

Рис. 2. SPS-модель с полупроводниковым диодом (а), окно настройки параметров диода (б), временные диаграммы тока и напряжения на диоде (в) и тока и напряжения на нагрузке (г)

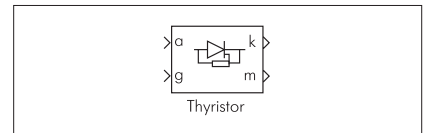
File/New/Model. Расположены окна на рабочем столе. В левой части окна обозревателя следует закрыть дерево **Simulink**, открыть дерево **SimPowerSystems** и активировать строку дерева **Electrical Sources** (источники электрической энергии). В правой части окна обозревателя открывается раздел **Electrical Sources**. С помощью ЛКМ нужно перетащить пиктограмму источника переменного напряжения **AC Voltage Source** в окно модели. Действуя аналогично, в окно модели поочередно перемещают пиктограмму последовательной RLC-цепи **Series RLC Branch** из раздела **Elements** (электротехнические элементы), пиктограммы измерителя напряжения **Voltage Measurement** и измерителя тока **Current Measurement** из раздела **Measurements** (измерительные и контрольные устройства). Из библиотеки **Simulink** — пиктограммы осциллографа **Scope** из раздела **Sinks** (приемники и измерители сигналов) и **Demux** из раздела **Signal Routing** (блоки, определяющие маршруты сигналов). Производятся соединения блоков в схему (рис. 2а), в которой к информа-

ционному порту m диода подключается осциллограф **Scope** через демультиплексор **Demux**, выделяющий из общего векторного Simulink-сигнала два отдельных сигнала, выводимых на подключенный осциллограф. Сам осциллограф имеет четыре входа. Напомним, что количество входов устанавливается после вызова в окне осциллограмм **Scope** (рис. 2в) кнопкой **Parameters** другого окна с именем **Parameters Scope** и закладкой **General** — общие параметры, где и устанавливается требуемое число осей **Number axes**.

В блоках настройки параметров производятся установки питающего напряжения 220 В, частоты 50 Гц (окно параметров источника **AC Voltage Source**), сопротивление 2 Ом, индуктивность 5 мГн и емкость ∞ (бесконечность) (окно параметров блока **Series RLC Branch**). Окно параметров диода с установленными настройками приведено на рис. 2б. Если в демпфирующей цепи **Snubber** уменьшить сопротивление резистора до величины 10–20 Ом, то на кривой тока нагрузки могут появиться высокочастотные колебания, что свидетельствует о необходи-

мости внимательного отношения к выбору параметров элементов этой цепи. Менее чувствительны процессы коммутации диода к выбору величины емкости данной цепочки, но снижение ее ниже 10^{-7} Ф также может вызвать появление аналогичных колебаний. Индуктивность L_{on} начинает сказываться на картине процессов при значении более 1–5 мГн. Допускается выбирать величину этого параметра бесконечно малой или даже нулевой. Временные диаграммы тока и напряжения на диоде и тока и напряжения на нагрузке приведены на осциллограммах (рис. 2в и 2г). Рекомендуется посмотреть и сравнить временные диаграммы процессов при различных сочетаниях параметров диода и нагрузки, не забывая каждый раз вновь запускать процесс моделирования.

Тиристор Thyristor, Detailed Thyristor



Пиктограмма тиристора.

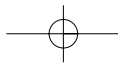
Назначение: моделирует тиристор. В библиотеке **SimPowerSystem** имеется упрощенная модель — **Thyristor** и уточненная модель — **Detailed Thyristor**.

Упрощенная модель тиристора состоит из резистора R_{on} , индуктивности L_{on} , источника постоянного напряжения V_f и ключа SW, соединенных последовательно (рис. 3а и 3б). Ключ управляется блоком логики. При положительном напряжении на тиристоре ($V_{ak} - V_f$) и поступлении положительного сигнала на управляющий электрод g происходит замыкание ключа с пропуском тока. Выключение тиристора происходит при снижении до нуля тока I_{ak} , протекающего через тиристор.

В уточненной модели тиристора длительность управляющего импульса должна быть достаточной, чтобы анодный ток включаемого тиристора превысил ток удержания (I_t). Иначе включение не произойдет. При выключении тиристора длительность запирающего отрицательного напряжения «анод-катод» должна превышать время выключения тиристора (T_q). Иначе тиристор автоматически включится даже при нулевом управляющем сигнале. На рис. 3в приводятся статические вольт-амперные характеристики модели тиристора для включенного и выключенного состояний. В модели параллельно тиристору подключена демпфирующая последовательная RC-цепь.

Окно настройки параметров аналогично окну настройки параметров диода. Но имеются особенности, а именно: **Latching current** I_l (A) — величина тока удержания (A); **Turn of time** T_q (s) — время выключения (с). Оба параметра задаются в уточненной модели тиристора.

На выходе порта блока m формируется вектор Simulink-сигнала, содержащий две составляющие — анодный ток и напряжение «анод-катод» тиристора.



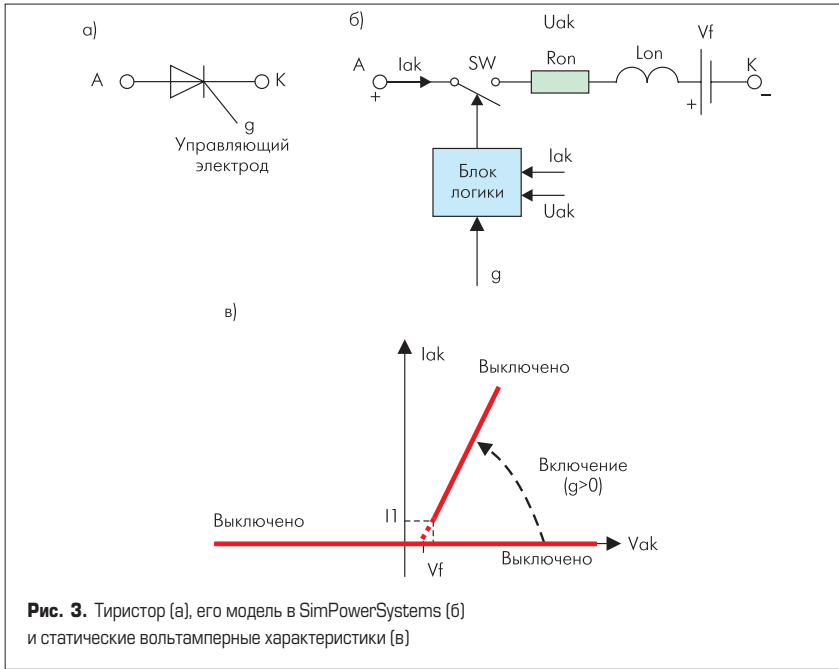
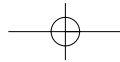


Рис. 3. Тиристор (а), его модель в SimPowerSystems (б) и статические вольтамперные характеристики (в)

Пример 2. Выполнить модель однофазного выпрямителя на тиристоре с RL-нагрузкой и измерить ток и напряжение на нагрузке.

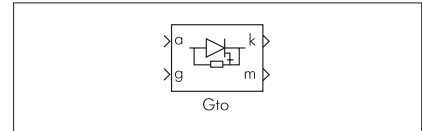
Исходные данные для модели: питающее переменное напряжение 100 В с частотой переменного тока 50 Гц; нагрузка с сопротивлением 2 Ом и индуктивностью 5 мГн, угол отпирания тиристора 90°.

Собранная схема модели выпрямителя представлена на рис. 4а и выполнена аналогично схеме диодного выпрямителя на рис. 2а. Особенности рассматриваемой схемы: отпирание тиристора осуществляется от генератора **Pulse Generator**, подключенного к порту g; информационный порт *m* тиристора заглушен (подключен **Terminator**, находящийся

в разделе **Sinks** библиотеки **Simulink**); введен новый блок **Ground** (заземление) из раздела **Connectors** (соединители) библиотеки **SimPowerSystems**, позволяющий упростить конфигурацию схемы. Различают блоки **Ground** (input) и **Ground** (output), то есть входное и выходное заземления, отличающиеся направлением стрелки, на что следует обратить внимание при сборке схемы. При отсутствии блока **Terminator** в командном окне будет выдана ошибка.

Параметры генератора заданы в окне (рис. 4б), из которого видно, что период (*Period*) составляет 0,02 с, ширина импульса (*Pulse Width*) — 5% от периода, фазовый сдвиг (*Phase Delay*) — четверть периода (90°). Окно для настройки параметров тиристора приведено на рис. 4в. Результаты моделирования представлены в виде временных диаграмм тока через нагрузку и напряжения на нагрузке на рис. 4г.

Полностью управляемый тиристор GTO Thyristor



Пиктограмма полностью управляемого тиристора GTO.

Назначение: моделирует полностью управляемый тиристор.

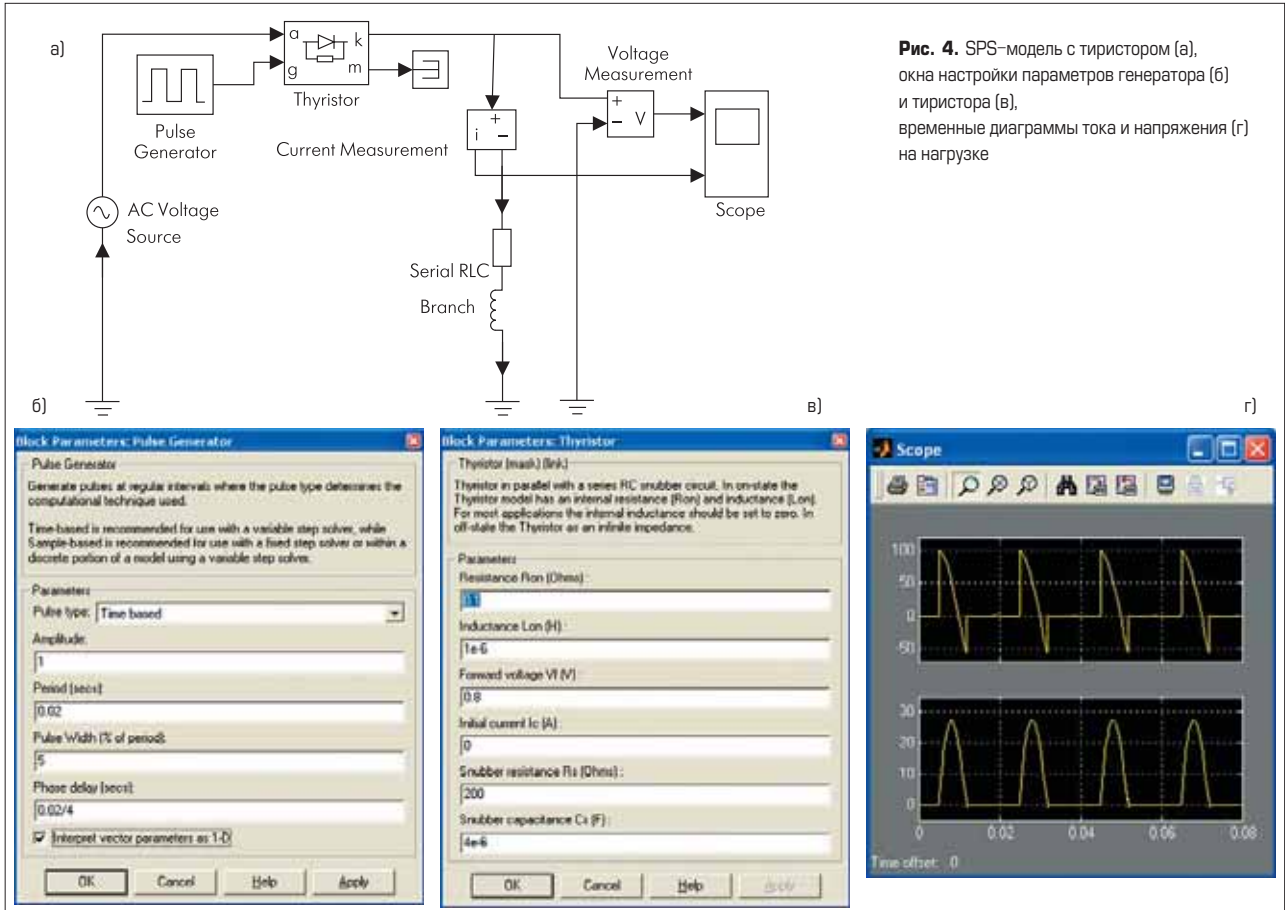
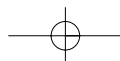
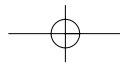


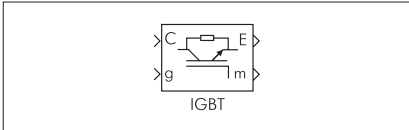
Рис. 4. SPS-модель с тиристором (а), окна настройки параметров генератора (б) и тиристора (в), временные диаграммы тока и напряжения (г) на нагрузке





Модель аналогична модели тиристора на рис. 4а. Особенность ее состоит в том, что для выключения прибора достаточно снизить управляющий сигнал до нулевого уровня. Выключение GTO-тиристора произойдет также при спаде анодного тока до нуля, даже при наличии отпирающего управляющего сигнала. Параллельно самому тиристоры подключена демпфирующая RC-цепь как в обычном тиристоре. В модели учитывается конечное время выключения тиристора. Процесс выключения состоит из двух участков: времени спада T_f (анодный ток уменьшается до 0,1 от тока в момент выключения) и времени затягивания T_t (анодный ток уменьшается до нуля). Эти составляющие дополнительно введены в окно настройки параметров GTO-тиристора: *Current 10% fall time* T_f (s) — время спада тока до уровня 0,1 от тока в момент выключения (с); *Current tail time* T_t (s) — время затягивания (с). Время, за которое ток уменьшится до нуля от уровня 0,1 тока в момент выключения.

Биполярный транзистор IGBT



Пиктограмма биполярного транзистора с изолированным затвором. На пиктограмме указан выходной порт блока, обозначенный m , для формирования векторного Simulink-сигнала из двух элементов — тока «коллектор-эмиттер» транзистора и напряжения «коллектор-эмиттер».

Назначение: моделирует биполярный транзистор с изолированным затвором.

Модель IGBT-транзистора состоит из резистора R_{on} , индуктивности L_{on} источника постоянного напряжения V_f и ключа SW, включенных последовательно (рис. 5а и 5б). Работой ключа управляет блок логики. Включение прибора происходит при положительном напряжении «коллектор-эмиттер», которое превышает V_f и на затвор g транзистора подан положительный сигнал. Выключение прибора происходит при уменьшении сигнала на затворе g до нуля. Транзистор находится в выключенном состоянии при отрицательном напряжении «коллектор-эмиттер». В модели параллельно самому прибору включена демпфирующая цепь из последовательно соединенных резистора и конденсатора. На рис. 5в показаны статические вольтамперные характеристики модели IGBT-транзистора для включенного и выключенного состояний.

В модели также учитывается инерционность выключающегося транзистора введением конечного времени выключения. Процесс выключения содержит два интервала: спада с длительностью T_f , в пределах которого ток «коллектор-эмиттер» уменьшается до 0,1 от тока в момент выключения (I_{max}), и затягивания с длительностью T_t , где ток уменьшается до нуля.

Окно установки параметров биполярного транзистора IGBT аналогично окну параметров полностью управляемого тиристора GTO и по этой причине не рассматривается.

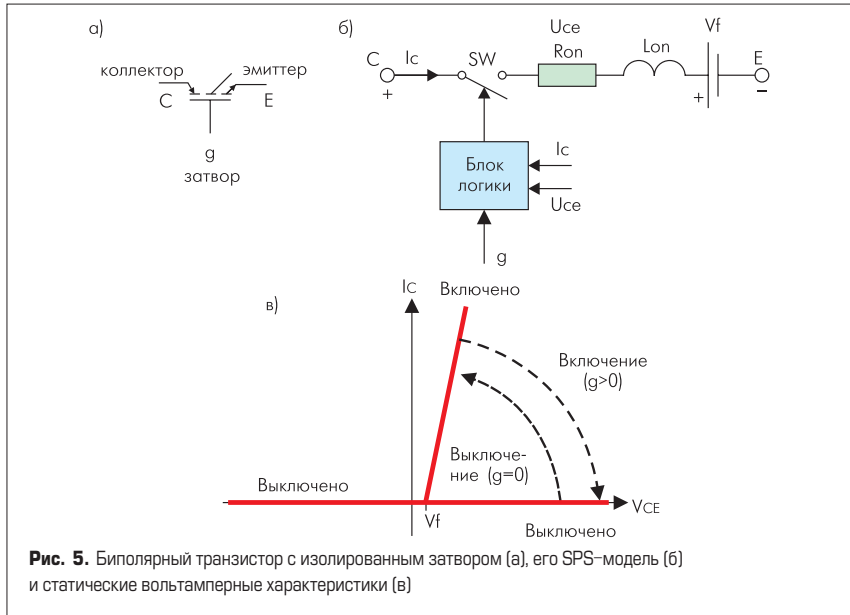
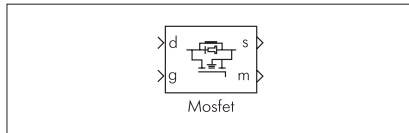


Рис. 5. Биполярный транзистор с изолированным затвором (а), его SPS-модель (б) и статические вольтамперные характеристики (в)

Силовой полевой транзистор MOSFET



Пиктограмма полевого транзистора.

Выходной порт блока m предназначен для формирования векторного Simulink-сигнала из двух составляющих — тока «сток-исток», напряжения «сток-исток» транзистора.

Назначение: моделирует силовой полевой транзистор с параллельно включенным обратным диодом.

Модель MOSFET-транзистора состоит из резистора R_{on} , индуктивности L_{on} и ключа SW, включенных последовательно (рис. 6а и 6б). Работой ключа управляет блок логики. Включение прибора происходит при положительном напряжении «сток-исток» транзистора находится в выключенном состоянии, а ток проходит через обратный диод. В модели параллельно самому прибору включена демпфирующая цепь из последовательно соединенных резистора и конденсатора. На рис. 6в представлены статические вольтамперные

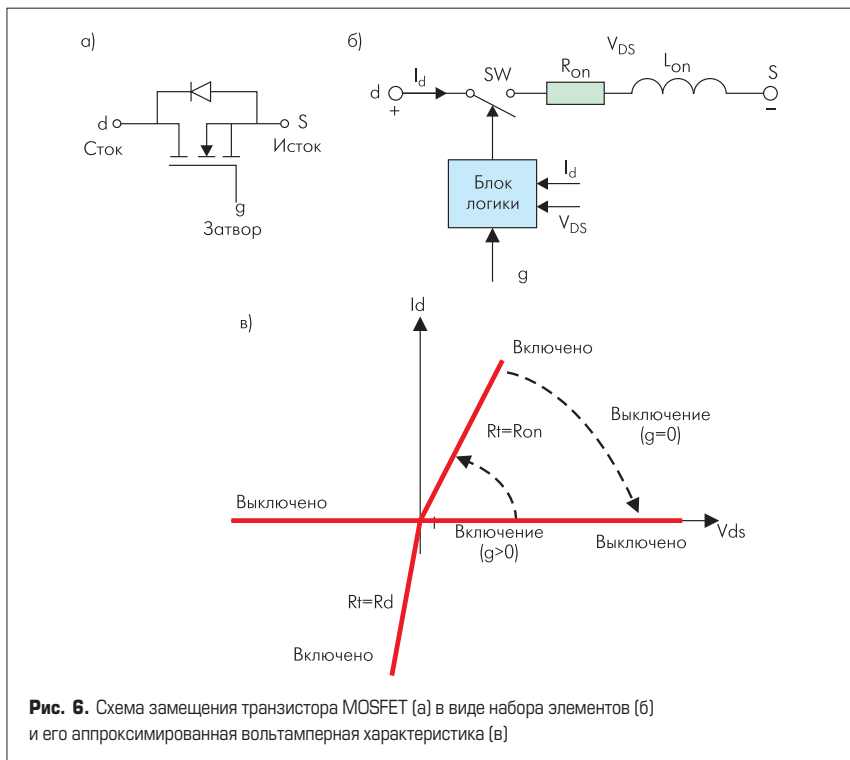
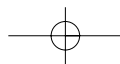
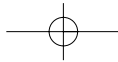


Рис. 6. Схема замещения транзистора MOSFET (а) в виде набора элементов (б) и его аппроксимированная вольтамперная характеристика (в)

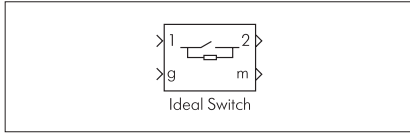




характеристики модели полевого транзистора MOSFET для включенного и выключенного состояний.

Окно установки параметров транзистора MOSFET аналогично окну параметров силового диода Diode и по этой причине не рассматривается.

Идеальный ключ Ideal Switch

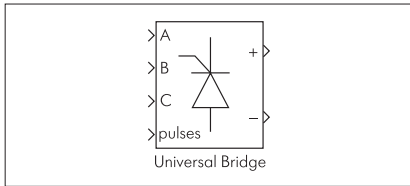


Пиктограмма идеального ключа.

Назначение: моделирует идеальный ключ.

Модель ключа состоит из резистора R_{on} и ключа SW, соединенных последовательно. Работой ключа управляет блок логики. Включение прибора происходит при единичном положительном сигнале ($g \geq 1$) на управляющем входе. Выключается прибор уменьшением сигнала на затворе до нуля ($g = 0$). В модели параллельно самому прибору включена демпфирующая цепь из резистора и конденсатора, соединенных последовательно. Окно установки параметров идеального ключа Ideal Switch не требует особых пояснений.

Универсальный мост Universal Bridge



Пиктограмма универсального моста.

Назначение: моделирует универсальный мост.

Модель позволяет выбирать количество плеч моста (от 1 до 3), вид полупроводниковых приборов (диоды, тиристоры, идеальные ключи, а также полностью управляемые тиристоры, IGBT- и MOSFET-транзисторы, шунтированные обратными диодами). В модели можно выбрать вид зажимов A, B и C (входные или выходные) (рис. 7а).

Окно задания параметров: параметры блока (рис. 7б).

Number of bridge arms — число плеч моста. Выбирается из списка: 1, 2 или 3.

Port configuration — конфигурация портов. Параметр задает зажимам порта статус входных или выходных зажимов. Значение параметра выбирается из списка:

- ABC as input terminals — зажимы A, B и C являются входными;
- ABC as output terminals — зажимы A, B и C являются выходными.

Snubber resistance R_s (Ohm) — сопротивление демпфирующей цепи (Ом).

Snubber capacitance C_s (F) — емкость демпфирующей цепи (Ф).

Power Electronic device — вид полупроводниковых устройств моста. Значение параметра выбирается из списка:

- Diodes — диоды;
- Thyristors — тиристоры;
- GTO/Diodes — полностью управляемые тиристоры, шунтированные обратными диодами;
- MOSFET/Diodes — MOSFET-транзисторы, шунтированные обратными диодами;
- IGBT/Diodes — IGBT-транзисторы, шунтированные обратными диодами;
- Ideal Switches — идеальные ключи.

Measurements — измеряемые переменные. Параметр для выбора передаваемых в блок Multimeter переменных, которые можно наблюдать с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None — нет переменных для отображения;
- Device voltages — напряжения на полупроводниковых устройствах;
- Device currents — токи полупроводниковых устройств;
- UAB UBC UCA UDC voltages — напряжения на зажимах моста;
- All voltages and currents — все напряжения и токи моста.

Отображаемым сигналам в блоке Multimeter присваиваются метки:

- Usw1, Usw2, Usw3, Usw4, Usw5, Usw6 — напряжения на ключах;
- Isw1, Isw2, Isw3, Isw4, Isw5, Isw6 — токи ключей;
- Uab, Ubc, Uca, Udc — напряжения на зажимах моста.

Кроме приведенных выше параметров в окне диалога задаются параметры для выбранных полупроводниковых приборов.

Рассмотрим несколько примеров.

Пример 3. Выполнить модель трехфазного выпрямителя с R-нагрузкой и измерить напряжение на нагрузке.

Исходные данные для модели: питающее переменное трехфазное напряжение 380 В с частотой переменного тока 50 Гц и фазовым сдвигом 90°; нагрузка сопротивлением 500 Ом.

Схема выпрямителя приведена на рис. 8а и содержит трехфазный источник питания 3-Phase Source (раздел Electrical Sources), универсальный выпрямительный мост Universal Bridge (раздел Power Electronics), сопротивление нагрузки R Series RLC Branch (раздел Elements), измеритель напряжения Voltage Measurement (раздел Measurements) и осциллограф Scope (раздел Sinks). Некоторая специфика настройки состоит в выборе параметров блока источника питания и блока выпрямительного моста. Задаются модельное время Stop time, равное 0,02, и максимальный шаг дискретизации Max step size (величина auto) в меню Simulation-Simulation parameters без особых сложностей.

Поскольку трехфазный источник питания используется нами впервые, приведем краткие сведения о настраиваемых параметрах.

Окно настройки параметров блока:

Phase-to-phase rms voltage (V) — действующее значение линейного напряжения;

Phase angle of phase A (deg) — начальная фаза напряжения в фазе А (град);

Frequency (Hz) — частота (Гц) переменного напряжения источника;

Internal connection — соединение фаз источника. Значение параметра выбирается из списка: Y — звезда; Yn — звезда с нулевым проводом; Yg — звезда с заземленной нейтралью.

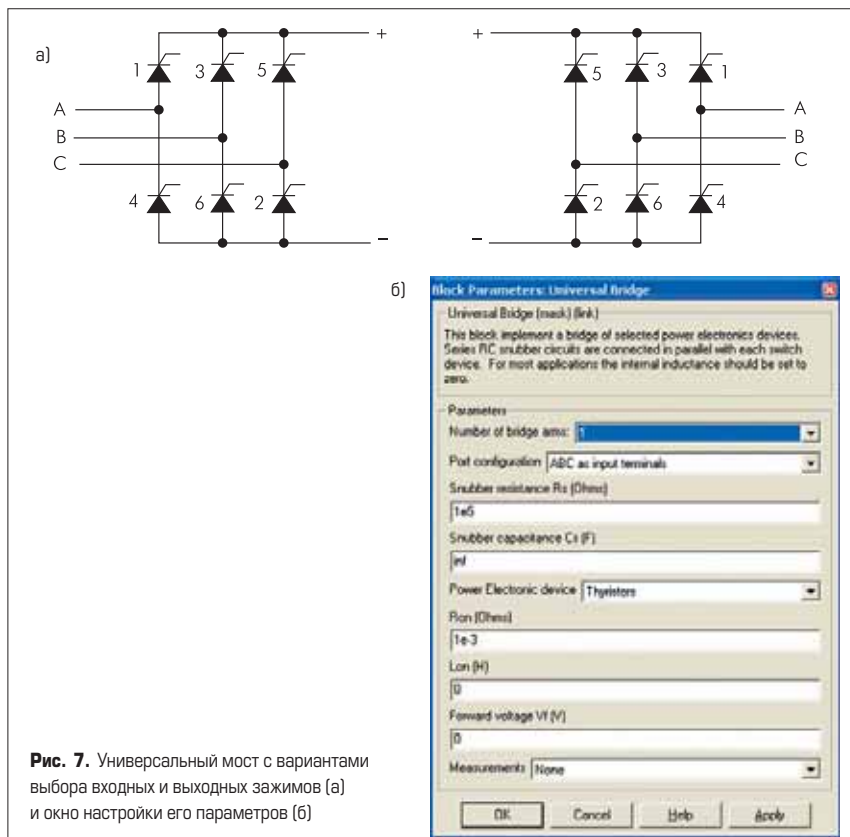
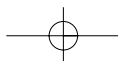


Рис. 7. Универсальный мост с вариантами выбора входных и выходных зажимов (а) и окно настройки его параметров (б)



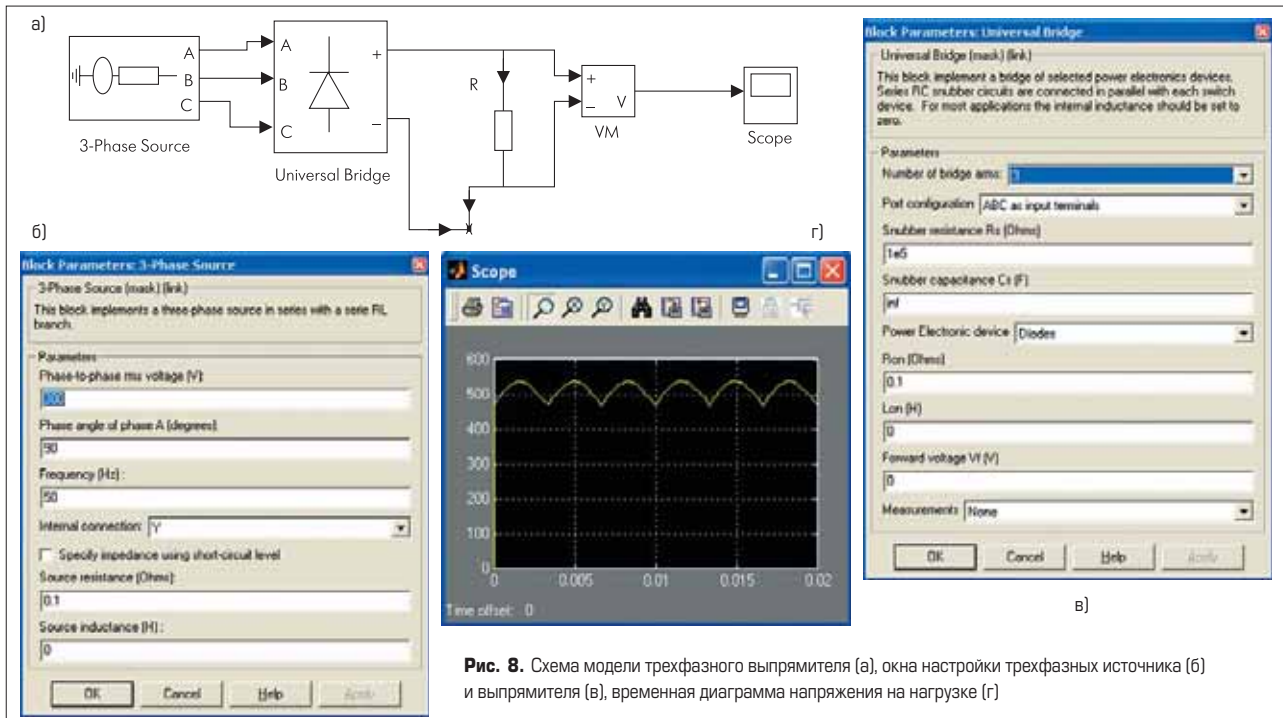
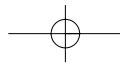


Рис. 8. Схема модели трехфазного выпрямителя (а), окна настройки трехфазных источника (б) и выпрямителя (в), временная диаграмма напряжения на нагрузке (г)

Specify impedance using short-circuit level — задание полного сопротивления источника с использованием параметров короткого замыкания. После установки этого параметра в окне диалога появляются дополнительные графы для ввода параметров короткого замыкания источника.

Source resistance (Ohms) — собственное сопротивление источника (Ом);

Source inductance (H) — собственная индуктивность источника (Гн);

3-Phase short-circuit level at base voltage (VA) — мощность короткого замыкания при базовом значении напряжения;

Base voltage (Vrms ph-ph) — действующее значение линейного базового напряжения. Величина базового линейного напряжения источника, с учетом которого определена мощность короткого замыкания;

X/R ratio — отношение индуктивного и реактивного сопротивлений;

При задании импеданса источника через мощность короткого замыкания реактивное сопротивление источника определяется по выражению:

$$X = U_{K3}^2 / Q_{K3}$$

где Q_{K3} — мощность короткого замыкания, U_{K3} — напряжение источника, при котором определена мощность короткого замыкания.

Активное сопротивление источника находится в соответствии с выражением:

$$R = X/k,$$

где k — отношение X к R (параметр X/R ratio).

Установленные параметры источника указаны на рис. 8б. Целесообразно попробовать изменять эти параметры и, запуская выполнение модели, наблюдать характер временных диаграмм процессов. Аналогично

устанавливаемые параметры универсального моста отражает рис. 8в. Выходное напряжение модели трехфазного выпрямителя с активной нагрузкой приведены на рис. 8г.

Пример 4. Выполнить модель понижающего однотактного преобразователя на IGBT-транзисторе с LC-сглаживающим фильтром и R-нагрузкой и измерить напряжение на нагрузке и токи в ключевых элементах.

Исходные данные для модели: питающее постоянное напряжение 12 В, выходное напряжение 6 В, сопротивление нагрузки 2 Ом, амплитуда переменной составляющей напряжения на нагрузке до 1% (60 мВ), частота работы ключа (частота преобразования) 100 Гц.

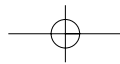
Модель преобразователя (рис. 9а) содержит источник питания **DC Voltage** с напряжением 12 В, генератор прямоугольных импульсов **Pulse Generator**, подключенный к затвору g транзистора, LC-фильтр, причем между индуктивностью и транзистором имеется **T-connector**, к которому подсоединен обратный диод **Diode**. Для наблюдения через порты m за токами транзистора и диода используются демультимплексоры **Demux** (информация о токе ключа снимается с верхнего порта, а нижний порт остается свободным) и осциллограф **Scope** с двумя входами. Второй осциллограф **Scope1** применяется для получения временной диаграммы выходного напряжения.

Работа преобразователя происходит следующим образом. При включении транзистора питающее напряжение подается на вход сглаживающего фильтра, элементы которого запасают энергию, причем ток в индуктивности нарастает по линейному закону. После отключения транзистора напряжение на индуктивности L изменяет полярность, а ток сохраняет свое направление, что вызывает включение обратного диода, образующего цепь для протекания тока индуктивности через нагрузку R . У импульсного напряжения, поступающего

на фильтр, при сглаживании выделяется среднее значение на нагрузке, зависящее от соотношения времени открытого состояния транзистора и периода коммутации (коэффициента заполнения импульсов или их относительной длительности). За счет регулирования коэффициента заполнения импульсов осуществляется стабилизация выходного напряжения при воздействии возмущающих факторов — питающего напряжения и тока нагрузки.

Для настройки модели в окнах параметров блоков следует установить величину питающего напряжения 12 В источника **DC Voltage**, параметры транзисторного ключа **IGBT** (рис. 9б), генератора прямоугольных импульсов (рис. 9в, период 0,01 с и длительность импульса 60%, то есть 0,006 с), сопротивление нагрузки 2 Ом. Параметры сглаживающего LC-фильтра выбраны с учетом требований к уровню переменной составляющей напряжения на нагрузке. Остальные настройки уже выполнялись и не должны вызвать затруднений. Отметим лишь, что время моделирования задано 0,3 с, а максимальный шаг — 0,0002 с.

После запуска модели получается временная диаграмма выходного напряжения, занимающая только часть окна (рис. 9г). Это обусловлено ограничением количества запоминаемых точек расчета в настройках осциллографа. Для того чтобы снять указанное ограничение, надо в окне **Scope1** через кнопку **Parameters** (рис. 2в) войти в дополнительное окно **Scope parameters** с закладкой **Data history** и убрать флажок в строчке **Limit date points to last**. Повторный запуск модели дает удовлетворительные временные диаграммы напряжения на нагрузке (рис. 9д) и токов транзисторного и диодного ключей (рис. 9е). Выбранные значения параметров индуктивности $L = 0,015$ Гн и емкости



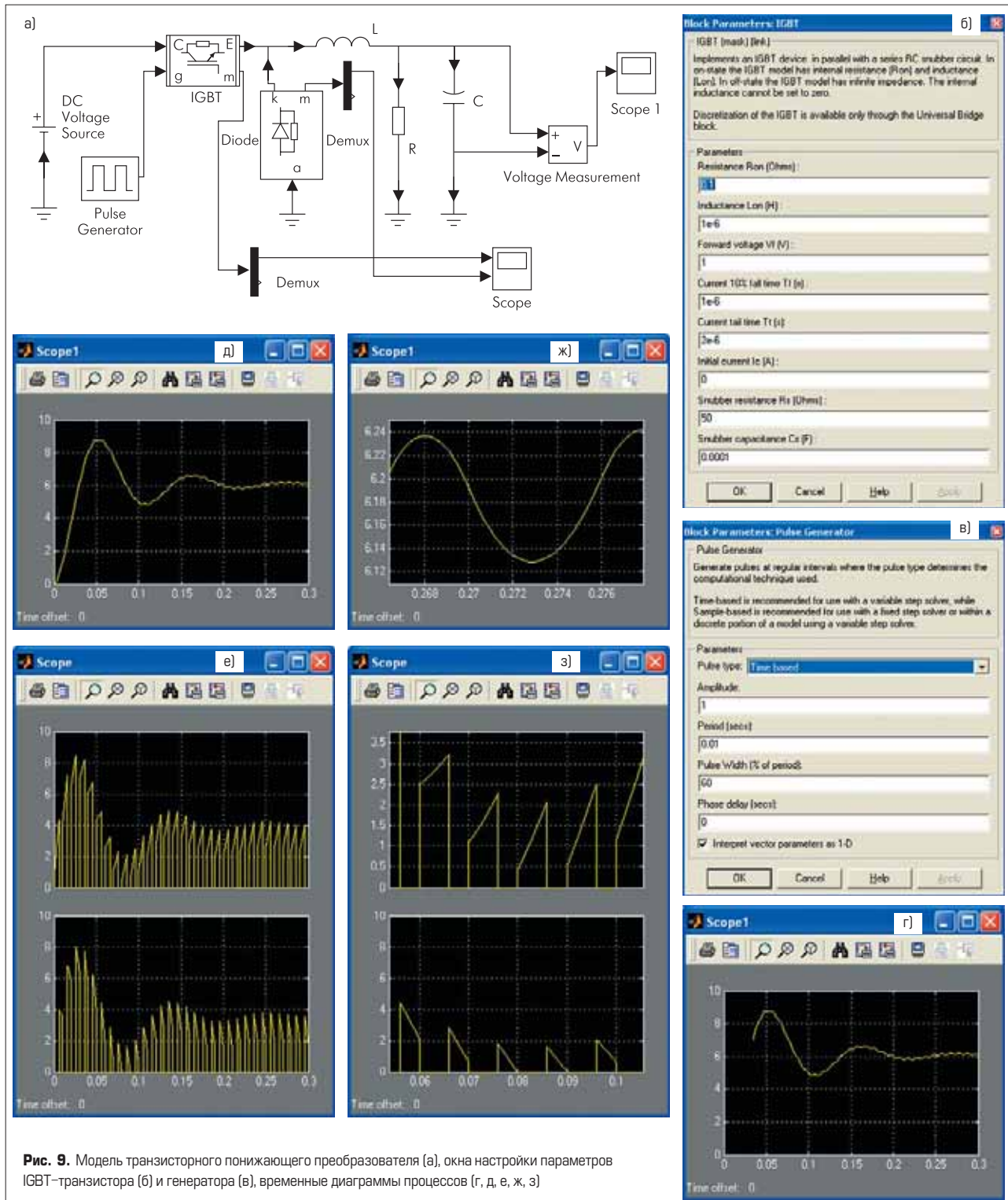
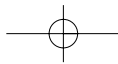
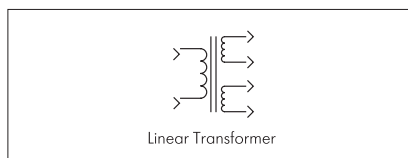


Рис. 9. Модель транзисторного понижающего преобразователя (а), окна настройки параметров IGBT-транзистора (б) и генератора (в), временные диаграммы процессов (г, д, е, ж, з)

$C = 0,02 \text{ Ф}$ обеспечили требуемую величину пульсаций выходного напряжения с размахом около 0,12 В (рис. 9ж) при относительно небольших амплитудах пилообразной составляющей тока транзисторного и диодного ключей (рис. 9з), определяемых индуктивностью L . Два последних рисунка получены за счет выделения с помощью динамической рамки и увеличения части анализируемых временных диаграмм напряжения (рис. 9д) и токов (рис. 9е).

Линейный трансформатор Linear Transformer

Пиктограмма линейного трансформатора.

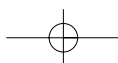


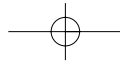
Назначение: моделирует линейный трансформатор.

Модель трех- или двухобмоточного однофазного трансформатора без учета нелинейности характеристики намагничивания материала сердечника. Схема замещения трансформатора показана на рис. 10а.

Окно установки параметров:

Nominal power and frequency [$P_n(\text{VA}) f_n(\text{Hz})$] — номинальная полная мощность (В·А) и номинальная частота (Гц);





Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)] — параметры первичной обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (pu — относительные единицы) и индуктивность рассеяния (pu — о. е.) обмотки;

Winding 2 parameters — параметры вторичной обмотки (действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление pu и индуктивность рассеяния pu обмотки);

Three windings transformer — трехобмоточный трансформатор. При установленном флажке трансформатор имеет две вторичные обмотки, а если флажок снят, то одну;

Winding 3 parameters — параметры третьей обмотки (действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (pu) и индуктивность рассеяния (pu) обмотки);

Magnetization resistance and reactance [Rm(pu) Lm(pu)] — сопротивление (pu) и индуктивность цепи намагничивания (pu);

Measurements — измеряемые переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- *Winding voltages* — напряжения обмоток;
- *Winding currents* — токи обмоток;
- *Magnetization current* — ток намагничивания;
- *All voltages and currents* — все напряжения и токи.

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также цепи намагничивания задаются в относительных единицах. Для каждой обмотки относительные значения сопротивления и индуктивности вычисляются из выражений:

$$R^* = R/R_6,$$

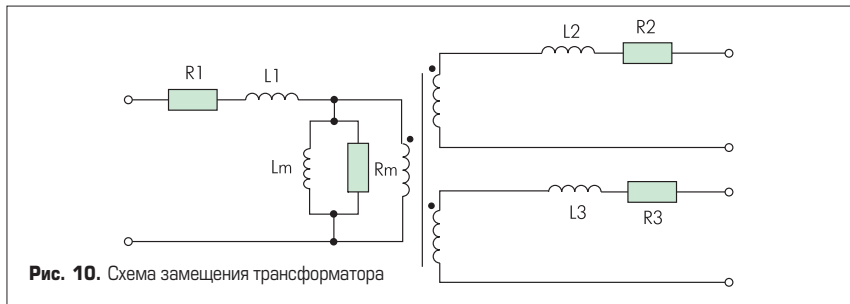


Рис. 10. Схема замещения трансформатора

$$L^* = L/L_6,$$

где R^* и L^* — относительные значения сопротивления и индуктивности; R и L — абсолютные значения сопротивления и индуктивности; $R_6 = U_n^2/P_M$ — базисное сопротивление; $L_6 = R_6/(2\pi f_n)$ — базисная индуктивность; U_n — номинальное напряжение обмотки; f_n — номинальная частота переменного тока.

Расчитанные относительные параметры обмоток оказываются одинаковыми.

Параметры цепи намагничивания можно найти через величину тока намагничивания, задаваемую в процентах от номинального тока. Так, при токе намагничивания, равном 0,2%, сопротивление и индуктивность цепи намагничивания будут равны $1/0,002 = 500$ pu (о. е.).

Пример 5. Выполнить модель двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой у трансформатора и емкостным фильтром и измерить напряжение на нагрузке, а также ток и напряжение на диоде.

Исходные данные для модели: питающее переменное напряжение 220 В с частотой 50 Гц, выходное напряжение 40–45 В, сопротивление

нагрузки 25 Ом, амплитуда переменной составляющей напряжения на нагрузке до 15% (7 В).

Модель выпрямителя (рис.11а) содержит источник питания **AC Voltage** с напряжением 220 В, линейный трансформатор **Linear Transformer** (окно настройки его параметров приведено на рис.11б), два диода **Diode**, С-фильтр, подключенный параллельно нагрузке R . Для наблюдения через порт m за током и напряжением на диоде используется демультиплексор **Demux** и осциллограф **Scope1** с двумя входами. Другой осциллограф **Scope** применяется для получения временной диаграммы выходного напряжения.

Для настройки модели в окнах параметров блоков следует установить величину 220 В и частоту 50 Гц питающего напряжения источника AC Voltage, параметры трансформатора (рис. 11б), сопротивление нагрузки 25 Ом, емкость фильтра 0,001 Ф. Отметим, что время моделирования задано 0,05 с, а максимальный шаг — 0,0002 с. Временные диаграммы напряжения на фильтре и тока и напряжения на диоде представлены на рис. 11в и рис. 11г соответственно.

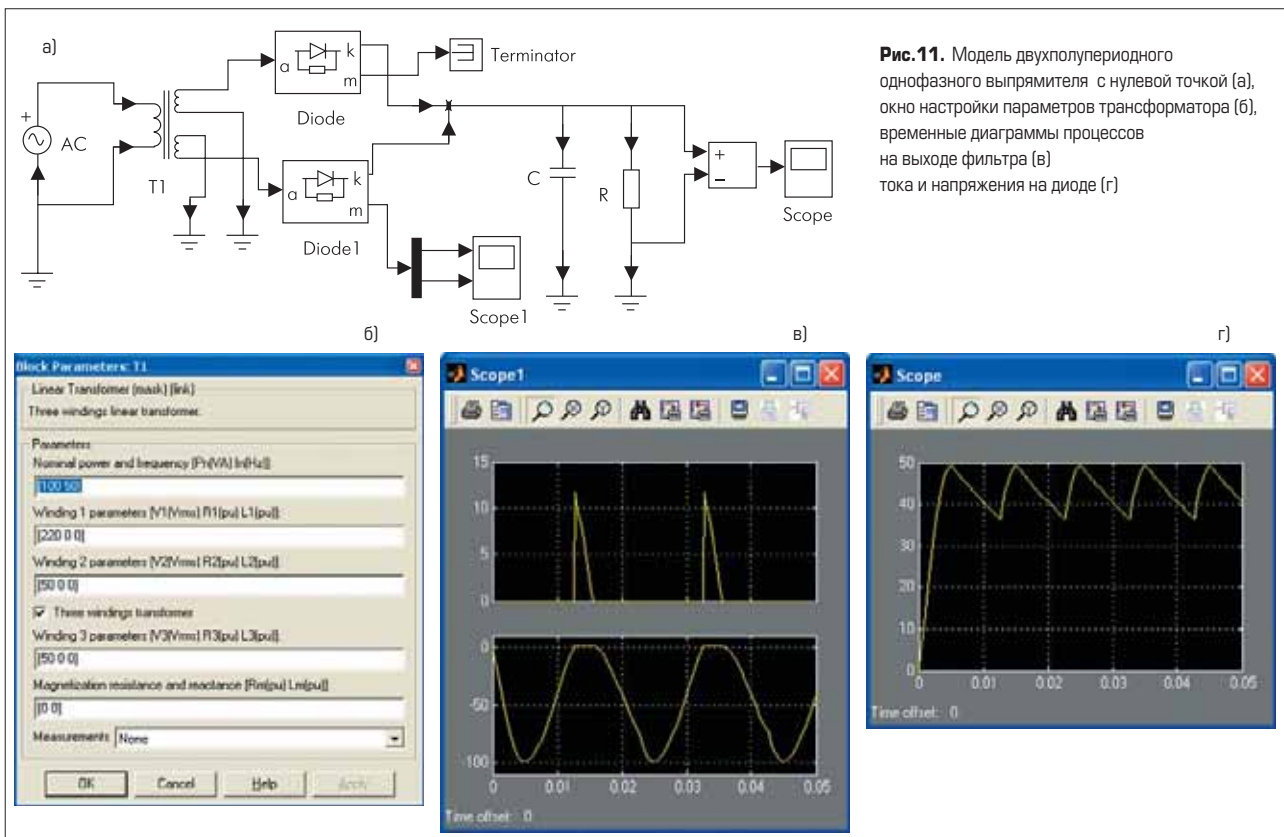
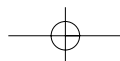
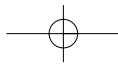


Рис. 11. Модель двухполупериодного однофазного выпрямителя с нулевой точкой (а), окно настройки параметров трансформатора (б), временные диаграммы процессов на выходе фильтра (в) тока и напряжения на диоде (г)





В командном окне появится надпись:

SimPowerSystems processing Viprem_Transformator ...
 Computing state-space representation of linear electrical circuit ...
 (3 states ; 5 inputs ; 3 outputs ; 2 switches)
 Computing steady-state values of currents and voltages ...
 Build the Simulink equivalent circuit ...
 (Circuit stored inside «Viprem_Transformator/Voltage Measurement1»
 block)
 Ready.

Программа SimPowerSystems включила Viprem_Transformator ...

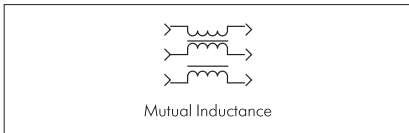
Расчет в представлении переменных состояния для линейной электрической цепи...

(3 переменные, 5 входов, 3 выхода, 2 ключа)
 Расчет величин переменных состояния для тока и напряжения...

Использованы уравнения цепи в Simulink...
 (Цепь Viprem_Transformator снабжена внутренним блоком Voltage Measurement)

Готово.

**Взаимная индуктивность
 Mutual Inductance**



Пиктограмма взаимной индуктивности.

Назначение: моделирует катушки или проводники, имеющие магнитную связь (рис. 12).

Окно задания параметров:

Winding 1 self impedance [R1(Ohm) L1(H)] — собственное сопротивление и индуктивность первой обмотки;

Three windings Mutual Inductance — трехобмоточная взаимная индуктивность. При снятом флажке из модели убирается третья обмотка;

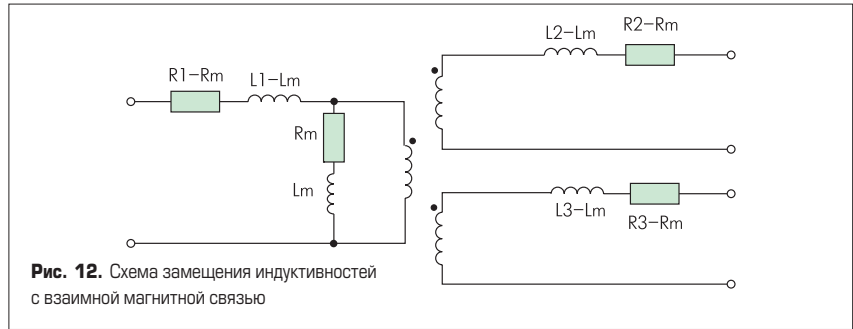


Рис. 12. Схема замещения индуктивностей с взаимной магнитной связью

Winding 2 self impedance [R2(Ohm) L2(H)] — собственное сопротивление и индуктивность второй обмотки;

Winding 3 self impedance [R3(Ohm) L3(H)] — собственное сопротивление и индуктивность третьей обмотки;

Mutual impedance [Rm(Ohm) Lm(H)] — взаимное сопротивление и индуктивность обмоток;

Measurements — измеряемые переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- None — нет переменных для отображения;
- Winding voltages — напряжения обмоток;
- Winding currents — токи обмоток;
- Winding voltages and currents — напряжения и токи обмоток.

Задаваемые параметры обмоток должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$R1, R2, R3 \neq R_m$$

$$L1, L2, L3 \neq L_m$$

При моделировании схем с использованием взаимной индуктивности (так же, как и трансформаторов) следует иметь в виду,

что несмотря на отсутствие видимой потенциальной связи между обмотками, такая связь (через резистор) все же имеется. Она необходима для расчета потенциалов в узлах всей схемы. Наличие такой связи не оказывает влияния на измеряемые токи и напряжения обмоток взаимной индуктивности.

Пример 6. Выполнить модель цепи, содержащей индуктивности с взаимной магнитной связью при активно-индуктивной нагрузке и измерить напряжение на обмотках Mutual Inductance.

Исходные данные для модели: два возбуждающих напряжения 10 В с частотой 50 Гц и 5 В с частотой 150 Гц, у нагрузки сопротивление 3 Ом и индуктивность 1,2 мГн.

Схема соединения основных блоков в модели приведена на рис. 13а.

Основная особенность схемы состоит в использовании вместо осциллографа измерительного прибора Multimeter (раздел Measurements). Рядом с пиктограммами источников синусоидальных сигналов AC Voltage проставлены значения напряжения и частоты 5 В, 150 Гц — у первого и 10 В, 50 Гц —

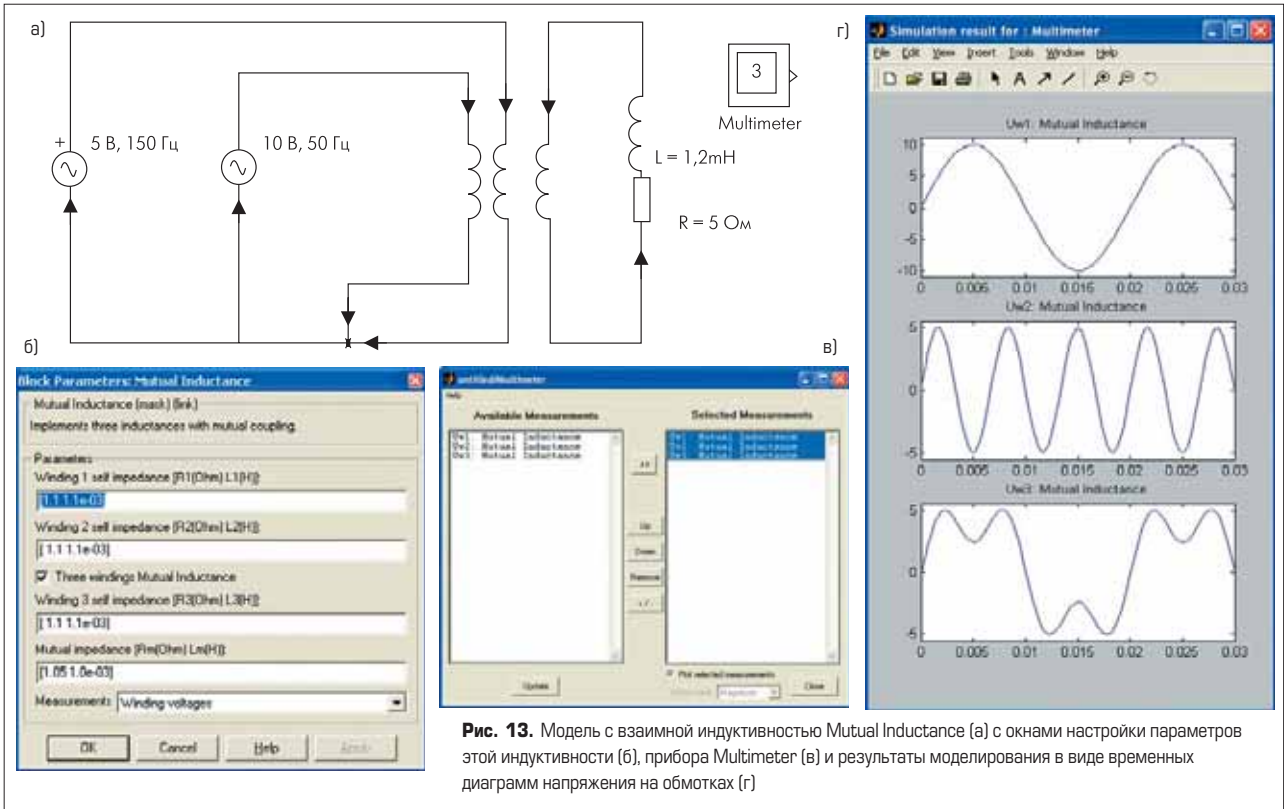
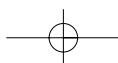
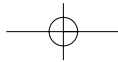


Рис. 13. Модель с взаимной индуктивностью Mutual Inductance (а) с окнами настройки параметров этой индуктивности (б), прибора Multimeter (в) и результаты моделирования в виде временных диаграмм напряжения на обмотках (г)

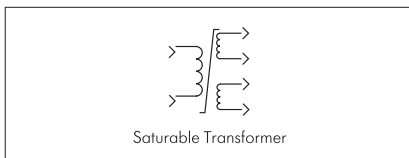




у второго. Эти надписи выполняются так: курсор устанавливают на саму надпись щелчком левой кнопки мыши ее активируют, после чего можно вносить исправления и изменения. Надписи несут только визуальную информацию и не влияют на результаты настройки источников, которая не должна вызывать затруднений.

Параметры индуктивности устанавливаются в окне (рис. 13б). Основное требование при установке указано выше и оговаривает соотношение сопротивлений и индуктивностей. Также отметим, что в нижнем текстовом окне с выпадающим меню выбран измеряемый параметр — напряжения обмоток *Winding voltages*, необходимый для применения прибора **Multimeter**. Настройка мультиметра в соответствии с рекомендациями из урока 2 выполняется в окне диалога (рис. 13в). В левой части окна имеются три переменные — напряжения на обмотках U_{w1} , U_{w2} , U_{w3} , которые выбраны при настройке параметров индуктивностей и могут быть измерены мультиметром. Все эти напряжения по очереди были активированы и с помощью клавиши >>> добавлены в правый список, что и видно на рассматриваемом рисунке. Все три переменные выделены и за счет включения команды **Plot selected Measurements** (диаграммы выделенных параметров) в нижней части окна будут изображены на рисунках вместо осциллограмм. После запуска модели получают три временные диаграммы на одном рисунке (рис. 13г), на которых видно, что из двух возбуждающих сигналов с разными амплитудами и частотами получается третий суммарный сигнал сложной формы.

Нелинейный трансформатор Saturable Transformer



Пиктограмма нелинейного трансформатора.

Назначение: моделирует трех- или двухобмоточный однофазный трансформатор с учетом нелинейности характеристики намагничивания материала сердечника. Схема замещения трансформатора показана на рис. 14а.

В модели сопротивление цепи намагничивания R_m учитывает активные потери в сердечнике, а нелинейная индуктивность L_{sat} — насыщение сердечника трансформатора. Нелинейная характеристика в модели задается как кусочно-линейная зависимость между магнитным потоком сердечника и током намагничивания (рис. 15а). В модели имеется возможность задать остаточный магнитный поток в сердечнике. В этом случае вторая точка нелинейной характеристики должна соответствовать нулевому току (рис. 15б).

Окно настройки параметров:

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] — номинальная полная мощность (В·А) и номинальная частота (Гц);

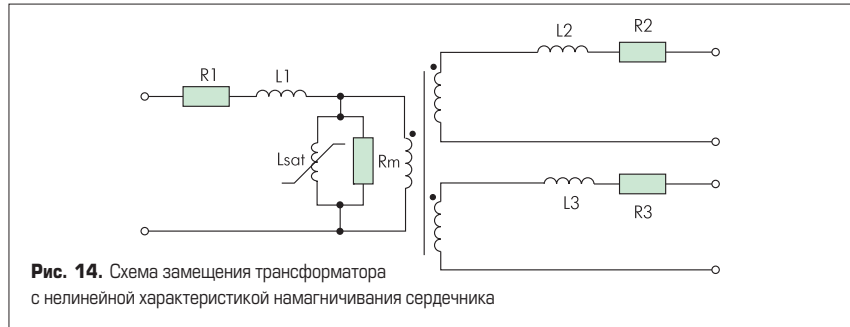


Рис. 14. Схема замещения трансформатора с нелинейной характеристикой намагничивания сердечника

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)] — параметры первичной обмотки. Действующее значение напряжения (В), активное сопротивление (о. е.) и индуктивность рассеяния (о. е.) первичной обмотки;

Winding 2 parameters — параметры вторичной обмотки. Действующее значение напряжения (В), активное сопротивление (о. е.) и индуктивность рассеяния (о. е.) вторичной обмотки;

Three windings transformer — трансформатор с тремя обмотками. При установленном флажке трансформатор имеет две вторичные обмотки, а при снятом флажке — одну;

Winding 3 parameters — параметры третьей обмотки. Действующее значение напряжения (В), активное сопротивление (о. е.) и индуктивность рассеяния (о. е.) третьей обмотки;

Saturation characteristic [i1(pu) phi1(pu); i2 phi2; ...] — характеристика насыщения сердечника;

Core loss resistance and initial flux [Rm(pu) phi(pu)] or [Rm(pu)] only — сопротивление цепи намагничивания (о. е.) и остаточный поток (о. е.) или только сопротивление цепи намагничивания (о. е.);

Simulate hysteresis — моделирование гистерезиса. При установленном флажке в характеристике намагничивания учитывается гистерезис;

Hysteresis Data Mat file — имя файла данных, содержащего гистерезисную характеристику. Файл данных может быть создан с помощью блока Powergui;

Measurements — измеряемые переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- *Winding voltages* — напряжения обмоток;
- *Winding currents* — токи обмоток;
- *Flux and excitation current [Imag IRm]* — поток и ток холостого хода;

- *Flux and magnetization current (Imag)* — поток и ток намагничивания;
- *All Measurements (V, I, Flux)* — все измеряемые напряжения, токи и поток.

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также сопротивления цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели линейного трансформатора.

Характеристика намагничивания задается парами значений намагничивающего тока и потока в относительных единицах, начиная с точки (0, 0). Относительные значения тока и потока определяются из выражений:

$$I^* = I/I_{\phi}, \\ \Phi^* = \Phi/\Phi_{\phi}$$

где I^* и Φ^* — относительные значения тока и потока, I и Φ — абсолютные значения тока и потока, $I_{\phi} = 2^{0.5} \times P_n/U_1$ — базисный ток, $\Phi_{\phi} = 2^{0.5} \times U_1/(2 f_n)$ — базисный поток, P_n — номинальная мощность первичной обмотки; U_1 — номинальное напряжение первичной обмотки, f_n — номинальная частота.

Пример 7. Выполнить модель трансформатора с нелинейной характеристикой намагничивания сердечника, работающего на активную нагрузку, и измерить напряжение на вторичной обмотке и ток первичной обмотки.

Исходные данные для модели: напряжение питания 220 В с частотой 50 Гц, напряжение на вторичной обмотке 36 В, нагрузка 5 Ом.

В схеме соединения блоков модели (рис. 16а) все блоки, кроме трансформатора **Saturable Transformer**, нам известны. В окне настройки параметров **Saturable Transformer** (рис. 16б) заданы данные в виде координат четырех точек характеристики насыщения

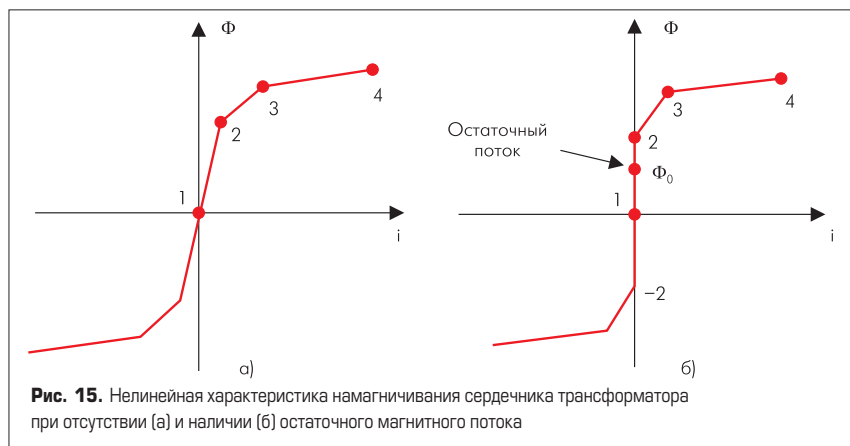
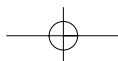
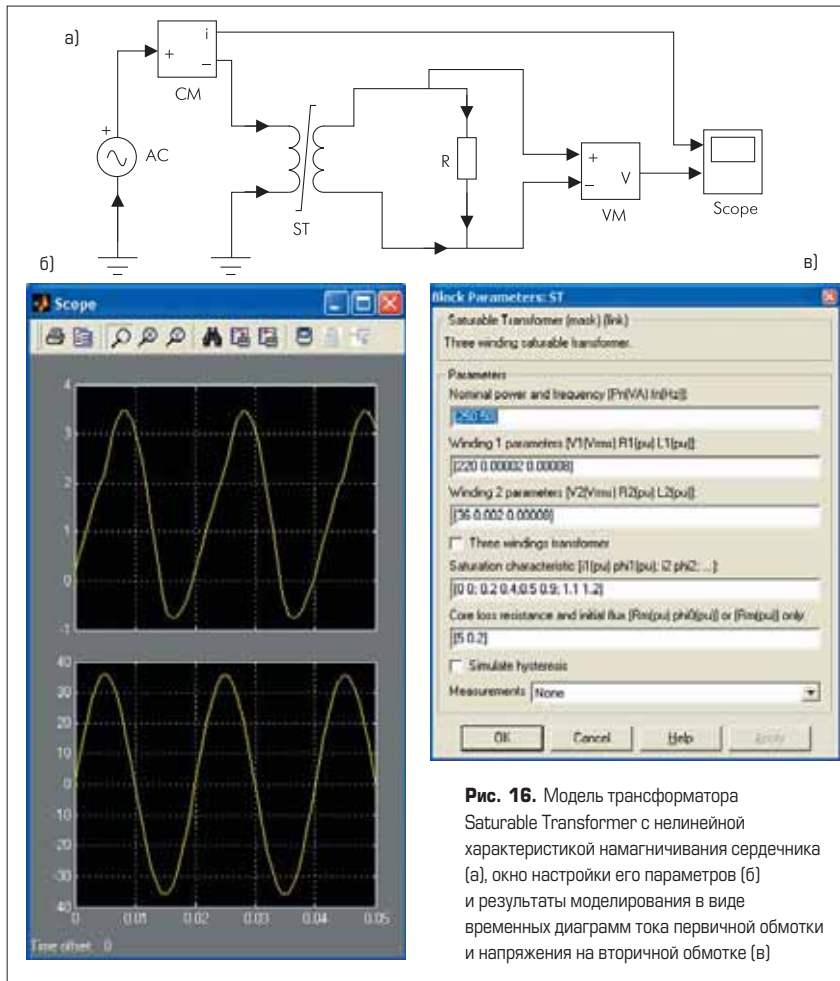
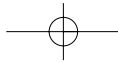


Рис. 15. Нелинейная характеристика намагничивания сердечника трансформатора при отсутствии [а] и наличии [б] остаточного магнитного потока





сердечника: для относительного тока и относительного потока — [0 0; 0.2 0.4; 0.5 0.9; 1.1 1.2]. Временные диаграммы входного тока трансформатора и напряжения на нагрузке приведены на рис. 16в.

Подведем итоги урока 3.

1. Для построения SPS-моделей устройств силовой электроники следует применять виртуальные модели основных видов ключевых полупроводниковых элементов — диодов, тиристоров и транзисторов.
2. В виртуальные модели полупроводниковых ключей введены элементы, позволяющие учесть их инерционные свойства при выключении, и специальные демпфирующие цепочки для снижения колебательных составляющих в кривых процессов переключения.
3. Для наблюдения характера изменения тока и напряжения на полупроводниковом ключе введен специальный информационный порт для подключения осциллографа.
4. В виртуальных моделях трансформаторов используются элементы схемы замещения, содержащие сопротивления проводников обмоток и индуктивности рассеяния, а также имеется возможность учесть нелинейную характеристику насыщения сердечника магнитопровода.
5. Модели выпрямителей и инверторов целесообразно создавать на базе универсального моста, содержащего различные варианты ключей — диоды, тиристоры, идеальные ключи, а также полностью управляемые тиристоры, IGBT- и MOSFET-транзисторы, шунтированные обратными диодами. При этом число плеч моста выбирается от 1 до 3.

