

# Макромоделирование устройств на мощных MOSFET в SimPowerSystems

**Владимир Дьяконов,  
д. т. н., профессор**

vpdyak@yandex.ru

**М**ощные полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET) в настоящее время стали основным типом силовых транзисторов [1–7]. По энергетическим параметрам они незначительно уступают тиристорам и IGBT, но заметно превосходят их по динамическим параметрам. Области применения MOSFET простираются от маломощных инверторов для сотовых телефонов и мобильных компьютеров до мощных промышленных энергетических устройств и систем. В статье описаны средства макромоделирования силовых устройств на мощных MOSFET с помощью новейших реализаций матричной лаборатории MATLAB R2010a,b с обновленными пакетами расширения Simulink и SimPowerSystem [8, 9]. Автор благодарит корпорацию The MathWorks за предоставленные программные продукты и лицензию на них.

## Интерфейс пользователя системы MATLAB

Интерфейс пользователя системы MATLAB R2010a с пакетом расширения Simulink прост и интуитивно понятен. Детально он описан в книгах

[8–10]. Из окна системы MATLAB вызывается окно браузера библиотеки основного пакета расширения Simulink (слева на рис. 1), а из него можно открыть окно диаграммы модели моделируемого устройства. Поначалу оно пустое и имеет титульную строку **Untitled**. В этом окне расположено окно данных о пакете Simulink. Разумеется, есть возможность загрузить в окно диаграммы готовую диаграмму модели из файла и сохранить подготовленную пользователем модель в виде файла с заданным именем.

Современные силовые устройства строятся на основе ключевых схем с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Математическое моделирование даже простых таких схем силовой электроники вызывает особые трудности из-за большого числа сложно определяемых электрофизических параметров ключевых устройств, жесткости описывающих их резко нелинейных дифференциальных уравнений, сложности применяемых вспомогательных схем управления и необходимости учета специфики работы в энергетической области.

В последнее время в число перспективных систем математического моделирования силовых устройств вошла матричная система MATLAB с пакетом визуально-ориентированного блочного имитационного моделирования различных систем и устройств Simulink. Их описание можно найти в [8, 9]. Читателю рекомендуется также ознакомиться с материалами, опубликованными в цикле статей «Школа MATLAB» журнала «Силовая электроника», относящимися к более ранним реализациям MATLAB.

## Пакет расширения SimPowerSystems по макромоделированию мощных систем

В новейшие реализации системы, например 2010 г. выпуска, вошли существенно обновленные и дополненные пакеты расширения SimPowerSystems V5.2.1 и SimElectronics V1.4, библиотеки блоков силовых устройств различного назначения, в том числе мощных MOSFET и модулей на их основе, ориентированные на физико-математическое моделирование, в том числе с применением Spice-моделей активных и пассивных устройств. Однако моделирование силовых устройств (СУ) с такими моделями даже на персональных компьютерах с многоядерными процессорами, поддерживаемых системой MATLAB, требует значительных затрат времени — как на само

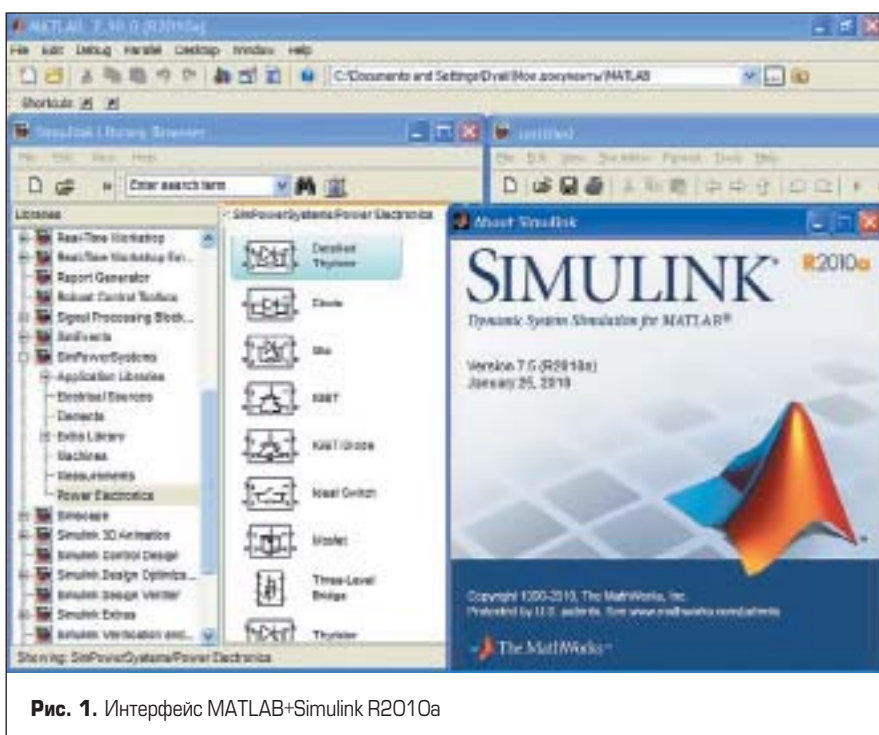


Рис. 1. Интерфейс MATLAB+Simulink R2010a

моделирование, так и на определение множества параметров моделей, которые часто пользователям просто не известны.

Во многих случаях этих недостатков можно избежать, используя макро моделирование, при проведении которого используются упрощенные модели компонентов СУ, например идеальные ключи вместо полных физико-математических и топологических моделей, упрощенные выражения для вольт-амперных характеристик (ВАХ) и т. д. Число параметров, характеризующих модели, при этом уменьшается в несколько раз, а сами параметры имеют вполне понятный смысл.

С первого взгляда может показаться, что это неизбежно ведет к снижению точности моделирования. Но это неверно. Во-первых, свойства большинства современных полевых силовых приборов, в частности мощных MOSFET, на практике уже приближаются к свойствам почти идеальных ключей. Они имеют малое и практически линейное сопротивление во включенном состоянии (доли-единицы Ом), а в выключенном состоянии оно близко к бесконечности. Входное омическое сопротивление MOSFET очень велико. Во-вторых, время включения и даже выключения их намного меньше времен переключения ключевых схем в реальных силовых устройствах, что позволяет считать его пренебрежимо малым. Учитывающая это упрощенная модель MOSFET принята в пакете расширения SimPowerSystems, включенном в новые реализации системы MATLAB+Simulink. В-третьих, многочисленные физико-топологические параметры MOSFET точно неизвестны, а применение усредненных справочных [6] параметров приводит к не меньшим погрешностям моделирования, чем при упрощении моделей ключевых приборов.

Поэтому применение упрощенных моделей силовых приборов в SimPowerSystems вполне оправдано и показало свою большую эффективность в большом числе примеров макро моделирования СУ и систем с построением их моделей на основе идеальных ключей, диодов, биполярных транзисторов, тиристоров (обычных и полностью управляемых) и IGBT. Ниже они доработаны и дополнены примерами с применением мощных MOSFET.

### Макромодель мощного полевого транзистора

В окне браузера библиотек слева видно дерево разделов библиотек с перечислением имен пакетов расширения и их разделов, а справа — окно с графическими обозначениями блоков того раздела библиотеки, который выбран. В нашем случае представлены блоки силовой электроники SimPowerSystems, среди которых виден и блок **Mosfet** макро модели мощного полевого транзистора с изолированным затвором. Эта же макро модель MOSFET используется в многоэлементных мостах (bridges).

Для детального знакомства с тем или иным блоком можно вызвать (например, из контекстно-зависимого меню правой клавишей мыши)

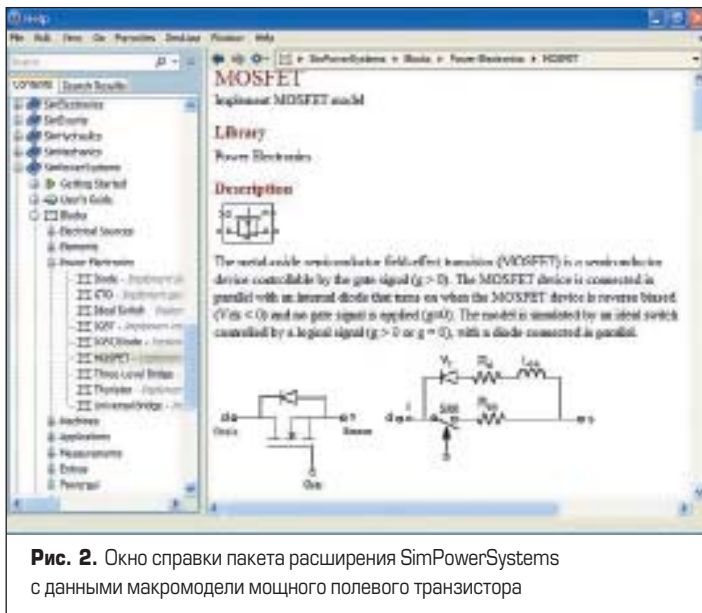


Рис. 2. Окно справки пакета расширения SimPowerSystems с данными макро модели мощного полевого транзистора

окно справки по заданному блоку. Это окно для макро модели мощного полевого транзистора представлено на рис. 2. В нем дано обозначение макро модели (в виде MOSFET с шунтирующим диодом) и идеализированная модель прибора.

Включенный прибор представлен идеальным ключом с сопротивлением  $R_{on}$  во включенном состоянии. Напряжение на стоке может быть любой полярности. MOSFET включен, если напряжение на затворе положительно относительно истока; при нулевом напряжении на затворе транзистор выключен. Таким образом, блок управляется логическим сигналом. Диод представлен идеальным диодом, последовательно с которым включено сопротивление диода  $R_d$  и индуктивность  $L_{on}$ . Блок имеет измерительный вывод, создающий векторы напряжения сток-исток и тока стока MOSFET.

Здесь уместно отметить, что модель мощного MOSFET в последних реализациях пакета расширения SimPowerSystems изменилась по сравнению с ранними реализациями этого пакета [8–10]. В последних индуктивность включалась последовательно с сопротивлением  $R_{on}$  и входила в цепь стока. Теперь же она включена последовательно с диодом (рис. 2). Если нужно учитывать индуктивность в цепи стока полевого транзистора, ее можно задать как внешний блок.

Диаграмма модели моделируемого устройства создается переносом мышью в окно диаграммы модели нужных блоков и их соединением, также с помощью мыши. Подробно процесс создания моделей описан в книгах по пакету расширения Simulink, например [8–10]. Там же можно найти общее описание пакета расширения SimPowerSystems и его библиотек.

Для задания параметров блоков моделей служат окна параметров. Они вызываются установкой на блоке курсора мыши и двойным щелчком левой клавиши мыши. На рис. 3 представлено окно параметров блока MOSFET. Обратите внимание на то, что кроме уже указанных параметров задаются параметры внешней снайберной RC-цепи, подключаемой между стоком (drain) и истоком (source) MOSFET. При задании бесконечной емкости эта цепь позволяет задавать сопротивление цепи сток-исток выключенного полевого транзистора. Но чаще цепь используется для ослабления колебаний напряжения на стоке при переключении полевого транзистора.

Показанные в окне на рис. 3 параметры MOSFET приняты как исходные в приведенных ниже примерах. Обратите внимание на то, что они отличаются от параметров, принятых по умолчанию в примерах справки по пакету расширения SimPowerSystems.

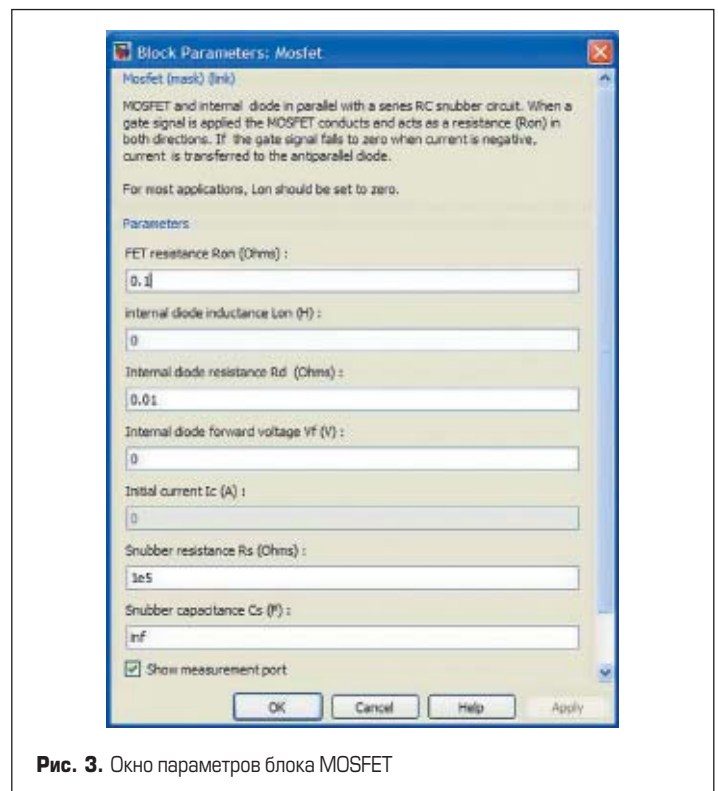
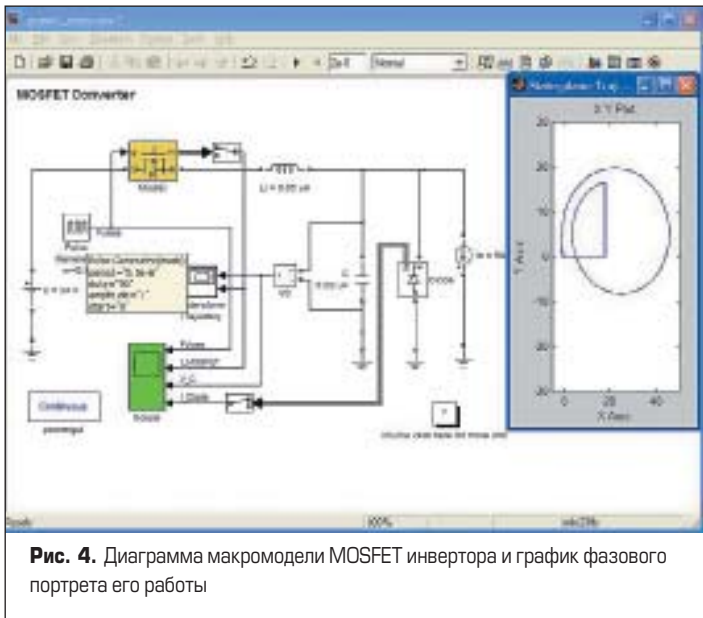


Рис. 3. Окно параметров блока MOSFET

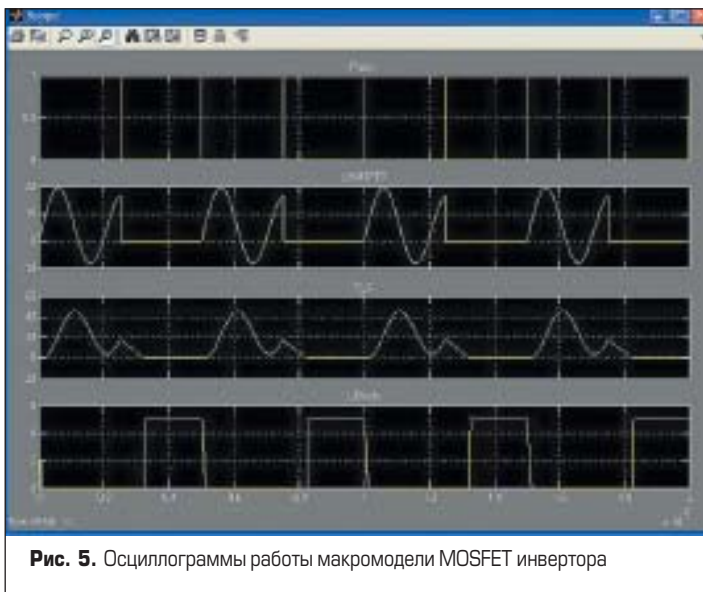
**Макромодель ключа на MOSFET**

На рис. 4 показана достаточно простая макромодель ключа на MOSFET с индуктивно-емкостной нагрузкой и источником тока на выходе. Такая макромодель описывается хорошо известным решением дифференциального уравнения второго порядка. Для построения фазового портрета, наглядно описывающего это решение в прямоугольной системе координат, строится зависимость напряжения на конденсаторе от тока стока MOSFET.



**Рис. 4.** Диаграмма макромодели MOSFET инвертора и график фазового портрета его работы

Осциллограммы работы макромодели MOSFET инвертора представлены на рис. 5. Несмотря на простоту макромодели, эти осциллограммы имеют довольно сложный вид. График фазового портрета позволяет сделать вывод, что при включении инвертора развивается колебательный процесс, который действует на время, равное длительности импульса импульсного генератора (его установки показаны на золотистой вкладке у правого нижнего угла блока генератора).

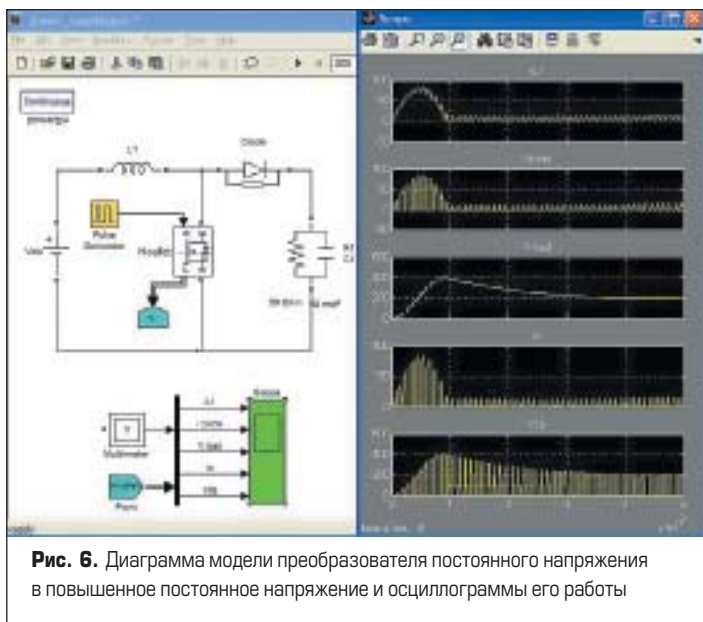


**Рис. 5.** Осциллограммы работы макромодели MOSFET инвертора

**Макромодель ключевого преобразователя DC/DC**

Диаграмма простейшего преобразователя типа DC/DC (рис. 6) обеспечивает преобразование напряжения постоянного тока одного уровня в напряжение постоянного тока другого (большого) уровня [9]. В данном случае напряжение  $V_{DC} = 100$  В преобразуется в удвоенное напряжение 200 В на нагрузке 50 Ом. Осциллограммы виртуального осциллографа, иллюстрирующие работу этой схемы, показаны

на рис. 6. Выходное напряжение такого преобразователя  $V_{load} = V_{DC}(1-m)$ , где  $m$  — коэффициент заполнения импульсов управления ключом. В нашем случае  $m = 0,5$  и  $V_{load} = 2V_{DC}$ . Это подтверждает средняя осциллограмма на рис. 6. Высокочастотные пульсации, связанные с работой ШИМ, хорошо заметны в начале переходного процесса роста выходного напряжения на нагрузке  $V_{load}$  и хорошо сглаживаются в установившемся режиме работы индуктивностью.

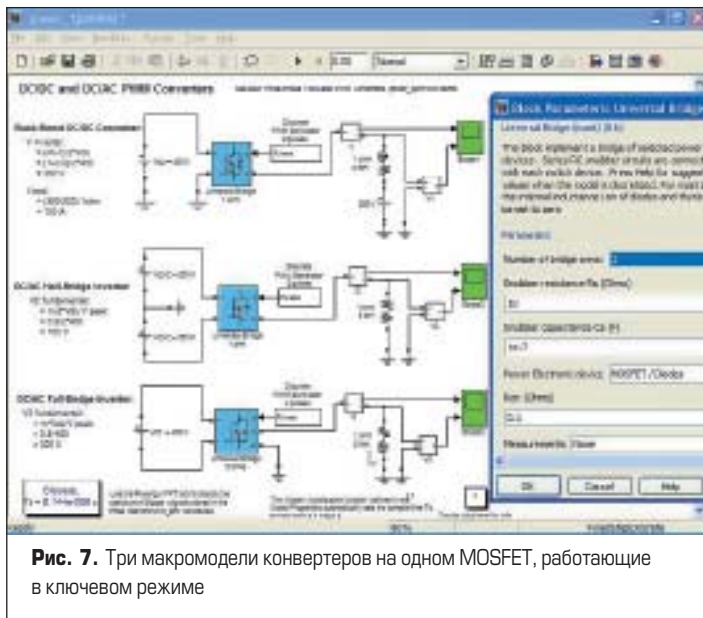


**Рис. 6.** Диаграмма модели преобразователя постоянного напряжения в повышенное постоянное напряжение и осциллограммы его работы

Интересно отметить, что вид осциллограмм преобразователя на MOSFET (рис. 6) ничем не отличается от вида осциллограмм преобразователя на IGBT, описанного в [7] и в разделе Demos справки по пакету расширения SimPowerSystems. Это говорит о том, что порою одни и те же характеристики СУ могут быть получены при их реализации на разных ключевых приборах.

**Одновременное макромоделирование трех MOSFET-конвертеров**

Применение макромоделей позволяет нередко моделировать одновременно несколько устройств на одной диаграмме Simulink. Пример этого показан на рис. 7. Здесь во всех моделируемых схемах используется универсальный модуль (блок Universal bridge), в котором задан выбор MOSFET с шунтирующим диодом. Параметры MOSFET соответствуют представленным на рис. 3. Выбор MOSFET с диодом задан параметром Power Electronic Device. Тут можно выбрать и дру-



**Рис. 7.** Три макромодели конвертеров на одном MOSFET, работающие в ключевом режиме

гой прибор, например для сравнения различных вариантов моделируемых схем.

Макромодель, представленная на рис. 7 сверху, представляет простейший конвертер типа DC/DC. Ключ на MOSFET управляется от ШИМ с коэффициентом заполнения  $m = 0,8$ . Преобразователь создает ток заряда около 160 А для заряда 200-В аккумулятора. Результаты моделирования представлены на рис. 8. Двухимпульсный генератор создает двухуровневую модуляцию.

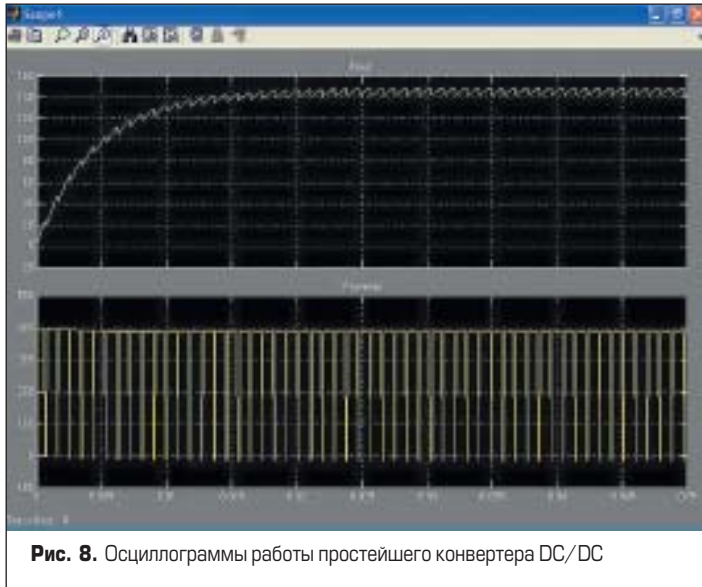


Рис. 8. Осциллограммы работы простейшего конвертера DC/DC

Средняя диаграмма на рис. 7 демонстрирует модель двухтактного преобразователя типа DC/AC (напряжения постоянного тока в однофазное напряжение переменного тока) на основе полумоста, выполненного на MOSFET. Питание преобразователя получает от двух источников — один с положительной, а другой с отрицательной полярностью. Благодаря ШИМ напряжение каждого из них преобразуется в полуволну почти синусоидального выходного сигнала. Высокочастотные пульсации последнего хорошо заметны на осциллограммах работы преобразователя (рис. 9).

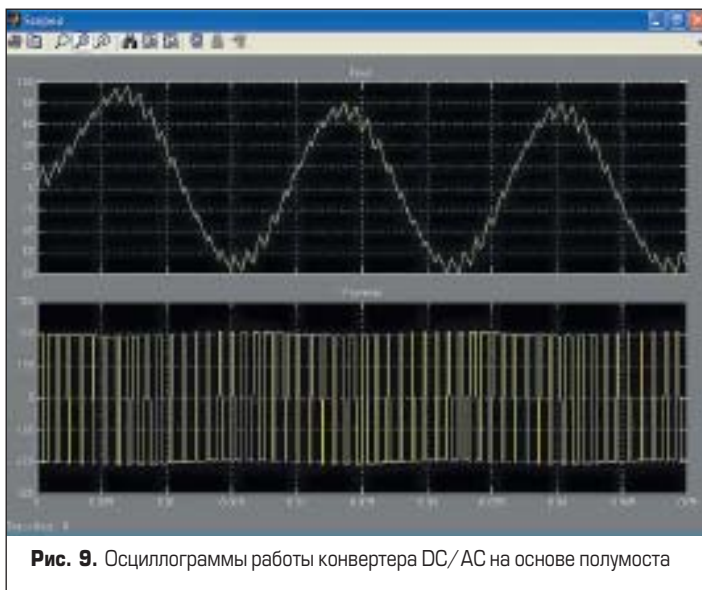


Рис. 9. Осциллограммы работы конвертера DC/AC на основе полумоста

Значительно улучшить форму выходного переменного напряжения позволяет конвертер DC/AC на основе полного моста. Он запускается четырехимпульсным генератором. Диаграмма его модели показана на рис. 7 снизу. Такой конвертер питается от одного источника постоянного напряжения. Осциллограммы его работы показаны на рис. 10. Они демонстрируют значительное снижение уровня высокочастотных пульсаций.

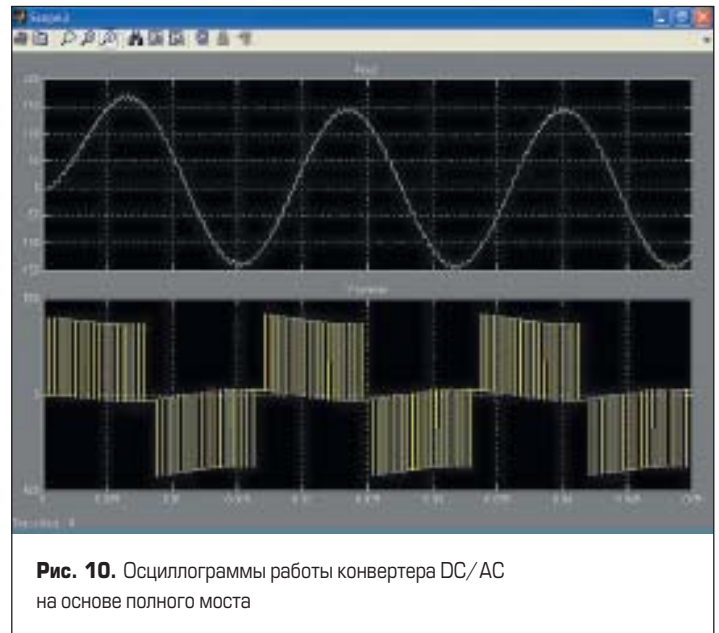


Рис. 10. Осциллограммы работы конвертера DC/AC на основе полного моста

### Спектральный анализ сигналов преобразователей на MOSFET

Судить о качестве выходного напряжения таких устройств можно, исследуя спектр их выходных напряжений или токов. Для этого в SimPowerSystems имеется специальный инструмент, анализирующий диаграмму модели, — **Power GUI**. Его блок рекомендуется вставлять в каждую созданную диаграмму, даже если возможности инструмента не предполагается использовать.

Блок построен на основе графического инструмента пользователя Graphics User Instruments (GUI), и его окно (рис. 11) можно вызвать, активизировав блок **Power GUI**. Он может называться **Continue**, если решатель дифференциальных уравнений работает с переменным шагом решения, или **Discrete**, если шаг решения постоянный.

Инструмент **Power GUI** позволяет на основе данных (массивов), расположенных в рабочем пространстве MATLAB, вычислять пара-

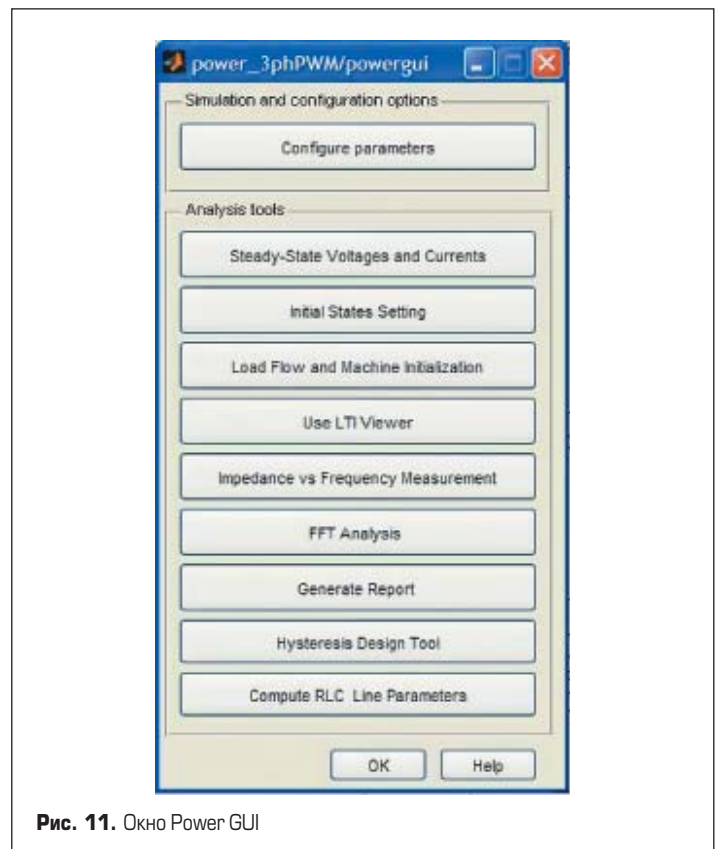
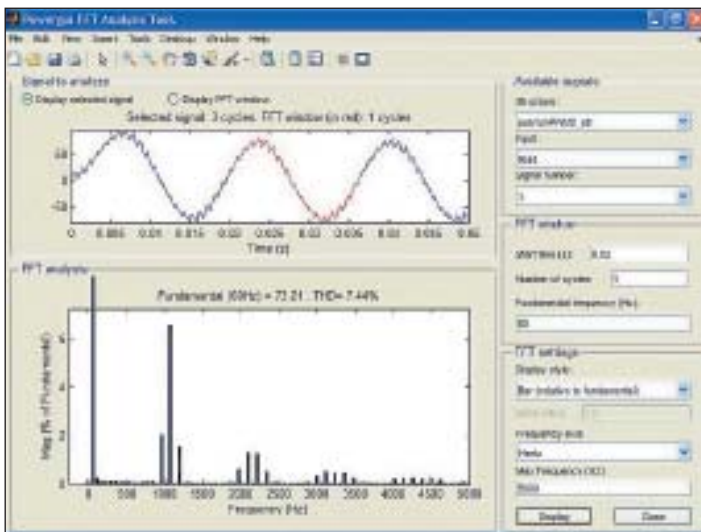


Рис. 11. Окно Power GUI

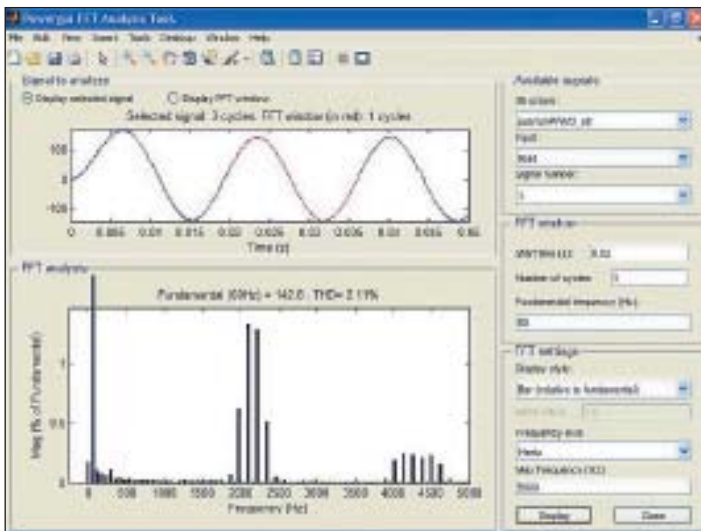
метры стационарного режима моделируемых схем, задать параметры инициализации, оценить импеданс цепи и т. д. Здесь нас интересует только применение инструмента для проведения спектрального анализа методом быстрого преобразования Фурье (БПФ, или Fourier Transform) — кнопка **FFT Analysis**.

Активизация кнопки **FFT Analysis** открывает окно спектрального анализа, которое показано на рис. 12. В этом окне можно выбрать анализируемую кривую напряжения или тока (в области Available signals — «возможный сигнал»), параметры окна спектрального анализа (область FFT Windows) и установки спектрального анализа (область FFT Setting). Окно спектрального анализа задается начальным временем, числом циклов анализа и основной частотой. В области установок спектрального анализа задается тип отображения его результатов, единица измерения по частотной оси и максимальная частота. Вид окна спектрального анализа на рис. 12 дан для тока нагрузки конвертера DC/AC на основе полного моста. Красным цветом выделяется участок кривой, который подвергается БПФ и размещается в его окне.



**Рис. 12.** Окно спектрального анализа для тока нагрузки конвертера DC/AC на основе полумоста

Окно спектрального анализа для тока нагрузки конвертера DC/AC на основе полного моста показано на рис. 13. Сравнение его с рис. 12 показывает, что частота высокочастотных составляющих спектра возросла вдвое, а сам уровень их значительно снизился. В результате коэффициент общих гармонических искажений упал до 2,11%, что говорит о существенном повышении чистоты кривой выходного тока.



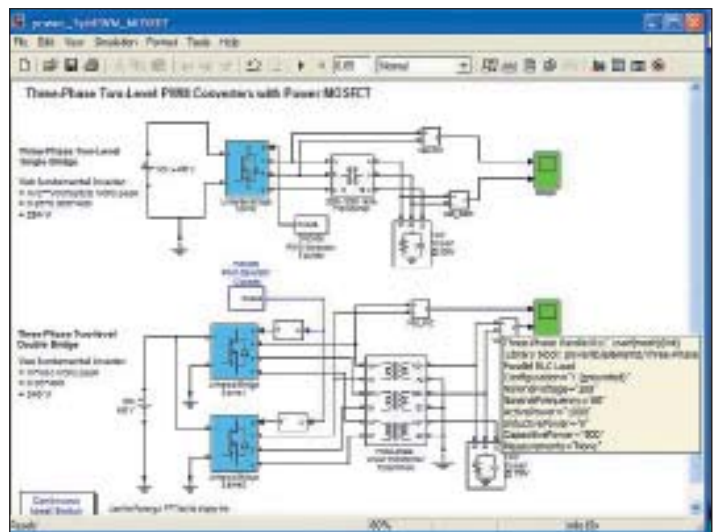
**Рис. 13.** Окно спектрального анализа для тока нагрузки конвертера DC/AC на основе полного моста

### Макромоделирование преобразователей постоянного напряжения в трехфазное переменное напряжение

В ряде областей применения электроэнергетики, например в промышленности, широко используются устройства и системы трехфазного переменного тока. Их применение значительно улучшает характеристики таких систем. В связи с этим часто необходимы конвертеры постоянного напряжения, например от аккумуляторных батарей, в трехфазное переменное напряжение или ток. Такие конвертеры востребованы в промышленности и на транспортных средствах, например в электрооборудовании судов и электротранспорта.

Синусоидальная форма выходного напряжения или тока у таких конвертеров обеспечивается за счет соответствующих законов широтно-импульсного управления силовыми ключами. Они обеспечиваются блоком многоимпульсного генератора. В качестве силовых ключей, наряду с тиристорами, мощными биполярными транзисторами и IGBT, весьма перспективны мощные полевые транзисторы. Их высокая скорость переключения не только уменьшает один из главных видов потерь — динамические потери, но и позволяет повысить частоту коммутации и значительно уменьшить габариты реактивных компонентов конвертеров, инверторов и преобразователей.

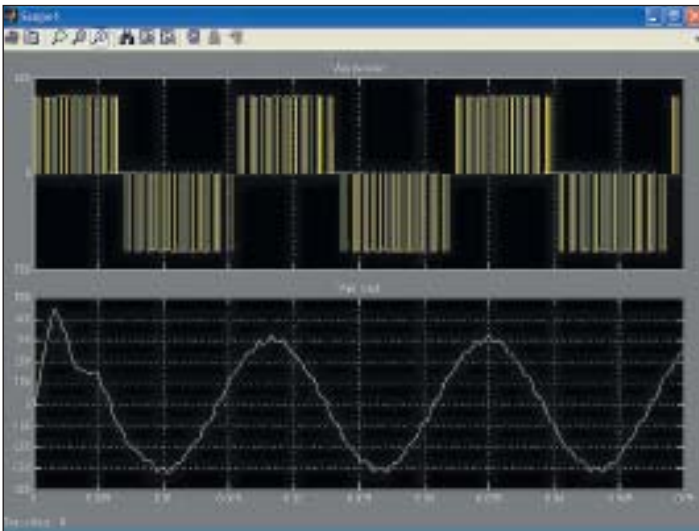
Это нетрудно пояснить на примере двух диаграмм моделей преобразователей постоянного напряжения в трехфазное (рис. 14). На верхней диаграмме модель соответствует преобразователю на одном мосте, содержащем три MOSFET (или три группы MOSFET), а модель на нижней использует два источника входного напряжения разной полярности и два моста на MOSFET. Для улучшения формы выходного напряжения используется двухуровневая широтно-импульсная модуляция с помощью шестиимпульсного ШИМ в верхней схеме и, соответственно, 12-импульсного в нижней. Их блоки генераторов входят в пакет расширения SimPowerSystems.



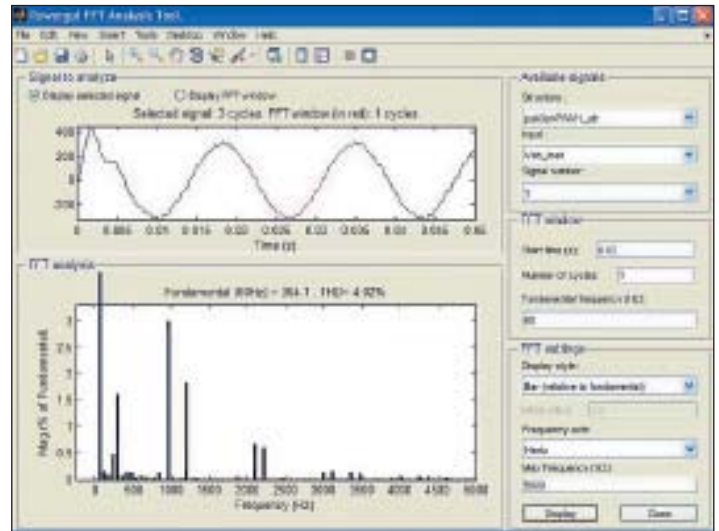
**Рис. 14.** Две диаграммы моделей преобразователя напряжения постоянного тока в трехфазное напряжение переменного тока с одним мостом

Преобразователь формирует каждую полуволну выходного переменного напряжения из половины входного постоянного напряжения. Осциллограммы диаграммы модели преобразователя напряжения постоянного тока в трехфазное напряжение переменного тока с одним мостом на MOSFET показаны на рис. 15. Нетрудно заметить, что осциллограмма входное напряжение напоминает синусоиду со значительными высокочастотными импульсными помехами, связанными с ключевым методом управления полевыми транзисторами в силовом мосте.

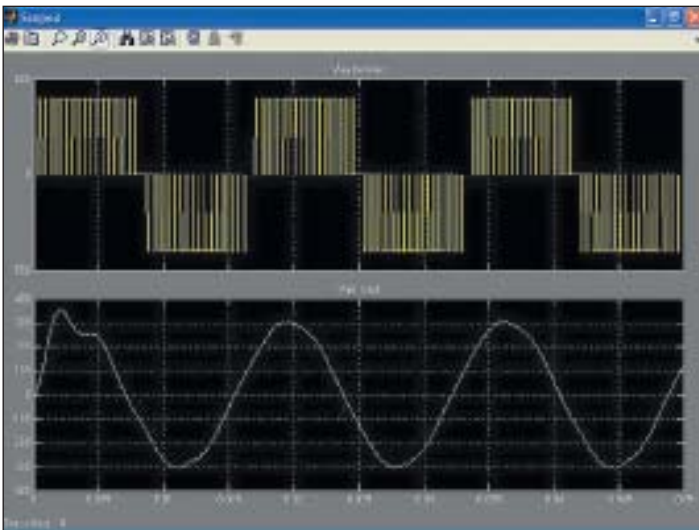
На рис. 16 показаны осциллограммы работы преобразователя напряжения постоянного тока в трехфазное напряжение переменного тока с двумя мостами. В данном случае каждая полуволна выходного



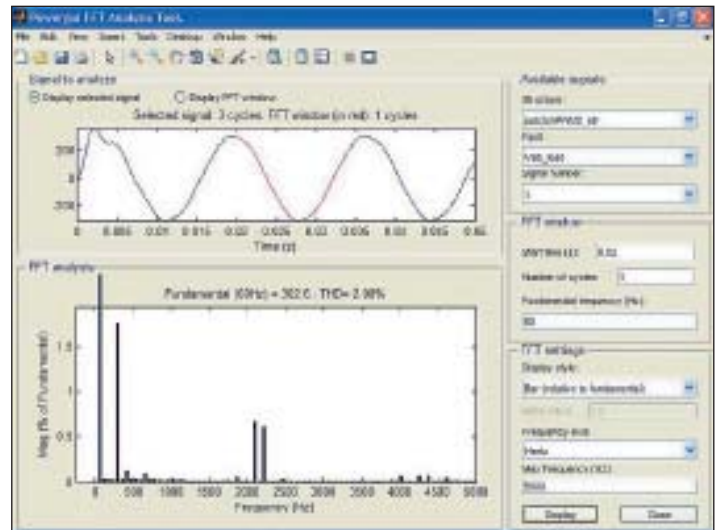
**Рис. 15.** Осциллограммы работы преобразователя напряжения постоянного тока в трехфазное напряжение переменного тока с одним мостом



**Рис. 17.** Окно спектрального анализа для напряжения нагрузки преобразователя постоянного напряжения в трехфазное переменное напряжение с одним мостом



**Рис. 16.** Осциллограммы работы преобразователя напряжения постоянного тока в трехфазное напряжение переменного тока с двумя мостами



**Рис. 18.** Окно спектрального анализа для напряжения нагрузки преобразователя постоянного напряжения в трехфазное переменное напряжение с двумя мостами

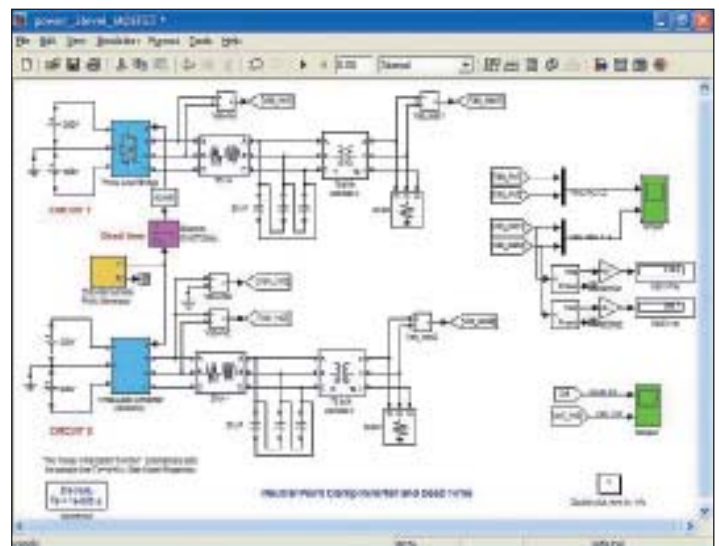
напряжения получается преобразованием напряжения от отдельного входного источника постоянного напряжения. При этом частота преобразования удваивается, и выходное напряжение имеет очень близкую к синусоидальной форму. Высокочастотные пульсации в этом случае едва заметны.

На рис. 17 представлено окно спектрального анализа для напряжения нагрузки преобразователя постоянного напряжения в трехфазное переменное напряжение с одним мостом. Уровень высших гармоник вполне умеренный, коэффициент гармоник достигает 4,02%.

Окно спектрального анализа для напряжения нагрузки двухмостового преобразователя постоянного напряжения в трехфазное переменное напряжение показано на рис. 18. Высших гармоник, по сравнению с примером на рис. 17, стало заметно меньше. Коэффициент гармоник, в сравнении с первой схемой рис. 14, упал с 4% до 2%.

Модель clamp-инвертора постоянного напряжения в трехфазное с нейтралью и мертвой зоной показана на рис. 19. Модель содержит, по существу, две схемы инверторов, вырабатывающих два выходных трехфазных напряжения. Оба инвертора управляются от одного дискретного ШИМ трехфазного генератора (нижний прямо, а верхний через устройство задержки).

Контроль за работой модели этого инвертора реализован двумя виртуальными осциллографами. Их осциллограммы представлены



**Рис. 19.** Диаграмма модели преобразователя с нейтральной точкой и мертвым временем

на рис. 20 и 21. Можно отметить довольно сложный характер наблюдаемых процессов. Вид кривых выходного напряжения (осциллограммы на рис. 21 снизу) очень близок к синусоидальным зависимостям.

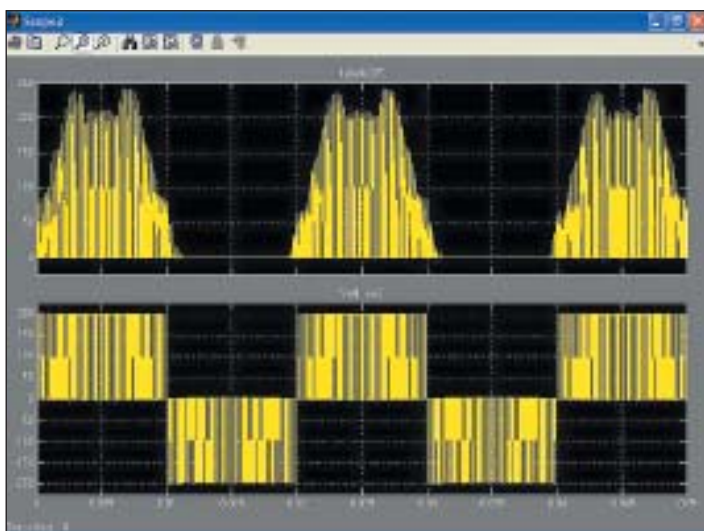


Рис. 20. Осциллограммы виртуального осциллографа Scope1 диаграммы рис. 19

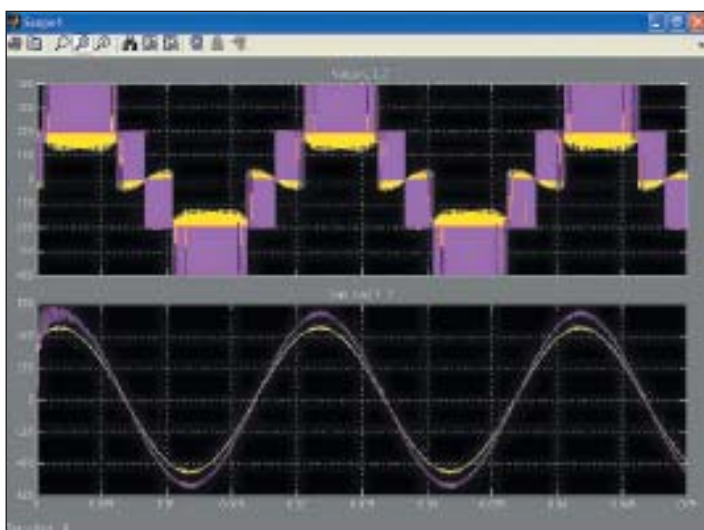


Рис. 21. Осциллограммы виртуального осциллографа Scope2 диаграммы рис. 19

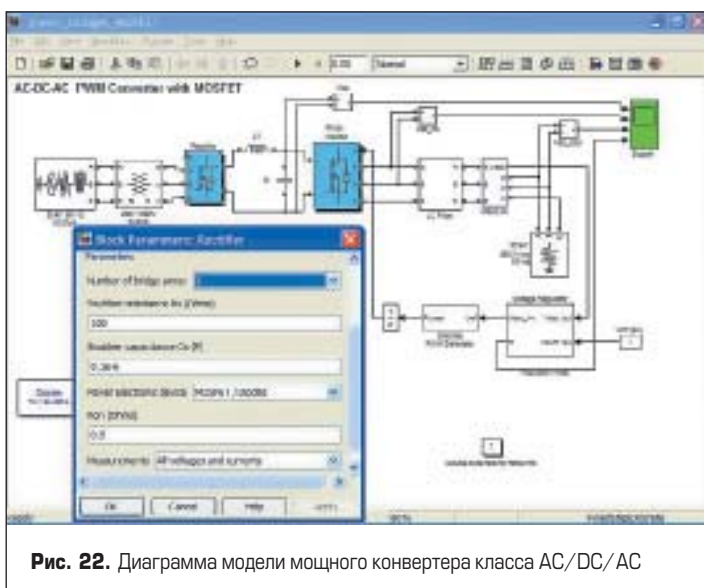


Рис. 22. Диаграмма модели мощного конвертера класса AC/DC/AC

### Макромоделирование мощного конвертера AC/DC/AC

Конверторы класса AC/DC/AC обычно применяются для преобразования напряжения переменного тока одной частоты в напряжение переменного тока другой частоты. Обычно это необходимо при питании оборудования с одной частотой от сети с другой частотой (например, 60 и 50 Гц). Возможно также построение на их основе источников бесперебойного питания: в них AC/DC-конвертер используется для заряда мощной буферной аккумуляторной батареи, которая затем с помощью конвертера DC/AC обеспечивает получение на выходе напряжения переменного тока с заданными параметрами. Это возможно, даже если питающая источник сеть переменного тока временно отключается и преобразователь DC/AC получает питание от ранее заряженной аккумуляторной батареи.

На рис. 22 представлена диаграмма модели одного из таких конвертеров трехфазного напряжения с мощностью до 50 кВт и частотой 60 Гц в трехфазное напряжение почти той же мощности, но с частотой 50 Гц. Трехфазный выпрямитель напряжения сети с частотой 60 Гц и инвертор с ШИМ и частотой выходного трехфазного напряжения с частотой 50 Гц построены мостом с MOSFET.

Осциллограммы виртуального осциллографа Scope диаграммы рис. 22 представлены на рис. 23. Осциллограммы хорошо иллюстрируют достаточно длительный (более одного периода выходного напряжения) переходный процесс выхода на стационарный режим работы. Он задан, в основном, переходным процессом в цепи LC-фильтра на выходе трехфазного выпрямителя Rectifier.

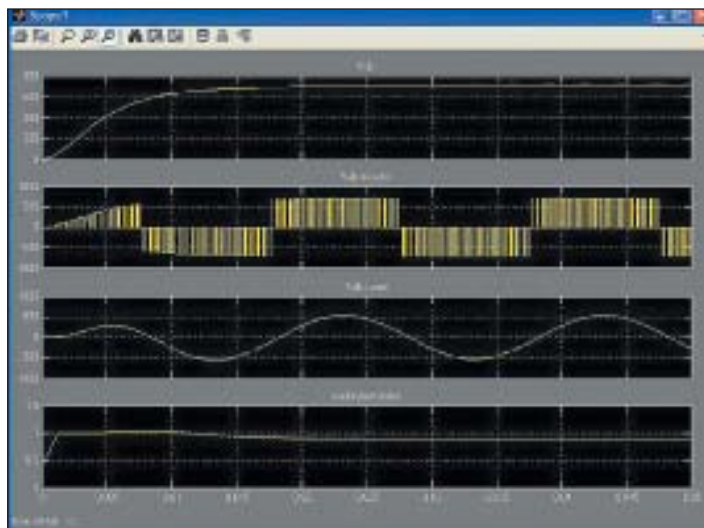


Рис. 23. Осциллограммы виртуального осциллографа Scope диаграммы рис. 22

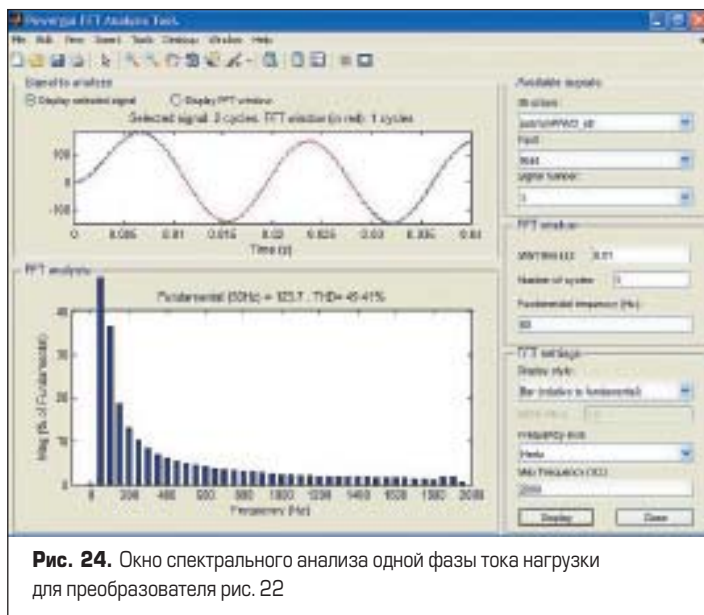
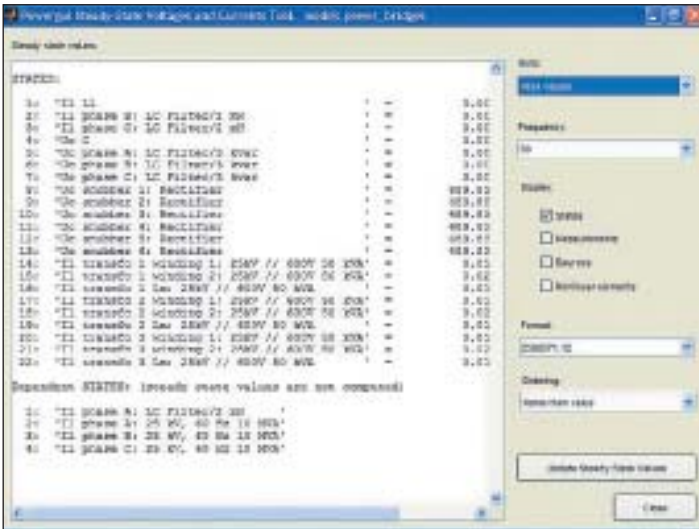


Рис. 24. Окно спектрального анализа одной фазы тока нагрузки для преобразователя рис. 22

Окно спектрального анализа одной фазы тока нагрузки для преобразователя рис. 22 показано на рис. 24.

Помимо спектрального анализа окно инструмента **Power GUI** позволяет выполнить анализ стационарного режима работы моделируемой схемы. Для этого в окне **Power GUI** (рис. 11) надо активизировать кнопку **Steady-State Voltages and Currents**. Окно анализа стационарных напряжений и токов показано на рис. 25.

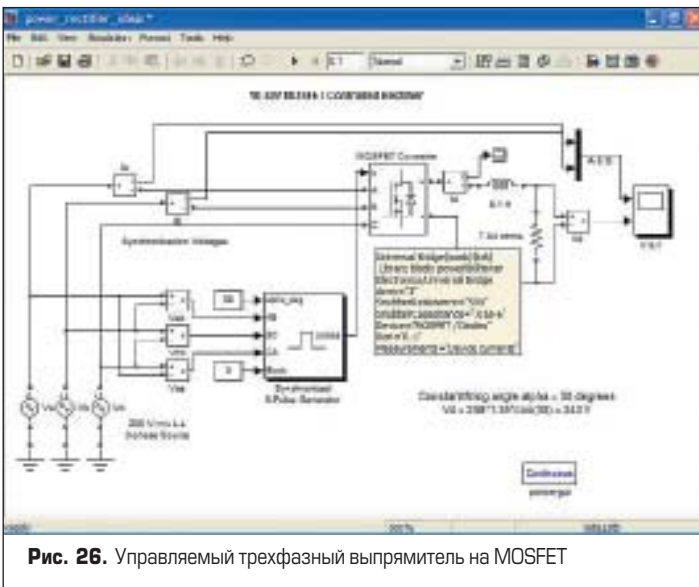


**Рис. 25.** Результаты расчета стационарного режима работы преобразователя рис. 22

**Макромоделирование управляемых трехфазных выпрямителей на MOSFET**

Трехфазный выпрямитель (Rectifier) позволяет, даже без применения ключевого режима работы силовых устройств с ШИМ, получить большую мощность и более чистый спектр выходного тока (напряжения). А применение в нем ключевых приборов упрощает регулировку выходной мощности и позволяет уменьшить габариты и массу фильтров на выходе выпрямителя.

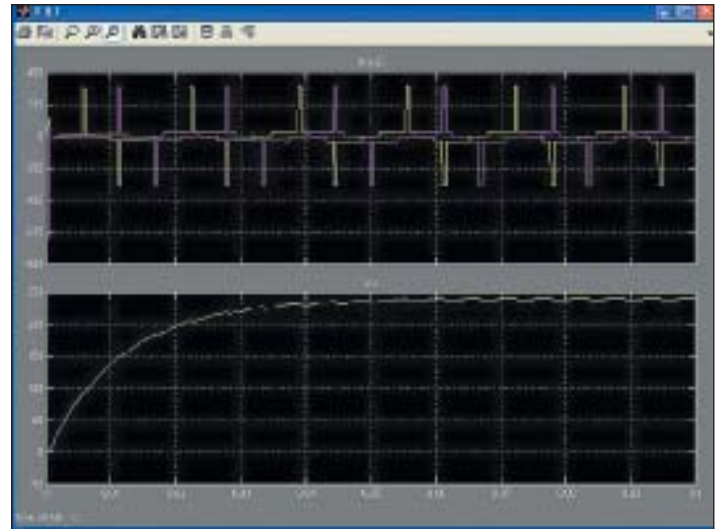
Диаграмма модели типичного трехфазного управляемого выпрямителя с мощностью на выходе около 10 кВт показана на рис. 26. Выпрямитель построен на основе трехфазного моста, в котором задано применение MOSFET. Он управляется синхронным с сетью шестипульсным генератором.



**Рис. 26.** Управляемый трехфазный выпрямитель на MOSFET

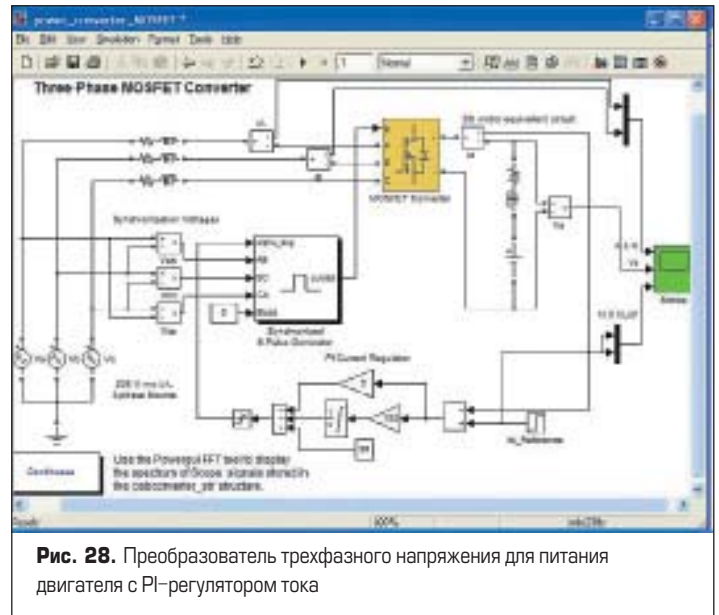
Осциллограммы работы управляемого выпрямителя показаны на рис. 27. Осциллограммы тока трудно назвать тривиальными — они сильно зависят от настройки параметров управляющего

генератора, а также от сопротивления сток-исток включенных MOSFET. Однако переходный процесс нарастания выходного напряжения достаточно очевиден: он близок к экспоненциальному и содержит обусловленные ключевым режимом работы MOSFET высокочастотные пульсации. Их уровень сильно зависит от номинала индуктивности, включенной на выходе выпрямителя перед нагрузкой.



**Рис. 27.** Осциллограммы работы управляемого трехфазного выпрямителя на MOSFET

В такой выпрямитель можно включить цепи стабилизации выходного напряжения путем изменения длительности импульсов управляющего генератора. Такая реализация диаграммы модели показана на рис. 28. Цепь стабилизации с применением PI-регулятора (с пропорциональным интегрированием) в цепи обратной связи на рис. 28 представлена в нижней части диаграммы.



**Рис. 28.** Преобразователь трехфазного напряжения для питания двигателя с PI-регулятором тока

Как видно из осциллограмм работы этого выпрямителя, форма его сигналов довольно сложна, и выходное напряжение (две фазы его показаны на рис. 29 сверху) имеет большие высокочастотные (с частотой управления MOSFET) колебания (выбросы). Ухудшение формы сигнала связано с потерей оптимальности длительности импульсов у генератора, запускающего ключи.

Спектр выходного тока содержит довольно большое число высших гармоник. Окно спектрального анализа этого выпрямителя показано на рис. 30. Для уменьшения уровня высших гармоник можно использовать трехфазные LC-фильтры.



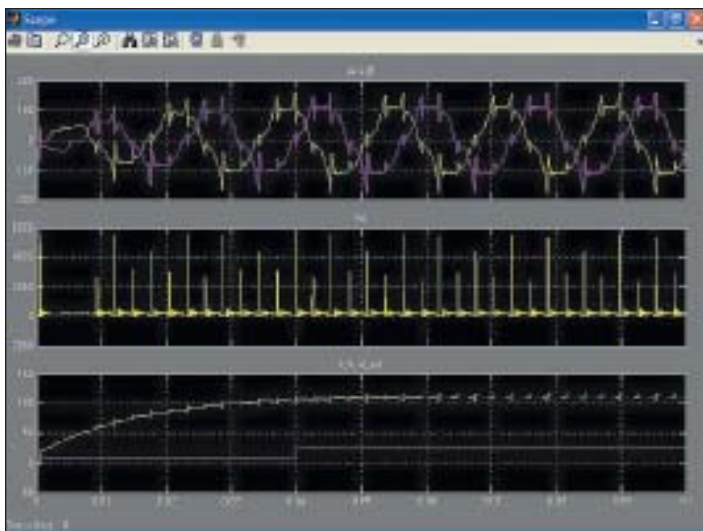


Рис. 29. Осциллограммы виртуального осциллографа Scope диаграммы рис. 26

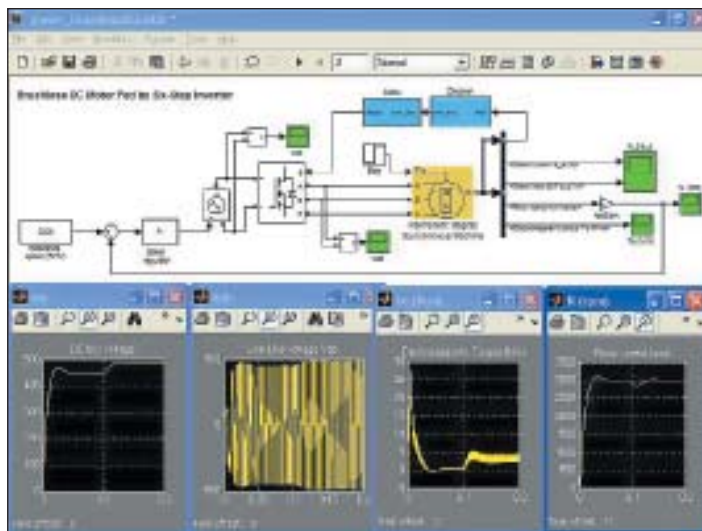


Рис. 31. Диаграмма модели синхронного двигателя с постоянным магнитом

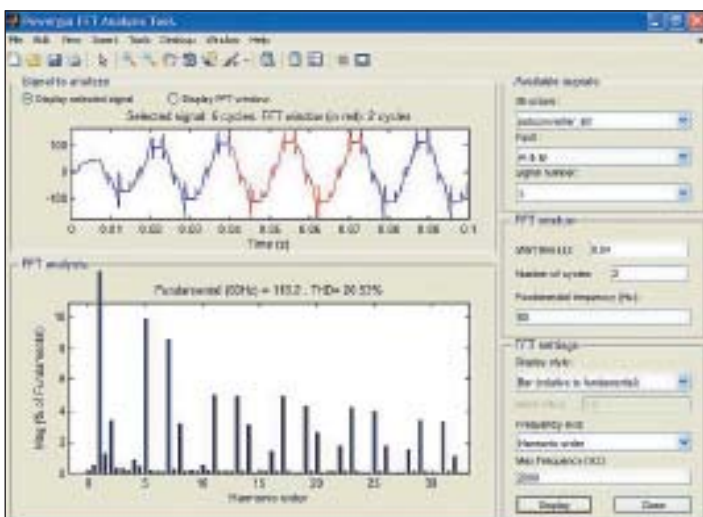


Рис. 30. Окно спектрального анализа одной фазы тока нагрузки для преобразователя рис. 28

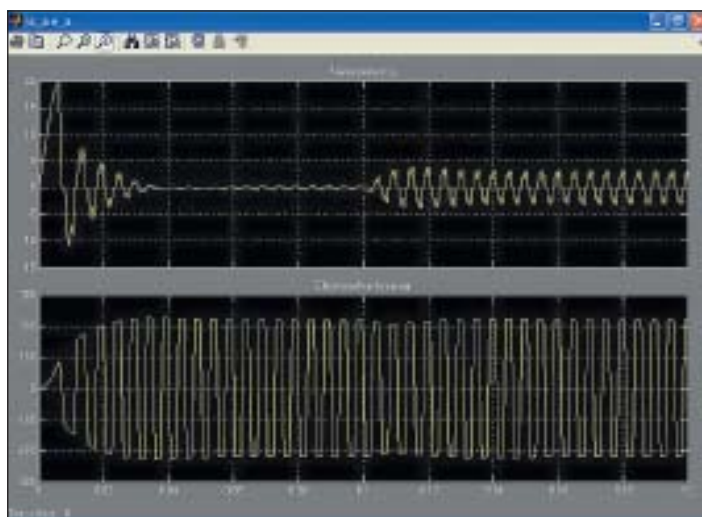


Рис. 32. Осциллограммы работы диаграммы рис. 31

**Макромоделирование электродвигателей с инверторами на MOSFET**

Инверторы на MOSFET часто используются для питания электродвигателей различного типа, например синхронных и асинхронных электрических машин, и управления скоростью вращения. Пакет расширения SimPowerSystems особенно удобен для макромоделирования «мехатронных» систем [9], поскольку имеет обширные библиотеки блоков как мощной электроники, так и электромеханических систем.

Не углубляясь в эту обширную тему, рассмотрим пару примеров применения инверторов на MOSFET для управления электродвигателями. На рис. 31 показана диаграмма модели синхронного двигателя с постоянным магнитом. Там же внизу представлены осциллограммы работы диаграммы, полученные четырьмя виртуальными осциллографами. Из них видно, как система реагирует на скачок Step, меняющий нагрузку магнита.

Подробные осциллограммы скорости вращения ротора двигателя и электромагнитного вращающего момента представлены на рис. 32. Нетрудно заметить, что эффективность стабилизации скорости вращения ротора достаточно высокая.

На рис. 33 представлена диаграмма модели системы питания асинхронного электродвигателя. Такие двигатели имеют простую конструкцию и высокую надежность работы.

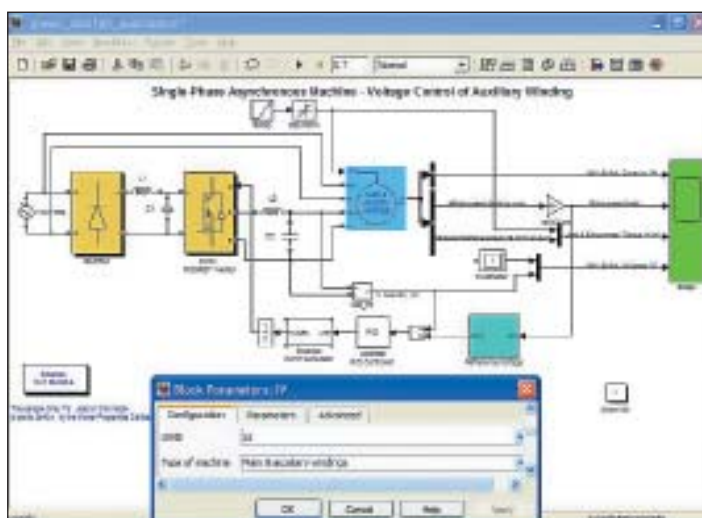


Рис. 33. Диаграмма модели системы питания асинхронного электродвигателя

Осциллограммы работы диаграммы рис. 33 показаны на рис. 34. Нетрудно заметить, что выход на стационарную скорость вращения ротора двигателя осуществляется плавно и без малейших колебаний.

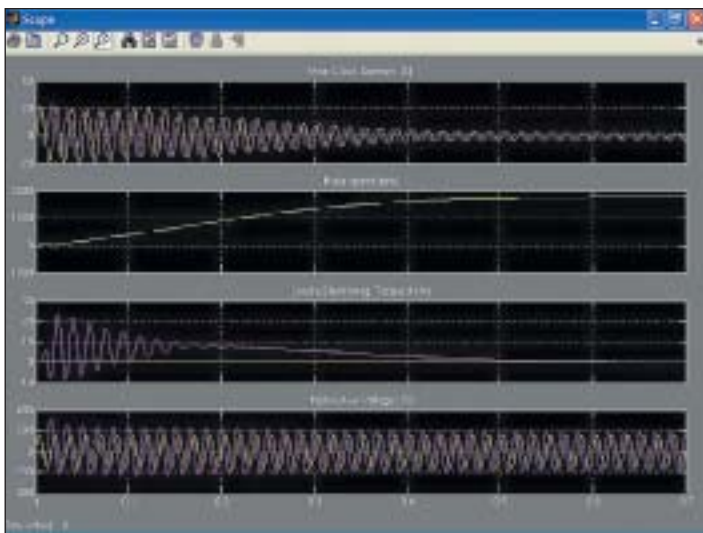


Рис. 34. Осциллограммы работы диаграммы рис. 33

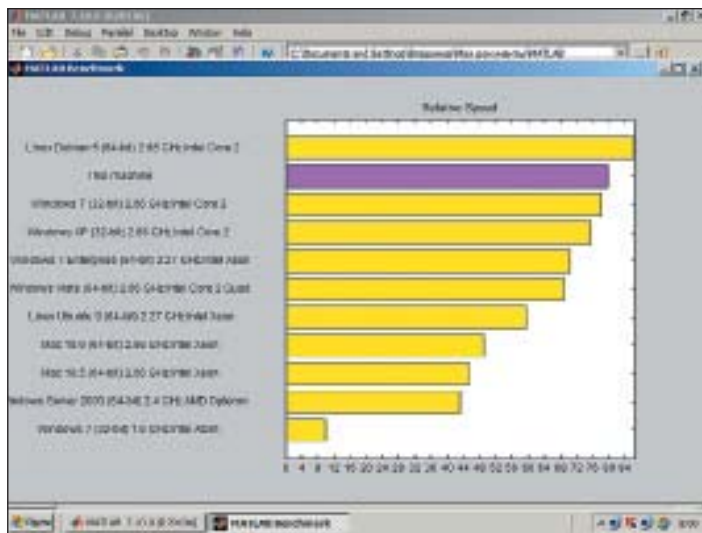


Рис. 35. Оценка быстродействия ПК командой bench

### О скорости моделирования в MATLAB+Simulink

Приведенные выше примеры моделирования были апробированы на ПК двух классов: на одноядерном процессоре Intel Pentium 4 HT и четырехъядерном Intel Core 2 Quad. Разница составляла 5–6 раз — меньшее время и большую скорость моделирования, естественно, дал ПК с многоядерным процессором. Выяснить примерное быстродействие используемого ПК и сравнить его с быстродействием ПК типовой конфигурации позволяет команда *bench*, исполняемая в окне командного режима системы MATLAB. На рис. 35 показан результат выполнения этой команды для ПК с четырехъядерным 32-разрядным микропроцессором, 2 Гбайт оперативной памяти и ОС Windows XP Professional. Она незначительно уступает Linux по скорости работы ПК.

Следует учитывать, что моделирование (и макро моделирование) в Simulink идет не в реальном масштабе времени, а в некотором условном масштабе, зависящем от быстродействия ПК и настроек решателя дифференциальных уравнений. Для описанных задач время макро моделирования составляло единицы секунд для ПК с четырехъядерным процессором и не более десятков секунд для ПК с одноядерным.

### Заключение

Выше было приведено множество примеров макро моделирования преобразователей (инверторов и конвертеров) на мощных MOSFET с управлением от ШИМ, обеспечивающих высокий КПД и высокие энергетические показатели устройств. Возможны простые эксперименты с макро моделями, выявляющими многие тонкости их работы задолго до реализации устройств «в железе» без опасности выхода силовых устройств из строя. Огромную ценность представляет возможность сравнения различных вариантов моделируемых устройств, выполненных на обычных диодах, обычных и полностью управляемых тиристорах,

биполярных транзисторах и IGBT. Для этого достаточно выбрать нужный тип прибора в окне параметров мостов и инверторов, а иногда сменить блок модели прибора в диаграмме. Все это делается гораздо проще и быстрее, чем при натуральных исследованиях создаваемых устройств. И, разумеется, надо помнить, что макро моделирование — это лишь один из этапов проектирования силовых устройств.

### Литература

1. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Новожилов А. М. Мощные полевые транзисторы во вторичных источниках питания // Электронная промышленность. 1982. № 1.
2. Дьяконов В. П. Силовые полевые транзисторы в энергетических устройствах // Электричество. 1984. № 4.
3. Окснер Э. Мощные полевые транзисторы и их применение/ Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1985.
4. Бачурин В. В., Ваксембург В. Я., Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Ремнев А. М., Смердов В. Ю. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах. Справочник. М.: Радио и связь. 1994.
5. Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Ремнев А. М., Смердов В. Ю. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. М.: СОЛОН-Р. 2002.
6. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности. Справочник. М.: Радио и связь. 1989.
7. Дьяконов В. П. Побисторы или IGBT и имитационное моделирование устройств на них // Силавая электроника. 2010. № 5.
8. Дьяконов В. П., Пеньков А. А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. Справочник. М.: Горячая линия — Телеком. 2009.
9. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7. Самоучитель. М.: ДМК-Пресс. 2008.
10. Герман-Галкин С. Г. MATLAB&SIMULINK. Проектирование механических устройств на ПК. Учебное пособие для вузов. С.-Пб. 2008.