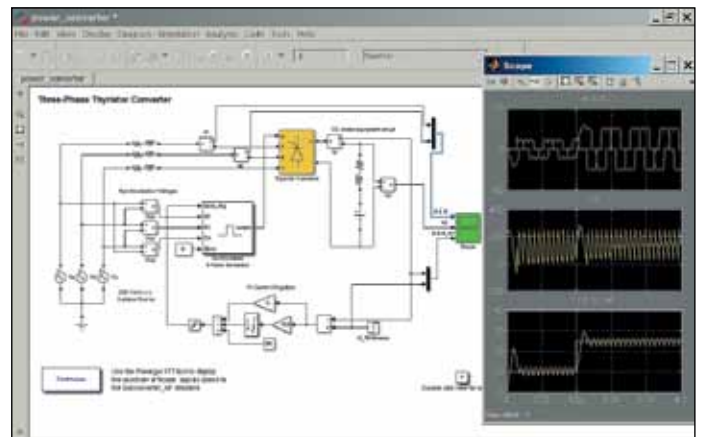


Рис. 29. Диаграмма модели трехфазного тиристорного конвертера

степенными элементами являются ключи, входящие в состав силового модуля. Просто указав нужный тип прибора (например, MOSFET, IGBT, GTO и др.), можно обеспечить моделирование схем на нем, не меняя диаграмму моделирования. Это очень удобно на этапе функционального моделирования и макро моделирования устройств и систем. Заметим, что в одном окне диаграммы можно создавать несколько устройств или систем, правда, с одинаковыми параметрами моделирования.

Первая схема представляет типовой понижающий постоянное напряжение обратного преобразователя. Для его питания достаточно иметь один источник. Полумостовая схема позволяет из постоянного напряжения получать переменное, однако нуждается в двух источниках питания. Наконец, мостовая схема позволяет преобразовывать постоянное напряжение питания от одного источника в переменное напряжение с двойной частотой пульсаций ШИМ и двойной амплитудой.

Типичная схема обратного повышающего напряжение (со 100 до 200 В) преобразователя постоянного напряжения в постоянное, выполненная на мощном биполярном транзисторе с полевым управлением IGBT, моделируется с помощью диаграммы (рис. 26). Формы сигналов в этой модели представлены на рисунке и достаточно ясно поясняют ее работу. Уровень выходного напряжения задается скважностью ШИМ и может меняться. На рисунке изображены также окна спектрального анализа установленного выходного напряжения и окно установки параметров IGBT. Подобные преобразователи тоже часто строятся на мощных силовых полевых транзисторах MOSFET [6, 7].

В SimPowerSystems есть блоки, позволяющие моделировать преобразователи постоянного напряжения в трехфазное (рис. 27). Форма напряжений здесь показана для одной фазы. Для других она имеет аналогичный характер.

Инверторы с ШИМ

Рассмотрим несколько примеров моделирования на функциональном уровне типовых электротехнических устройств и устройств силовой электроники. Диаграммы двух моделей преобразователей (однофазных PWM-инверторов) постоянного напряжения в переменное показаны на рис. 28. Преобразователи выполнены на IGBT.

Диаграмма модели трехфазного тиристорного конвертера показана на рис. 29. Форма сигнала у этого устройства довольно своеобразная, и сигнал нуждается в проведении спектрального анализа.

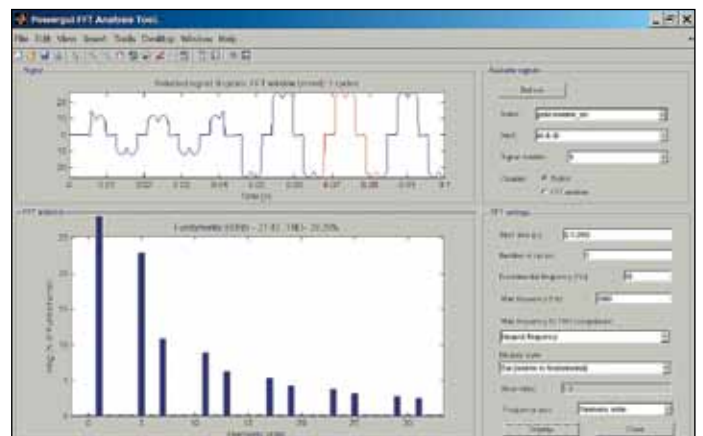


Рис. 30. Спектральный анализ выходного напряжения трехфазного тиристорного конвертера

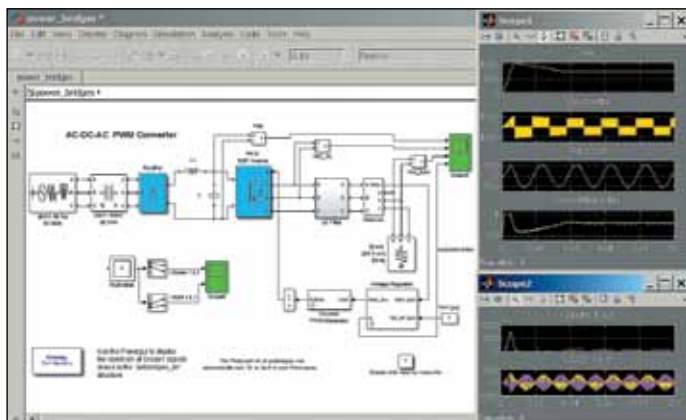


Рис. 31. Диаграмма модели AC/DC/AC-конвертера с широтно-импульсной модуляцией

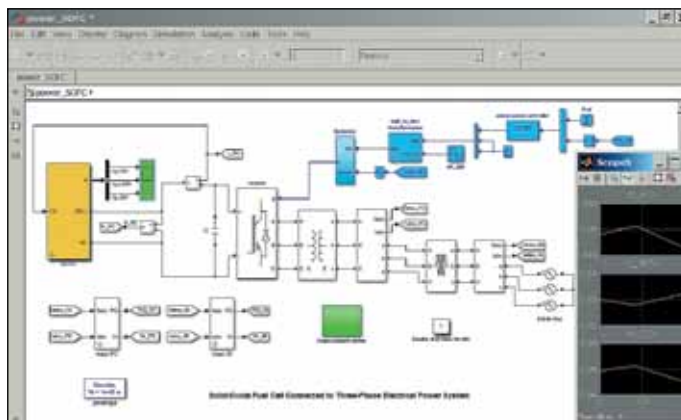


Рис. 33. Диаграмма модели энергетической системы, питаемой от твердо-оксидного топливного элемента

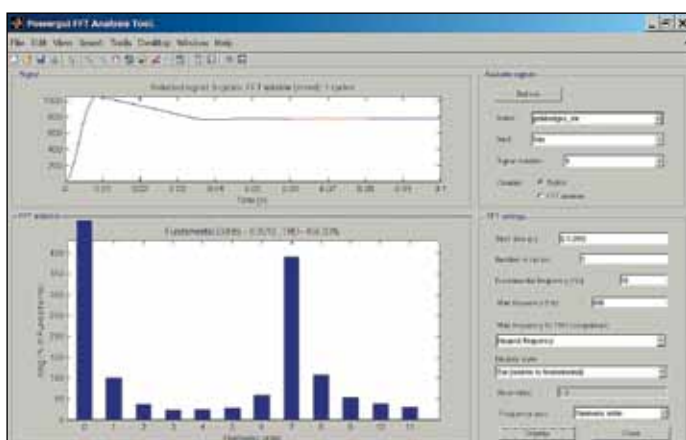


Рис. 32. Спектральный анализ выходного напряжения конвертера (рис. 31)

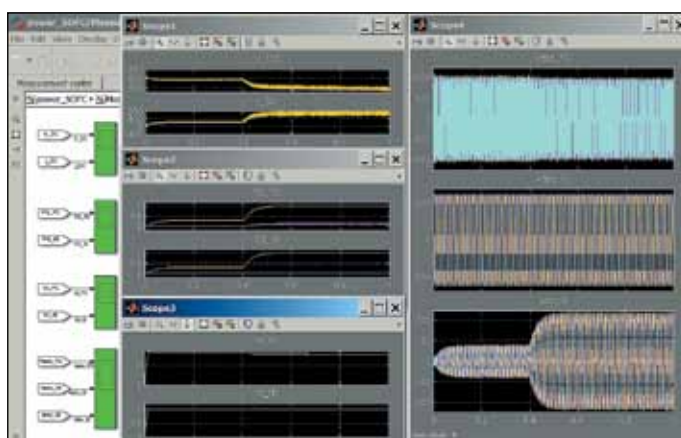


Рис. 34. Блок осциллографов и осциллограммы работы системы рис. 33

На рис. 30 показано окно спектрального анализа для этого устройства, получаемое с помощью блока powergui. Для проведения спектрального анализа достаточно одного-двух периодов исследуемого сигнала, причем на любом его участке.

Для получения из одного постоянного напряжения другого с высоким КПД и большой выходной мощностью часто используются AC/DC/AC-конвертеры с ШИМ (рис. 31). Конвертер использует трехфазный нерегулируемый выпрямитель на диодной сборке и инвертор типа PWM DC/AC на IGBT.

Спектральный анализ одного из сигналов представлен в окне спектрального анализа блока powergui (рис. 32). Тут также важно отметить, что спектральный анализ возможен для части временной зависимости сигнала при условии, что на ней укладывается не менее одного полного периода сигнала. Другими словами, возможен анализ по частям спектра нестационарного сигнала. Это важное преимущество анализатора спектра блока powergui.

Моделирование систем с топливными элементами

В топливных элементах химические реагенты подаются извне, что значительно повышает мощность и срок службы по сравнению с гальваническими элементами. Перспективным типом топливных элементов являются твердо-оксидные элементы SOFC. Диаграмма моделирования энергетической системы с таким элементом показана на рис. 33.

Постоянное напряжение, получаемое от SOFC, преобразуется в трехфазное напряжение с помощью инвертора на IGBT. Измерительная часть модели выполнена в виде субблока. Она вместе с результатами измерений показана на рис. 34.

Моделирование ячейки топливного элемента (6 кВт, 45 В) представлено на рис. 35. Для повышения напряжения до 100 В применен

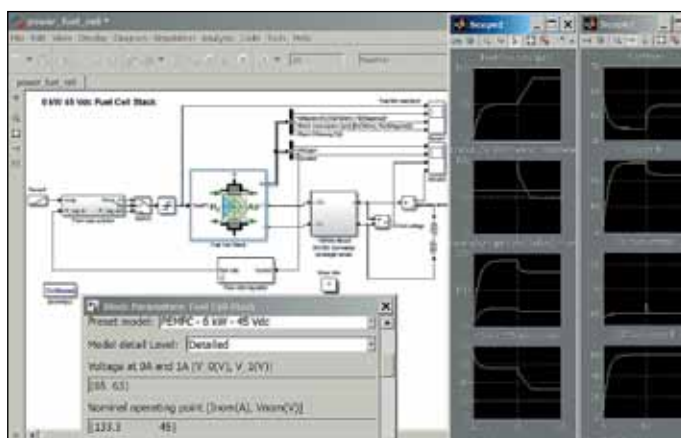


Рис. 35. Диаграмма работы ячейки топливного элемента

блок DC/DC-преобразователя. Временные диаграммы модели достаточно просты и отражают динамику процессов работы.

Моделирование ветровых электростанций

Ветровые электростанции используют возобновляемую энергию ветра и в последнее время получили широкое развитие. В SimPowerSystems есть средства для проектирования и моделирования таких электростанций различного типа, в том числе самых мощных с высотой ветряка более 100 м. Так, на рис. 36 можно видеть диаграмму модели мощной ветровой электростанции с турбиной

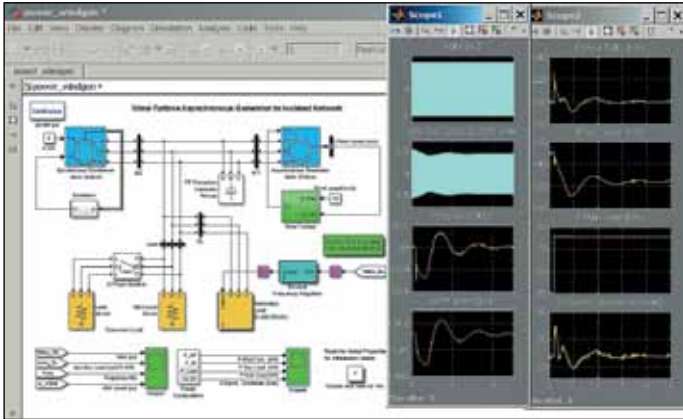


Рис. 36. Диаграмма модели ветровой электростанции с асинхронным генератором и изолированной сетью

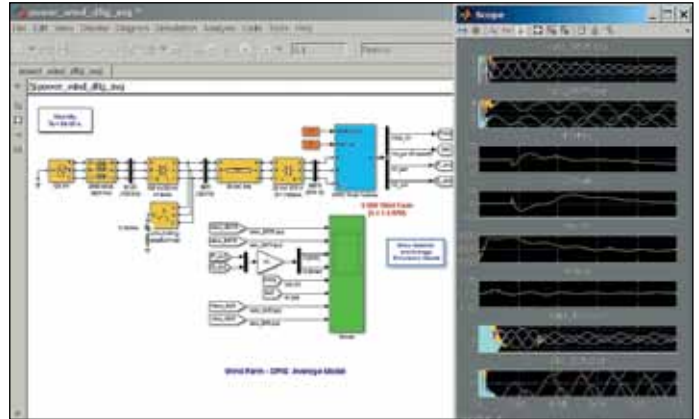


Рис. 38. Диаграмма работы мощной ветровой электростанции

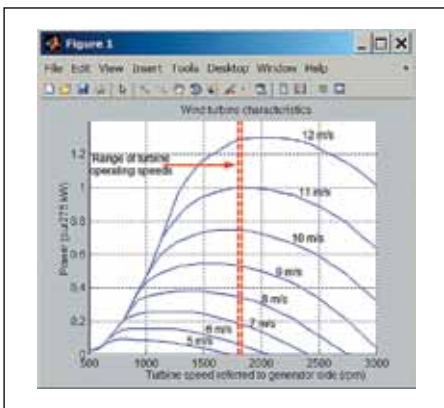


Рис. 37. Нормированная мощность в функции от скорости вращения турбины ветровой электростанции при различной скорости ветра

и асинхронным генератором большой мощности (275 кВ·А, 480 В).

Детали работы ветровых электростанций требуют особого обсуждения, но эта тема выходит за рамки данной статьи. Нормированная мощность в функции от скорости вращения турбины показана на рис. 37 при разных скоростях ветра.

Диаграмма моделирования еще одной системы большой мощности на основе ветровых электростанций (6×1,5 МВт) представлена на рис. 38. Блок многоканального виртуального осциллографа контролирует восемь основных временных зависимостей. Они довольно сложные и представляют интерес для разработчиков ветровых станций и специалистов по их эксплуатации.

Блок справа от осциллографа выводит детальные временные диаграммы работы, показанные на рис. 39.

Моделирование мощных электромеханических систем

Наличие обширной библиотеки электрических машин позволяет осуществлять функциональное моделирование мощных электромеханических систем. Например, на рис. 40 показана диаграмма моделирования типичной промышленной асинхронной модели трехфазного электродвигателя с приводом. Миллионы таких двигателей во всем мире вращают шпиндели станков и перемещают ленты конвейеров.

Диаграмма моделирования работы мощного (1 МВт, 315 кВ) синхронного двигателя

представлена на рис. 41. Она иллюстрирует явные преимущества макро моделирования — огромная машина мощностью в 1 МВт требует для подготовки данного процесса простой диаграммы, словно это игрушечный моторчик в 1 Вт. Видно, что такая машина ведет себя как типичная система второго порядка и запускается с заметным перерегулированием. Открытое окно параметров синхронного двигателя показано в левой части диаграммы, а осциллограммы, поясняющие его работу, в центре снизу.

Диаграмма моделирования запуска мощного электродвигателя постоянного тока показана на рис. 42. Переходные процессы запуска не очень сложны, и в них просматривается разгон двигателя по закону, близкому к экспоненциальному, и «качание», связанное с вращением ротора двигателя. Заметим, что моделирование маломощных электродвигателей и систем электропривода для них предусмотрено в другом пакете расширения: = SimElectronics Toolbox.

На рис. 43 показана простая электромашина с NiMh-батареей (200 В, 6,5 А·ч), подключенной к постоянной нагрузке 50 А — двигателю постоянного тока с регулятором релейного типа.

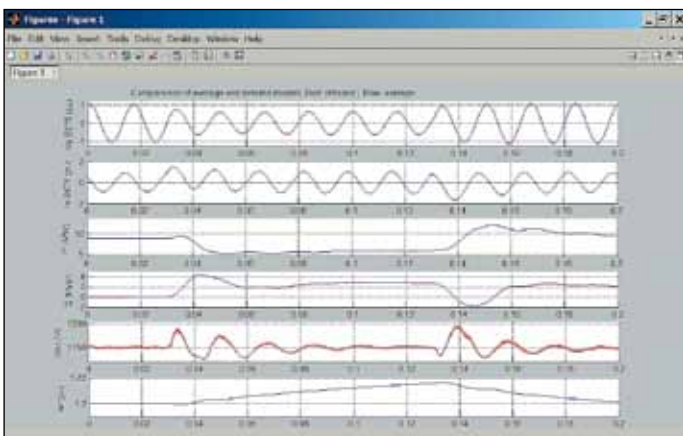


Рис. 39. Детальные временные диаграммы работы системы (рис. 38)

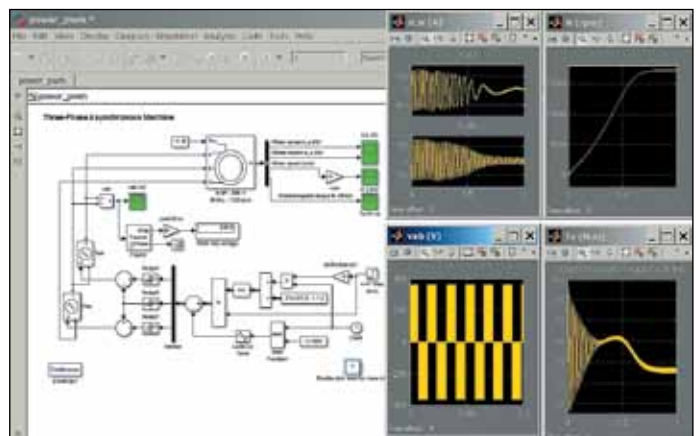


Рис. 40. Диаграммы моделирования асинхронной модели электродвигателя с приводом

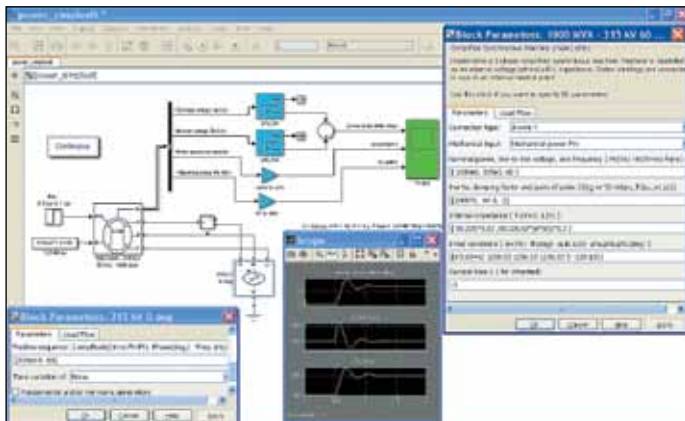


Рис. 41. Диаграмма моделирования работы мощного синхронного электродвигателя с мощностью 1 МВт

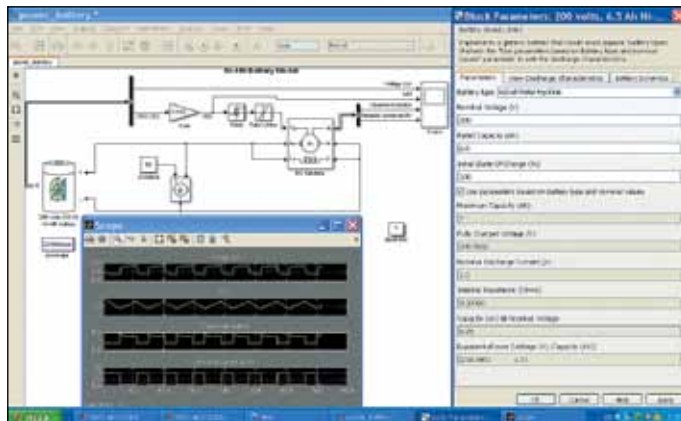


Рис. 43. Электромашинная система постоянного тока с NiMh-батареями и двигателем постоянного тока

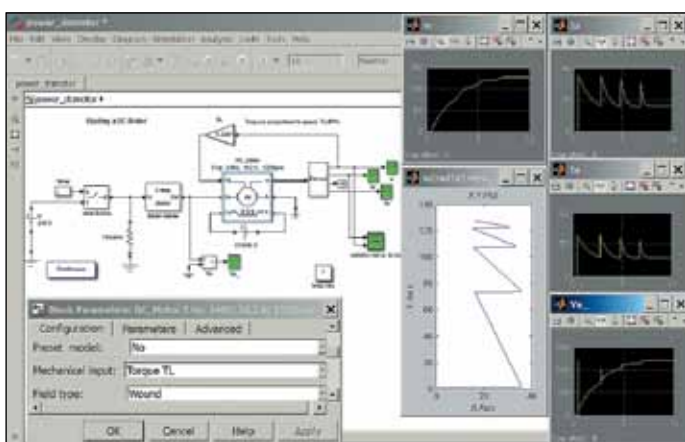


Рис. 42. Диаграмма моделирования запуска электродвигателя постоянного тока

Заключение

Пользователь, впервые осваивающий моделирование, может подумать, что это очень простое дело. Это в корне неверно: каждый блок любой диаграммы имеет свои параметры и их надо задавать перед началом моделирования и уточнять по мере его проведения. Диаграмма модели средней сложности может потребовать установки десятков параметров, каждый из которых надо осмыслить и определить. Кроме того, важно понимать алгоритмы работы моделируемых устройств и численные методы, применяемые в ходе моделирования. Его приходится повторять многократно, пока не будут получены ожидаемые результаты. Кажущаяся простота моделирования обычно связана с тем, что пользователь уже готовой модели видит конечные

результаты ее работы и не склонен оценивать время, затраченное разработчиком на создание примеров моделирования.

Обновленный пакет расширения SimPowerSystems R2012b обеспечивает системе MATLAB+Simulink уникальные возможности функционального моделирования самых разнообразных устройств электротехники, силовой электроники и энергетики. Резкое упрощение применяемых моделей позволило фактически перейти на уровень полноценного макро моделирования и значительно повысить сложность моделируемых систем и устройств, доведя ее до уровня моделирования мощных энергетических устройств передачи электроэнергии на дальние расстояния и крупных энергетических систем. Представленные примеры моделирования являются хорошей основой для дальнейшей разработки моделей устройств и систем энергетики и заметно усиливают позиции этой системы на отечественном и мировом рынке.

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. Макромоделирование устройств на мощных MOSFET в SimPowerSystems // Компоненты и технологии. 2011. № 1.
7. Дьяконов В. П. Моделирование в MATLAB+ Simulink электронных компонентов, устройств и систем // Компоненты и технологии. 2011. № 4.
8. Герман-Галкин С. Г. MATLAB & SIMULINK. Проектирование механотронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008.