

Черных И. В.

# Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystems и Simulink



Москва, 2008

УДК 004.438  
ББК 32.973.26-018.2  
Ч45

**Черных И. В.**

**Ч45** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с., ил. (Серия «Проектирование»).

**ISBN 5-94074-395-1** («ДМК Пресс»)

**ISBN 978-5-388-00020-0** («Питер»)

В книге содержится описание прикладной программы Simulink и библиотеки блоков SimPowerSystems, предназначенной для моделирования электротехнических устройств и систем. Рассматривается методика создания моделей с помощью графического интерфейса программы, дается описание базовой библиотеки блоков SimPowerSystems, описаны методы расчета моделей. Подробно изложена методика создания электротехнических блоков пользователя. Даны основные команды для управления моделью из ядра пакета MATLAB. Рассмотрен механизм выполнения расчета модели. Даны советы автора по применению программы.

В издании дано большое количество примеров, поясняющих работу блоков и методику создания модели.

Книга предназначена для инженеров, научных работников, аспирантов и студентов, занимающихся моделированием в области электротехники.

Черных Илья Викторович

## **Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystems и Simulink**

Главный редактор *Мовчан Д. А.*

*dm@dmk-press.ru*

Корректор *Синяева Г. И.*

Верстка *Чаннова А. А.*

Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Подписано в печать 10.09.2007. Формат 70×100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Гарнитура «Петербург». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 27. Тираж 2000 экз.

№

Издательство ДМК Пресс

Web-сайт издательства: [www.dmk-press.ru](http://www.dmk-press.ru)

Internet-магазин: [www.abook.ru](http://www.abook.ru)

ISBN 5-94074-395-1  
ISBN 978-5-388-00020-0

© Черных И. В., 2007  
© Оформление ДМК Пресс, 2007

# Краткое содержание

|  |     |
|--|-----|
| <b>Введение</b> .....  | 10  |
| <b>Глава 1</b><br><b>ОПЕРАЦИОННАЯ СРЕДА SIMULINK</b> .....   | 11  |
| <b>Глава 2</b><br><b>ОБЗОР ОСНОВНОЙ БИБЛИОТЕКИ SIMULINK</b> .....                                    | 27  |
| <b>Глава 3</b><br><b>БИБЛИОТЕКА БЛОКОВ SIMPOWERSYSTEMS</b> .....                                     | 35  |
| <b>Глава 4</b><br><b>ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ</b><br><b>POWERGUI</b> .....                 | 215 |
| <b>Глава 5</b><br><b>СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ БЛОКОВ</b><br><b>ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ</b> .....             | 238 |
| <b>Глава 6</b><br><b>БИБЛИОТЕКА НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ</b> .....   | 248 |
| <b>Глава 7</b><br><b>ОСНОВНЫЕ КОМАНДЫ МАТЛАВ</b><br><b>ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ SPS-МОДЕЛЬЮ</b> .....          | 252 |
| <b>Глава 8</b><br><b>КАК SIMPOWERSYSTEMS РАБОТАЕТ</b> .....  | 260 |
| <b>Глава 9</b><br><b>СОВЕТЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМ SIMPOWERSYSTEMS</b> ....                                   | 266 |
| <b>Приложение 1</b><br><b>СИСТЕМА МЕНЮ ОБОЗРЕВАТЕЛЯ</b><br><b>БИБЛИОТЕК ПРОГРАММЫ SIMULINK</b> ..... | 280 |
| <b>Приложение 2</b><br><b>СИСТЕМА МЕНЮ ОКНА МОДЕЛИ</b> .....   | 281 |
| <b>Литература</b> .....  | 286 |
| <b>Предметный указатель</b> .....  | 287 |

# Содержание

|   |    |
|---|----|
| <b>Введение</b> .....   | 10 |
| <b>Глава 1. Операционная среда Simulink</b> .....                 | 11 |
| 1.1. Запуск системы .....   | 12 |
| 1.2. Обзор библиотеки блоков Simulink .....                       | 12 |
| 1.3. Создание модели .....  | 15 |
| 1.4. Основные элементы окна модели .....                          | 17 |
| 1.5. Основные приемы подготовки и редактирования<br>модели .....  | 20 |
| Добавление текстовых надписей .....                               | 20 |
| Выделение объектов .....  | 20 |
| Копирование и перемещение объектов в буфер хранения .....         | 21 |
| Вставка объектов из буфера хранения .....                         | 21 |
| Удаление объектов .....   | 21 |
| Соединение блоков .....   | 21 |
| Изменение размеров блоков .....                                   | 22 |
| Перемещение блоков и вставка блоков в соединение .....            | 23 |
| Использование команд Undo и Redo .....                            | 23 |
| Форматирование объектов .....                                     | 23 |
| 1.6. Установка параметров моделирования<br>и его выполнение ..... | 24 |
| Установка параметров расчета модели .....                         | 25 |
| Выполнение расчета .....  | 26 |
| Завершение работы .....   | 26 |
| <b>Глава 2. Обзор основной библиотеки Simulink</b> .....          | 27 |
| 2.1. Источники сигналов Sources .....                             | 28 |
| 2.2. Приемники сигналов Sinks .....                               | 28 |
| 2.3. Блоки непрерывных моделей Continuous .....                   | 28 |
| 2.4. Блоки дискретных моделей Discrete .....                      | 29 |
| 2.5. Нелинейные блоки Discontinuities .....                       | 29 |
| 2.6. Блоки математических операций Math Operations .....          | 30 |
| 2.7. Блоки маршрутизации сигналов Signal&Routing .....            | 31 |
| 2.8. Блоки определения свойств сигналов Signal Attributes .....   | 31 |
| 2.9. Блоки задания таблиц Look-Up Tables .....                    | 32 |

---

|   |           |
|---|-----------|
| 2.10. Функции, определяемые пользователем User-defined Function .....                           | 32        |
| 2.11. Порты и подсистемы Ports & Subsystems .....   | 32        |
| 2.12. Блоки верификации сигналов Model Verification .....                                       | 33        |
| 2.13. Библиотека дополнительных утилит Model-Wide Utilities ...                                 | 33        |
| 2.14. Блоки логических операций Logic and Bit Operations .....                                  | 33        |
| 2.15. Часто используемые блоки Commonly Used Blocks .....                                       | 34        |
| 2.16. Дополнительные математические и дискретные блоки Additional Math & Discrete .....         | 34        |
| <b>Глава 3. Библиотека блоков SimPowerSystems ...</b>   | <b>35</b> |
| 3.1. Состав библиотеки и основные особенности .....   | 36        |
| 3.1.1. Состав библиотеки .....  | 36        |
| 3.1.2. Основные особенности .....   | 37        |
| 3.1.3. Единицы измерения электрических и неэлектрических величин .....                          | 39        |
| 3.1.4. Повышение скорости и точности расчетов .....   | 44        |
| 3.2. Источники электрической энергии Electrical Sources .....                                   | 47        |
| 3.2.1. Идеальный источник постоянного напряжения DC Voltage Source .....                        | 47        |
| 3.2.2. Идеальный источник переменного напряжения AC Voltage Source .....                        | 48        |
| 3.2.3. Идеальный источник переменного тока AC Current Source .....                              | 50        |
| 3.2.4. Управляемый источник напряжения Controlled Voltage Source .....                          | 52        |
| 3.2.5. Управляемый источник тока Controlled Current Source ...                                  | 54        |
| 3.2.6. Трехфазный источник напряжения 3-Phase Source .....                                      | 56        |
| 3.2.7. Трехфазный программируемый источник напряжения 3-Phase Programmable Voltage Source ..... | 58        |
| 3.3. Измерительные и контрольные устройства .....   | 61        |
| 3.3.1. Измеритель тока Current Measurement .....  | 61        |
| 3.3.2. Измеритель напряжения Voltage Measurement .....  | 63        |
| 3.3.3. Мультиметр Multimeter .....  | 65        |
| 3.3.4. Трехфазный измеритель Three-Phase V-I Measurement .....                                  | 68        |
| 3.3.5. Измеритель полного сопротивления Impedance Measurement .....                             | 71        |

|   |     |
|---|-----|
| 3.4. Электротехнические элементы Elements .....   | 73  |
| 3.4.1. Последовательная RLC-цепь Series RLC Branch .....  | 73  |
| 3.4.2. Параллельная RLC-цепь Parallel RLC Branch .....  | 75  |
| 3.4.3. Последовательная RLC-нагрузка Series RLC Load .....  | 77  |
| 3.4.4. Параллельная RLC-нагрузка Parallel RLC Load .....  | 80  |
| 3.4.5. Трехфазная последовательная RLC-цепь 3-Phase<br>Series RLC Branch .....                              | 82  |
| 3.4.6. Трехфазная параллельная RLC-цепь 3-Phase Parallel<br>RLC Branch .....                                | 84  |
| 3.4.7. Трехфазная последовательная RLC-нагрузка 3-Phase<br>Series RLC Load .....                            | 86  |
| 3.4.8. Трехфазная параллельная RLC-нагрузка 3-Phase<br>Parallel RLC Load .....                              | 88  |
| 3.4.9. Трехфазная динамическая нагрузка 3-Phase<br>Dynamic Load .....                                       | 90  |
| 3.4.10. Грозозащитный разрядник Surge Arrester .....  | 93  |
| 3.4.11. Взаимная индуктивность Mutual Inductance .....  | 95  |
| 3.4.12. Трехфазная взаимная индуктивность 3-Phase Mutual<br>Inductance Z1-Z0 .....                          | 98  |
| 3.4.13. Выключатель переменного тока Breaker .....  | 99  |
| 3.4.14. Трехфазный выключатель переменного тока<br>3-Phase Breaker .....                                    | 102 |
| 3.4.15. Трехфазный короткозамыкатель 3-Phase Fault .....  | 104 |
| 3.4.16. Линия электропередачи с сосредоточенными<br>параметрами PI Section Line .....                       | 107 |
| 3.4.17. Трехфазная линия электропередачи<br>с сосредоточенными параметрами 3-Phase<br>PI Section Line ..... | 110 |
| 3.4.18. Линия электропередачи с распределенными<br>параметрами Distributed Parameters Line .....            | 111 |
| 3.4.19. Силовой трансформатор без учета насыщения<br>стали сердечника Linear Transformer .....              | 113 |
| 3.4.20. Силовой трансформатор с учетом насыщения<br>стали сердечника Saturable Transformer .....            | 116 |
| 3.4.21. Трехфазный двухобмоточный трансформатор<br>Three-phase Transformer (Two Windings) .....             | 120 |
| 3.4.22. Трехфазный трехобмоточный трансформатор<br>Three-phase Transformer (Three Windings) .....           | 123 |

---

|  |     |
|--|-----|
| 3.4.23. Трехфазный трансформатор без учета насыщения сердечника (12 выводов) Three-phase Linear Transformer (12-terminals) ..... | 126 |
| 3.4.24. Трехфазный трансформатор с первичной обмоткой, соединенной в зигзаг Zigzag Phase-Shifting Transformer .....              | 127 |
| 3.4.25. Многообмоточный трансформатор Multi-Winding Transformer .....  | 130 |
| 3.4.26. Трехфазный фильтр Three-Phase Harmonic Filter .....  | 134 |
| 3.4.27. Заземление Ground .....  | 135 |
| 3.4.28. Нейтраль Neutral .....   | 137 |
| 3.4.29. Клемма Connection Port .....   | 138 |
| 3.5. Элементы силовой электроники Power Electronics .....  | 139 |
| 3.5.1. Силовой диод Diode .....  | 139 |
| 3.5.2. Тиристор Thyristor, Detailed Thyristor .....  | 142 |
| 3.5.3. Полностью управляемый тиристор GTO Thyristor .....  | 145 |
| 3.5.4. Биполярный транзистор IGBT .....  | 148 |
| 3.5.5. Транзистор Mosfet .....   | 151 |
| 3.5.6. Идеальный ключ Ideal Switch .....   | 153 |
| 3.5.7. Универсальный мост Universal Bridge .....   | 156 |
| 3.5.8. Трехуровневый мост Three-Level Bridge .....   | 158 |
| 3.6. Электрические машины Machines .....   | 162 |
| 3.6.1. Машина постоянного тока DC Machine .....  | 162 |
| 3.6.2. Асинхронная машина Asynchronous Machine .....   | 167 |
| 3.6.3. Упрощенная модель синхронной машины Simplified Synchronous Machine .....  | 172 |
| 3.6.4. Синхронная машина Synchronous Machine .....   | 175 |
| 3.6.5. Синхронная машина с постоянными магнитами Permanent Magnet Synchronous Machine .....                                      | 179 |
| 3.6.6. Блок измерения переменных электрической машины Machines Measurement Demux .....   | 182 |
| 3.6.7. Система возбуждения синхронной машины Excitation System .....   | 185 |
| 3.6.8. Гидравлическая турбина с регулятором Hydraulic Turbine and Governor .....   | 188 |
| 3.6.9. Паровая турбина с регулятором Steam Turbine and Governor .....  | 190 |
| 3.6.10. Универсальный стабилизатор энергосистемы Generic Power System Stabilizer .....   | 196 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.6.11. Многополосный стабилизатор энергосистемы<br>Multiband Power System Stabilizer ..... | 198 |
| 3.6.12. Однофазная асинхронная машина Single Phase<br>Asynchronous Machine .....            | 202 |
| 3.6.13. Вентильный реактивный двигатель Switched<br>Reluctance Motor .....                  | 206 |
| 3.7. Модели для расчета векторным методом Phasor Elements .                                 | 209 |
| 3.7.1. Статический компенсатор реактивной мощности<br>Static Var Compensator .....          | 209 |

## **Глава 4. Графический интерфейс**

|  |     |
|--|-----|
| <b>пользователя Powergui</b> .....   | 215 |
| 4.1. Расчет схемы векторным методом .....                                      | 218 |
| 4.2. Дискретизация модели .....  | 220 |
| 4.3. Расчет установившегося режима .....                                       | 221 |
| 4.4. Инициализация трехфазных схем, содержащих<br>электрические машины .....   | 223 |
| 4.5. Использование Simulink LTI-Viewer для анализа<br>электрических схем ..... | 226 |
| 4.6. Определение импеданса цепи .....  | 226 |
| 4.7. Гармонический анализ .....  | 228 |
| 4.8. Создание отчета .....   | 230 |
| 4.9. Инструмент расчета характеристики намагничивания ..                       | 232 |
| 4.10. Расчет параметров линии электропередачи .....                            | 234 |

## **Глава 5. Создание электротехнических блоков**

|  |     |
|--|-----|
| <b>пользователя</b> .....  | 238 |
| 5.1. Принцип создания электротехнических блоков<br>пользователя .....      | 239 |
| 5.2. Модель нелинейного резистора .....                                    | 240 |
| 5.3. Модель насыщающегося реактора .....                                   | 241 |
| 5.4. Модель двигателя постоянного тока с независимым<br>возбуждением ..... | 243 |
| 5.4.1. Математическое описание ДПТ НВ и его<br>Simulink-модель .....       | 243 |
| 5.4.2. Модель двигателя на базе источника тока .....                       | 244 |
| 5.4.3. Модель двигателя на базе источника напряжения ....                  | 245 |

---

|  |     |
|--|-----|
| <b>Глава 6. Библиотека нелинейных моделей</b> .....  | 248 |
| <b>Глава 7. Основные команды MATLAB для управления SPS-моделью</b> .....                                     | 252 |
| 7.1. Функция инициализации SPS-модели power_init .....   | 254 |
| 7.2. Функция для определения математической модели линейной части электрической схемы power_statespace ..... | 255 |
| 7.3. Функция для анализа модели электрической схемы power_analyze .....                                      | 258 |
| 7.4. Функция для расчета параметров линии электропередачи power_lineparam .....                              | 259 |
| <b>Глава 8. Как SimPowerSystems работает</b> .....   | 260 |
| 8.1. Алгоритм расчета SimPowerSystems-модели .....   | 261 |
| 8.2. Выбор метода интегрирования .....   | 263 |
| 8.3. Особенности моделирования схем силовой электроники .....  | 264 |
| <b>Глава 9. Советы пользователям SimPowerSystems</b> .....   | 266 |
| 9.1. RLC «по-русски» .....   | 267 |
| 9.2. Задание начальных условий расчета .....   | 268 |
| 9.3. Модернизация блока Fourier .....  | 279 |
| 9.4. Особенности блока Breaker .....   | 271 |
| 9.5. Моделирование выбега электродвигателя .....   | 271 |
| 9.6. Модель операционного усилителя .....  | 272 |
| 9.7. Открытие и сохранение моделей ранних версий .....   | 276 |
| 9.8. Проведение серии вычислительных экспериментов .....   | 278 |
| <b>Приложение 1. Система меню обозревателя библиотек программы Simulink</b> .....                            | 280 |
| <b>Приложение 2. Система меню окна модели</b> .....  | 281 |
| <b>Литература</b> .....  | 286 |
| <b>Предметный указатель</b> .....  | 287 |

# Введение

Библиотека блоков SimPowerSystems (в версии MATLAB 6.1 и более ранних – Power System Blockset) является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование конкретных устройств. SimPowerSystems содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. В состав библиотеки входят модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и тому подобного оборудования. Имеется также раздел, содержащий блоки для моделирования устройств силовой электроники, включая системы управления для них. Комбинируя возможности Simulink и SimPowerSystems, пользователь может не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств. В частности, пользователь имеет возможность рассчитать установившийся режим работы системы на переменном токе, выполнить расчет импеданса (полного сопротивления) участка цепи, получить частотные характеристики, проанализировать устойчивость, а также выполнить гармонический анализ токов и напряжений.

Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием имитационных блоков SimPowerSystems, а систему управления – с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит, повысить ее устойчивость и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems (в дальнейшем SPS-модели) можно использовать блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MATLAB, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем.

Библиотека SimPowerSystems достаточно обширна. В том случае, если все же нужного блока в библиотеке нет, пользователь имеет возможность создать свой собственный блок как с помощью уже имеющихся в библиотеке блоков, реализуя возможности Simulink по созданию подсистем, так и на основе блоков основной библиотеки Simulink и управляемых источников тока или напряжения.

Таким образом, SimPowerSystems в составе Simulink на настоящее время может считаться одним из лучших пакетов для моделирования электротехнических устройств и систем.

## Операционная среда Simulink

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Запуск системы .....   | 12 |
| 1.2. Обзорщик библиотеки блоков<br>Simulink .....                 | 12 |
| 1.3. Создание модели .....  | 15 |
| 1.4. Основные элементы окна модели .....                          | 17 |
| 1.5. Основные приемы подготовки<br>и редактирования модели .....  | 20 |
| 1.6. Установка параметров моделирования<br>и его выполнение ..... | 24 |

## 1.1. Запуск системы

Для запуска программы Simulink необходимо предварительно запустить пакет MATLAB. Рабочий стол системы MATLAB с командным окном показан на рис. 1.1. Там же показана подсказка, появляющаяся в окне при наведении указателя мыши на ярлык Simulink в панели инструментов.

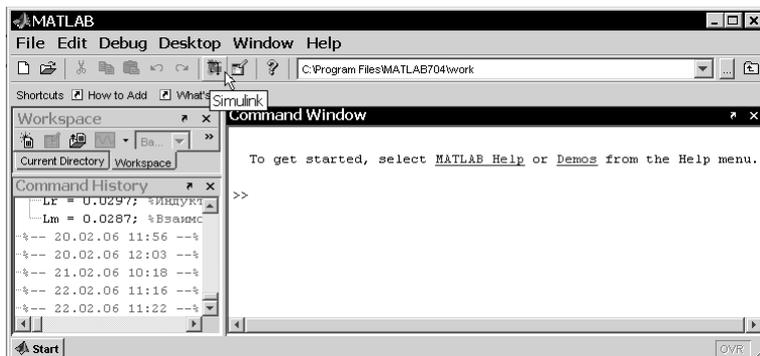


Рис. 1.1. Рабочий стол системы MATLAB

После открытия основного окна программы MATLAB нужно запустить программу Simulink. Это можно сделать одним из трех способов:

- нажать кнопку  (**Simulink**) на панели инструментов командного окна **MATLAB**;
- в строке командного окна **MATLAB** напечатать Simulink и нажать клавишу **Enter** на клавиатуре;
- выполнить команду **Open...** меню **File** и открыть файл модели (mdl-файл).

Последний способ предпочтителен при запуске уже готовой и отлаженной модели, когда требуется лишь провести моделирование и не нужно добавлять новые блоки в модель. При применении двух первых способов открывается окно обозревателя библиотеки блоков (рис. 1.2).

## 1.2. Обзорщик библиотеки блоков Simulink

Окно обозревателя библиотеки блоков **Simulink Library Browser** содержит следующие элементы (рис. 1.2):

1. Заголовок с названием окна – **Simulink Library Browser**.
2. Меню с командами **File**, **Edit**, **View**, **Help**.
3. Панель инструментов с кнопками наиболее часто используемых команд меню.

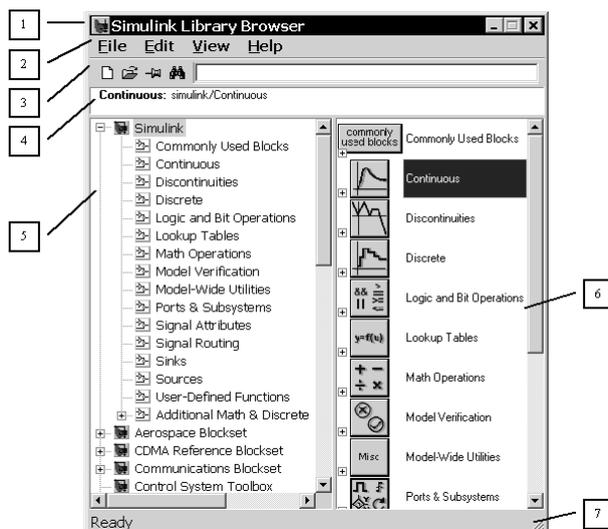


Рис. 1.2. Обзорщик библиотеки блоков

4. Окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном разделе библиотеки или блоке.
5. Список разделов библиотеки.
6. Окно для вывода содержимого раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков).
7. Строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию.

На рис. 1.2 выделена основная библиотека Simulink (в левой части окна) и показаны ее разделы (в правой части окна).

Основная библиотека системы Simulink содержит следующие разделы:

- **Commonly Used Blocks** – часто используемые блоки;
- **Continuous** – блоки аналоговых элементов;
- **Discontinuities** – нелинейные блоки;
- **Discrete** – дискретные блоки;
- **Logic and Bit Operations** – блоки логических и битовых операций;
- **Look-Up Tables** – блоки таблиц;
- **Math Operations** – блоки математических операций;
- **Model Verification** – блоки верификации сигналов;
- **Model-Wide Utilities** – раздел вспомогательных утилит;
- **Ports & Subsystems** – порты и подсистемы;
- **Signal Attributes** – блоки получения свойств сигналов;
- **Signal&Routing** – блоки преобразования сигналов и вспомогательные блоки;
- **Sinks** – приемники сигналов;
- **Sources** – источники сигналов;
- **User-defined Function** – функции пользователя;
- **Additional Math & Discrete**.

## 14 Операционная среда Simulink

Список разделов библиотеки Simulink представлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида: пиктограмма свернутого узла дерева содержит символ «+», а пиктограмма развернутого содержит символ «-».

Для того чтобы развернуть или свернуть узел дерева, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши.

При выборе соответствующего раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое (рис. 1.3).

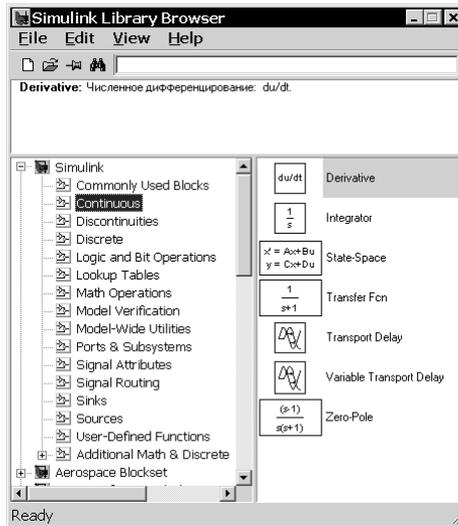


Рис. 1.3. Отображение содержимого библиотеки обозревателем блоков

Для работы с окном используются команды, собранные в меню. Меню обозревателя библиотек содержит следующие пункты:

- **File** (Файл) – работа с файлами библиотек;
- **Edit** (Редактирование) – добавление блоков и их поиск (по названию);
- **View** (Вид) – управление показом элементов интерфейса;
- **Help** (Справка) – вывод окна справки по обозревателю библиотек.

Полный список команд меню обозревателя библиотек приведен в приложении 1.

Для работы с обозревателем можно также использовать кнопки на панели инструментов (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Кнопки панели инструментов обозревателя

Кнопки панели инструментов имеют следующее назначение:

1. Создать новую Simulink-модель (открыть новое окно модели).
2. Открыть одну из существующих S-моделей.
3. Изменить свойство окна обозревателя «всегда сверху». После нажатия на кнопку окно обозревателя будет отображаться поверх других открытых окон.
4. Найти блок, название которого (или первые несколько символов названия) указано в расположенном справа от кнопки текстовом поле. Если требуемый блок найден, в окне обозревателя открывается соответствующий раздел библиотеки, а блок отображается как выбранный, в противном случае в подокне комментария выводится сообщение Not found <имя блока> (Блок <имя> не найден).

## 1.3. Создание модели

Для создания модели в среде SIMULINK необходимо последовательно выполнить ряд действий:

1. Создать новый файл модели с помощью команды **File** ⇒ **New** ⇒ **Model** (здесь и далее с помощью символа «⇒» указывается последовательность вызова пунктов меню) или используя кнопку  на панели инструментов. Новое созданное окно модели показано на рис. 1.5.

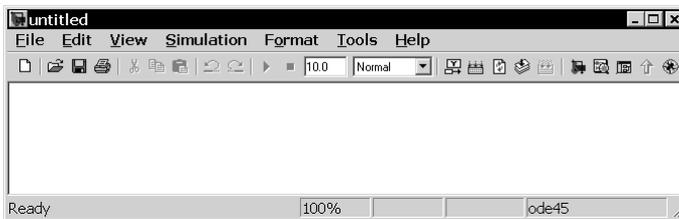


Рис. 1.5. Пустое окно модели

2. Расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки. Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу мыши, «перетащить» блок в созданное окно. Клавишу мыши нужно держать нажатой. На рис. 1.6 показано окно модели, содержащее блоки.

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу мыши), а затем нажать клавишу **Delete** на клавиатуре.

3. Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные по умолчанию. Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей мыши, указав курсором на изображение блока. Откроется окно редактирования параметров данного блока. При вводе численных параметров

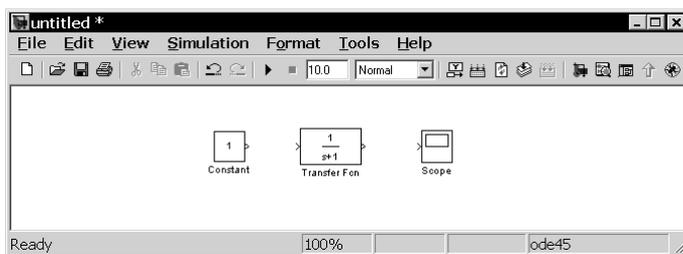


Рис. 1.6. Окно модели с блоками

следует иметь в виду, что в качестве десятичного разделителя должна использоваться точка, а не запятая. После внесения изменений нужно закрыть окно кнопкой **ОК**. Можно также, не закрывая окна, воспользоваться кнопкой **Apply** для сохранения изменений. На рис. 1.7 в качестве примера показаны блок, моделирующий передаточную функцию, и окно редактирования параметров данного блока.

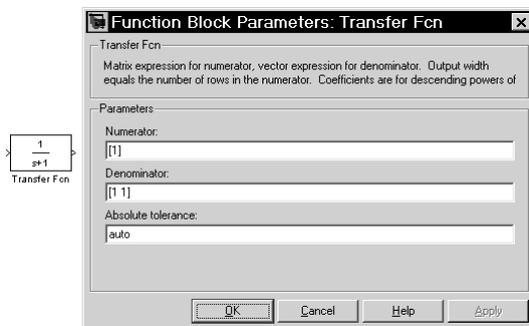


Рис. 1.7. Блок передаточной функции и его окно параметров

4. После установки на схеме всех блоков требуется выполнить соединение элементов схемы. Для этого необходимо указать курсором на «выход» блока, а затем нажать и, не отпуская левую клавишу мыши, провести линию ко входу другого блока. После чего отпустить клавишу. Если соединение не создано, то линия связи будет пунктирной и иметь красный цвет. В случае правильного соединения линия связи будет сплошной. Для создания линии связи можно также выделить блок-источник сигнала, затем нажать клавишу **Ctrl** на клавиатуре и выделить блок-приемник. Для создания точки разветвления в соединительной линии нужно подвести курсор к предполагаемому узлу и, нажав правую клавишу мыши, протянуть линию. Для удаления линии требуется выбрать линию, а затем нажать клавишу **Delete** на

клавиатуре. Схема модели, в которой выполнены соединения между блоками, показана на рис. 1.8.

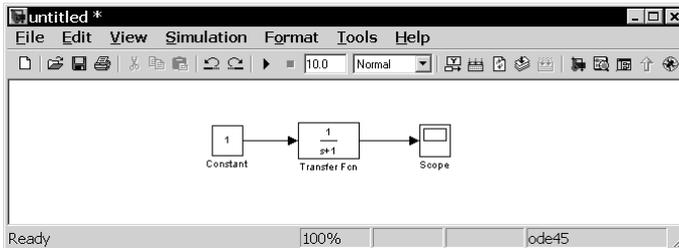


Рис. 1.8. Готовая модель

5. После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню **File** ⇒ **Save As...** в окне схемы и указав папку и имя файла. Следует иметь в виду, что имя файла не должно превышать 64 символов, должно начинаться с буквы и содержать только алфавитно-цифровые символы латиницы и знак подчеркивания. Это же требование (за исключением длины названия) относится и к пути файла. При последующем редактировании схемы можно пользоваться пунктом меню **File** ⇒ **Save**. При повторных запусках программы SIMULINK загрузка схемы осуществляется с помощью меню **File** ⇒ **Open...** в окне обозревателя библиотеки или из командного окна системы MATLAB.

## 1.4. Основные элементы окна модели

Окно модели содержит следующие элементы (рис. 1.9):

1. Заголовок с названием окна. Вновь созданному окну присваивается имя Untitled с соответствующим номером.
2. Панель меню – **File**, **Edit**, **View**, **Simulation**, **Format**, **Tools** и **Help**.
3. Панель инструментов.
4. Окно для создания схемы модели.
5. Строка состояния, содержащая информацию о текущем состоянии модели.

Меню окна содержит команды для редактирования модели, ее настройки и управления процессом расчета, работы с файлами и т. п.:

- **File** (Файл) – работа с файлами моделей;
- **Edit** (Редактирование) – изменение модели и поиск блоков;
- **View** (Вид) – управление показом элементов модели и интерфейса;
- **Simulation** (Моделирование) – задание настроек для моделирования и управление процессом расчета;
- **Format** (Форматирование) – изменение внешнего вида блоков и модели в целом;

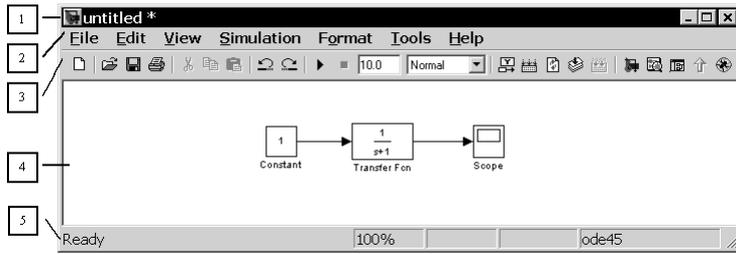


Рис. 1.9. Основные элементы окна модели

- **Tools** (Инструментальные средства) – применение специальных средств для работы с моделью (отладчик, инструмент линейного анализа и т. п.);
- **Help** (Справка) – открытие окна справочной системы.

Полный список команд меню окна модели приведен в приложении 2.

Для работы с моделью можно также использовать кнопки на панели инструментов (рис. 1.10).

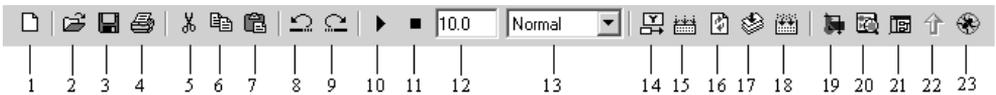


Рис. 1.10. Панель инструментов окна модели

Кнопки панели инструментов имеют следующее назначение:

1. **New Model** – открыть новое (пустое) окно модели;
2. **Open Model** – открыть существующий файл модели (mdl-файл);
3. **Save Model** – сохранить файл на диске;
4. **Print Model** – вывод на печать схемы модели;
5. **Cut** – вырезать выделенную часть модели в буфер промежуточного хранения;
6. **Copy** – скопировать выделенную часть модели в буфер промежуточного хранения;
7. **Paste** – вставить в окно модели содержимое буфера промежуточного хранения;
8. **Undo** – отменить предыдущую операцию редактирования;
9. **Redo** – восстановить результат отмененной операции редактирования;
10. **Start/Pause/Continue Simulation** – запуск модели на исполнение (команда **Start**); после запуска модели на изображении кнопки выводится символ **II**, и ей соответствует уже команда **Pause** (приостановить моделирование). Для возобновления моделирования после паузы следует щелкнуть по

той же кнопке, поскольку в режиме паузы ей соответствует команда **Continue** (Продолжить);

11. **Stop** – закончить моделирование. Кнопка становится доступной после начала моделирования, а также после выполнения команды **Pause**;
12. **Simulation Stop Time** – время окончания моделирования. Позволяет задать время окончания расчета;
13. **Normal/Accelerator** – обычный/ускоренный режим расчета. Инструмент доступен, если установлено приложение Simulink Performance Tool;
14. **Show when hovering** – показывать значения сигналов на выходах блока при наведении на блок указателя мыши;
15. **Incremental Build** – генерировать код для инструмента Real Time Workshop (мастерская реального времени);
16. **Refresh Model Blocks** – обновить входные и выходные порты и параметры всех блоков модели;
17. **Update diagram** – обновить окно модели;
18. **Build Subsystem** – создать исполняемый код подсистемы;
19. **Library Browser** – открыть окно обозревателя. Если обозреватель уже открыт, то его окно будет выведено поверх всех остальных окон;
20. **Launch model Explorer** – открыть окно исследователя модели (инструмента, систематизирующего информацию о модели);
21. **Toggle Model Browser** – открыть окно обозревателя модели. При использовании данного инструмента в левой части окна модели будет открыто дополнительное окно, содержащее изображение иерархической структуры модели в виде дерева;
22. **Go to parent system** – переход из подсистемы в систему высшего уровня иерархии («родительскую систему»). Команда доступна, только если открыта подсистема;
23. **Debug** – запуск отладчика модели.

В нижней части окна модели находится строка состояния, в которой отображаются краткие комментарии к кнопкам панели инструментов, а также к пунктам меню, когда указатель мыши находится над соответствующим элементом интерфейса. Это же текстовое поле используется и для индикации состояния Simulink: **Ready** (Готов) или **Running** (Выполнение). В строке состояния отображаются также:

- масштаб отображения блок-диаграммы (в процентах, исходное значение равно 100%);
- индикатор степени завершенности сеанса моделирования (появляется после запуска модели);
- текущее значение модельного времени (выводится также только после запуска модели);
- используемый метод расчета состояний модели.

## 1.5. Основные приемы подготовки и редактирования модели

### **Добавление текстовых надписей**

Для повышения наглядности модели удобно использовать текстовые надписи. Для создания надписи достаточно указать мышью место надписи и дважды щелкнуть левой кнопкой мыши. После этого появится блок надписи с курсором ввода. Так же можно изменить и подписи к блокам моделей. Для этого нужно установить мышь в область надписи и щелкнуть левой кнопкой мыши – в подписи появится курсор ввода, и ее можно будет редактировать. На рис. 1.11 показаны текстовая надпись и изменение надписи в блоке Transfer Function. Следует иметь в виду, что только начиная с версии программы Simulink 6.5 (MATLAB 2006b) допустимо использование кириллических шрифтов. Более ранние версии Simulink не адаптированы к их использованию, и применение таких шрифтов может иметь самые разные последствия: отображение надписей в нечитаемом виде, обрезание надписей, сообщения об ошибках, а также невозможность открыть модель после ее сохранения. Поэтому применение надписей на русском языке для ранних версий Simulink крайне не желательно.

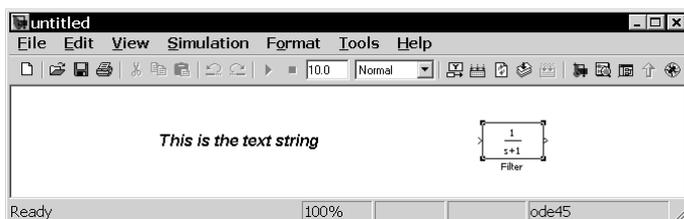


Рис. 1.11. Создание текстовых надписей

### **Выделение объектов**

Для выполнения какого-либо действия с элементом модели (блоком, соединительной линией, надписью) этот элемент необходимо сначала выделить. Выделение объектов удобнее всего осуществляется с помощью мыши. Для этого необходимо установить курсор мыши на нужном объекте и щелкнуть левой кнопкой мыши. Объект будет выделен. Об этом будут свидетельствовать маркеры по углам объекта (см. рис. 1.11). Можно также выделить несколько объектов. Для этого требуется установить курсор мыши вблизи них, нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее, начать перемещать мышь. Появится пунктирная рамка, размеры которой будут изменяться при перемещении мыши. Все охваченные рамкой объекты становятся выделенными. Для выделения всех объектов в модели удобно использовать команду **Edit** ⇒ **Select All**. После выделения объекта его можно ко-

пировать или перемещать в буфер промежуточного хранения, извлекать из буфера, а также удалять, используя стандартные приемы работы в Windows-программах.

## **Копирование и перемещение объектов в буфер хранения**

Для копирования объекта в буфер его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду **Edit** ⇒ **Copy** или воспользоваться инструментом  на панели инструментов.

Для вырезания объекта в буфер его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду **Edit** ⇒ **Cut** или воспользоваться инструментом  на панели инструментов. При выполнении данных операций следует иметь в виду, что объекты помещаются в собственный буфер MATLAB и недоступны из других приложений. Использование команды **Edit** ⇒ **Copy model to Clipboard** позволяет поместить графическое изображение модели в буфер Windows и, соответственно, делает его доступным для остальных программ.

Копирование можно выполнить и таким образом: нажать правую клавишу мыши и, не отпуская ее, переместить объект. При этом будет создана копия объекта, которую можно переместить в необходимое место.

## **Вставка объектов из буфера хранения**

Для вставки объекта из буфера необходимо предварительно указать место вставки, щелкнув левой клавишей мыши в предполагаемом месте вставки, а затем выполнить команду **Edit** ⇒ **Paste** или воспользоваться инструментом  на панели инструментов.

## **Удаление объектов**

Для удаления объекта его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду **Edit** ⇒ **Clear** или воспользоваться клавишей **Delete** на клавиатуре. Нужно помнить, что команда **Clear** удаляет блок без помещения его в буфер обмена. Однако эту операцию можно отменить командой меню **File** ⇒ **Undo**.

## **Соединение блоков**

Для соединения выхода одного блока со входом другого курсор мыши устанавливается на выходе блока, от которого должно исходить соединение. При этом курсор превращается в большой крест из тонких линий (рис. 1.12). Держа нажатой левую кнопку мыши, необходимо переместить курсор ко входу следующего блока, где курсор мыши приобретет вид креста из тонких сдвоенных линий (рис. 1.13). Добившись протяжки линии ко входу следующего блока, следует отпустить левую кнопку мыши. Соединение будет завершено, и в конце его появится жирная стрелка.

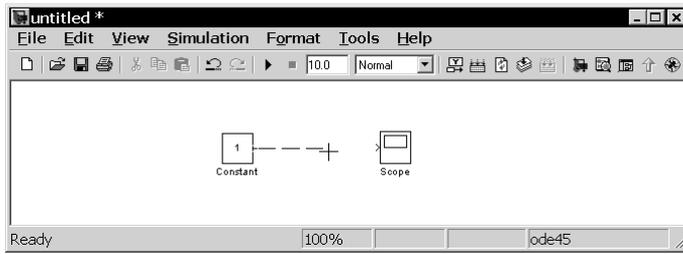


Рис. 1.12. Начало проведения линии

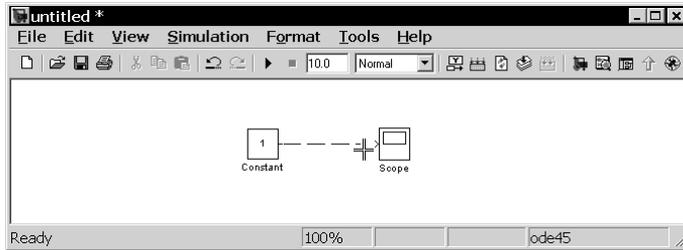


Рис. 1.13. Завершение проведения линии

Созданную линию можно выделить, признаком чего будут квадратные маркеры, расположенные в узловых точках соединительной линии (см. рис. 1.14). Для выделенной линии доступны те же операции, что и для блоков модели: удаление, перемещение, копирование в буфер промежуточного хранения и т. д.

Иногда требуется сделать петлю соединительной линии в ту или иную сторону. Для этого нужно захватить фрагмент линии и отвести его в нужную сторону, перемещая мышью с нажатой левой кнопкой. Рисунок 1.14 поясняет этот процесс.

### **Изменение размеров блоков**

Для изменения размера блока он выделяется, после чего курсор мыши необходимо установить на один из маркеров по углам блока. Как только курсор мыши превратится в двунаправленную диагональную стрелку, можно будет при нажатой

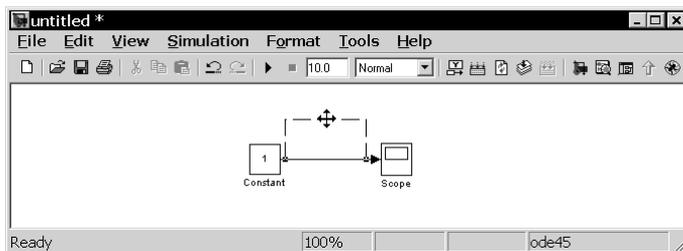


Рис. 1.14. Создание петли линии

левой кнопке растягивать блок по диагонали, увеличивая или уменьшая его размеры (см. рис. 1.15). При этом изменяется только графическое изображение блока, а размеры его названия в виде текстовой надписи остаются прежними.

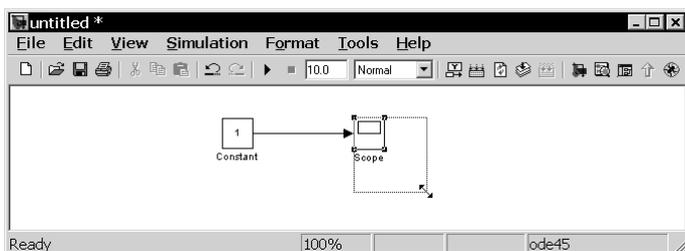


Рис. 1.15. Изменение размеров блока

## Перемещение блоков и вставка блоков в соединение

Блок, участвующий в соединении, можно перемещать в окне модели, выделив его и перетаскивая, как обычно, мышью. При этом соединение не разрывается, а просто сокращается или увеличивается в длину. В длинное соединение можно вставить новый блок, поместив его в нужном месте линии. Такая вставка возможна лишь для блоков, имеющих один вход и один выход, которые включаются в соединение.

## Использование команд **Undo** и **Redo**

В процессе освоения программы пользователь может совершать действия, кажущиеся на первый взгляд необратимыми (например, случайное удаление части модели, наложение блоков друг на друга при копировании и т. д.). В этом случае следует воспользоваться командой **Undo** – отмена последней операции. Команду можно вызвать с помощью кнопки  в панели инструментов окна модели или из меню **Edit**. Для восстановления отмененной операции служит команда **Redo** (инструмент .

## Форматирование объектов

В меню **Format** (так же как и в контекстном меню, вызываемом нажатием правой клавиши мыши на объекте) находится ряд команд форматирования блоков. Их можно разделить на несколько характерных групп.

1. Управление отображением надписей и видом блоков:
  - **Enable TeX commands** – включить выполнение специальных текстовых команд для отображения математических символов, греческих букв и т. п.;
  - **Text alignment** – выравнивание текста в текстовом блоке;

- **Flip name** – помещение подписи блока сверху или снизу блока;
  - **Show/Hide name** – отображение или скрытие подписи выделенного блока;
  - **Show drop shadow** – показ тени от блока;
  - **Show port labels** – показ меток портов.
2. Установка цветов:
- **Foreground color** – установка цвета линий выделенных блоков;
  - **Background color** – установка цвета фона для выделенных блоков;
  - **Screen color** – установка цвета фона для всего окна модели.
3. Изменение положения блока:
- **Flip block** – зеркальное отображение относительно вертикальной оси симметрии;
  - **Rotate block** – поворот блока на 90° по часовой стрелке.
4. Форматирование надписей. Команда **Format** ⇒ **Font** выводит окно с установками шрифта для текстовых надписей, позволяющее изменять вид шрифта надписи, размер шрифта, начертание и тому подобные параметры надписи.
5. Прочие установки:
- **Library link display** – отображение связей с библиотеками;
  - **Sample time colors** – установка цвета блока индикации времени;
  - **Wide nonscalar lines** – увеличение/уменьшение ширины нескаллярных линий;
  - **Signal dimensions** – отображение размерности сигналов;
  - **Port data types** – вывод данных о типе портов;
  - **Storage class** – класс памяти. Параметр, устанавливаемый при работе Real-Time Workshop;
  - **Execution order** – вывод порядкового номера блока в последовательности исполнения.

## 1.6. Установка параметров моделирования и его выполнение

Перед выполнением расчетов необходимо предварительно задать параметры расчета. Задание параметров расчета выполняется в панели управления меню **Simulation** ⇒ **Configuration Parameters**. Вид панели управления приведен на рис. 1.16.

В левой части панели управления находится список групп настраиваемых параметров. При выборе какой-либо группы параметров в левой части окна появляется панель, позволяющая изменять параметры данной группы. Установка параметров моделирования выполняется с помощью элементов управления, размещенных в панели **Solver** (Решатель). Эти элементы разделены на две группы (рис. 1.16): **Simulation time** (Интервал моделирования) и **Solver options** (Параметры расчета).

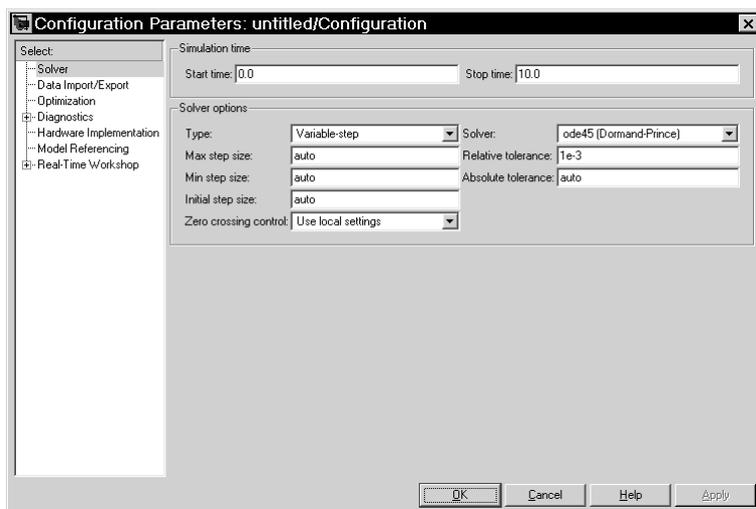


Рис. 1.16. Окно настройки параметров расчета

## Установка параметров расчета модели

### Simulation time:

[интервал моделирования]. Величина интервала моделирования задается с помощью указания начального (Start time) и конечного (Stop time) значений времени расчета. Начальное время, как правило, задается равным нулю. Величина конечного времени задается пользователем исходя из условий решаемой задачи.

### Solver options:

[параметры решателя]. При выборе параметров решателя необходимо указать метод интегрирования (Type) либо с фиксированным (Fixed-step), либо с переменным (Variable-step) шагом. Как правило, Variable-step используется для моделирования непрерывных систем, а Fixed-step – для дискретных.

Можно выбрать один из следующих методов:

- ode45 – одношаговые явные методы Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядка;
- ode23 – одношаговые явные методы Рунге-Кутты 2-го и 3-го порядка;
- ode113 – многошаговый метод Адамса-Башворта-Мултона переменного порядка;
- ode15s – многошаговый метод переменного порядка (от 1 до 5), использующий формулы численного дифференцирования;
- ode23s – одношаговый метод, использующий модифицированную формулу Розенброка 2-го порядка;
- ode23t – метод трапеций с интерполяцией;
- ode23tb – неявный метод Рунге-Кутта в начале решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка в последующем.

Содержимое панели **Configuration Parameters** может меняться в зависимости от выбранного метода интегрирования и решателя. Основные параметры решателей для разных методов интегрирования приведены ниже:

- **Max step size** – максимальный шаг интегрирования. По умолчанию он устанавливается автоматически (auto), и его значение в этом случае равно  $(\text{StopTime} - \text{StartTime})/50$ . Довольно часто это значение оказывается слишком большим, и наблюдаемые графики представляют собой ломаные, а не плавные линии. В этом случае величину максимального шага расчета необходимо задавать явным образом;
- **Min step size** – минимальный шаг интегрирования;
- **Initial step size** – начальное значение шага интегрирования;
- **Zero crossing control** – контроль пересечения нулевого уровня. Значение параметра выбирается из списка: Use local setting (Использовать настройки блоков), Enable on (Включить для всех блоков), Disable on (Выключить для всех блоков). Параметр позволяет управлять точностью расчета при пересечении сигналами нулевого уровня. При отключении Zero crossing control может быть существенно повышена скорость расчета, но будет снижена точность;
- **Relative tolerance** – относительная погрешность;
- **Absolute tolerance** – абсолютная погрешность;
- **Fixed step size** – фиксированный шаг расчета. Параметр доступен при выборе метода интегрирования с фиксированным шагом.

## **Выполнение расчета**

Запуск расчета выполняется с помощью выбора пункта меню **Simulation** ⇒ **Start** или инструмента  на панели инструментов. Процесс расчета можно завершить досрочно, выбрав пункт меню **Simulation/Stop** или инструмент . Расчет также можно остановить (**Simulation** ⇒ **Pause**) и затем продолжить (**Simulation** ⇒ **Continue**).

## **Завершение работы**

Для завершения работы необходимо сохранить модель в файле, закрыть окно модели, окно обозревателя библиотек, а также командное окно пакета MATLAB.

## Обзор основной библиотеки Simulink

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Источники сигналов Sources .....                                 | 28 |
| 2.2. Приемники сигналов Sinks .....                                   | 28 |
| 2.3. Блоки непрерывных моделей<br>continuous .....                    | 28 |
| 2.4. Блоки дискретных моделей Discrete ....                           | 29 |
| 2.5. Нелинейные блоки Discontinuities .....                           | 29 |
| 2.6. Блоки математических операций<br>Math Operations .....           | 30 |
| 2.7. Блоки маршрутизации сигналов<br>Signal&Routing .....             | 31 |
| 2.8. Блоки определения свойств сигналов<br>Signal Attributes .....    | 31 |
| 2.9. Блоки задания таблиц Look-Up Tables ..                           | 32 |
| 2.10. Функции, определяемые<br>пользователем User-defined Function .. | 32 |
| 2.11. Порты и подсистемы Ports &<br>Subsystems .....                  | 32 |
| 2.12. Блоки верификации сигналов Model<br>Verification .....          | 33 |
| 2.13. Библиотека дополнительных утилит<br>Model-Wide Utilities .....  | 33 |
| 2.14. Блоки логических операций Logic<br>and Bit Operations .....     | 33 |
| 2.15. Часто используемые блоки<br>Commonly Used Blocks .....          | 34 |
| 2.16. Additional Math & Discrete .....                                | 34 |

## 2.1. Источники сигналов Sources

1. **Constant** – источник постоянного сигнала.
2. **Sine Wave** – источник синусоидального сигнала.
3. **Ramp** – источник линейно-изменяющегося воздействия.
4. **Step** – генератор ступенчатого сигнала.
5. **Signal Generator** – генератор сигналов.
6. **Uniform Random Number** – источник случайного сигнала с равномерным распределением.
7. **Random Number** – источник случайного сигнала с нормальным распределением.
8. **Pulse Generator** – источник импульсного сигнала.
9. **Chirp Signal** – генератор линейно-изменяющейся частоты.
10. **Band-Limited White Noise** – генератор белого шума.
11. **Clock** – источник времени.
12. **Digital Clock** – дискретный источник времени.
13. **From File** – блок считывания данных из файла.
14. **From Workspace** – блок считывания данных из рабочей области MATLAB.
15. **Ground** – формиратель сигнала нулевого уровня.
16. **Repeating Sequence** – источник периодического сигнала.
17. **Inport** – входной порт.
18. **Signal Builder** – конструктор сигналов.
19. **Repeating Sequence Stair** – источник ступенчатого периодического сигнала.
20. **Repeating Sequence Interpolated** – источник периодического сигнала с интерполяцией.
21. **Counter Free-Running** – источник сигнала типа «счетчик».
22. **Counter Limited** – источник типа «счетчик с ограничением».

## 2.2. Приемники сигналов Sinks

1. **Scope** – осциллограф.
2. **Floating Scope** – «плавающий» осциллограф.
3. **XY Graph** – графопостроитель.
4. **Display** – цифровой дисплей.
5. **Stop Simulation** – блок остановки моделирования.
6. **To File** – блок записи в файл.
7. **To Workspace** – блок записи в рабочую область MATLAB.
8. **Terminator** – конечный приемник.
9. **Outport** – выходной порт.

## 2.3. Блоки непрерывных моделей Continuous

1. **Derivative** – блок вычисления производной.
2. **Integrator** – интегратор.

3. **Transport Delay** – блок фиксированной задержки сигнала.
4. **Variable Transport Delay** – блок управляемой задержки сигнала.
5. **Transfer Fcn** – передаточная функция.
6. **Zero-Pole** – передаточная функция «нули-полюса».
7. **State-Space** – объект пространства состояний.

## 2.4. Блоки дискретных моделей Discrete

1. **Unit Delay** – единичная дискретная задержка.
2. **Zero-Order Hold** – экстраполятор нулевого порядка.
3. **First-Order Hold** – экстраполятор первого порядка.
4. **Discrete-Time Integrator** – дискретный интегратор.
5. **Discrete Transfer Fcn** – дискретная передаточная функция.
6. **Discrete Zero-Pole** – дискретная передаточная функция «нули-полюса».
7. **Discrete Filter** – дискретный фильтр.
8. **Discrete State-Space** – дискретный объект пространства состояний.
9. **Memory** – блок задержки на один расчетный шаг.
10. **Integer Delay** – блок задержки дискретного сигнала на  $n$  расчетных шагов.
11. **Tapped Delay** – блок задержки дискретного сигнала на  $n$  расчетных шагов с выводом всех задержанных сигналов.
12. **Difference** – блок вычисления приращения сигнала за один расчетный шаг.
13. **Discrete Derivative** – блок вычисления производной дискретного сигнала.
14. **Transfer Fcn First Order** – дискретная передаточная функция первого порядка.
15. **Transfer Fcn Lead or Lag** – передаточная функция, компенсирующая задержку или опережение сигнала.
16. **Transfer Fcn Real Zero** – передаточная функция с действительными нулями.
17. **Weighted Moving Average** – блок вычисления скользящего среднего значения входного сигнала с учетом весовых коэффициентов.

## 2.5. Нелинейные блоки Discontinuities

1. **Saturation** – ограничитель.
2. **Dead Zone** – зона нечувствительности.
3. **Relay** – реле.
4. **Rate Limiter** – блок ограничения скорости изменения сигнала.
5. **Quantizer** – квантователь.
6. **Coulomb and Viscous Friction** – блок сухого и вязкого трения.
7. **Backlash** – люфт.
8. **Hit Crossing** – блок определения момента пересечения порогового значения.
9. **Saturation Dynamic** – управляемый ограничитель.
10. **Dead Zone Dynamic** – управляемая зона нечувствительности.

11. **Rate Limiter Dynamic** – управляемый блок ограничения скорости изменения сигнала.
12. **Wrap To Zero** – блок, выполняющий сброс сигнала до нулевого уровня.

## 2.6. Блоки математических операций

### Math Operations

1. **Abs** – блок вычисления модуля.
2. **Sum** – сумматор (пиктограмма в виде окружности).
3. **Product** – умножитель.
4. **Sign** – определитель знака.
5. **Gain, Matrix Gain** – усилитель.
6. **Slider Gain** – ползунковый регулятор.
7. **Dot Product** – блок скалярного умножения векторов.
8. **Math Function** – математическая функция.
9. **Trigonometric Function** – тригонометрическая функция.
10. **Complex to Real-Image** – блок вычисления действительной и (или) мнимой части комплексного числа.
11. **Complex to Magnitude-Angle** – блок вычисления модуля и (или) аргумента комплексного числа.
12. **Real-Image to Complex** – блок расчета комплексного числа по его действительной и мнимой части.
13. **Magnitude-Angle to Complex** – блок расчета комплексного числа по его модулю и аргументу.
14. **MinMax** – блок вычисления максимального или минимального значения.
15. **Rounding Function** – блок округления числа.
16. **Algebraic Constraint** – блок алгебраического контура.
17. **Assignment** – блок присвоения элементам массива новых значений.
18. **Matrix Concatenation** – блок объединения сигналов в матрицу.
19. **Reshape** – преобразователь размерности сигнала.
20. **Polynomial** – степенной многочлен.
21. **Add** – сумматор (пиктограмма в виде прямоугольника).
22. **Subtract** – блок вычисления разности.
23. **Sum of Elements** – блок вычисления суммы элементов вектора.
24. **Bias** – смещение.
25. **Product of Elements** – блок вычисления произведения элементов вектора.
26. **Weighted Sample Time Math** – блок поддержки вычислений, использующих шаг дискретизации.
27. **Divide** – блок деления.
28. **Unary Minus** – унарный минус.
29. **MinMax Running Resettable** – блок вычисления максимального или минимального значения с возможностью сброса.

30. **Sine Wave Function** – синусоидальная функция.

## 2.7. Блоки маршрутизации сигналов Signal&Routing

1. **Mux** – мультиплексор.
2. **Demux** – демультимплексор.
3. **Bus Creator** – шинный формирователь.
4. **Bus Selector** – шинный селектор.
5. **Selector** – селектор.
6. **Merge** – объединитель сигналов.
7. **Goto** – блок передачи сигнала.
8. **From** – блок приема сигнала.
9. **Goto Tag Visibility** – блок признака видимости сигнала.
10. **Data Store Memory** – блок создания общей области памяти.
11. **Data Store Write** – блок записи в именованную область памяти.
12. **Data Store Read** – блок считывания из именованной области памяти.
13. **Switch** – переключатель.
14. **Multipoint Switch** – многовходовой переключатель.
15. **Manual Switch** – ручной переключатель.
16. **Bus Assignment** – блок, выполняющий замену сигнала в шине.
17. **Environment Controller** – контроллер среды.
18. **Index Vector** – переключатель элементов вектора.

## 2.8. Блоки определения свойств сигналов Signal Attributes

1. **Data Type Conversion** – преобразователь типа сигнала.
2. **Width** – блок определения размерности сигнала.
3. **IC** – блок установки начального значения.
4. **Signal Specification** – блок проверки спецификаций сигнала.
5. **Probe** – датчик свойств сигнала.
6. **Rate Transition** – блок согласования дискретных сигналов.
7. **Data Type Duplicate** – проверка совпадения типа данных.
8. **Data Type Propagation** – преобразование типа сигнала в соответствии с типом образцового сигнала.
9. **Data Type Scaling Strip** – масштабирование сигнала с фиксированной точкой.
10. **Data Type Conversion Inherited** – преобразование типа входного сигнала.
11. **Signal Conversion** – преобразование векторного сигнала.
12. **Weighted Sample Time** – блок определения величины шага дискретизации (вариант блока Weighted Sample Time Math).

## 2.9. Блоки задания таблиц Look-Up Tables

1. **Look-Up Table** – одномерная таблица.
2. **Look-Up Table (2D)** – двумерная таблица.
3. **Look-Up Table (n-D)** – многомерная таблица.
4. **Direct Look-Up Table (n-D)** – многомерная таблица с прямым доступом к элементам.
5. **PreLook-Up Index Search** – блок обработки индексов.
6. **Interpolation (n-D) using PreLook-Up** – блок интерполяции табличной функции.
7. **Lookup Table Dynamic** – одномерная таблица. Табличные данные задаются внешними сигналами.
8. **Sine** – табличная функция  $\sin$ .
9. **Cosine** – табличная функция  $\cos$ .

## 2.10. Функции, определяемые пользователем User-defined Function

1. **Fcn** – блок задания функции.
2. **MATLAB Fcn** – блок задания MATLAB-функции.
3. **S-function** – S-функция.
4. **S-Function Builder** – конструктор S-функции на языке C.
5. **Embedded MATLAB Function** – вложенная MATLAB-функция.
6. **Level-2 M-file S-Function** – блок задания S-функции второго уровня.

## 2.11. Порты и подсистемы Ports & Subsystems

1. **Subsystem, Atomic Subsystem** – виртуальная и неделимая подсистемы.
2. **Enabled Subsystem, Enabled** – управляемая наличием сигнала подсистема и ее блок управления.
3. **Triggered Subsystem, Trigger** – управляемая фронтом сигнала подсистема и ее блок управления.
4. **Enabled and Triggered Subsystem** – управляемая уровнем и фронтом сигнала подсистема.
5. **Function-Call Subsystem** – управляемая функцией подсистема и ее блок управления.
6. **Function-Call Generator** – внешний блок управления FC-подсистемой.
7. **If** – блок условного оператора.
8. **Switch Case** – блок переключателя.
9. **If Action Subsystem** – управляемая условием подсистема.
10. **Switch Case Action Subsystem** – переключаемая подсистема.

11. **For Iterator Subsystem** – управляемая циклом For подсистема.
12. **While Iterator Subsystem** – управляемая циклом While подсистема.
13. **Configurable Subsystem** – переконфигурируемая подсистема.
14. **CodeReuse Subsystem** – подсистема, имеющая общий код для всех ее экземпляров в модели.
15. **Model** – блок, обеспечивающий подключение файла к текущей модели.
16. **In** – входной порт.
17. **Out** – выходной порт.

## 2.12. Блоки верификации сигналов Model Verification

1. **Check Static Lower Bound** – блок контроля минимального уровня сигнала.
2. **Check Static Upper Bound** – блок контроля максимального уровня сигнала.
3. **Check Static Range** – блок контроля сигнала внутри зоны.
4. **Check Static Gap** – блок контроля сигнала вне зоны.
5. **Check Dynamic Lower Bound** – блок контроля динамического минимального уровня сигнала.
6. **Check Dynamic Upper Bound** – блок контроля динамического максимального уровня сигнала.
7. **Check Dynamic Range** – блок контроля сигнала внутри динамической зоны.
8. **Check Dynamic Gap** – блок контроля сигнала вне динамической зоны.
9. **Assertion** – блок проверки сигнала на нулевое значение.
10. **Check Discrete Gradient** – блок контроля градиента дискретного сигнала.
11. **Check Input Resolution** – блок проверки разрешения входного сигнала.

## 2.13. Библиотека дополнительных утилит Model-Wide Utilities

1. **Model Info** – информационный блок.
2. **DocBlock** – блок документации.
3. **Timed-Based Linearization** – блок линеаризации для заданного момента времени.
4. **Trigger-Based Linearization** – блок линеаризации для момента времени, заданного управляющим сигналом.

## 2.14. Блоки логических операций Logic and Bit Operations

1. **Bitwise Operator** – блок побитовых логических операций.
2. **Combinatorial Logic** – блок комбинаторной логики.
3. **Logical Operator** – блок логической операции.

4. **Relational Operator** – блок вычисления операции отношения.
5. **Interval Test** – блок, определяющий, что значение входного сигнала находится в заданном интервале.
6. **Interval Test Dynamic** – блок, определяющий, что значение входного сигнала находится в заданном интервале. Значение интервала задается внешними сигналами.
7. **Compare To Zero** – сравнение с нулем.
8. **Compare To Constant** – сравнение с константой.
9. **Bit Set** – блок устанавливает указанный бит целого числа равным 1.
10. **Bit Clear** – блок устанавливает указанный бит целого числа равным 0.
11. **Shift Arithmetic** – сдвиг числа в двоичном представлении.
12. **Extract Bits** – извлечение битов двоичного числа.
13. **Detect Increase** – обнаружение увеличения сигнала.
14. **Detect Decrease** – обнаружение уменьшения сигнала.
15. **Detect Change** – обнаружение изменения сигнала.
16. **Detect Rise Positive** – обнаружение увеличения положительного сигнала.
17. **Detect Rise Nonnegative** – обнаружение увеличения неотрицательного сигнала.
18. **Detect Fall Negative** – обнаружение уменьшения отрицательного сигнала.
19. **Detect Fall Nonpositive** – обнаружение уменьшения неположительного сигнала.

## 2.15. Часто используемые блоки Commonly Used Blocks

Библиотека включает наиболее часто используемые пользователями блоки из других библиотек (Constant, Step, Sum, Scope, Gain и т. д.).

## 2.16. Дополнительные математические и дискретные блоки Additional Math & Discrete

Библиотека содержит два раздела: **Additional Discrete** (Дополнительные дискретные блоки) и **Increment/Decrement** (Блоки «Приращение/Уменьшение»). В первом разделе находятся дополнительные блоки дискретных передаточных функций и разного вида блоки задержки сигналов. Во втором разделе находятся блоки, увеличивающие и уменьшающие значение сигналов на фиксированную величину.

## Библиотека блоков SimPowerSystems

|  |     |
|--|-----|
| 3.1. Состав библиотеки и основные особенности .....              | 36  |
| 3.2. Источники электрической энергии<br>Electrical Sources ..... | 47  |
| 3.3. Измерительные и контрольные устройства .....                | 61  |
| 3.4. Электротехнические элементы<br>Elements .....               | 73  |
| 3.5. Элементы силовой электроники<br>Power Electronics .....     | 139 |
| 3.6. Электрические машины Machines .....                         | 162 |
| 3.7. Модели для расчета векторным методом Phasor Elements .....  | 209 |

## 3.1. Состав библиотеки и основные особенности

### 3.1.1. Состав библиотеки

Библиотека SimPowerSystems имеет восемь основных разделов:

- **Electrical Sources** – источники электрической энергии. В состав библиотеки входят источники постоянного и переменного напряжения и тока, управляемые источники напряжения и тока, а также трехфазные источники переменного напряжения.
- **Measurements** – измерительные и контрольные устройства. Библиотека содержит датчики тока и напряжения, блок измерения для трехфазных систем, мультиметр и измеритель полного сопротивления цепи (импеданса).
- **Elements** – электротехнические элементы. В библиотеке находится большой набор моделей пассивных электротехнических элементов: одно- и трехфазные RLC-цепи, трансформаторы, взаимоиндуктивность, грозозащитный разрядник и т. д.
- **Power Electronics** – устройства силовой электроники. В библиотеку включены модели силовых полупроводниковых элементов, диода, тиристора, IGBT-транзистора и тому подобных элементов. Кроме того, в библиотеке находятся модель универсального моста и модель трехуровневого моста.
- **Machines** – электрические машины. В библиотеку входят различные модели машин постоянного и переменного тока, а также модели паровой и водяной турбин с регуляторами.
- **Phasor Elements** – модели устройств для расчета векторным методом.
- **Extra Library** – дополнительные электротехнические устройства. В данной библиотеке находятся модели дискретных и аналоговых элементов управления, в частности блоки управления полупроводниковыми выпрямителями и инверторами, различные фильтры, генераторы, таймеры и тому подобные устройства. Кроме того, в библиотеке находятся различные устройства для измерения, в частности блоки вычисления действующего и среднего значения сигнала, блок вычисления гармонического состава, блок вычисления активной и реактивной мощности и т. д. В библиотеке также есть раздел, где сведены все модели трехфазных элементов.
- **Libraries Application** – прикладные библиотеки. Библиотека включает модели элементов для конкретных отраслей электротехники, в частности модели электроприводов постоянного и переменного тока.

Используя блоки из этих разделов, пользователь в состоянии за короткое время создать полноценную модель достаточно сложной электротехнической системы.

## 3.1.2. Основные особенности

Методика создания SPS-модели ничем не отличается от методики создания модели на основе базовой библиотеки Simulink. Так же как и для обычной Simulink-модели (S-модели), необходимо выполнить расстановку блоков на схеме, задать их параметры, соединить блоки и установить параметры расчета модели в целом. Для SPS-моделей доступен ускоренный режим расчета и все возможности Simulink, включая набор инструментов Simulink Performance Tools, линейный анализ, отладчик и т. д. Однако SPS-модели имеют и некоторые особенности:

1. Входы и выходы SPS-блоков, в отличие от блоков Simulink, не показывают направление передачи сигнала, поскольку фактически являются эквивалентами электрических контактов. Таким образом, электрический ток может через вход или выход блока протекать в двух направлениях: как во внутрь блока, так и наружу.
2. Соединительные линии между блоками являются, по сути, моделями электрических проводов, по которым ток может протекать также в двух направлениях. В Simulink-моделях же информационный сигнал распространяется только в одном направлении – от выхода одного блока ко входу другого.
3. Simulink-блоки и SimPowerSystems-блоки не могут быть непосредственно соединены друг с другом. Сигнал от S-блока можно передать к SPS-блоку через управляемые источники тока или напряжения, а наоборот – с помощью измерителей тока или напряжения.
4. При расчете схемы, содержащей нелинейные блоки, следует использовать методы:
  - ode15s – многошаговый метод переменного порядка (от 1 до 5), использующий формулы численного дифференцирования;
  - ode23t – метод трапеций с интерполяцией.Эти методы дают наилучшие результаты по быстродействию.
5. На схеме должен присутствовать хотя бы один измерительный блок (Current Measurement, Voltage Measurement, Three-Phase VI Measurement или Multimeter). Это связано с особенностями преобразования SimPowerSystems-модели в эквивалентную расчетную Simulink-модель.

### *Пример:*

На рис. 3.1 приведена модель трехфазного мостового тиристорного преобразователя, работающего на активно-индуктивную нагрузку.

В модели преобразователя использованы как блоки библиотеки SimPowerSystems (источники переменного напряжения, тиристорный мост, система управления, RLC-цепи, измерители тока и напряжения), так и блоки основной библиотеки Simulink (осциллограф, блок ступенчатого сигнала и т. д.).

На схеме модели показаны изображения резистора и катушки индуктивности в соответствии со стандартом, принятым в России. Если не предпринимать специальных мер, то изображения этих элементов будут выглядеть в соответствии со стандартом США. Каким образом можно изменить пиктограммы элементов, описано в главе 9.

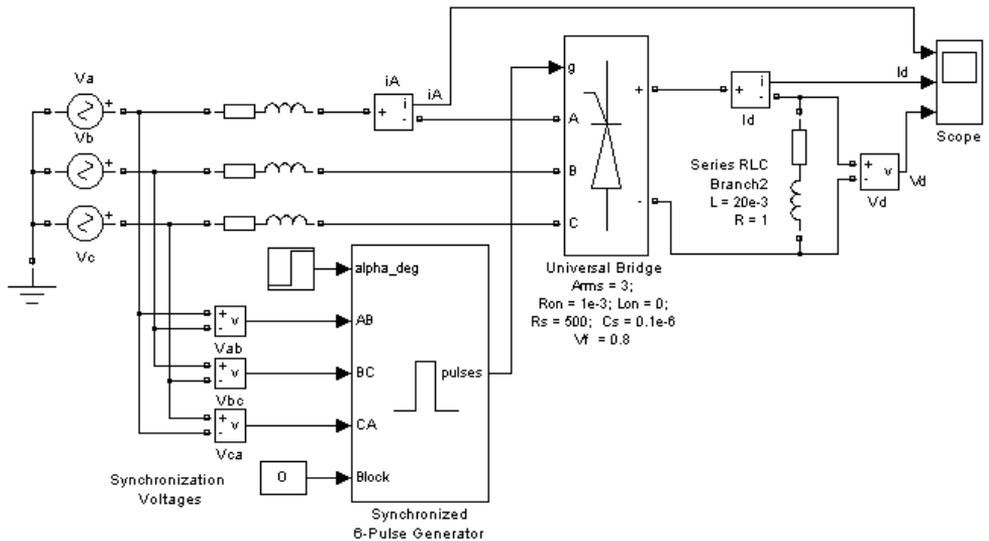


Рис. 3.1. Модель трехфазного мостового тиристорного преобразователя

На рис. 3.2 показаны осциллограммы токов, напряжений и мощности в различных участках схемы. На рисунке хорошо видно, что при переходе преобразователя в инверторный режим напряжение на нагрузке меняет знак, хотя направление тока остается прежним.

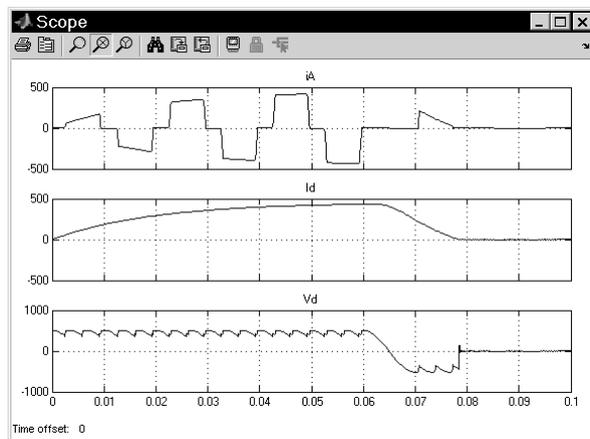


Рис. 3.2. Диаграммы работы тиристорного преобразователя

### 3.1.3. Единицы измерения электрических и неэлектрических величин

При указании параметров элементов могут использоваться абсолютные и относительные единицы. Система абсолютных единиц приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Система абсолютных единиц

| Параметр                             | Обозначение                 | Единицы измерения                      |
|--------------------------------------|-----------------------------|--|
| Time (время)                         | second                      | s (с)                                  |
| Length (расстояние)                  | meter                       | m (м)                                  |
| Mass (масса)                         | kilogram                    | kg (кг)                                |
| Energy (энергия)                     | joule                       | J (Дж)                                 |
| Current (ток)                        | ampere                      | A (А)                                  |
| Voltage (напряжение)                 | volt                        | V (В)                                  |
| Active power (активная мощность)     | watt                        | W (Вт)                                 |
| Apparent power (полная мощность)     | volt-ampere                 | VA (ВА)                                |
| Reactive power (реактивная мощность) | var                         | var (ВАр)                              |
| Impedance (полное сопротивление)     | ohm                         | Ohm (Ом)                               |
| Resistance (активное сопротивление)  | ohm                         | Ohm (Ом)                               |
| Inductance (индуктивность)           | henry                       | H (Гн)                                 |
| Capacitance (емкость)                | farad                       | F (Ф)                                  |
| Flux linkage (потокосцепление)       | volt-second                 | V·с (В·с)                              |
| Rotation speed (угловая частота)     | radians per second          | rad/s (рад/с)                          |
| revolutions per minute               | rpm (Об/мин)                |  |
| Torque (момент)                      | newton-meter                | N·m (Н·м)                              |
| Inertia (момент инерции)             | kilogram-meter <sup>2</sup> | kg·m <sup>2</sup> (кг·м <sup>2</sup> ) |
| Friction factor (коэффициент трения) | newton-meter-second         | N·m·с (Н·м·с)                          |

В некоторых моделях для задания параметров используются также и относительные единицы (р.у., о.е.). Общая формула для перехода к относительным единицам имеет вид:

$$y = \frac{Y}{Y_0},$$

где  $Y$  – значение физической величины (параметра, переменной и т. п.) в исходной системе единиц, например в системе единиц СИ;  $Y_0$  – базисное (базовое) значение физической величины, выраженное в той же системе единиц и принятое в качестве единицы измерения величины  $Y$  в системе относительных единиц.

Основными базисными единицами электрических величин выбраны две независимые величины:

- $S_0$  – базисная мощность, равная номинальной полной мощности устройства ( $S_n$ );
- $U_0$  – базисное напряжение, равное номинальному действующему значению напряжения питания устройства ( $U_n$ ).

Все остальные электрические базисные единицы определяются через эти две единицы. Например, базисный электрический ток:

$$I_0 = \frac{S_0}{U_0},$$

базисное сопротивление:

$$Z_{\delta} = \frac{U_{\delta}^2}{S_{\delta}}.$$

Для цепей переменного тока должна задаваться базисная частота  $f_{\delta}$ , равная, как правило, номинальной частоте питающего напряжения  $f_n$ .

Для трансформатора, имеющего несколько обмоток, одна и та же мощность (номинальная мощность трансформатора) будет использоваться для всех обмоток. Однако в соответствии приведенными выше выражениями каждая обмотка может иметь разные базисные напряжение, ток и сопротивление.

Для асинхронной электрической машины дополнительно задаются:

$\Omega_{\delta}$  – базисная угловая скорость,

$$M_{\delta} = \frac{P_{\delta}}{\Omega_{\delta}} - \text{базисный момент.}$$

Вместо момента инерции при задании параметров машины в относительных единицах используется инерционная постоянная:

$$H = \frac{\frac{1}{2} \times J \cdot \Omega_1^2}{S_n},$$

где  $J$  – момент инерции;  $\Omega_1$  – угловая скорость вращения магнитного поля.

Инерционная постоянная выражается в секундах. Величина инерционной постоянной показывает, какое время вал электрической машины будет вращаться под действием запасенной кинетической энергии во вращающихся частях машины при номинальной нагрузке. Для машин большой мощности значение этой постоянной лежит в пределах 3–5 с. Для машин малой мощности эта величина меньше: 0,5–0,7 с.

*Пример 1:*

Параметры трехфазного двухобмоточного трансформатора имеют следующие значения (табл. 1.2).

**Таблица 1.2.** Параметры трехфазного двухобмоточного трансформатора

| Параметр   | Обозначение | Значение    | Единицы измерения |
|--|-------------|-------------|-------------------|
| Число фаз  | $m$         | 3           | –                 |
| Nominal power (номинальная мощность)                   | $S_n$       | 300         | кВА               |
| Nominal frequency (номинальная частота сети)           | $f_n$       | 60          | Гц                |
| Первичная обмотка:                                     |             |             |                   |
| Схема соединения                                       | –           | звезда      | –                 |
| Nominal voltage (номинальное напряжение)               | $U1_n$      | 25          | кВ                |
| Line-to-line resistance (межфазное сопротивление)      | $R1_*$      | 0.01        | о.е.              |
| Leakage reactance (реактивное сопротивление рассеяния) | $X1_*$      | 0.02        | о.е.              |
| Вторичная обмотка:                                     |             |             |                   |
| Схема соединения                                       | –           | треугольник | –                 |
| Nominal voltage (номинальное напряжение)               | $U2_n$      | 600         | В                 |

Таблица 1.2. Параметры трехфазного двухобмоточного трансформатора (продолжение)

| Параметр  | Обозначение     | Значение | Единицы измерения |
|---|-----------------|----------|-------------------|
| Line-to-line resistance (межфазное сопротивление)   | $R2_*$          | 0.01     | о.е.              |
| Leakage reactance (реактивное сопротивление рассеяния)  | $X2_*$          | 0.02     | о.е.              |
| Magnetizing losses at nominal voltage in % of nominal current (потери на намагничивание при номинальном напряжении в % от номинального тока): |                 |          |                   |
| Resistive (активные)  | $\Delta I_{0a}$ | 1        | %                 |
| Inductive (реактивные)  | $\Delta I_{0p}$ | 1        | %                 |

Выражения для определения базисных единиц и их значения приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Базисные единицы

| Параметр   | Расчетное выражение  | Значение         | Единицы измерения |
|--|--|------------------|-------------------|
| Frequency (частота)<br>Первичная обмотка:        | $f_{\delta} = f_n$   | 60               | Гц                |
| Power (мощность)                                 | $S1_{\delta} = \frac{S_n}{m} = \frac{300 \cdot 10^3}{3}$   | $100 \cdot 10^3$ | ВА                |
| Voltage (напряжение)                             | $U1_{\delta} = \frac{U1_n}{\sqrt{3}} = \frac{25 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}$                               | 14434            | В                 |
| Current (ток)                                    | $I1_{\delta} = \frac{S1_{\delta}}{U1_{\delta}} = \frac{100 \cdot 10^3}{14434}$                       | 6.928            | А                 |
| Impedance (полное сопротивление)                 | $Z1_{\delta} = \frac{U1_{\delta}}{I1_{\delta}} = \frac{14434}{6.928}$                                | 2083             | Ом                |
| Resistance (активное сопротивление)              | $R1_{\delta} = \frac{U1_{\delta}}{I1_{\delta}} = \frac{14434}{6.928}$                                | 2083             | Ом                |
| Inductance (индуктивность)<br>Вторичная обмотка: | $L1_{\delta} = \frac{Z1_{\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\delta}} = \frac{2083}{2 \cdot \pi \cdot 60}$ | 5.525            | Гн                |
| Power (мощность)                                 | $S2_{\delta} = \frac{S_n}{m} = \frac{300 \cdot 10^3}{3}$   | $100 \cdot 10^3$ | ВА                |
| Voltage (напряжение)                             | $U2 = U2_n = 600$  | 600              | В                 |
| Current (ток)                                    | $I2_{\delta} = \frac{S2_{\delta}}{U2_{\delta}} = \frac{100 \cdot 10^3}{600}$                         | 166.7            | А                 |
| Impedance (полное сопротивление)                 | $Z2_{\delta} = \frac{U2_{\delta}}{I2_{\delta}} = \frac{600}{166.7}$                                  | 3.60             | Ом                |
| Resistance (активное сопротивление)              | $R2_{\delta} = \frac{U2_{\delta}}{I2_{\delta}} = \frac{600}{166.7}$                                  | 3.60             | Ом                |
| Inductance (индуктивность)                       | $L2_{\delta} = \frac{Z2_{\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\delta}} = \frac{3.60}{2 \cdot \pi \cdot 60}$ | 0.009549         | Гн                |

Значения параметров обмоток в абсолютных единицах могут быть определены следующим образом.

Первичная обмотка:

$$R1 = R1_* \times R1_\sigma = 0,01 \times 2083 = 20,83 \text{ Ом},$$

$$L1 = L1_* \times L1_\sigma = 0,02 \times 5,525 = 0,1105 \text{ Гн}.$$

Вторичная обмотка:

$$R2 = R2_* \times R2_\sigma = 0,01 \times 3,60 = 0,0360 \text{ Ом},$$

$$L2 = L2_* \times L2_\sigma = 0,02 \times 0,009549 = 0,191 \text{ мГн}.$$

Для цепи намагничивания значение активной мощности, равное 1%, и значение реактивной мощности, равное 1%, означает, что активное сопротивление цепи намагничивания равно 100 о.е. и реактивное сопротивление цепи намагничивания равно 100 о.е. Следовательно, абсолютные значения параметров цепи намагничивания равны:

$$R_m = 100 \times R1_\sigma = 100 \times 2083 = 208,3 \text{ кОм},$$

$$L_m = 100 \times L1_\sigma = 100 \times 5,525 = 552,5 \text{ Гн}.$$

*Пример 2:*

Параметры трехфазного четырехполюсного асинхронного двигателя с фазным ротором имеют следующие значения (табл. 1.4).

Таблица 1.4. Параметры асинхронного двигателя

| Параметр   | Обозначение | Значение | Единицы измерения |
|--|-------------|----------|-------------------|
| Число фаз  | $m$         | 3        | -                 |
| Число пар полюсов                                      | $p$         | 2        | -                 |
| Схема соединения обмотки статора                       | -           | звезда   | -                 |
| Nominal power (номинальная мощность)                   | $S_n$       | 2238     | ВА                |
| Nominal frequency (номинальная частота сети)           | $f_n$       | 60       | Гц                |
| Line-to-line voltage (номинальное линейное напряжение) | $U_n$       | 220      | В                 |
| Mutual inductance (взаимоиндуктивность обмоток)        | $L_m$       | 69.31    | мГн               |
| Rotor inertia (момент инерции ротора)                  | $J$         | 0.089    | кг·м <sup>2</sup> |
| Параметры статора:                                     |             |          |                   |
| Активное сопротивление                                 | $R_s$       | 0.435    | Ом                |
| Индуктивность  | $L_s$       | 0.002    | Гн                |
| Параметры ротора, приведенные к статору:               |             |          |                   |
| Активное сопротивление                                 | $R'_r$      | 0.816    | Ом                |
| Индуктивность  | $L'_r$      | 0.002    | Гн                |

Выражения для определения базисных единиц и их значения приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Базисные единицы

| Параметр             | Расчетное выражение                                      | Значение | Единицы измерения |
|----------------------|--|----------|-------------------|
| Power (мощность)     | $S_\sigma = \frac{S_n}{m} = \frac{2238}{3}$              | 746      | ВА                |
| Frequency (частота)  | $f_\sigma = f_n$   | 60       | Гц                |
| Voltage (напряжение) | $U_\sigma = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}}$ | 127.0    | В                 |

Таблица 1.5. Базисные единицы (продолжение)

| Параметр                            | Расчетное выражение   | Значение | Единицы измерения |
|-------------------------------------|---|----------|-------------------|
| Current (ток)                       | $I_{\phi} = \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{746}{127.0}$                                    | 5.874    | А                 |
| Impedance (полное сопротивление)    | $Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}} = \frac{127.0}{5.874}$                                  | 21.62    | Ом                |
| Resistance (активное сопротивление) | $R_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}} = \frac{127.0}{5.874}$                                  | 21.62    | Ом                |
| Inductance (индуктивность)          | $L_{\phi} = \frac{Z_{\phi}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\phi}} = \frac{21.62}{2 \cdot \pi \cdot 60}$ | 0.05735  | Гн                |
| Speed (частота вращения)            | $\Omega_{\phi} = \Omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_u}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 60}{2}$ | 188.5    | рад/с             |
| Torque (момент)                     | $M_{\phi} = \frac{S_{\phi} \cdot m}{\Omega_{\phi}} = \frac{746 \cdot 3}{188.5}$               | 11.87    | Н · м             |

Значения параметров обмоток двигателя и цепи намагничивания могут быть определены следующим образом.

Сопротивление статора:

$$R_{s*} = \frac{R_s}{Z_{\phi}} = \frac{0.435}{21.62} = 0.0201 \text{ о.е.}$$

Индуктивность статора:

$$L_{s*} = \frac{L_s}{L_{\phi}} = \frac{0.002}{0.05735} = 0.0349 \text{ о.е.}$$

Сопротивление ротора:

$$R'_{r*} = \frac{R'_r}{Z_{\phi}} = \frac{0.816}{21.62} = 0.0377 \text{ о.е.}$$

Индуктивность ротора:

$$L'_{r*} = \frac{L'_r}{L_{\phi}} = \frac{0.002}{0.05735} = 0.0349 \text{ о.е.}$$

Величина инерционной постоянной равна:

$$H = \frac{\frac{1}{2} \times J \cdot \Omega_1^2}{S_n} = \frac{\frac{1}{2} \times 0.089 \cdot 188.5^2}{2238} = 0.7065 \text{ с.}$$

Рассчитанные параметры асинхронной машины заданы «по умолчанию» для модели машины в относительных единицах (блок Asynchronous Machine pu Units).

При наблюдении переменных блоком Scope следует иметь в виду, что блок показывает *мгновенные* значения переменных. Иными словами, максимальное значение синусоидальной переменной, показываемое осциллографом, будет в  $\sqrt{2}$  больше, чем заданное в параметрах блока действующее значение.

Использование относительных единиц имеет следующие преимущества:

- облегчается сравнение значений переменных в разных режимах работы. Например, если величина напряжения какого-либо участка электрической цепи равна 1,5 о.е., то это означает, что величина напряжения этого участка в 1,5 раза больше, чем номинальное питающее напряжение;
- величины полных сопротивлений слабо меняются при изменении мощности и питающего напряжения устройства. Например, для всех трансформаторов в диапазоне мощностей от 3 до 300 кВА реактивное сопротивление рассеяния изменяется в пределах между 0,01 и 0,03 о.е., а активные сопротивления обмоток изменяются от 0,01 до 0,005 о.е., независимо от номинального напряжения. В свою очередь, для трансформаторов в диапазоне мощностей от 300 кВА до 300 МВА реактивное сопротивление рассеяния изменяется в пределах между 0,03 и 0,12 о.е., а активные сопротивления обмоток – от 0,005 до 0,002 о.е. Таким образом, если параметры трансформатора мощностью 10 кВА неизвестны, не будет большой ошибкой принять среднее значение 0,02 о.е. для реактивности рассеяния и 0,0075 о.е. для активных сопротивлений;
- вычисления в относительных единицах упрощены. Когда все полные сопротивления энергетической системы вычислены на общей энергетической базе и номинальных напряжениях подсетей, то общее полное сопротивление может быть вычислено простым суммированием полных сопротивлений подсетей без учета коэффициентов трансформации.

### **3.1.4. Повышение скорости и точности расчетов**

На точность и скорость расчета модели в Simulink и SimPowerSystems можно воздействовать многими способами, включая структуру модели и ее параметры. Решающие модули Simulink и SPS работают точно и эффективно с параметрами, заданными для них «по умолчанию». Однако для некоторых моделей можно добиться лучших результатов по скорости и точности, если задать более точно параметры решателя дифференциальных уравнений. Также, если предполагаемое поведение модели известно, то можно, используя эту информацию, повысить скорость и точность расчетов. Как правило, модель электротехнической установки включает не только SimPowerSystems-блоки, но и блоки основной библиотеки Simulink, поэтому повышение скорости и точности расчета может достигаться как общими для Simulink-моделей методами, так и методами, специфическими для SPS-моделей. Ниже приведены рекомендации по повышению скорости и точности расчетов, как для Simulink-моделей, так и для моделей, включающих SimPowerSystems-блоки.

Малая скорость моделирования может иметь много причин. Среди них можно выделить основные:

- Модель содержит блок MATLAB Fcn. При использовании блока MATLAB Fcn в модели Simulink на каждом расчетном шаге обращается к интерпретатору

языка MATLAB для выполнения расчетов в данном блоке. Вместо блока MATLAB Fcn, если это возможно, следует использовать блоки Fcn или Math Function.

- Модель включает S-функцию, написанную на языке MATLAB. В этом случае также происходит обращение к интерпретатору языка MATLAB на каждом расчетном шаге. Вместо MATLAB S-функции более предпочтительным было бы использование S-функций, написанных на языках C или Fortran и откомпилированных в исполняемый машинный код в виде динамической библиотеки.
- Модель включает блок памяти Memory. Использование блока памяти заставляет решающие модули с переменным порядком (ode15s и ode113) выполнять снижение порядка до первого на каждом расчетном шаге.
- Максимальный размер шага (Max step size) слишком мал. Если этот параметр был изменен, то следует попробовать выполнить моделирование снова, установив этот параметр равным auto.
- Задана слишком высокая точность расчетов. Обычно значение абсолютной погрешности (Relative tolerance), заданное равным 0,1%, достаточно для большинства расчетов. При слишком малых значениях этого параметра шаг расчета может оказаться также достаточно малым, что приведет к замедлению расчетов.
- Задан слишком большой интервал расчета по времени. Как правило, при моделировании динамических систем переходные процессы представляют больший интерес, нежели установившийся режим. По достижении установившегося режима расчет можно прекратить, поскольку далее никаких изменений в состоянии модели не будет. Желательно заранее оценить предполагаемое время расчета, исходя из знаний о моделируемом объекте.
- Модель может оказаться жесткой, а используемый решатель не предназначен для моделирования жестких систем. Следует попробовать использовать методы ode15s или ode23t и сравнить время расчета при решении этими методами.
- В модели используются блоки, шаг дискретизации которых (Sample time) не является кратным. В этом случае Simulink уменьшает шаг расчета до такого значения, чтобы он был кратен шагу дискретизации каждого блока. Например, если шаг дискретизации одного блок равен 0,5, а другого – 0,7, то Simulink установит максимальное значение шага расчета, равное 0,1.
- Модель содержит алгебраический контур. Алгебраические контуры рассчитываются в Simulink с помощью итерационной процедуры на каждом шаге расчета, что замедляет общее время расчета.
- Модель имеет блок Random Number, который передает свой выходной сигнал на вход интегратора (блок Integrator). Предпочтительнее использовать блок Band-Limited White Noise block из библиотеки Sources.
- Модель включает большое число блоков Scope. Блоки требуют значительного объема памяти для хранения отображаемых данных, что может привести к использованию компьютером виртуальной (дисковой) памяти и существенному замедлению расчетов.

- В блоках Scope параметр Limit data points to last задан значительно меньшим, чем фактическое число расчетных шагов (либо флажок этого параметра снят). В этом случае, при превышении числом шагов значения параметра Limit data points to last, для отображения каждой новой расчетной точки будет выполняться процедура выделения памяти, что существенно замедляет скорость расчета. Рекомендуется заранее установить параметр Limit data points to last большим, чем фактическое число расчетных шагов. Имеет смысл также задать параметр Decimation (прореживание) большим 1, чтобы сократить число хранимых блоком Scope данных.

Скорость расчета можно также повысить в несколько раз, используя ускоренный (Accelerator) режим расчета. Это можно сделать с помощью меню Tools или панели инструментов. В ускоренном режиме расчета предварительно проводится трансляция модели в исполнительный код (dll-файл), а затем уже проводится сам расчет. Некоторые дополнительные затраты времени на трансляцию с лихвой окупаются ускорением расчета модели. Однако при изменении структуры модели процедура трансляции будет повторена. К сожалению, ускоренный режим расчета не может быть использован в моделях, имеющих алгебраические контуры.

Существенный выигрыш по времени может дать использование дискретных моделей вместо непрерывных. В SPS-моделях дискретизацию удобнее всего выполнить с помощью графического интерфейса пользователя – Powergui.

При моделировании ключевых устройств следует избегать неоправданно большого различия в параметрах для включенного и выключенного состояний. Так, начинающий пользователь для Ideal Switch может задать сопротивление во включенном состоянии  $R_{on} = 10^{-6}$  Ом, а активное сопротивление искрогасящей цепи  $R_s = 10^6$  Ом, полагая, что такие параметры обеспечат наилучшее приближение к идеальной модели. При этом разница в сопротивлении ключа для включенного и выключенного состояний составит 12 порядков и модель окажется жесткой, что вынудит Simulink существенно снизить шаг расчета и, соответственно, общее время расчета модели значительно возрастет. В то время как для достижения вполне хороших результатов различие между  $R_{on}$  и  $R_s$  может составлять всего 2–3 порядка.

Моделирование полупроводниковых преобразователей энергии может занимать достаточно большое время. Если при расчетах требуются повторные вычисления, начиная с некоторого момента времени, то можно сэкономить время, сохранив вектор состояний модели для этого момента в рабочей области MATLAB. Все повторные расчеты можно будет проводить, начиная с этого состояния. Для реализации такого механизма необходимо выполнить соответствующие настройки на вкладке Workspace окна Configuration parameters.

Наиболее существенным с точки зрения скорости вычислений может оказаться правильный выбор уровня детализации модели. К примеру, если выполняется моделирование системы электроснабжения города, вряд ли стоит моделировать каждый потребитель электрической энергии: электрический двигатель, чайник, сварочный аппарат и т. п. Вполне достаточным будет создание обобщенных моделей электрических потребителей на уровне заводского цеха, жилого дома, трамвайного парка и т. п.

Чтобы проверить, достаточно ли точно выполняется моделирование, следует провести сравнительные расчеты с разными значениями параметра Relative

tolerance (относительная погрешность). К примеру, можно провести расчет с заданным «по умолчанию» значением этого параметра –  $1e-3$  и с меньшим ( $1e-4$ ) значением. Если результаты расчетов отличаются незначительно, то можно полагать, что найденное решение является верным. Если решения значительно отличаются в начальной стадии, то следует задать в явном виде достаточно малый начальный шаг расчета (Initial step size).

Если решение оказывается неустойчивым, то это может быть вызвано следующими причинами:

- моделируемая система сама является неустойчивой;
- используется метод ode15s. Следует ограничить порядок величиной 2 или использовать метод ode23t.

Если решение кажется неточным, то следует задать в явном виде параметр Absolute tolerance (абсолютная погрешность) и выполнить ряд расчетов, уменьшая величину этого параметра.

Если при уменьшении абсолютной погрешности точность расчетов не улучшается, следует уменьшить относительную погрешность (это приведет к уменьшению шага расчета) либо в явном виде задавать достаточно малую величину максимального шага расчета.

## 3.2. Источники электрической энергии Electrical Sources

### 3.2.1. Идеальный источник постоянного напряжения DC Voltage Source

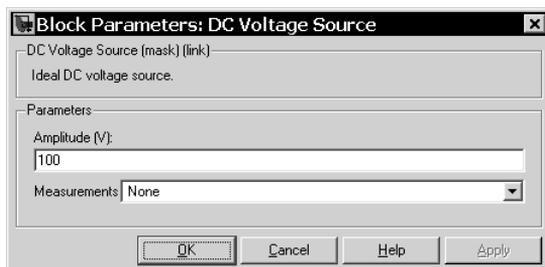
*Пиктограмма:*



*Назначение:*

Вырабатывает постоянное по уровню напряжение. Вход и выход блока DC Voltage Source соответствуют положительному и отрицательному выводам источника.

*Окно задания параметров:*



**Параметры блока:****Amplitude (V):**

[Амплитуда (В)]. Задает величину выходного напряжения источника.

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Voltage – выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения, то есть его собственное сопротивление равно нулю.

*Пример:*

На рис. 3.3 показан пример включения активно-индуктивной нагрузки на постоянное напряжение. Подключение источника к нагрузке обеспечивается блоком Ideal Switch, который замыкает электрическую цепь по сигналу, вырабатываемому генератором ступенчатого сигнала Step. Измерение тока в цепи выполняется с помощью блока Current Measurement. Полученный измерителем сигнал отображается с помощью блока Scope.

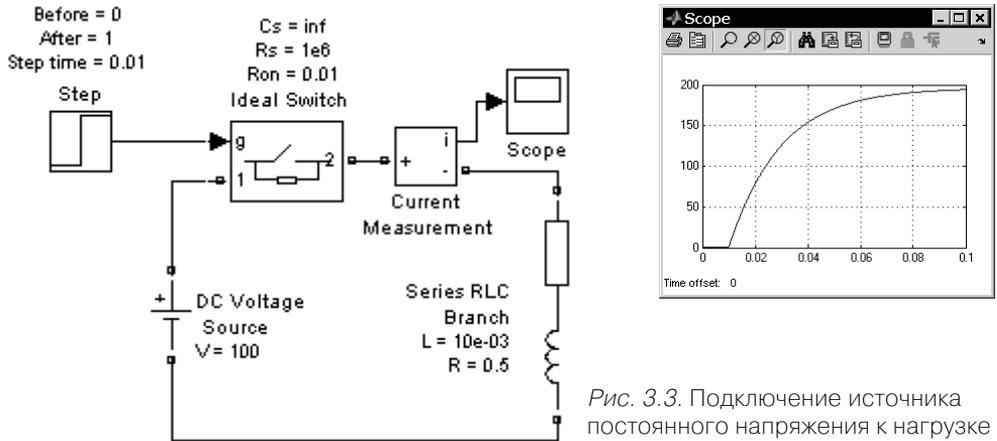


Рис. 3.3. Подключение источника постоянного напряжения к нагрузке

### 3.2.2. Идеальный источник переменного напряжения AC Voltage Source

**Пиктограмма:**

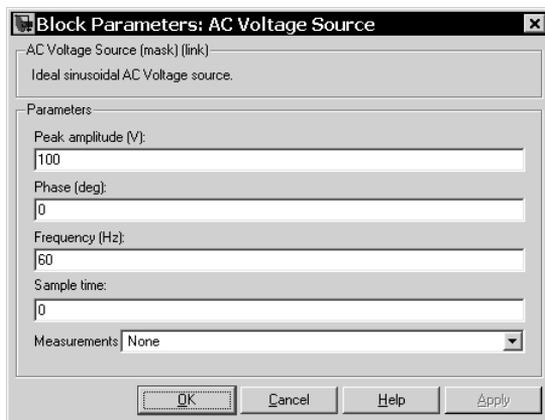
**Назначение:**

Вырабатывает синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой. Напряжение источника AC Voltage Source описывается следующим выражением:

$$U = A \times \sin(2\pi ft + \phi),$$

где  $A$  – амплитуда напряжения источника;  $f$  – частота;  $\phi$  – начальная фаза напряжения.

Знак «+» на пиктограмме блока показывает положительное направление напряжения источника.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Peak Amplitude (V):**

[Амплитуда (В)]. Амплитуда выходного напряжения источника.

**Phase (deg):**

[Фаза (град)]. Начальная фаза.

**Frequency (Hz):**

[Частота (Гц)]. Частота источника.

**Sample time:**

[Шаг дискретизации]. Параметр задает шаг дискретизации по времени выходного напряжения источника при создании дискретных моделей.

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Voltage – выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения, то есть его собственное сопротивление равно нулю.

*Пример:*

На рис. 3.4 показана схема, моделирующая подключение активно-индуктивной нагрузки к источнику переменного напряжения. Там же приведен график тока в нагрузке.

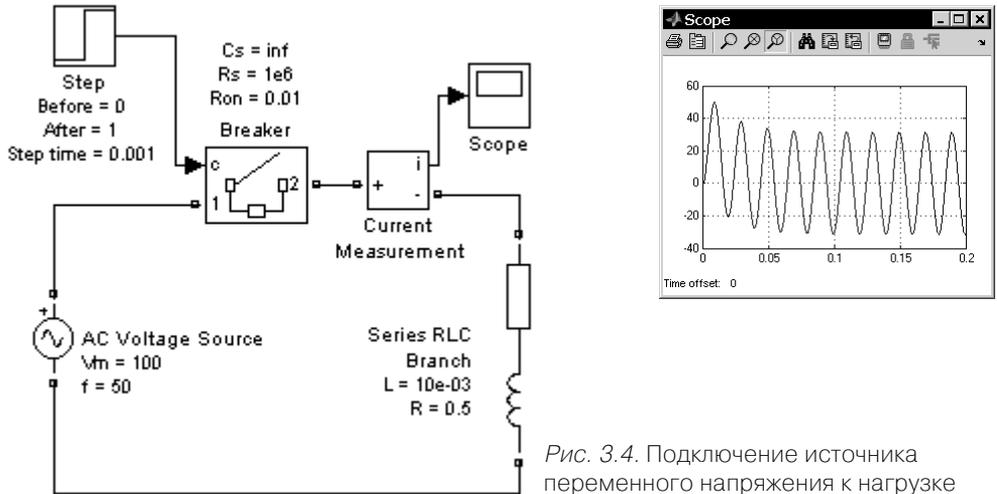


Рис. 3.4. Подключение источника переменного напряжения к нагрузке

### 3.2.3. Идеальный источник переменного тока AC Current Source

*Пиктограмма:*



*Назначение:*

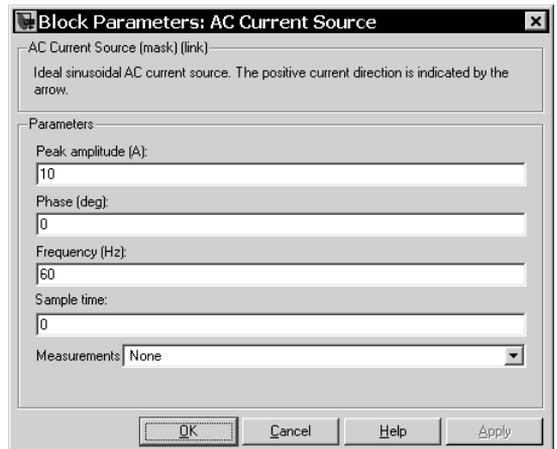
Вырабатывает синусоидальный ток с постоянной амплитудой. Ток источника AC Current Source описывается следующим выражением:

$$I = A \times \sin(2\pi ft + \phi),$$

где  $A$  – амплитуда тока источника;  $f$  – частота;  $\phi$  – начальная фаза тока.

Знак «+» на пиктограмме блока показывает положительное направление тока источника.

*Окно задания параметров:*



**Параметры блока:****Peak Amplitude (A):**

[Амплитуда (A)]. Амплитуда выходного тока источника.

**Phase (deg):**

[Фаза (град)]. Начальная фаза.

**Frequency (Hz):**

[Частота (Гц)]. Частота источника.

**Sample time:**

[Шаг дискретизации]. Параметр задает шаг дискретизации по времени выходного тока источника при создании дискретных моделей.

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Current – выходной ток источника.

Блок является идеальным источником тока, то есть его собственное сопротивление равно бесконечности. Для амплитуды и фазы допустимы отрицательные значения. Нулевая частота определяет источник постоянного тока. Задание отрицательной частоты недопустимо.

*Пример:*

На рис. 3.5 показана схема, моделирующая работу двух источников тока на активную нагрузку. Источники имеют одинаковую амплитуду тока (3 А), но разную частоту (50 и 60 Гц). Ток в нагрузке является суммой токов этих двух источников.

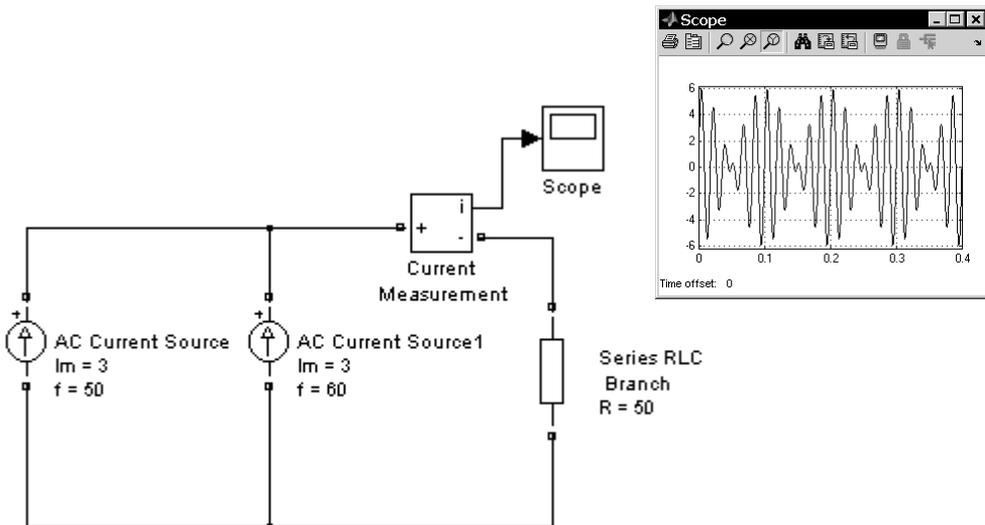


Рис. 3.5. Работа источников тока на общую нагрузку

## 3.2.4. Управляемый источник напряжения Controlled Voltage Source

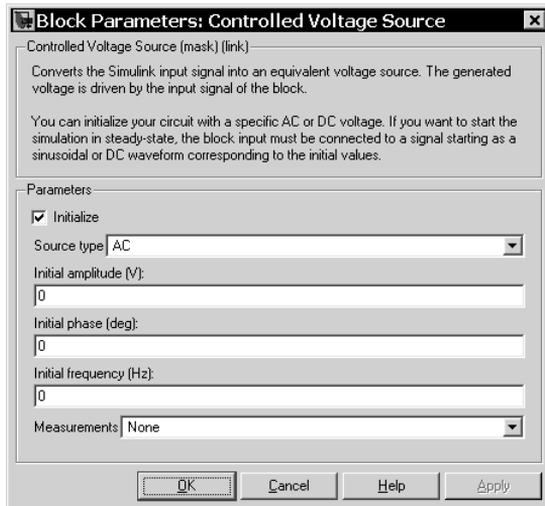
**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Вырабатывает напряжение в соответствии с сигналом управления. Сигнал управления является безразмерным Simulink-сигналом. Источник Controlled Voltage Source может быть инициализирован как источник постоянного или переменного напряжения. При моделировании установившегося режима начальное значение управляющего сигнала должно соответствовать начальным значениям параметров источника.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Initialize:**

[Инициализация]. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами – амплитудой, фазой и частотой.

**Source type:**

[Тип источника]. Тип источника указывается, если требуется инициализация источника. Если инициализация источника не задана, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- AC – источник переменного напряжения;
- DC – источник постоянного напряжения.

**Initial amplitude (V):**

[Начальная амплитуда (В)]. Начальное значение выходного напряжения источника. Параметр доступен, если задана инициализация источника.

**Initial phase (deg):**

[Начальная фаза (град)]. Начальная фаза. Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного напряжения.

**Initial frequency (Hz):**

[Initial частота (Гц)]. Начальная частота источника. Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного напряжения.

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Voltage – выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения, то есть его собственное сопротивление равно нулю.

*Пример:*

На рис. 3.6 показана схема с использованием управляемого источника напряжения, формирующего по сигналу управления прямоугольное напряжение на нагрузке.

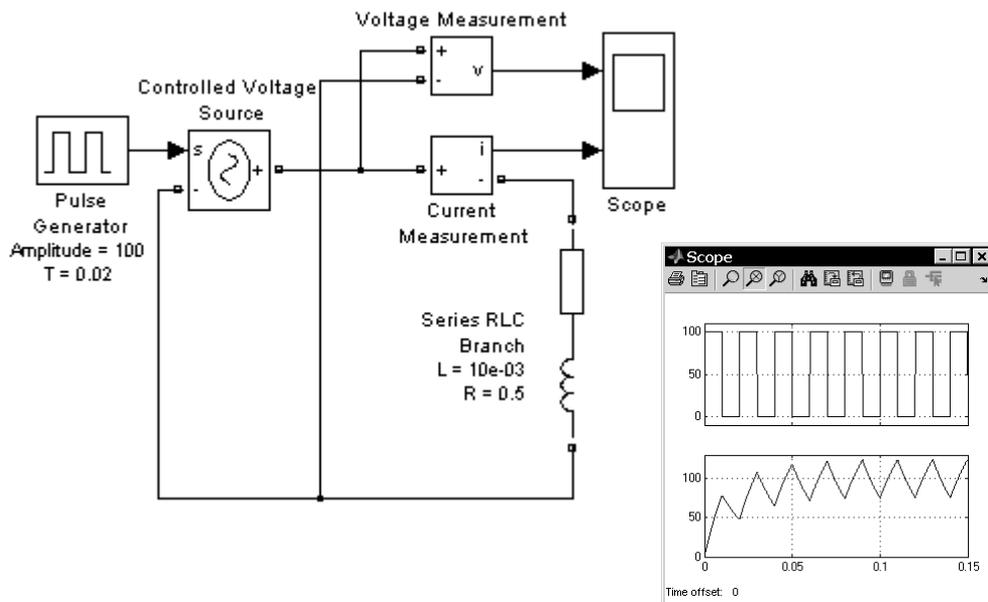


Рис. 3.6. Формирование пульсирующего напряжения с помощью управляемого источника напряжения

## 3.2.5. Управляемый источник тока Controlled Current Source

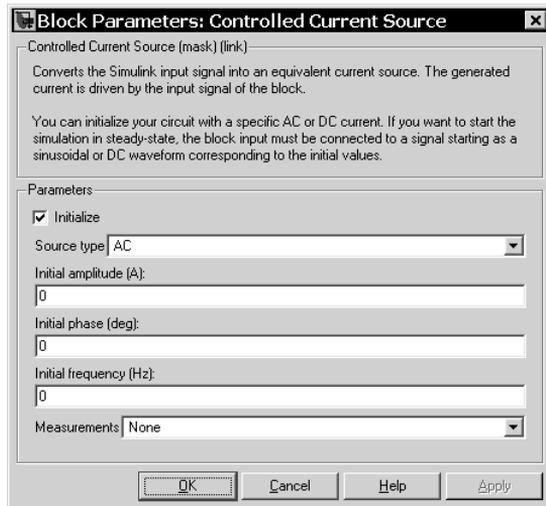
**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Вырабатывает ток в соответствии с сигналом управления. Сигнал управления является безразмерным Simulink-сигналом. Источник Controlled Current Source может быть инициализирован как источник постоянного или переменного тока. При моделировании установившегося режима начальное значение управляющего сигнала должно соответствовать начальным значениям параметров источника.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Initialize:**

[Инициализация]. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами – амплитудой, фазой и частотой.

**Source type:**

[Тип источника]. Тип источника указывается, если требуется инициализация источника. Если инициализация источника не задана, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- AC – источник переменного тока;
- DC – источник постоянного тока.

**Initial amplitude (A):**

[Начальная амплитуда (A)]. Начальное значение выходного тока источника. Параметр доступен, если задана инициализация источника.

**Initial phase (deg):**

[Начальная фаза (град)]. Начальная фаза. Параметр доступен, источник инициализируется как источник переменного тока.

**Initial frequency (Hz):**

[Initial частота (Гц)]. Начальная частота источника. Параметр доступен, источник инициализируется как источник переменного тока.

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Current – выходной ток источника.

Блок является идеальным источником тока, то есть его собственное сопротивление равно бесконечности.

*Пример:*

На рис. 3.7 показана схема с использованием управляемого источника тока, формирующего в нагрузке серии синусоидальных импульсов тока.

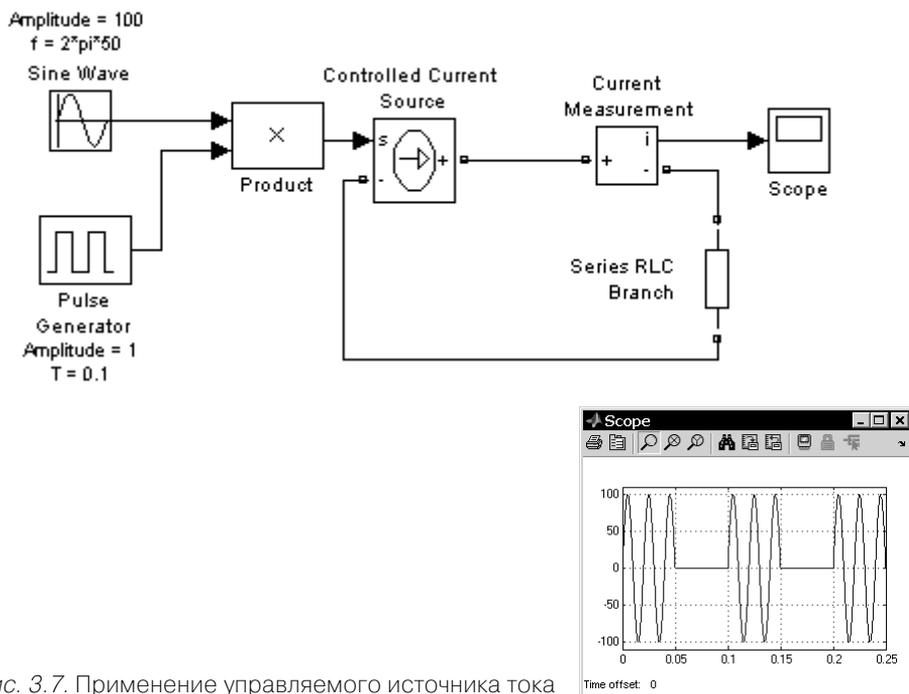
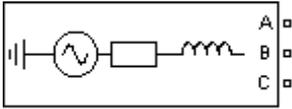


Рис. 3.7. Применение управляемого источника тока

## 3.2.6. Трехфазный источник напряжения

### 3-Phase Source

**Пиктограмма:**

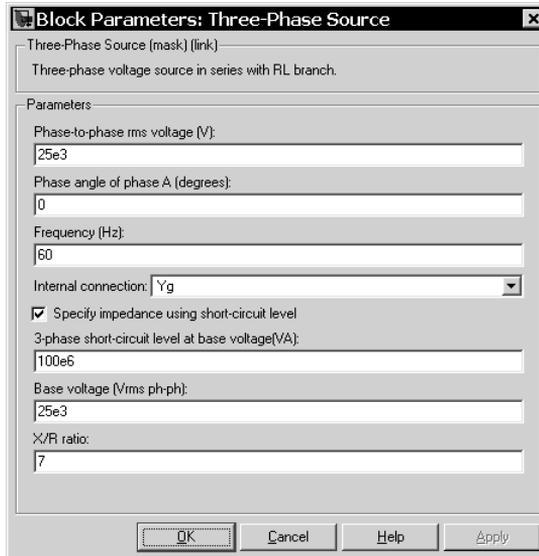


Three-Phase Source

**Назначение:**

Моделирует трехфазный источник напряжения. Блок 3-Phase Source включает в себя три источника переменного напряжения, соединенных в звезду с нулевым проводом или без него. Каждая фаза источника обладает внутренним активнo-индуктивным сопротивлением. Внутренние сопротивления всех фаз источника одинаковы. Внутреннее сопротивление источника может быть задано непосредственно с помощью значений сопротивления и индуктивности фазы или косвенно, с помощью параметров короткого замыкания.

**Окно задания параметров:**



**Параметры 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)]. Частота источника.

**Internal connection:**

[Соединение фаз источника]. Значение параметра выбирается из списка:

- Y – звезда;
- Yn – звезда с нулевым проводом;
- Yg – звезда с заземленной нейтралью.

**Specify impedance using short-circuit level:**

[Задать собственное полное сопротивление источника, используя параметры короткого замыкания]. При установке флажка 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, при котором определена мощность короткого замыкания.

**X/R ratio:**

[Отношение индуктивного и активного сопротивлений].

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

$$X = \frac{U_{кз}^2}{Q_{кз}},$$

где  $Q_{кз}$  – мощность короткого замыкания;  $U_{кз}$  – напряжение источника, при котором определена мощность короткого замыкания.

Активное сопротивление источника находится в соответствии с выражением:

$$R = \frac{X}{k},$$

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

**Пример:**

На рис. 3.8 показана схема с использованием трехфазного источника напряжения, подключаемого к несимметричной трехфазной нагрузке. Токи в нагрузке измерены с помощью блока Multimetr.

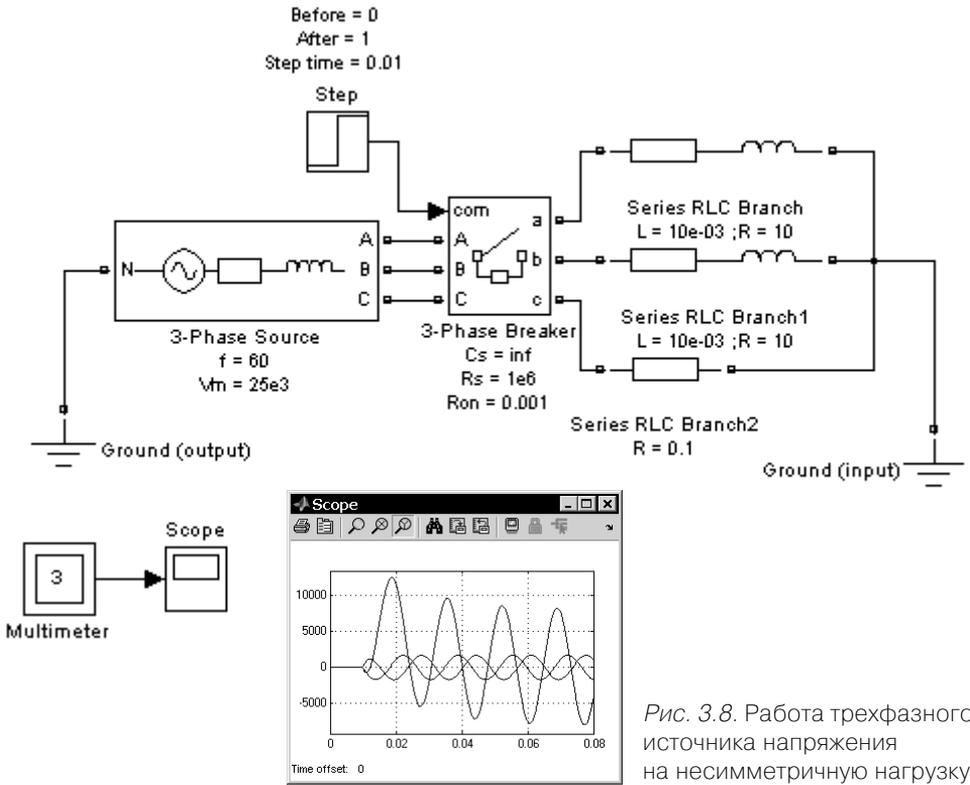
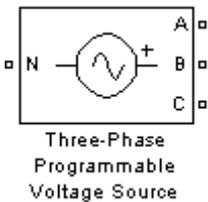


Рис. 3.8. Работа трехфазного источника напряжения на несимметричную нагрузку

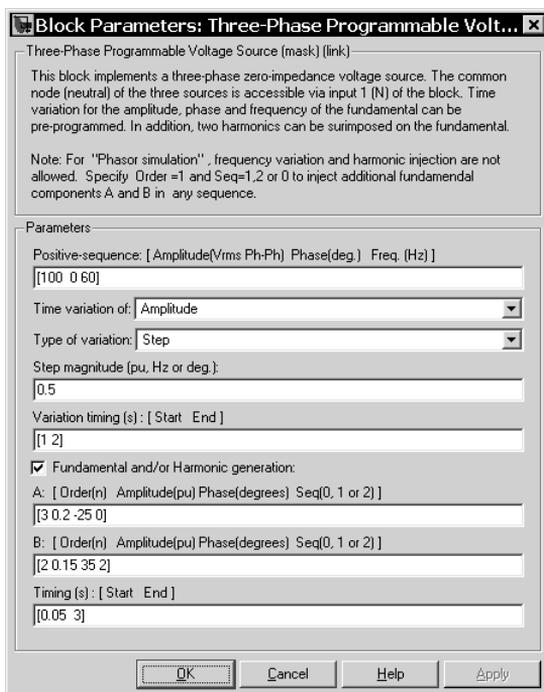
### 3.2.7. Трехфазный программируемый источник напряжения 3-Phase Programmable Voltage Source

*Пиктограмма:*



**Назначение:**

Блок 3-Phase Programmable Voltage Source вырабатывает трехфазную систему напряжений с программируемыми во времени изменениями амплитуды, фазы и частоты, а также гармонического состава.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:**

**Positive-sequence:** [Amplitude (Vrms Ph-Ph) Phase (degrees) Freq. (Hz)]

[Прямая последовательность: [Действующее значение (В) Фаза (градусы) Частота (Гц)]]. Параметр задается в виде вектора из трех элементов.

**Time variation of:**

[Изменение во времени]. Раскрывающийся список позволяет выбрать параметр источника, который будет изменяться с течением времени. Значение параметра выбирается из списка:

- None – нет изменяющихся во времени параметров источника;
- Amplitude – амплитуда;
- Phase – фаза;
- Frequency – частота.

**Type of variation:**

[Способ изменения]. Параметр задает вид изменения выбранного параметра источника. Вид изменения выбирается из списка:

- Step – ступенчатое изменение;
- Ramp – линейное изменение;
- Modulation – модуляция;
- Table of time-amplitude pairs – таблица ‘время–значение’.

**Step magnitude** [pu, Hz or deg]:

[Уровень ступенчатого сигнала [о.е., Гц или град.]]. Задаёт величину, на которую ступенчато изменяется выбранный параметр. Изменение величины напряжения задаётся в относительных единицах (о.е.), фазы – в эл. градусах, и частоты – в Гц. Например, если выбрано ступенчатое изменение амплитуды сигнала, равное 0,5, то это означает, что величина выходного напряжения источника будет увеличена на 0,5 относительно указанного в первой графе значения. Время, в течение которого величина выходного напряжения будет изменена, задаётся в графе Variation timing.

**Rate of change** (value/s):

[Скорость изменения (величина/с)]. Задаёт скорость изменения параметра источника. Изменение величины напряжения задаётся в о. е./с, фазы – в эл. градусах/с, и частоты – в Гц/с.

**Amplitude of the modulation:**

[Амплитуда модуляции]. В данной графе задаётся амплитуда модуляции параметра источника. Амплитуда модуляции напряжения задаётся в относительных единицах (о.е.), фазы – в эл. градусах, и частоты – в Гц.

**Frequency of the modulation** (Hz):

[Частота модуляции (Гц)].

**Variation timing** (s): [Start End]

[Время действия изменения [Начало Конец]]. Параметр определяет время начала и время окончания действия изменения выбранного параметра источника. Параметр задаётся в виде вектора из двух значений (начальное и конечное время).

**Fundamental and/or Harmonic generation:**

[Наложение прямой, обратной, или нулевой последовательности и/или высших гармоник].

**A: [Order (n) Amplitude Phase (degrees) Seq (0, 1 or 2)]**

[A: [Гармоника (n) Амплитуда Фаза (град) Последовательность (0, 1 или 2)]]. В графе задаётся вектор параметров генерируемой гармоники напряжения: номер гармоники, амплитуда (в относительных единицах), начальная фаза, последовательность (0 – нулевая, 1 – прямая, 2 – обратная). Результирующее выходное напряжение будет являться суммой напряжений, заданных в графе Positive-sequences и в данной графе.

**B: [Order (n) Amplitude Phase (degrees) Seq (0, 1 or 2)]**

[B: [Гармоника (n) Амплитуда Фаза (град) Последовательность (0, 1 или 2)]]. Параметр задаётся аналогично предыдущему.

**Harmonic timing** (s): [Start End]

[Время действия гармоники (с) [Начало Конец]]. В графе задаётся вектор начального и конечного значений времени для генерации гармоник.

Источник является идеальным источником напряжения (его внутреннее сопротивление равно нулю).

*Пример:*

На рис. 3.9 показана схема с использованием трехфазного программируемого источника напряжения, подключенного к симметричной активной нагрузке.

В интервале времени от 0,02 до 0,06 с источник дополнительно генерирует третью гармонику напряжения прямой последовательности с амплитудой 0,5 о.е.

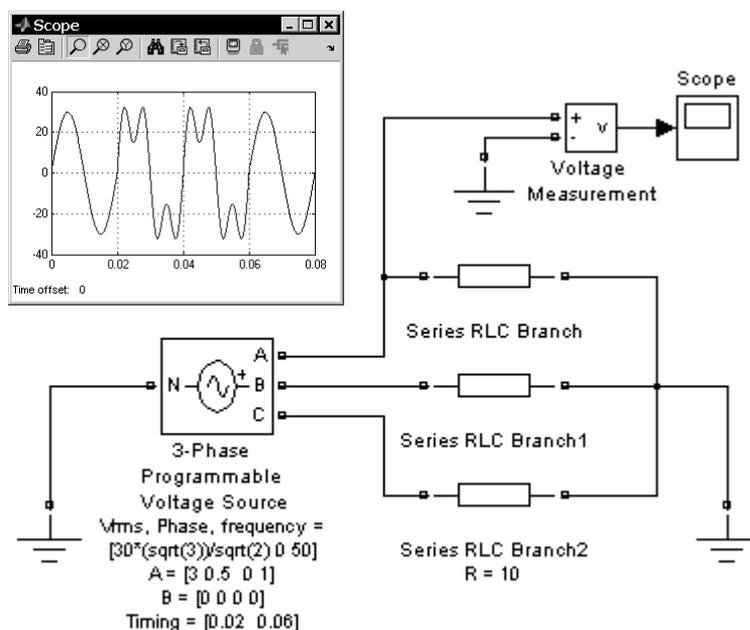


Рис. 3.9. Применение трехфазного программируемого источника напряжения

## 3.3. Измерительные и контрольные устройства

### 3.3.1. Измеритель тока *Current Measurement*

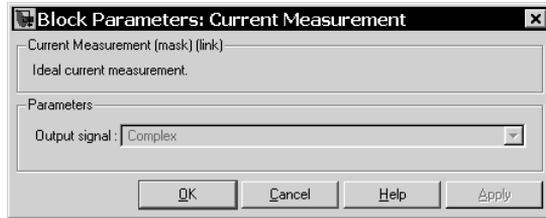
**Пиктограмма:**



Current Measurement

**Назначение:**

Выполняет измерение мгновенного значения тока, протекающего через соединительную линию (провод). Выходным сигналом блока *Current Measurement* является обычный сигнал Simulink, который может использоваться любым Simulink-блоком.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Output type:**

[Вид выходного сигнала]. Выбор значения параметра возможен, только если с помощью блока Powergui установлен режим расчета схемы комплексным методом (Phasor simulation). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- Magnitude – амплитуда (скалярный сигнал);
- Complex – комплексный сигнал;
- Real-Imag – вектор, состоящий из двух элементов – действительная и мнимая составляющие сигнала;
- Magnitude-Angle – вектор, состоящий из двух элементов – амплитуда и аргумент сигнала.

Положительное направление тока задается знаками «+» и «-» на пиктограмме блока. При протекании тока от клеммы «+» к клемме «-» знак тока считается положительным.

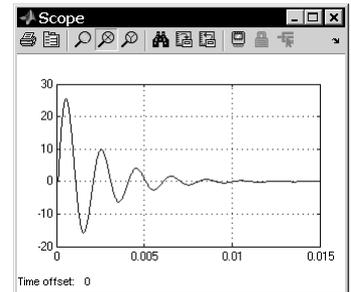
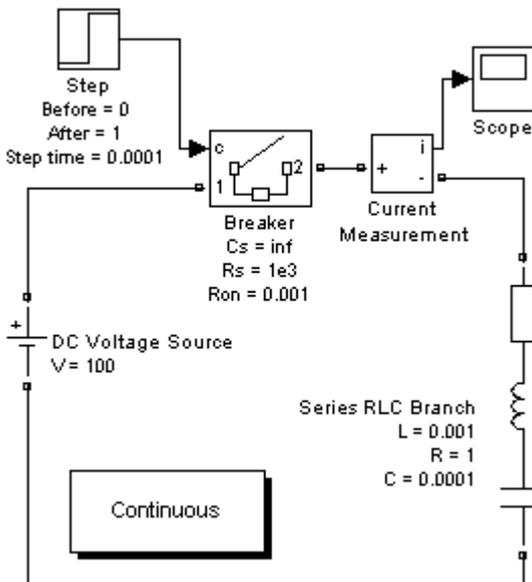


Рис. 3.10. Измерение тока цепи

*Пример:*

На рис. 3.10 показана схема, в которой блок Current Measurement используется для измерения тока в последовательном колебательном контуре. Simulink-сигнал, формируемый данным блоком, используется затем для отображения тока на осциллографе. Нулевые начальные условия для расчета схемы задаются в окне параметров блока Series RLC Branch.

## 3.3.2. Измеритель напряжения Voltage Measurement

**Пиктограмма:**

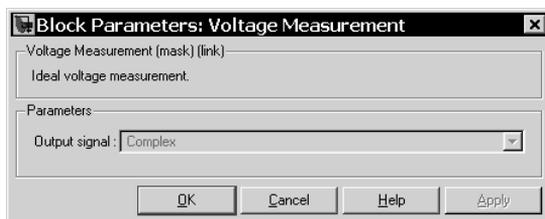


Voltage Measurement

**Назначение:**

Выполняет измерение мгновенного значения напряжения между двумя узлами схемы. Выходным сигналом блока Voltage Measurement является обычный сигнал Simulink, который может использоваться любым Simulink-блоком.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Output signal:**

[Выходной сигнал]. Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен, только если с помощью блока Powergui установлен режим расчета схемы комплексным методом (Phasor simulation). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- Magnitude – амплитуда (скалярный сигнал);
- Complex – комплексный сигнал;
- Real-Imag – вектор, состоящий из двух элементов – действительная и мнимая составляющие сигнала;
- Magnitude-Angle – вектор, состоящий из двух элементов – амплитуда и аргумент сигнала.

Положительное направление напряжения задается знаками «+» и «-» на пиктограмме блока. Знак напряжения считается положительным, если напряжение направлено от клеммы «+» к клемме «-».

*Пример:*

На рис. 3.11 показана схема, в которой блок Voltage Measurement используется для измерения напряжения на конденсаторе последовательного колебательного контура. Simulink-сигнал, формируемый данным блоком, используется затем для отображения напряжения на осциллографе. Нулевые начальные условия для расчета схемы задаются в окне параметров блока Series RLC Branch.

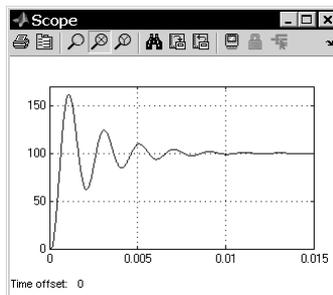
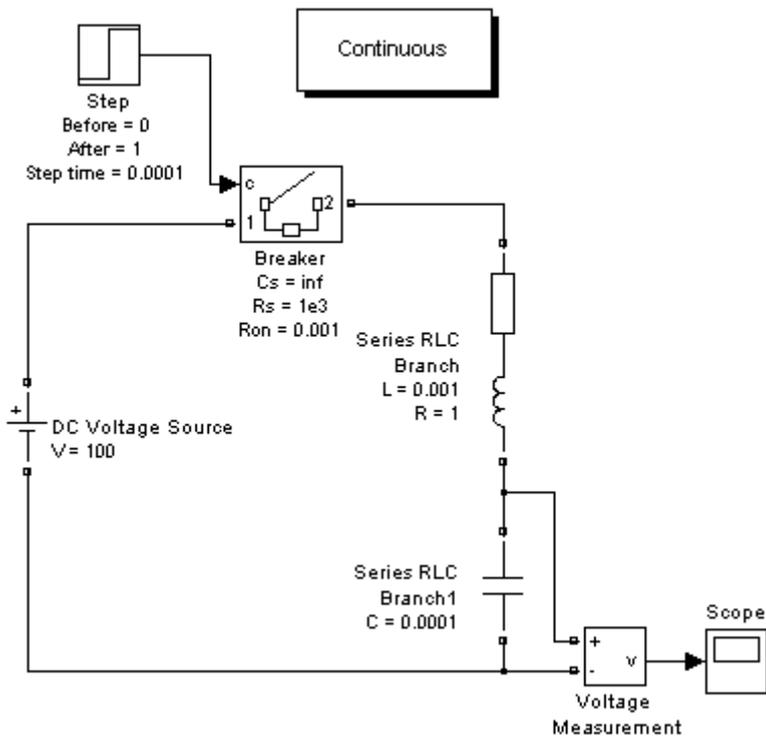


Рис. 3.11. Измерение напряжения участка цепи

### 3.3.3. Мультиметр *Multimeter*

**Пиктограмма:**

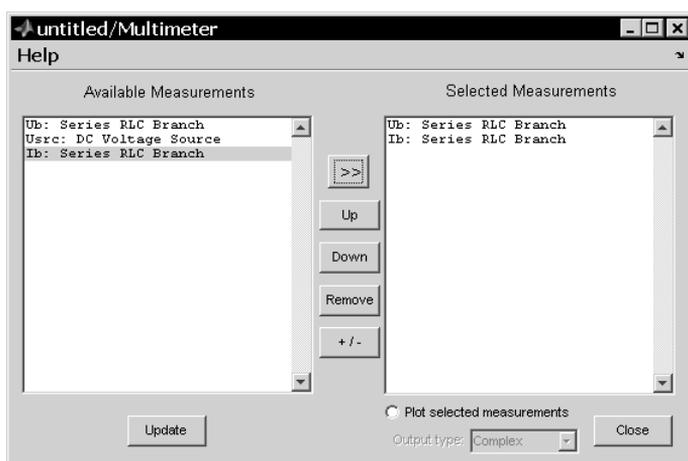


Multimeter

**Назначение:**

Блок Multimeter выполняет измерение токов и напряжений блоков библиотеки SimPowerSystems, для которых в их окне диалога установлен параметр Measurements (измеряемые переменные).

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

#### Available Measurements

[Переменные, доступные для измерения]. В данной графе отображаются переменные (токи и напряжения) блоков схемы, для которых в их окне диалога установлен параметр Measurements (измеряемые переменные). Обновление списка переменных можно выполнить с помощью клавиши Update.

#### Selected Measurements

[Измеряемые переменные]. В данной графе указываются переменные, которые будут передаваться на выход блока Multimeter. Для управления списком измеряемых переменных можно использовать следующие клавиши:

- >> – добавить выделенную переменную в список измеряемых;
- Up – передвинуть вверх выделенную переменную в списке измеряемых;
- Down – передвинуть вниз выделенную переменную в списке измеряемых;
- Remove – удалить выделенную переменную из списка измеряемых;
- + / - – изменить знак выделенной переменной.

**Output type:**

[Выходной сигнал]. Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен, только если с помощью блока Powergui установлен режим расчета схемы комплексным методом (Phasor simulation). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- Magnitude – амплитуда (скалярный сигнал);
- Complex – комплексный сигнал;
- Real-Imag – вектор, состоящий из двух элементов – действительная и мнимая составляющие сигнала;
- Magnitude-Angle – вектор, состоящий из двух элементов – амплитуда и аргумент сигнала.

Блок может использоваться для измерения напряжений и токов вместо обычных измерителей – Current Measurement и Voltage Measurement. Список блоков, в окне параметров которых имеется параметр Measurements, приведен в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Блоки, имеющие параметр Measurements

| Название блока             | Название блока                                   |
|----------------------------|--|
| AC Current Source          | PI Section Line                                  |
| AC Voltage Source          | Saturable Transformer                            |
| Breaker                    | Series RLC Branch                                |
| Controlled Current Source  | Series RLC Load                                  |
| Controlled Voltage Source  | Surge Arrester                                   |
| DC Voltage Source          | Three-Level Bridge                               |
| Distributed Parameter Line | Three-Phase Harmonic Filter                      |
| Linear Transformer         | Three-Phase Load (Series and Parallel)           |
| Multi-Winding Transformer  | Three-Phase Branch (Series and Parallel)         |
| Mutual Inductance          | Three-Phase Transformer (Two and Three Windings) |
| Parallel RLC Branch        | Universal Bridge                                 |
| Parallel RLC Load          | Zigzag Phase-Shifting Transformer                |

Выходным сигналом блока является вектор сигналов измеряемых переменных.

Знаки измеряемых переменных (токов и напряжений) не являются столь очевидными, как при измерениях с помощью Current Measurement или Voltage Measurement, поскольку блоки, для которых выполняются измерения, могут быть повернуты. При этом никаких символов для указания положительных направлений токов или напряжений на самих блоках нет. В отличие от Simulink-блоков порты SPS-блоков являются ненаправленными, и по ним нельзя судить о положительных направлениях токов и напряжений. В SPS-блоках положительные направления определяются их ориентацией. Для нахождения ориентации блока необходимо выделить требуемый блок и выполнить команду вида:

```
get_param(gcb, 'Orientation')
```

В табл. 3.2 приведены полярности токов и напряжений для различной ориентации блоков.

Естественная ориентация блоков, т.е. их ориентация в библиотеке, – *right* для горизонтально ориентированных блоков и *down* – для блоков, ориентированных вертикально.

Таблица 3.2. Полярность токов и напряжений блоков в зависимости от их ориентации

| Ориентация блока | Положительное направление тока | Положительное направление напряжения |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| right            | слева направо                  | от левой клеммы к правой             |
| left             | справа налево                  | от правой клеммы к левой             |
| down             | сверху вниз                    | от верхней клеммы к нижней           |
| up               | снизу вверх                    | от нижней клеммы к верхней           |

Для однофазных трансформаторов, клеммы обмоток которых расположены как с левой, так и с правой стороны, напряжение обмотки есть напряжение верхней клеммы относительно нижней вне зависимости от ориентации блока (*right* или *left*). Токи обмоток – это токи, втекающие в верхнюю клемму. Для трехфазных трансформаторов положительные направления токов и напряжений будут показаны с помощью меток сигналов в самом блоке мультиметра. Например, метка сигнала *Ubn\_w2* означает, что измеряется напряжение второй обмотки трансформатора между нейтральной точкой и клеммой В, а метка сигнала *Iab\_w1* означает, что измеряется ток, протекающий от клеммы А к клемме В первой обмотки трансформатора.

Пример:

На рис. 3.12 показана схема однофазного мостового выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку. С помощью блока Multimeter измеряются напряжение и ток одного из вентилялей, выходное напряжение моста и ток нагрузки.

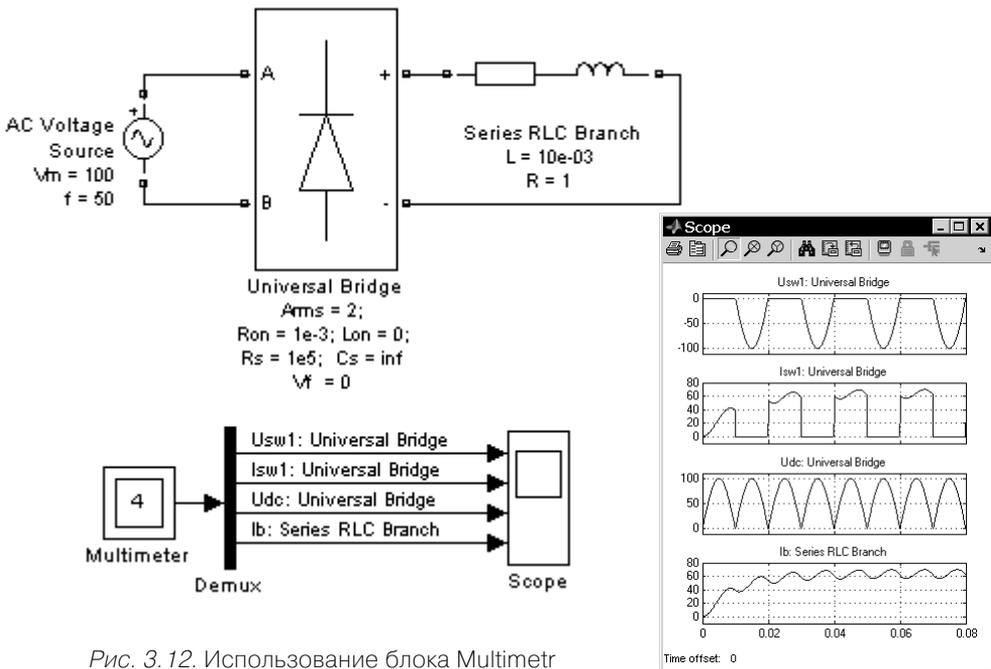
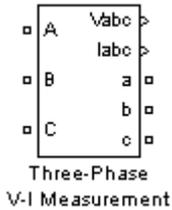


Рис. 3.12. Использование блока Multimetr

### 3.3.4. Трехфазный измеритель Three-Phase V-I Measurement

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок Three-Phase V-I Measurement выполняет измерение токов и напряжений в трехфазных цепях.

**Окно задания параметров:**

**Параметры блока:**

**Voltage Measurement:**

[Измерение напряжений]. В данной графе производится выбор измеряемого напряжения:

- no – напряжения не измеряются;
- phase-to-ground – измерение фазного напряжения;
- phase-to-phase – измерение линейного (межфазного) напряжения.

**Use a label:**

[Использовать метку]. При установке флажка сигнал будет передаваться к блоку From. Параметр Goto tag блока From должен соответствовать имени метки, заданной в графе Signal label.

**Signal label:**

[Метка сигнала].

**Voltages in p.u.:**

[Измерение напряжений в относительных единицах]. При установке флажка измеренные напряжения будут преобразованы в соответствии со следующим выражением:

$$U_* = \frac{U}{U_\phi \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}},$$

где  $U_\phi$  – базисное напряжение, задаваемое в графе Base voltage.

**Base voltage (Vrms phase-phase):**

[Базисное напряжение (действующее значение линейного напряжения)].

**Current measurement:**

[Измерение токов]. В данной графе производится выбор измерения токов:

- no – токи не измеряются;
- yes – токи измеряются.

**Use a label:**

[Использовать метку]. При установке флажка сигнал будет передаваться к блоку From. Параметр Goto tag блока From должен соответствовать имени метки, заданной в графе Signal label.

**Signal label:**

[Метка сигнала].

**Currents in p.u.:**

[Измерение токов в относительных единицах]. При установке флажка измеренные токи будут преобразованы в соответствии со следующим выражением:

$$I_* = \frac{I}{S_\phi \cdot \sqrt{2} / (U_\phi \cdot \sqrt{3})},$$

где  $S_\phi$  – базисная мощность, задаваемая в графе Base power.

**Base power (VA 3 phase):**

[Базисная мощность]. Полная мощность трех фаз.

**Output signal:**

[Выходной сигнал]. Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен, только если с помощью блока Powergui установлен режим расчета схемы комплексным методом (Phasor simulation). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- Magnitude – амплитуда (скалярный сигнал);
- Complex – комплексный сигнал;
- Real-Imag – вектор, состоящий из двух элементов – действительная и мнимая составляющие сигнала;
- Magnitude-Angle – вектор, состоящий из двух элементов – амплитуда и аргумент сигнала.

Выходными сигналами блока являются векторы сигналов измеряемых переменных.

*Пример:*

На рис. 3.13 показана схема включения трехфазного источника напряжения на активно-индуктивную нагрузку. С помощью блока Three-Phase V-I Measurement измеряются фазные токи и напряжения нагрузки.

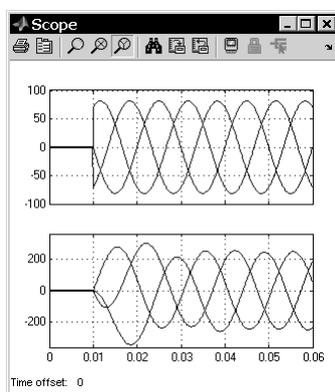
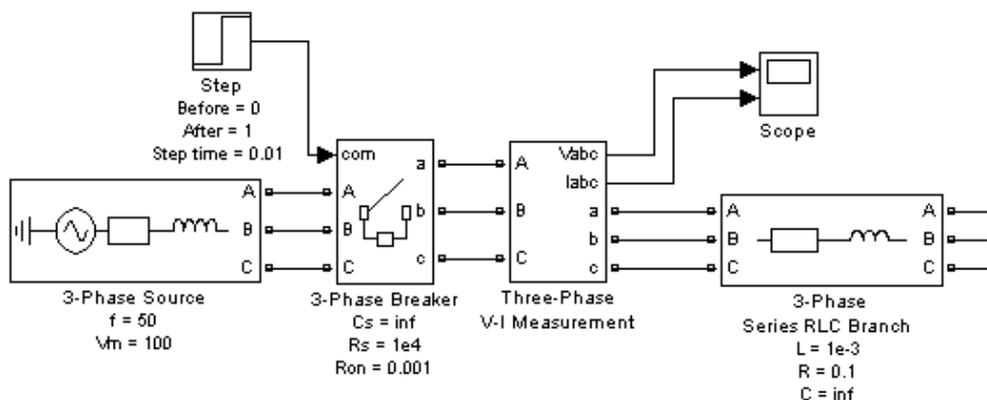


Рис. 3.13. Измерение токов и напряжений в трехфазной цепи

### 3.3.5. Измеритель полного сопротивления

## *Impedance Measurement*

*Пиктограмма:*

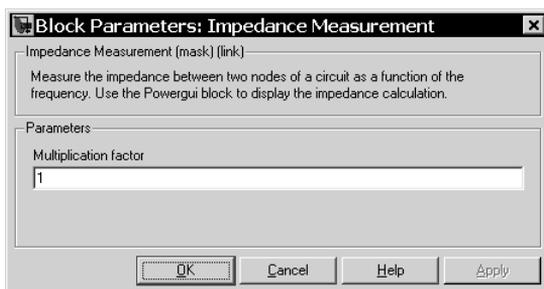


Impedance Measurement

*Назначение:*

Блок Impedance Measurement выполняет измерение зависимости полного сопротивления (импеданса) участка электрической цепи от частоты.

*Окно задания параметров:*



**Параметры блока:**

**Multiplication factor:**

[Масштабный коэффициент]. Значение параметра, отличающееся от 1, может использоваться для соответствующего увеличения или уменьшения измеряемого значения. Например, при измерении полного сопротивления между двумя фазами симметричной трехфазной цепи значение параметра можно установить равным 0,5. В результате будет получено значение полного сопротивления только для одной фазы.

Для отображения зависимости импеданса от частоты необходимо установить на схему блок Powergui. Открыв окно диалога блока, следует нажать кнопку Impedance vs Frequency Measurements и в новом открывшемся окне нажать кнопку Display. В итоге в окне будут отображены зависимости модуля и аргумента полного сопротивления от частоты.

При расчете полного сопротивления схемы учитываются только три нелинейных блока: **Breaker** (выключатель), **Ideal Switch** (идеальный ключ) и **Distributed Parameter Line** (линия с распределенными параметрами). Все остальные нелинейные блоки (электрические машины, силовые полупроводниковые приборы и т. п.) будут отключены.

При использовании измерителя полного сопротивления следует иметь в виду, что этот блок выполнен на основе источника тока и не может быть включен последовательно с индуктивными элементами. Для устранения этого ограничения следует шунтировать блок резистором с достаточно большим сопротивлением. Величину сопротивления следует выбирать такой, чтобы свойства схемы значительно не изменялись.

*Пример:*

На рис. 3.14 показана схема подключения блока Impedance vs Frequency Measurements к последовательному колебательному контуру для измерения его полного сопротивления. Там же показано окно блока Powergui с графиками.

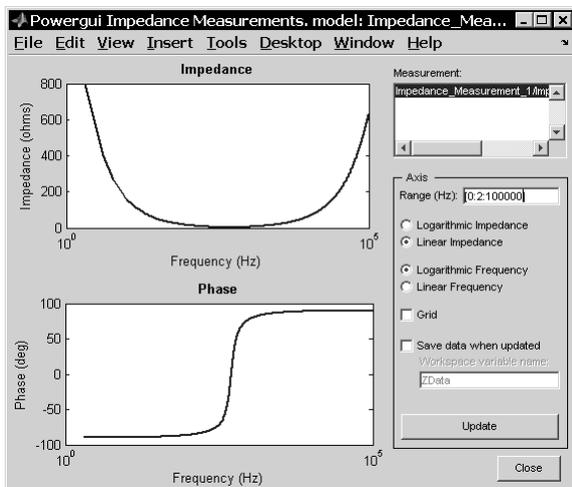
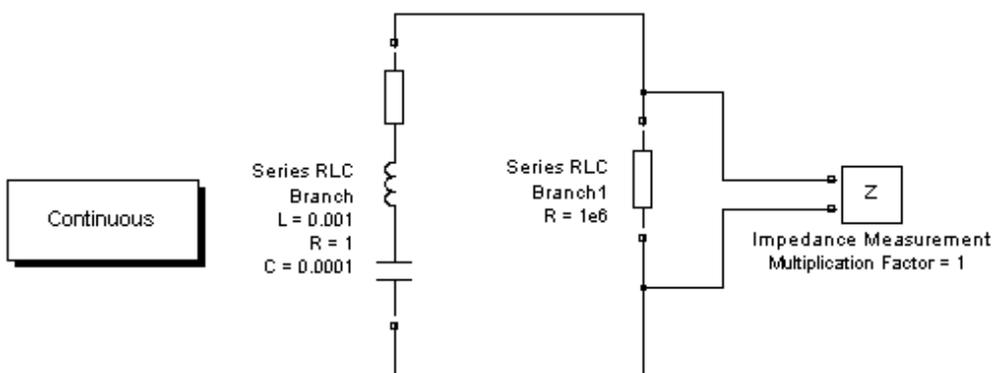
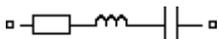


Рис. 3.14. Измерение полного сопротивления цепи

## 3.4. Электротехнические элементы Elements

### 3.4.1. Последовательная RLC-цепь *Series RLC Branch*

**Пиктограмма:**

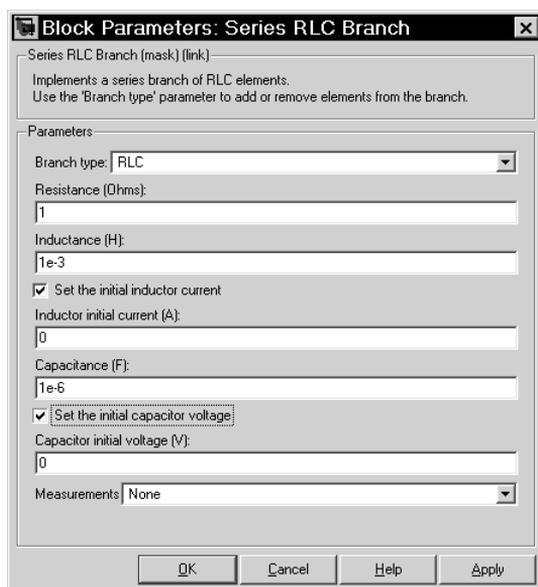


Series RLC Branch

**Назначение:**

Блок Series RLC Branch моделирует последовательное включение резистора, индуктивности и конденсатора.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Branch type:**

[Тип цепи]. Параметр задает конфигурацию цепи: RLC, R, L, C, RL, RC, LC, Open circuit (разрыв).

**Resistance R (Ohms):**

[Сопротивление (Ом)]. Величина активного сопротивления. Для исключения резистора из цепи значение сопротивления можно задать равным нулю. В этом случае на пиктограмме блока резистор отображаться не будет.

**Inductance L (H):**

[Индуктивность (Гн)]. Величина индуктивности. Для исключения индуктивности из цепи ее величину можно задать равной нулю. В этом случае на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет.

**Set initial inductor current:**

[Задать начальный ток индуктивности]. При установке флажка в окне параметров появляется дополнительная графа для ввода начального значения тока.

**Inductor initial current (A):**

[Начальный ток индуктивности (А)].

**Capacitance C (F):**

[Емкость (Ф)]. Величина емкости. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости можно задать равным *inf* (бесконечность). В этом случае конденсатор на пиктограмме блока показан не будет.

**Set initial capacitor voltage:**

[Задать начальное напряжение конденсатора]. При установке флажка в окне параметров появляется дополнительная графа для ввода начального значения напряжения.

**Capacitor initial voltage (V):**

[Начальное напряжение конденсатора (В)].

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Branch voltage Voltage – напряжение на зажимах цепи;

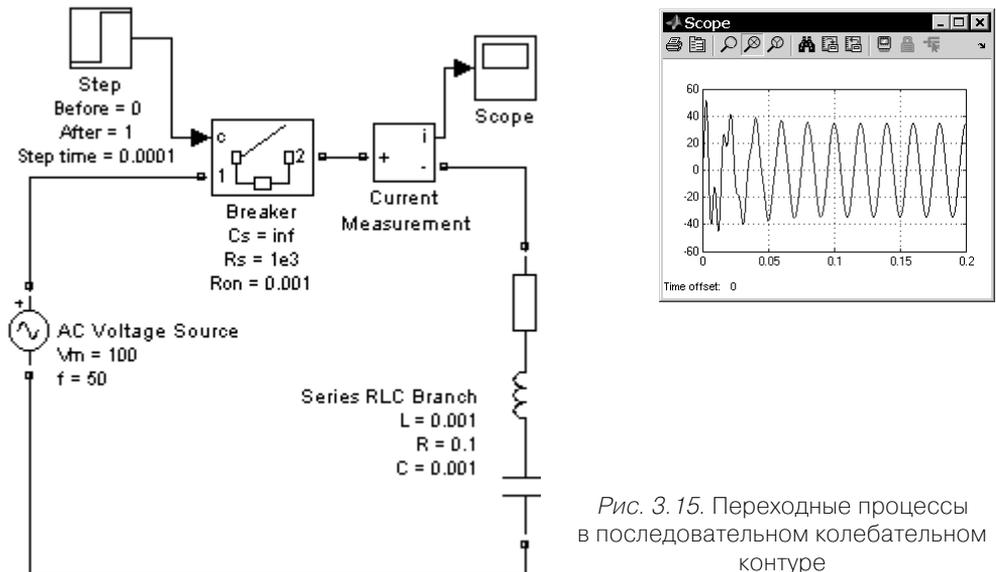


Рис. 3.15. Переходные процессы в последовательном колебательном контуре

- Branch current – ток цепи;
- Branch voltage and current – напряжение и ток цепи.

Отображаемым сигналам в блоке Multimeter присваиваются метки:

- Ib – ток цепи;
- Ub – напряжение цепи.

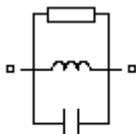
*Пример:*

На рис. 3.15 показана схема с использованием последовательного колебательного контура. На схеме источник переменного напряжения амплитудой 100 В и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами:  $R = 0,1$  Ом,  $L = 0,001$  Гн и  $C = 0,001$  Ф.

## 3.4.2. Параллельная RLC-цепь

### Parallel RLC Branch

*Пиктограмма:*



Parallel RLC Branch

**Назначение:**

Блок Parallel RLC Branch моделирует параллельное включение резистора, индуктивности и конденсатора.

**Окно задания параметров:**

**Параметры блока:****Branch type:**

[Тип цепи]. Параметр задает конфигурацию цепи: RLC, R, L, C, RL, RC, LC, Open circuit (разрыв).

**Resistance R (Ohms):**

[Сопротивление (Ом)]. Величина активного сопротивления. Для исключения резистора из цепи значение сопротивления можно задать равным inf (бесконечность). В этом случае на пиктограмме блока резистор отображаться не будет.

**Inductance L (H):**

[Индуктивность (Гн)]. Величина индуктивности. Для исключения индуктивности из цепи ее величину можно задать равной inf (бесконечность). В этом случае на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет.

**Set initial inductor current:**

[Задать начальный ток индуктивности]. При установке флажка в окне параметров появляется дополнительная графа для ввода начального значения тока.

**Inductor initial current (A):**

[Начальный ток индуктивности (А)].

**Capacitance C (F):**

[Емкость (Ф)]. Величина емкости. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости можно задать равным нулю. В этом случае конденсатор на пиктограмме блока показан не будет.

**Set initial capacitor voltage:**

[Задать начальное напряжение конденсатора]. При установке флажка в окне параметров появляется дополнительная графа для ввода начального значения напряжения.

**Capacitor initial voltage (V):**

[Начальное напряжение конденсатора (В)].

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Branch voltage Voltage – напряжение на зажимах цепи;
- Branch current – ток цепи;
- Branch voltage and current – напряжение и ток цепи.

Отображаемым сигналам в блоке Multimeter присваиваются метки:

- Ib – ток цепи;
- Ub – напряжение цепи.

**Пример:**

На рис. 3.16 показана схема с использованием параллельного колебательного контура. На схеме источник переменного напряжения амплитудой 100 В и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами:  $R = 0,1$  Ом,  $L = 0,1 \cdot 10^{-3}$  Гн и  $C = 0,01 \cdot 10^{-3}$  Ф.

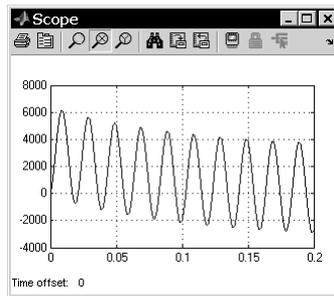
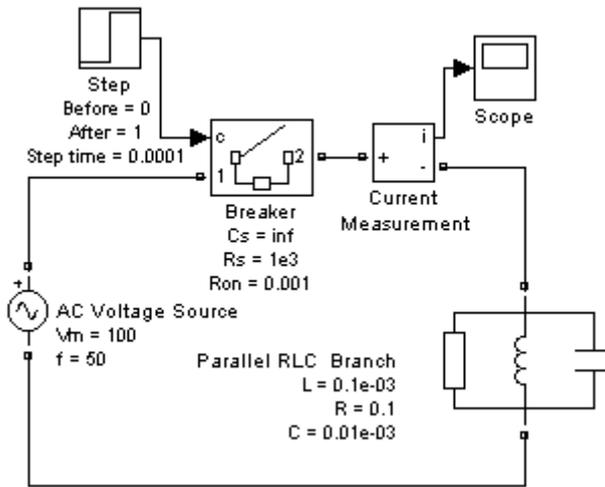


Рис. 3.16. Переходные процессы в параллельном колебательном контуре

### 3.4.3. Последовательная RLC-нагрузка Series RLC Load

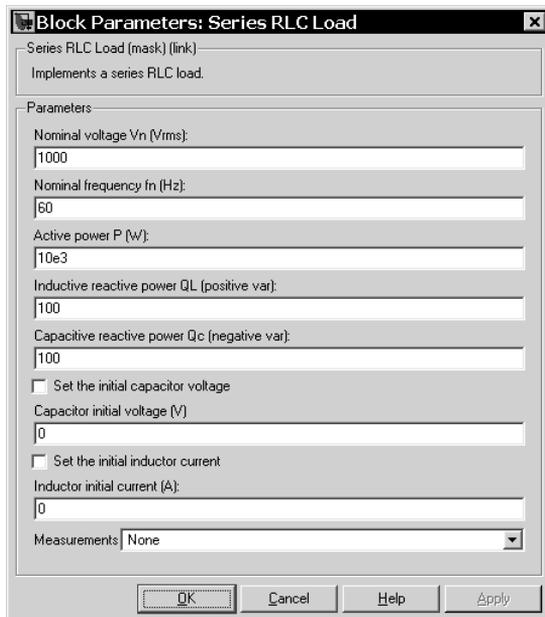
**Пиктограмма:**



Series RLC Load

**Назначение:**

Блок Series RLC Load моделирует последовательное включение резистора, индуктивности и конденсатора. Параметры цепи задаются через мощность цепи при номинальном напряжении и частоте.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Nominal voltage  $V_n$  (Vrms):**

[Номинальное напряжение (В)]. Значение действующего напряжения цепи, для которого определены мощности элементов.

**Nominal frequency  $f_n$  (Hz):**

[Номинальная частота (Гц)]. Значение частоты, для которого определены мощности элементов.

**Active power  $P$  (W):**

[Активная мощность (Вт)].

**Inductive reactive power  $Q_L$  (positive var):**

[Реактивная мощность индуктивности (ВАр)]. Потребляемая индуктивно-реактивная мощность.

**Capacitive reactive power  $Q_C$  (negative var):**

[Реактивная мощность емкости (ВАр)]. Отдаваемая конденсатором реактивная мощность. В графе вводится абсолютное значение мощности (без учета знака).

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Branch voltage Voltage – напряжение на зажимах цепи;
- Branch current – ток цепи;
- Branch voltage and current – напряжение и ток цепи.

Отображаемым сигналам в блоке Multimeter присваиваются метки:

- Ib – ток цепи;
- Ub – напряжение цепи.

Величины мощностей могут быть определены по следующим выражениям:

$$P = R \cdot \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2},$$

$$Q_L = \omega L \cdot \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2},$$

$$Q_C = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2},$$

где  $P$  – активная мощность;  $Q_L$  – реактивная мощность индуктивности;  $Q_C$  – реактивная мощность емкости;  $\omega$  – круговая частота напряжения;  $U$  – действующее значение напряжения.

*Пример:*

На рис. 3.17 показана схема с использованием последовательной нагрузочной цепи. На схеме источник переменного напряжения амплитудой 100 В и частотой

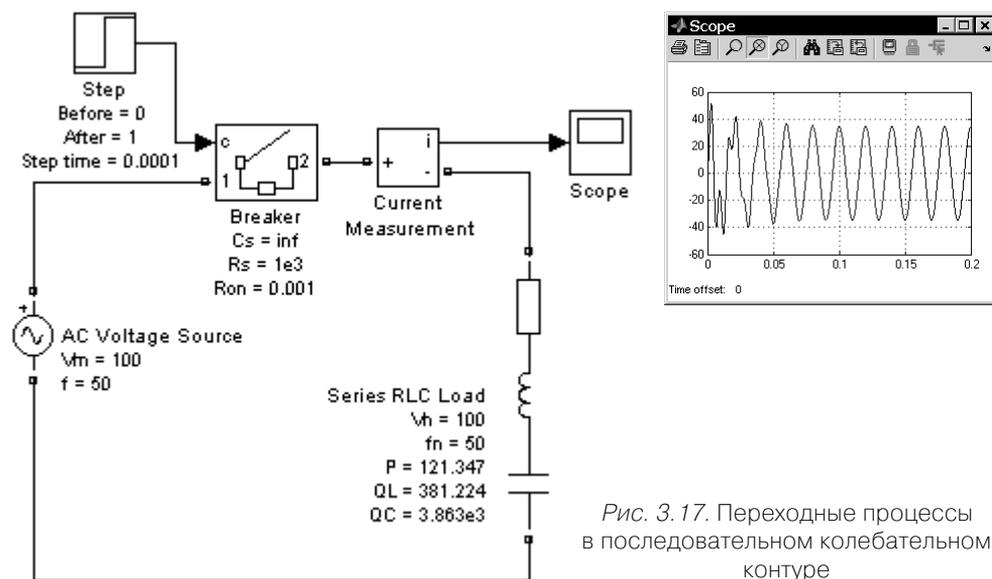


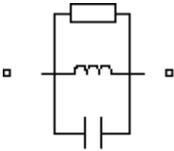
Рис. 3.17. Переходные процессы в последовательном колебательном контуре

50 Гц подключается к цепи с параметрами:  $U_n = 100$  В,  $f_n = 50$  Гц,  $P = 121,347$  Вт,  $Q_L = 381,224$  ВАр и  $Q_C = 3863$  ВАр. При выбранных нагрузочных параметрах значения сопротивления, индуктивности и емкости будут равны параметрам последовательной RLC-цепи, показанной на рис. 3.15.

### 3.4.4. Параллельная RLC-нагрузка

#### Parallel RLC Load

**Пиктограмма:**



Parallel RLC Load

**Назначение:**

Блок Parallel RLC Load моделирует параллельное включение резистора, индуктивности и конденсатора. Параметры цепи задаются через мощности цепи при номинальном напряжении и частоте.

**Окно задания параметров:**

**Параметры блока:****Nominal voltage V<sub>n</sub> (V<sub>rms</sub>):**

[Номинальное напряжение (В)]. Значение действующего напряжения цепи, для которого определены мощности элементов.

**Nominal frequency f<sub>n</sub> (Hz):**

[Номинальная частота (Гц)]. Значение частоты, для которого определены мощности элементов.

**Active power P (W):**

[Активная мощность (Вт)].

**Inductive reactive power Q<sub>L</sub> (positive var):**

[Реактивная мощность индуктивности (ВАр)]. Потребляемая индуктивностью реактивная мощность.

**Capacitive reactive power Q<sub>C</sub> (negative var):**

[Реактивная мощность емкости (ВАр)]. Отдаваемая конденсатором реактивная мощность. В графе вводится абсолютное значение мощности (без учета знака).

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Branch voltage Voltage – напряжение на зажимах цепи;
- Branch current – ток цепи;
- Branch voltage and current – напряжение и ток цепи.

Отображаемым сигналам в блоке Multimeter присваиваются метки:

- I<sub>b</sub> – ток цепи;
- U<sub>b</sub> – напряжение цепи.

Величины мощностей могут быть определены по следующим выражениям:

$$P = \frac{U^2}{R},$$

$$Q_L = \frac{U^2}{\omega L},$$

$$Q_C = U^2 \omega C,$$

где  $P$  – активная мощность;  $Q_L$  – реактивная мощность индуктивности;  $Q_C$  – реактивная мощность емкости;  $\omega$  – круговая частота напряжения;  $U$  – действующее значение напряжения.

*Пример:*

На рис. 3.18 показана схема с использованием последовательной нагрузочной цепи. На схеме источник переменного напряжения амплитудой 100 В и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами:  $U_n = 100$  В,  $f_n = 50$  Гц,  $P = 100$  кВт,  $Q_L = 318,3$  кВАр и  $Q_C = 31,42$  ВАр. При выбранных нагрузочных параметрах значения сопротивления, индуктивности и емкости будут равны параметрам параллельной RLC-цепи, показанной на рис. 3.16.

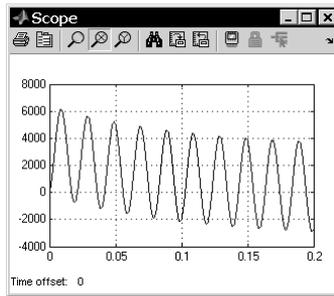
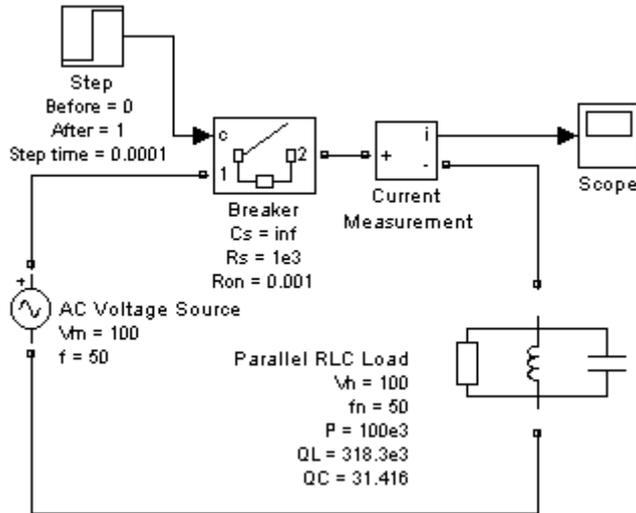
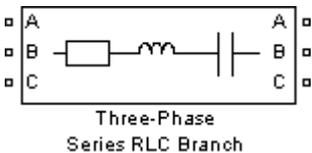


Рис. 3.18. Переходные процессы в параллельном колебательном контуре

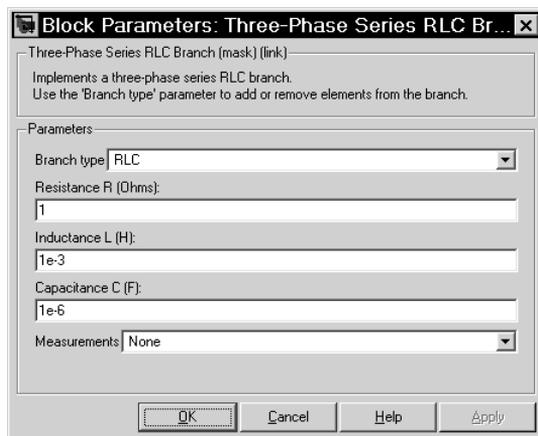
### 3.4.5. Трехфазная последовательная RLC-цепь 3-Phase Series RLC Branch

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок 3-Phase Series RLC Branch моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех RLC-цепей.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Branch type:**

[Тип цепи]. Параметр задает конфигурацию цепи: RLC, R, L, C, RL, RC, LC, Open circuit (разрыв).

**Resistance R (Ohms):**

[Сопротивление (Ом)]. Величина активного сопротивления в одной фазе. Для исключения резистора из цепи значение сопротивления можно задать равным нулю. В этом случае на пиктограмме блока резистор отображаться не будет.

**Inductance L (H):**

[Индуктивность (Гн)]. Величина индуктивности в одной фазе. Для исключения индуктивности из цепи ее величину можно задать равной нулю. В этом случае на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет.

**Capacitance C (F):**

[Емкость (Ф)]. Величина емкости в одной фазе. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости можно задать равным inf (бесконечность). В этом случае конденсатор на пиктограмме блока показан не будет.

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Score. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Branch voltage Voltage – напряжение на зажимах цепи;
- Branch current – ток цепи;
- Branch voltage and current – напряжение и ток цепи.

Отображаемым сигналам в блоке Multimeter присваиваются метки:

- Ib – ток цепи;
- Ub – напряжение цепи.

*Пример:*

На рис. 3.19 показана схема, в которой трехфазная последовательная RLC-цепь подключается к трехфазному источнику напряжения с действующим значением линейного напряжения 25 кВ и частотой 50 Гц. Подключение осуществляется с помощью блока 3-Phase Breaker. Параметры цепи выбраны следующими:  $R = 0,1$  Ом,  $L = 0,1 \cdot 10^{-3}$  Гн и  $C = 0,05 \cdot 10^{-3}$  Ф. Для измерения тока в трехфазной системе использован блок Three-Phase V-I Measurement.

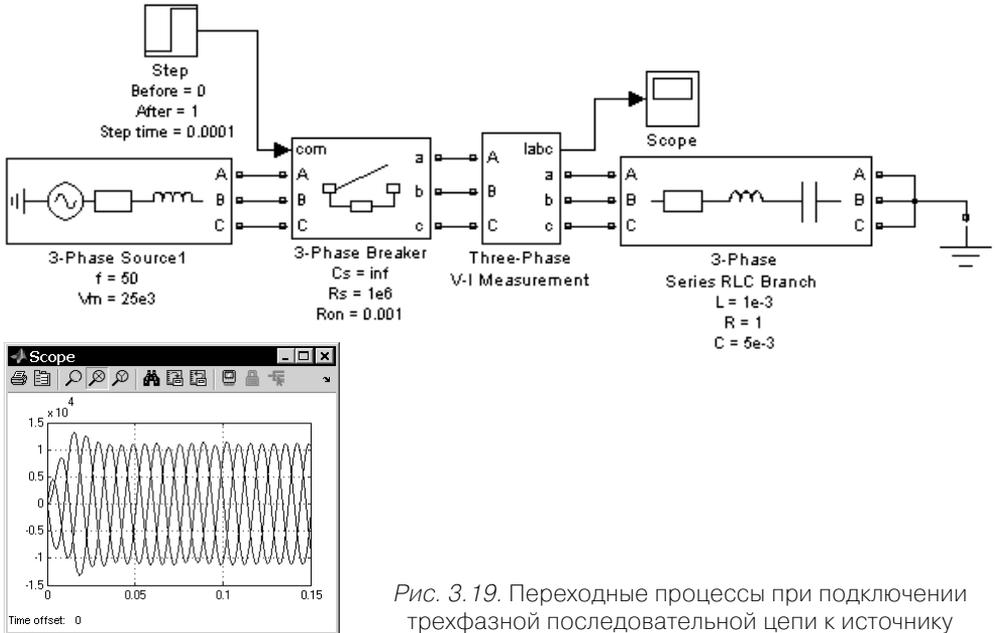
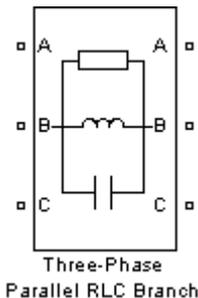


Рис. 3.19. Переходные процессы при подключении трехфазной последовательной цепи к источнику

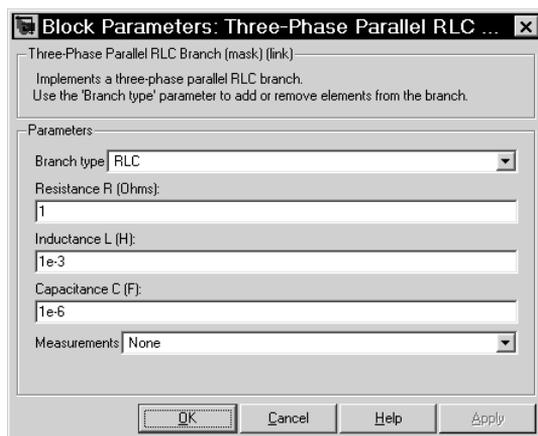
### 3.4.6. Трехфазная параллельная RLC-цепь 3-Phase Parallel RLC Branch

*Пиктограмма:*



**Назначение:**

Моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех параллельных RLC-цепей.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Branch type:**

[Тип цепи]. Параметр задает конфигурацию цепи: RLC, R, L, C, RL, RC, LC, Open circuit (разрыв).

**Resistance R (Ohms):**

[Сопротивление (Ом)]. Величина активного сопротивления в одной фазе. Для исключения резистора из цепи значение сопротивления можно задать равным inf (бесконечность). В этом случае на пиктограмме блока резистор отображаться не будет.

**Inductance L (H):**

[Индуктивность (Гн)]. Величина индуктивности в одной фазе. Для исключения индуктивности из цепи ее величину можно задать равной inf (бесконечность). В этом случае на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет.

**Capacitance C (F):**

[Емкость (Ф)]. Величина емкости в одной фазе. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости можно задать равным нулю. В этом случае конденсатор на пиктограмме блока показан не будет.

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Branch voltage Voltage – напряжение на зажимах цепи;
- Branch current – ток цепи;
- Branch voltage and current – напряжение и ток цепи.

Отображаемым сигналам в блоке Multimeter присваиваются метки:

- Ib – ток цепи;
- Ub – напряжение цепи.

*Пример:*

На рис. 3.20 показана схема, в которой трехфазная параллельная RLC-цепь подключается к трехфазному источнику напряжения с действующим значением линейного напряжения 25 кВ и частотой 50 Гц. Параметры цепи выбраны следующими:  $R = 0,1 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$  и  $C = 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$ .

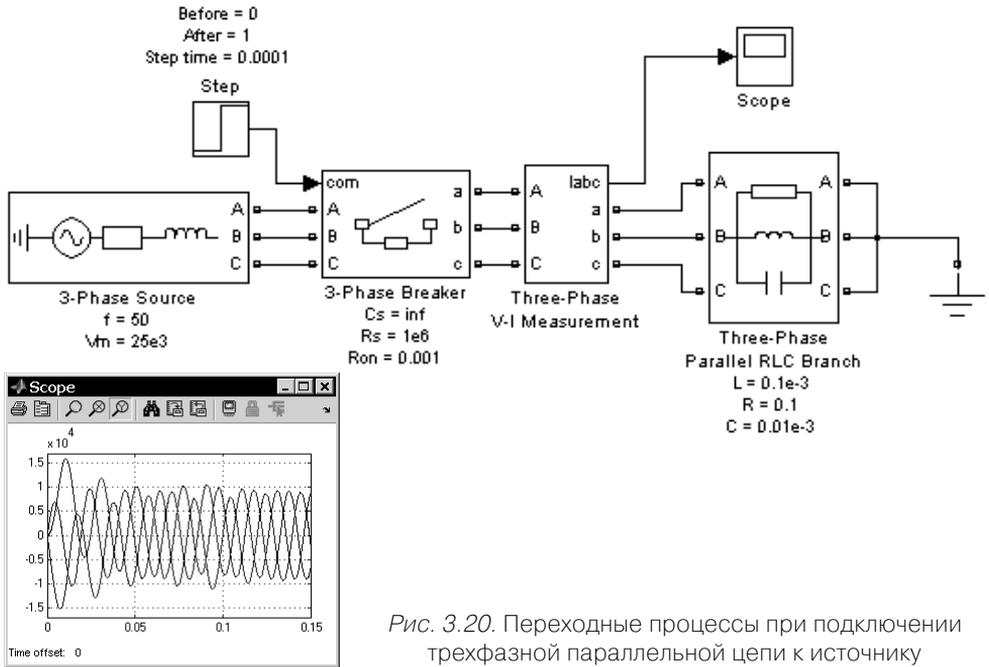
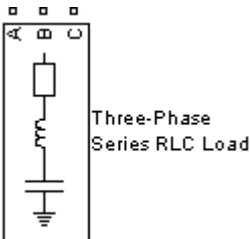


Рис. 3.20. Переходные процессы при подключении трехфазной параллельной цепи к источнику

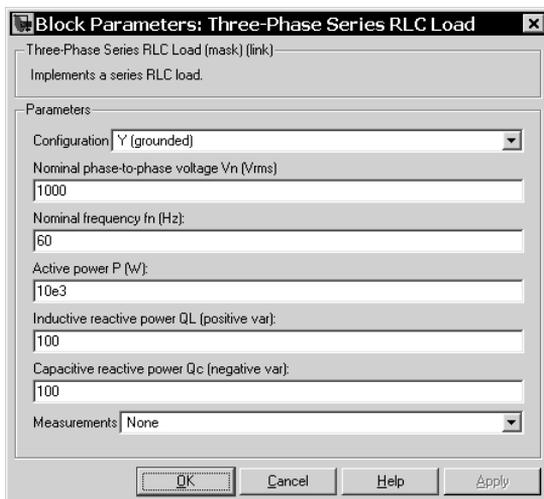
### 3.4.7. Трехфазная последовательная RLC-нагрузка 3-Phase Series RLC Load

*Пиктограмма:*



**Назначение:**

Блок 3-Phase Series RLC Load моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех последовательных RLC-нагрузок. Схема соединения цепей может быть различной. Параметры цепи задаются через мощности фаз цепи при номинальном напряжении и частоте.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Configuration:**

[Соединение]. Параметр задает схему соединения трехфазной цепи. Значение выбирается из списка:

- Y (grounded) – звезда с заземленной нейтралью,
- Y (floating) – звезда без нулевого провода,
- Y (neutral) – звезда с нулевым проводом,
- Delta – треугольник.

**Nominal phase-voltage Vn (Vrms):**

[Номинальное линейное напряжение (В)]. Значение действующего линейного напряжения цепи, для которого определены мощности элементов.

**Nominal frequency fn (Hz):**

[Номинальная частота (Гц)]. Значение частоты, для которого определены мощности элементов.

**Active power P (W):**

[Активная мощность на три фазы (Вт)].

**Inductive reactive power QL (positive var):**

[Реактивная мощность индуктивности на три фазы (ВАр)]. Потребляемая индуктивностью реактивная мощность.

**Capacitive reactive power  $Q_C$  (negative var):**

[Реактивная мощность емкости на три фазы (ВАр)]. Отдаваемая конденсатором реактивная мощность. В графе вводится абсолютное значение мощности (без учета знака).

**Пример:**

На рис. 3.21 показана схема с использованием трехфазной последовательной нагрузочной цепи. На схеме источник переменного напряжения с действующим значением линейного напряжения 25 кВ и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами:  $U_n = 25$  кВ,  $f_n = 50$  Гц,  $P = 188,7$  МВт,  $Q_L = 59,29$  МВАр и  $Q_C = 120,1$  МВАр. При выбранных нагрузочных параметрах значения сопротивления, индуктивности и емкости будут равны параметрам трехфазной последовательной RLC-цепи, показанной на рис. 3.19.

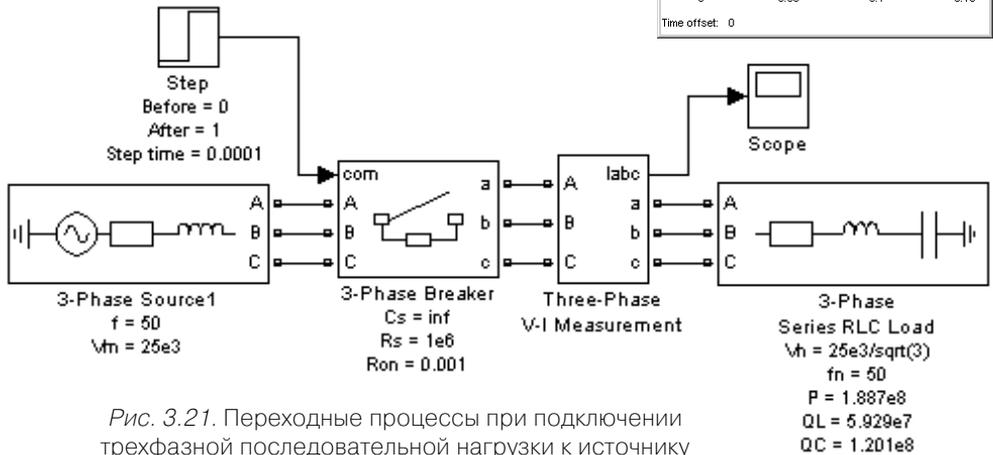
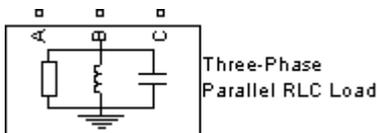


Рис. 3.21. Переходные процессы при подключении трехфазной последовательной нагрузки к источнику

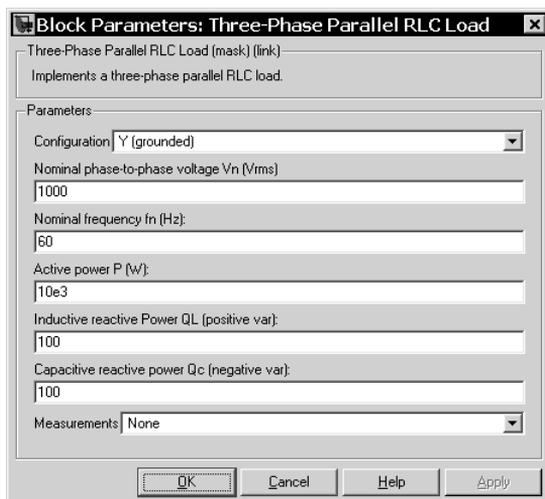
### 3.4.8. Трехфазная параллельная RLC-нагрузка 3-Phase Parallel RLC Load

**Пиктограмма:****Назначение:**

Блок 3-Phase Parallel RLC Load моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех параллельных RLC-нагрузок. Схема соединения цепей может быть различ-

ной. Параметры цепи задаются через мощности фаз цепи при номинальном напряжении и частоте.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Configuration:**

[Соединение]. Параметр задает схему соединения трехфазной цепи. Значение выбирается из списка:

- Y (grounded) – звезда с заземленной нейтралью,
- Y (floating) – звезда без нулевого провода,
- Y (neutral) – звезда с нулевым проводом,
- Delta – треугольник.

**Nominal phase-phase voltage Vn (Vrms):**

[Номинальное линейное напряжение (В)]. Значение действующего линейного напряжения цепи, для которого определены мощности элементов.

**Nominal frequency fn (Hz):**

[Номинальная частота (Гц)]. Значение частоты, для которого определены мощности элементов.

**Active power P (W):**

[Активная мощность на три фазы (Вт)].

**Inductive reactive power QL (positive var):**

[Реактивная мощность индуктивности на три фазы (ВАр)]. Потребляемая индуктивностью реактивная мощность.

**Capacitive reactive power QC (negative var):**

[Реактивная мощность емкости на три фазы (ВАр)]. Отдаваемая конденсатором реактивная мощность. В графе вводится абсолютное значение мощности (без учета знака).

**Пример:**

На рис. 3.22 показана схема с использованием трехфазной параллельной нагрузочной цепи. На схеме источник переменного напряжения с действующим значением линейного напряжения 25 кВ и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами:  $U_n = 25$  кВ,  $f_n = 50$  Гц,  $P = 2083$  МВт,  $Q_L = 6631$  МВАр и  $Q_C = 654,5$  кВАр. При выбранных нагрузочных параметрах значения сопротивления, индуктивности и емкости будут равны параметрам трехфазной параллельной RLC-цепи, показанной на рис. 3.20.

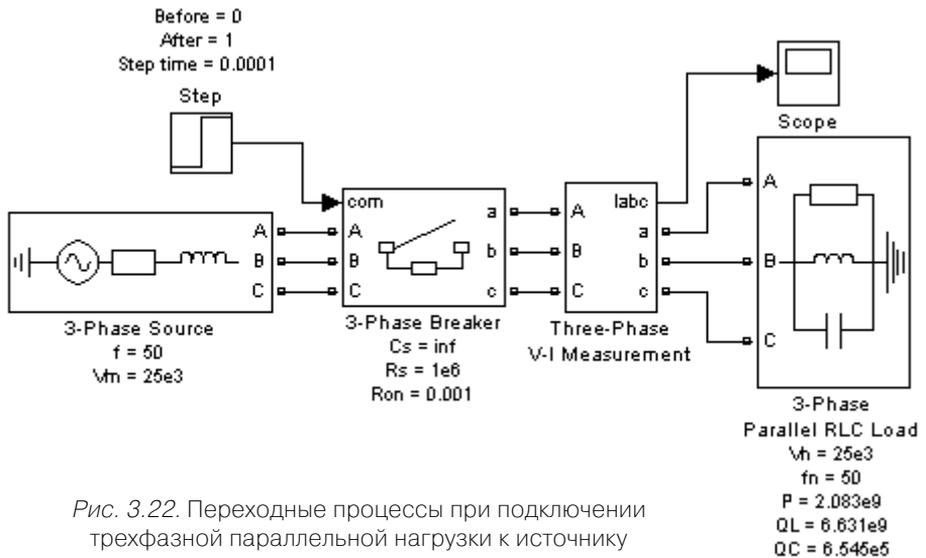
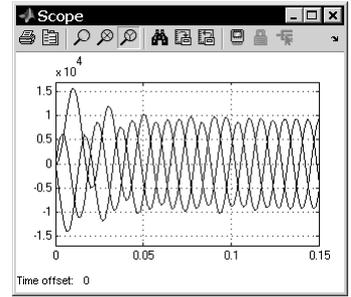
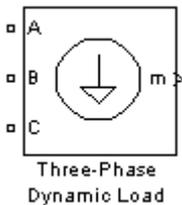


Рис. 3.22. Переходные процессы при подключении трехфазной параллельной нагрузки к источнику

### 3.4.9. Трехфазная динамическая нагрузка 3-Phase Dynamic Load

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок 3-Phase Dynamic Load – трехфазный блок динамической нагрузки моделирует трехфазную, трехпроводную динамическую нагрузку, чья активная мощ-

ность  $P$  и реактивная мощность  $Q$  изменяются как функция напряжения прямой последовательности. Токи обратной и нулевой последовательностей не моделируются, поэтому фазные токи нагрузки являются сбалансированными даже при несбалансированных напряжениях.

Полное сопротивление нагрузки сохраняется постоянным, если напряжение на зажимах нагрузки более низкое, чем заданная величина  $V_{\min}$ . Когда напряжение на зажимах больше, чем величина  $V_{\min}$ , активная мощность  $P$  и реактивная мощность  $Q$  нагрузки изменяются в соответствии с выражениями:

$$P(s) = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_p} \frac{(1 + T_{p1}s)}{(1 + T_{p2}s)}, \quad Q(s) = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_q} \frac{(1 + T_{q1}s)}{(1 + T_{q2}s)},$$

где  $V_0$  – начальное напряжение прямой последовательности;  $P_0$  и  $Q_0$  – начальные значения активной и реактивной мощности при напряжении  $V_0$ ;  $V$  – напряжение прямой последовательности;  $n_p$  и  $n_q$  – показатели степени (обычно между 1 и 3), управляющие свойствами нагрузки;  $T_{p1}$  и  $T_{p2}$  – постоянные времени, управляющие динамикой активной мощности  $P$ ;  $T_{q1}$  и  $T_{q2}$  – постоянные времени, управляющие динамикой реактивной мощности  $Q$ .

Для моделирования, например, токовой нагрузки постоянной величины требуется задать  $n_p$  и  $n_q$  равными 1, а для задания постоянного по величине полного сопротивления нагрузки необходимо задать  $n_p$  и  $n_q$  равными 2.

#### Окно задания параметров:

**Block Parameters: Three-Phase Dynamic Load**

Three-Phase Dynamic Load (mask) (link)

Implements a three-phase, three-wire dynamic load. Active power  $P$  and reactive power  $Q$  absorbed by the load vary as function of positive-sequence voltage  $V$  according to following equations:

If  $V > V_{\min}$ ,  $P$  and  $Q$  vary as follows:  
 $P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_p} \frac{(1 + T_{p1}s)}{(1 + T_{p2}s)}$   
 $Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_q} \frac{(1 + T_{q1}s)}{(1 + T_{q2}s)}$   
 if  $V < V_{\min}$   
 Same equations with  $n_p = n_q = 2$  (constant impedance load)

Check 'External control of PQ' to control power from a vectorized Simulink signal [P Q].

Parameters

Nominal L-L voltage and frequency [Vn(Vrms) fn(Hz)]:

Active\_reactive power at initial voltage [Po(W) Qo(var)]:

Initial positive-sequence voltage Vo [Mag(pu) Phase (deg.)]:

External control of PQ

Parameters [ np nq ]:

Time constants [Tp1 Tp2 Tq1 Tq2] (s):

Minimum voltage Vmin (pu):

Buttons: OK, Cancel, Help, Apply

**Параметры блока:****Nominal L-L voltage and frequency** [ $V_n$  ( $V_{rms}$ )  $f_n$  (Hz)]:

[Номинальное линейное напряжение и частота].

**Active & reactive power at initial voltage** [ $P_o$  (W)  $Q_o$  (var)]:

[Значения активной и реактивной мощности при начальном напряжении].

**Initial positive-sequence voltage**  $V_o$  [ $Mag$  (pu)  $Phase$  (deg.)]:

[Начальное значение напряжения прямой последовательности]. Параметр задается вектором, содержащим значение модуля напряжения  $Mag$  и его начальной фазы  $Phase$ . Величина напряжения задается в относительных единицах (по отношению к номинальному напряжению), а фаза – в эл. градусах.

**External control of PQ:**

[Внешнее управление активной и реактивной мощностью]. При установке флажка на пиктограмме блока появляется дополнительный входной порт, на который следует подавать векторный сигнал из двух элементов для управления  $P$  и  $Q$ .

**Parameters** [ $n_p$   $n_q$ ]:[Параметры  $n_p$  и  $n_q$ ]. Показатели степени, управляющие свойствами нагрузки.**Time constants** [ $T_{p1}$   $T_{p2}$   $T_{q1}$   $T_{q2}$ ] (s):

[Постоянные времени нагрузки].

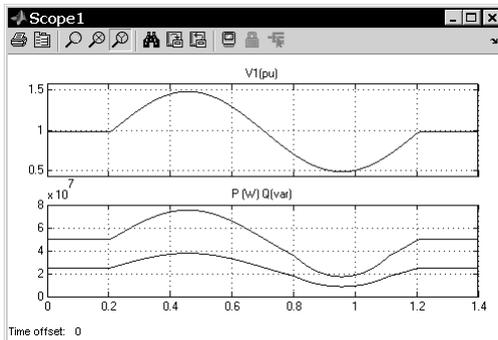
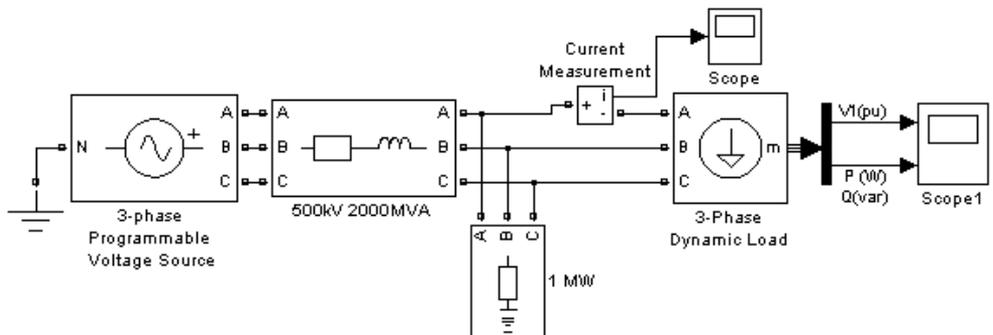
**Minimum voltage**  $V_m$  in (pu):[Минимальное напряжение  $V_{min}$ ]. Параметр задается в относительных единицах.

Рис. 3.23. Схема с использованием трехфазной динамической нагрузки

*Пример:*

На рис. 3.23 показана схема с использованием трехфазной динамической нагрузки. Поскольку блок 3-Phase Dynamic Load создан на базе источников тока, то он не может быть последовательно включен с индуктивными элементами, поэтому параллельно динамической нагрузке добавлена малая активная нагрузка (1 MW).

### 3.4.10. Грозозащитный разрядник Surge Arrester

**Пиктограмма:**



Surge Arrester

**Назначение:**

Грозозащитный разрядник (варистор) Surge Arrester представляет собой резистор с нелинейной вольт-амперной характеристикой и предназначен для защиты энергетического оборудования от перенапряжений. Конструктивно разрядник выполняется в виде одного или нескольких параллельно включенных столбов металлоксидных дисков, заключенных в диэлектрический (фарфоровый) корпус. Нелинейная характеристика варистора аппроксимируется комбинацией трех экспоненциальных функций вида:

$$\frac{V}{V_{ref}} = K_i \left( \frac{I}{I_{ref}} \right)^{1/\alpha_i},$$

где  $V$  и  $I$  – напряжение и ток разрядника;  $V_{ref}$  и  $I_{ref}$  – защитное напряжение разрядника и его ток при этом напряжении;  $K_i$  и  $\alpha_i$  – параметры  $i$ -го участка нелинейной зависимости.

На рис. 3.24 показаны графики вольт-амперной характеристики разрядника в обычном и логарифмическом масштабах.

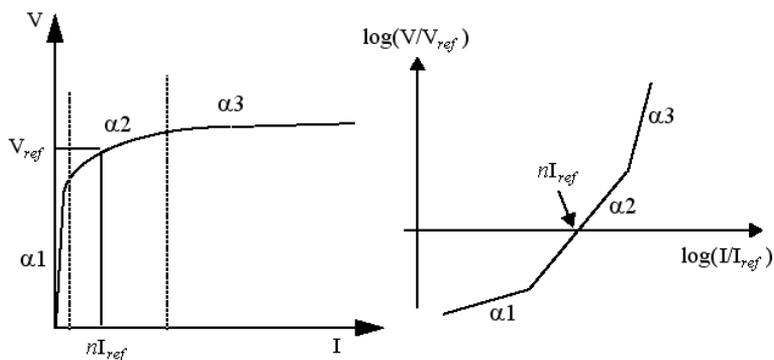
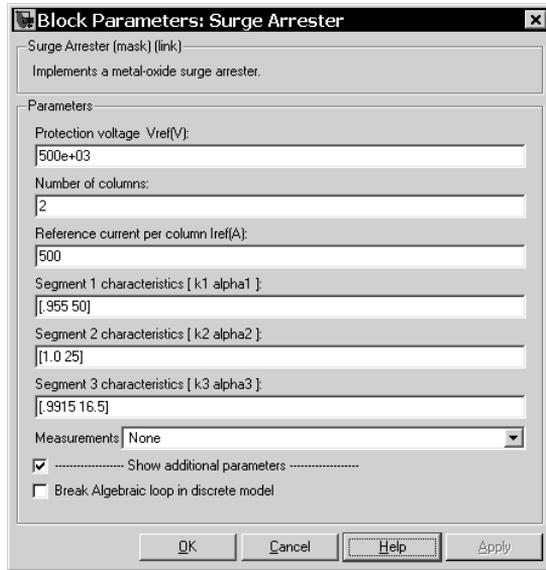


Рис. 3.24. Вольт-амперные характеристики разрядника

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Protection voltage Vref:**

[Напряжение защиты].

**Number of columns:**

[Количество столбов металлоксидных дисков].

**Reference current per column Iref:**

[Ток одного столба при напряжении, равном Vref].

**Segment 1 characteristic:**[Параметры  $K$  и  $\alpha$  первого сегмента вольт-амперной характеристики].**Segment 2 characteristic:**[Параметры  $K$  и  $\alpha$  второго сегмента вольт-амперной характеристики].**Segment 3 characteristic:**[Параметры  $K$  и  $\alpha$  третьего сегмента вольт-амперной характеристики].**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Branch voltage Voltage – напряжение на зажимах элемента;
- Branch current – ток элемента;
- Branch voltage and current – напряжение и ток элемента.

**Пример:**

На рис. 3.25 показана схема, в которой при замыкании ключа Breaker происходит скачкообразное повышение напряжения на конденсаторе. Блок Surge Arrester

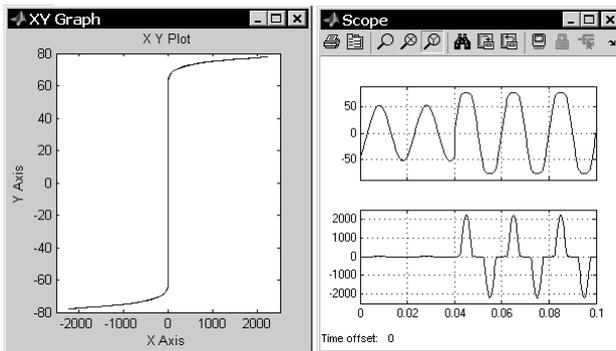
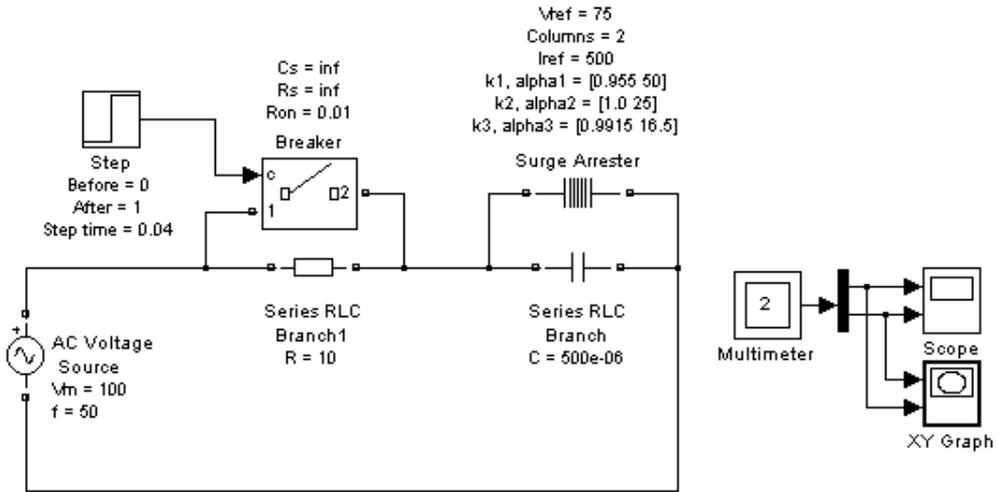
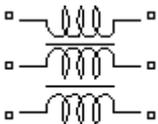


Рис. 3.25. Ограничение перенапряжений с помощью разрядника

предотвращает чрезмерное повышение напряжения. На рисунке показана также вольт-амперная характеристика разрядника.

### 3.4.11. Взаимная индуктивность Mutual Inductance

Пиктограмма:



Mutual Inductance

**Назначение:**

Блок взаимной индуктивности Mutual Inductance предназначен для моделирования катушек или проводников, имеющих магнитную связь. Блок позволяет моделировать три или два магнитно-связанных элемента. Схема модели взаимной индуктивности показана на рис. 3.26.

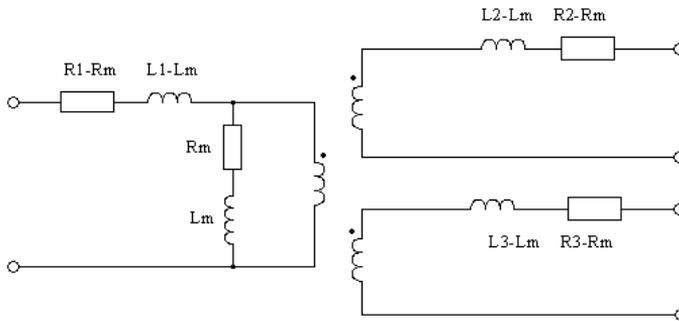
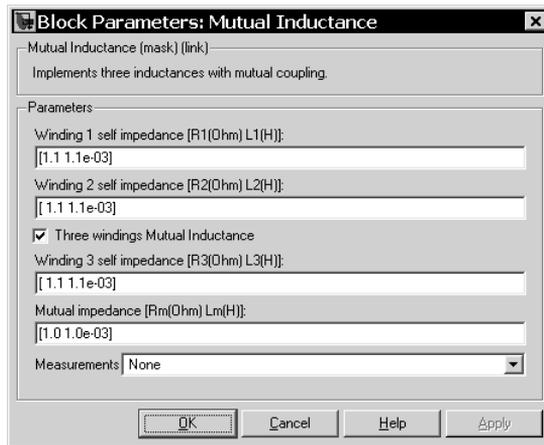


Рис. 3.26. Схема модели взаимной индуктивности

**Окно задания параметров:****Параметры блока:**

**Winding 1 self impedance [R1 (Ohm) L1 (H)]:**

[Собственное сопротивление и индуктивность первой обмотки].

**Three windings Mutual Inductance:**

[Трехобмоточная взаимная индуктивность]. Снятие флажка позволяет убрать из модели третью обмотку.

**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 (см. рис. 3.26):

$$R1, R2, R3 \neq Rm,$$

$$L1, L2, L3 \neq Lm.$$

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 подобной связи не оказывает влияния на измеряемые величины токов и напряжений обмоток взаимной индуктивности.

*Пример:*

На рис. 3.27 показана схема, в которой третья гармоника напряжения на нагрузке вводится с помощью блока взаимной индуктивности.

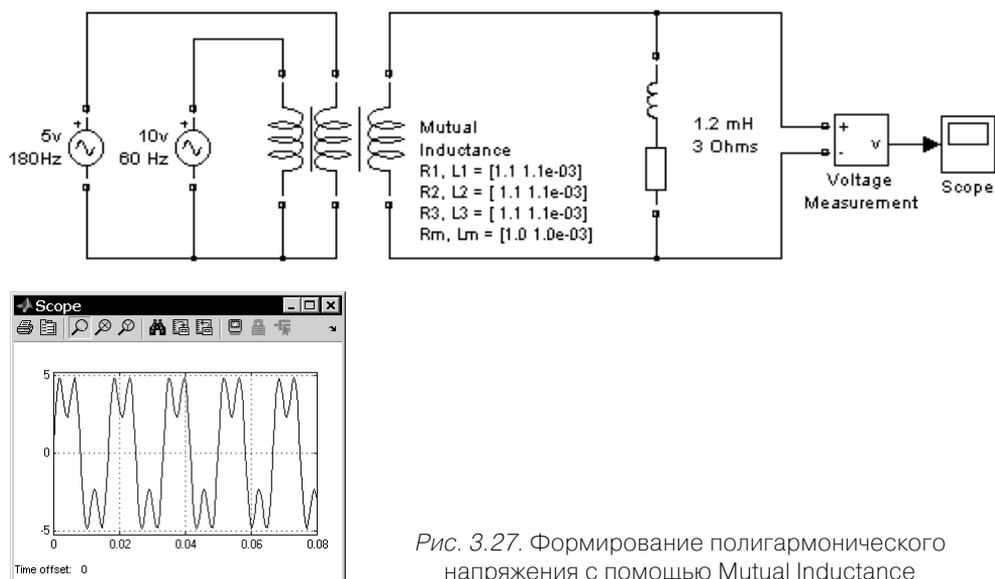
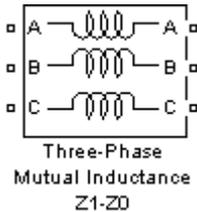


Рис. 3.27. Формирование полигармонического напряжения с помощью Mutual Inductance

## 3.4.12. Трехфазная взаимная индуктивность 3-Phase Mutual Inductance Z1-Z0

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок трехфазной взаимной индуктивности 3-Phase Mutual Inductance Z1-Z0 предназначен для моделирования трехфазной цепи с индуктивной связью между фазами. В качестве основы модели трехфазной взаимной индуктивности используется блок Mutual Inductance с тремя обмотками. Параметры блока взаимной индуктивности пересчитываются исходя из задаваемых для трехфазной взаимной индуктивности параметров прямой и обратной последовательностей по следующим выражениям:

$$R_S = (2 \times R_1 + R_0) / 3,$$

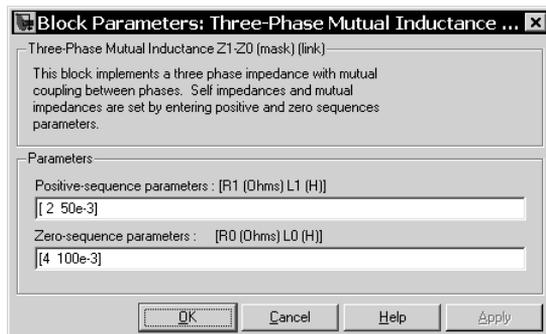
$$L_S = (2 \times L_1 + L_0) / 3,$$

$$R_m = (R_0 - R_1) / 3,$$

$$L_m = (L_0 - L_1) / 3,$$

где  $R_0$  и  $R_1$  – сопротивления нулевой и прямой последовательности блока трехфазной взаимной индуктивности;  $L_0$  и  $L_1$  – индуктивности нулевой и прямой последовательности блока трехфазной взаимной индуктивности;  $R_S$  и  $R_m$  – собственное сопротивление каждой из трех обмоток блока взаимной индуктивности и их взаимное сопротивление;  $L_S$  и  $L_m$  – собственная индуктивность каждой из трех обмоток блока взаимной индуктивности и их взаимная индуктивность.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Positive-sequence parameters** [R1 (Ohms) L1 (H)]:

[Параметры прямой последовательности]. Сопротивление и индуктивность прямой последовательности.

**Zero-sequence parameters** [R0 (Ohms) L0 (H)]:

[Параметры нулевой последовательности]. Сопротивление и индуктивность нулевой последовательности.

*Пример:*

На рис. 3.28 показана схема с использованием блока трехфазной взаимной индуктивности.

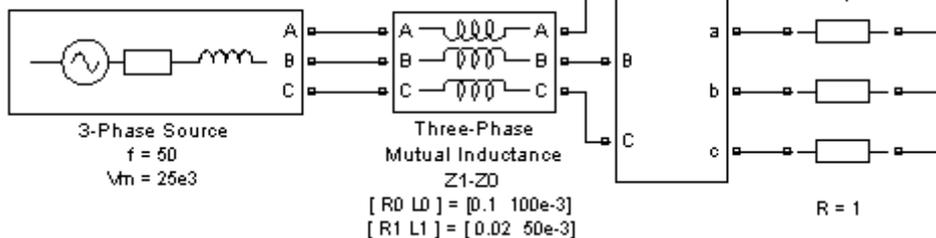
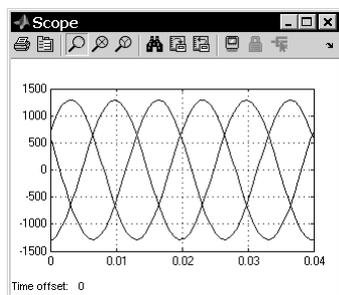
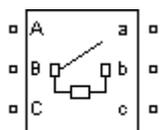


Рис. 3.28. Моделирование трехфазной цепи, имеющей взаимоиндуктивную связь

### 3.4.13. Выключатель переменного тока Breaker

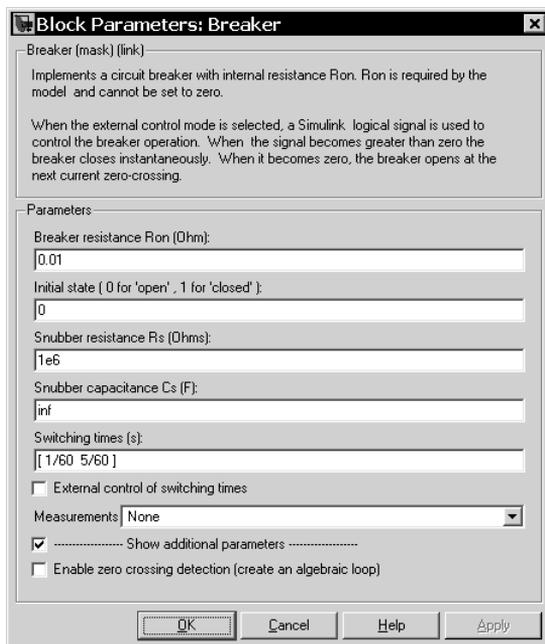
**Пиктограмма:**



Three-Phase Breaker

**Назначение:**

Моделирует устройство включения и выключения переменного тока. Выключатель Breaker может управляться внешним входным сигналом или от встроенного таймера. Включение устройства выполняется единичным управляющим сигналом. Команда на выключение дается нулевым уровнем сигнала, при этом выключение устройства осуществляется при уменьшении тока до нуля. Устройство имеет встроенную искрогасящую RC-цепь, включенную параллельно контактам выключателя.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Breaker resistance  $R_{on}$  (Ohm):**

[Сопротивление выключателя в замкнутом состоянии (Ом)].

**Initial state (0 for 'open', 1 for 'closed')**

[Начальное состояние выключателя (0 – разомкнут, 1 – замкнут)].

**Snubber resistance  $R_s$  (Ohm):**

[Сопротивление искрогасящей цепи (Ом)].

**Snubber capacitance  $C_s$  (F):**

[Емкость искрогасящей цепи (Ф)].

**Switching times (s):**

[Время срабатывания выключателя]. Параметр задается в виде вектора, определяющего моменты времени срабатывания выключателя. Например, при разомкнутом начальном состоянии ключа значение параметра, заданное вектором [0.005 0.01 0.02 0.03], означает, что замыкание ключа будет выполняться в моменты времени 0,005 с и 0,02 с, а размыкание – в моменты времени 0,01 с и 0,03 с.

**External control of switching times:**

[Внешнее управление временем срабатывания]. При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключа, а нулевой уровень является командой на размыкание ключа, при этом разрыв цепи выполняется при достижении током нулевого уровня.

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Branch voltage Voltage – напряжение на зажимах элемента;
- Branch current – ток элемента;
- Branch voltage and current – напряжение и ток элемента.

**Show additional parameters:**

[Показать дополнительные параметры]. При установке флажка в окне диалога будут отображены дополнительные параметры модели.

**Enable zero crossing detection (create an algebraic loop):**

[Включить определение прохождения сигнала через нулевой уровень (создать алгебраический контур)]: С помощью данной опции устанавливается режим проверки смены знака переменной. Момент смены знака переменной может попасть между расчетными точками и результат моделирования существенно исказится. Повышение точности в этом случае может быть достигнуто за счет существенного уменьшения шага расчета, однако это приведет к увеличению времени моделирования. Для исключения этого Simulink на каждом расчетном шаге проверяет смену знака переменными и, если такое изменение обнаружено, то Simulink выполняет интерполяцию значений переменной на текущем шаге. Благодаря данному алгоритму время расчета существенно не увеличивается.

*Пример:*

На рис. 3.29 показана схема, в которой элемент Breaker осуществляет подключение и отключение активно-индуктивной нагрузки к источнику переменного тока. На диаграмме хорошо видно, что отключение источника от нагрузки происходит только тогда, когда ток в цепи упадет до нуля.

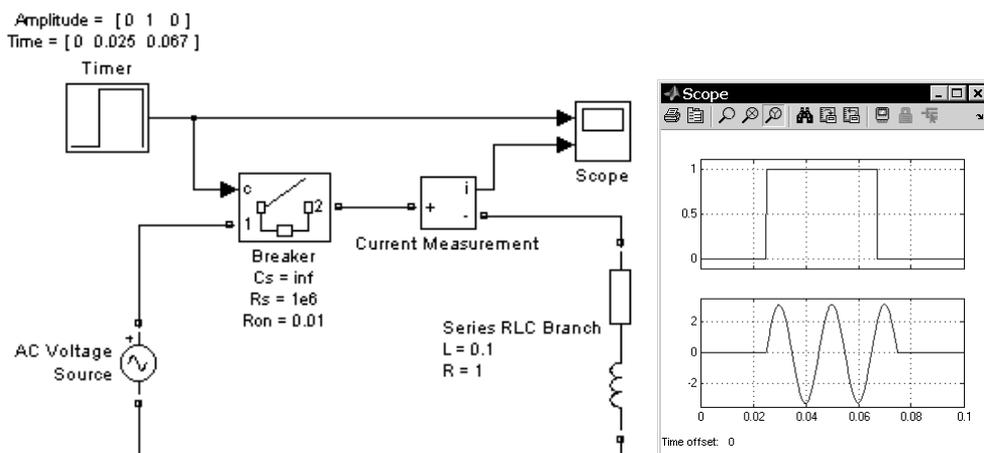
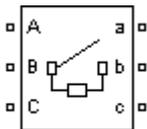


Рис. 3.29. Коммутация электрической цепи с помощью блока Breaker

### 3.4.14. Трехфазный выключатель переменного тока 3-Phase Breaker

**Пиктограмма:**

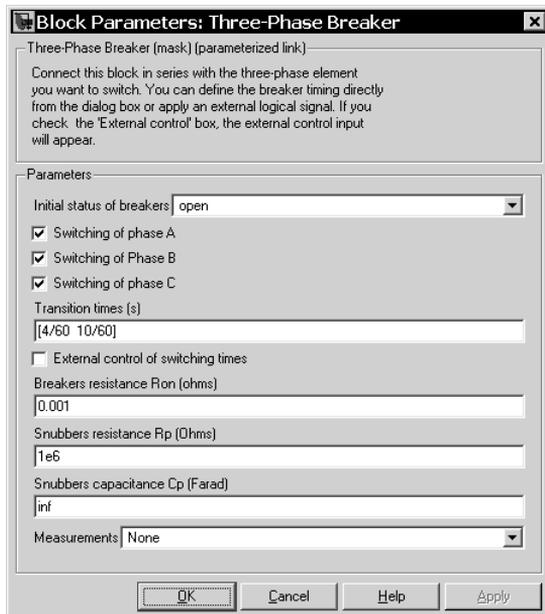


Three-Phase Breaker

#### **Назначение:**

Блок 3-Phase Breaker моделирует трехфазное устройство включения и выключения переменного тока. Состоит из трех блоков Breaker, управляемых одним сигналом.

#### **Окно задания параметров:**



#### **Параметры блока:**

##### **Initial status of breakers:**

[Начальное состояние ключей]. Значение параметра выбирается из списка:

- open – все ключи открыты;
- closed – все ключи закрыты.

##### **Switching of phase A:**

[Управление ключом фазы A]. При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром Initial status of breakers.

**Switching of phase B:**

[Управление ключом фазы В]. При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром Initial status of breakers.

**Switching of phase C:**

[Управление ключом фазы С]. При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром Initial status of breakers.

**Transition times (s):**

[Время срабатывания выключателя]. Параметр задается в виде вектора, определяющего моменты времени срабатывания выключателя.

**External control of switching times:**

[Внешнее управление временем срабатывания]. При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключей, а нулевой уровень является командой на размыкание ключей, при этом разрыв цепи в каждой фазе выполняется при достижении током этой фазы нулевого уровня.

**Breaker resistance Ron (Ohm):**

[Сопротивление выключателя в замкнутом состоянии (Ом)].

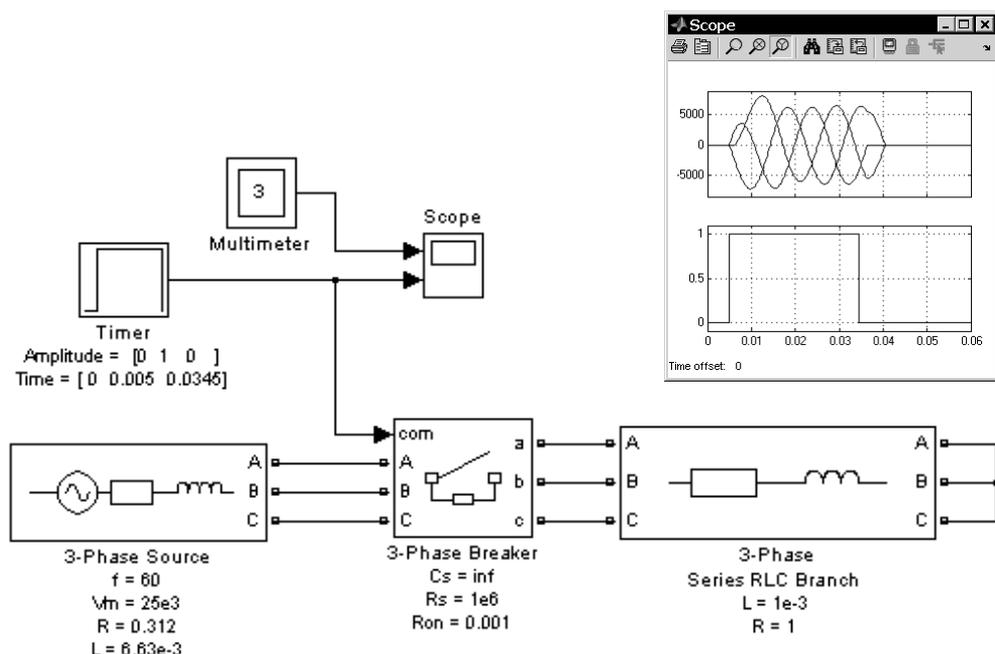


Рис. 3.30. Коммутация трехфазной электрической цепи с помощью блока 3-Phase Breaker

**Snubber resistance Rs (Ohm):**

[Сопротивление искрогасящей цепи (Ом)].

**Snubber capacitance Cs (F):**

[Емкость искрогасящей цепи (Ф)].

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Значения параметра выбираются из списка:

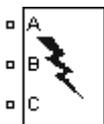
- None – нет переменных для отображения;
- Branch voltage Voltage – напряжение на зажимах элемента;
- Branch current – ток элемента;
- Branch voltage and current – напряжение и ток элемента.

*Пример:*

На рис. 3.30 показана схема с использованием трехфазного выключателя. Управление выключателем осуществляется с помощью блока Timer. Измерение фазных токов выполняется блоком Multimeter.

### 3.4.15. Трехфазный короткозамыкатель 3-Phase Fault

*Пиктограмма:*



Three-Phase Fault

**Назначение:**

Моделирует трехфазное устройство, замыкающее фазы между собой, а также на землю. Схема блока 3-Phase Fault показана на рис. 3.31. Величина сопротивления заземления  $R_g$  устанавливается равной  $10^6$  Ом, если замыкание на землю не задано в окне параметров блока.

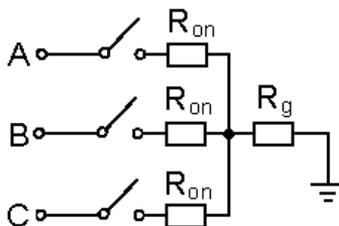
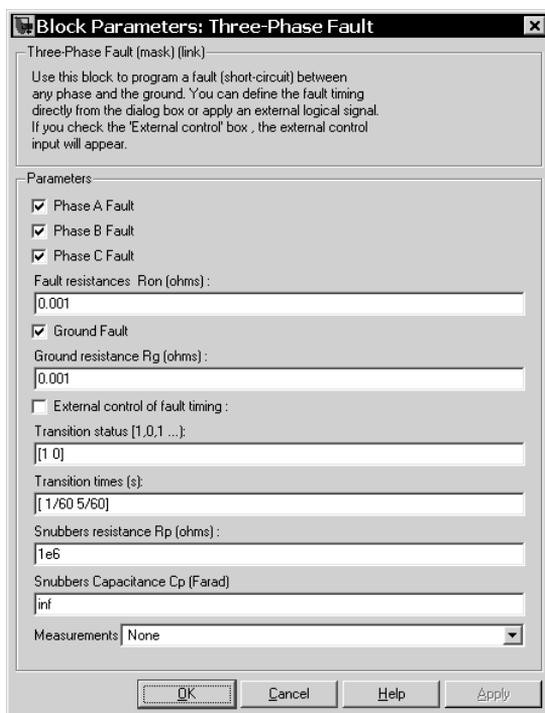


Рис. 3.31. Схема блока 3-Phase Fault

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Phase A Fault:**

[Управление ключом фазы А]. При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром Transition status, если блок работает под управлением встроенного таймера, или параметром Initial status of fault, если блок управляется внешним сигналом.

**Phase B Fault:**

[Управление ключом фазы В]. При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром Transition status, если блок работает под управлением встроенного таймера, или параметром Initial status of fault, если блок управляется внешним сигналом.

**Phase C Fault:**

[Управление ключом фазы С]. При снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром Transition status, если блок работает под управлением встроенного таймера, или параметром Initial status of fault, если блок управляется внешним сигналом.

**Fault resistance Ron (Ohm):**

[Сопротивление выключателей в замкнутом состоянии (Ом)].

**Ground Fault:**

[Замыкание на землю]. При установленном флажке производится замыкание на землю.

**Ground resistance Rg (Ohm):**

[Сопротивление заземления (Ом)]. Величина сопротивления заземления не может задаваться равной нулю.

**External control of fault timing:**

[Внешнее управление временем срабатывания]. При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключей, а нулевой уровень является командой на размыкание ключей.

**Transition status [1 0 1...]:**

[Состояние ключей]. Состояние ключей, которое соответствует моменту времени, заданному вектором Transition times (0 – разомкнутый ключ, 1 – замкнутый ключ). Параметр доступен при управлении блоком от встроенного таймера.

**Transition times (s):**

[Время срабатывания ключа]. Параметр задается в виде вектора значений времени, определяющих моменты срабатывания ключей. Параметр доступен при управлении блоком от встроенного таймера.

**Initial status of fault [Phase A Phase B Phase C]:**

[Начальное состояние ключей]. Параметр задается в виде вектора из трех элементов, определяющих состояние ключей в начальный момент времени. Значение элемента, равное 0, соответствует разомкнутому начальному состоянию, 1 – замкнутому. Параметр доступен при внешнем управлении устройством.

**Snubbers resistance Rs (Ohm):**

[Сопротивление искрогасящей цепи (Ом)].

**Snubbers capacitance Cs (F):**

[Емкость искрогасящей цепи (Ф)].

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения;
- Fault voltages – напряжения на входных зажимах короткозамыкателя;
- Fault currents – токи короткозамыкателя;
- Fault voltages and currents – напряжения и токи короткозамыкателя.

**Пример:**

На рис. 3.32 показана схема с использованием трехфазного короткозамыкателя. В момент времени 0,02 с производится межфазное короткое замыкание. Управление устройством осуществляется с помощью блока Step. Измерение фазных токов выполняется блоком Multimetr.

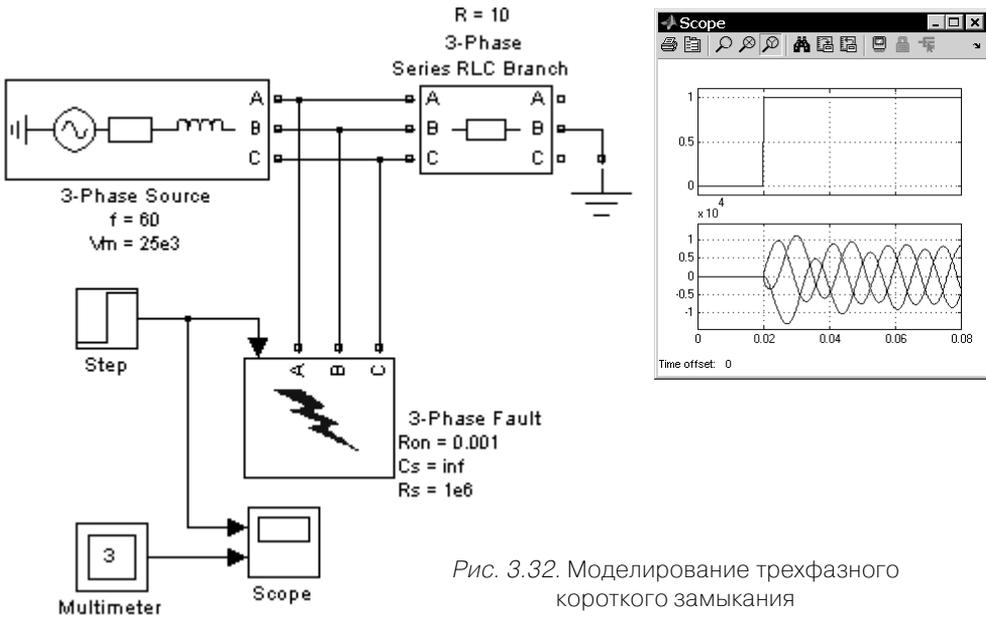
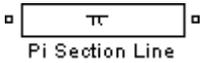


Рис. 3.32. Моделирование трехфазного короткого замыкания

### 3.4.16. Линия электропередачи с сосредоточенными параметрами PI Section Line

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок PI Section Line моделирует однофазную линию электропередачи с сосредоточенными параметрами. В реальной линии электропередачи сопротивление, индуктивность и емкость равномерно распределены вдоль линии. Приближенная модель высоковольтной линии (рис. 3.33) может содержать от одной до нескольких идентичных секций с сосредоточенными параметрами. Число секций зависит от частотного диапазона, который необходимо охватить при моделировании. Приближенно число секций можно определить из выражения:

$$f_{\max} = \frac{Nv}{8l},$$

где  $f_{\max}$  – максимальная частота;  $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – скорость распространения в км/с, при измерении индуктивности в Гн/км и емкости в Ф/км;  $l$  – длина линии в км;  $N$  – число секций.

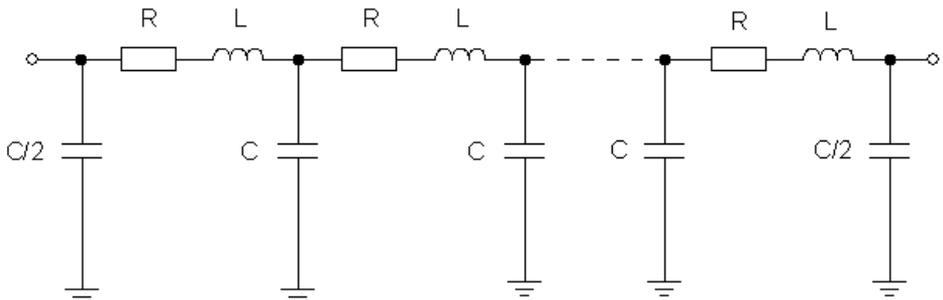
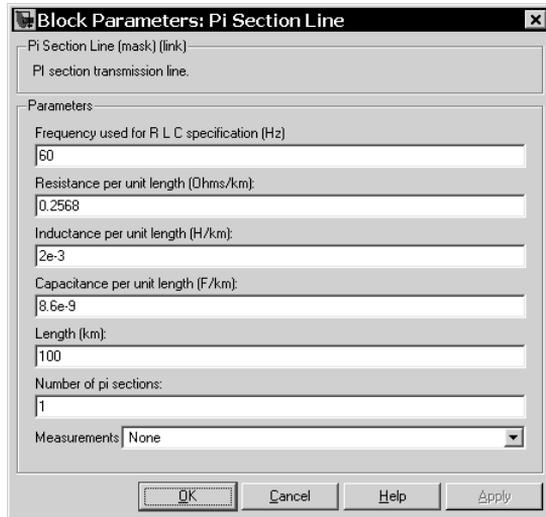


Рис. 3.33. Схема модели блока PI Section Line

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Frequency used for R L C specification (Hz):**

[Частота работы линии (Гц)].

**Resistance per unit length (Ohm/km):**

[Сопротивление линии на 1 км длины (Ом/км)].

**Inductance per unit length (H/km):**

[Индуктивность линии на 1 км длины (Гн/км)].

**Capacitance per unit length (F/km):**

[Емкость линии на 1 км длины (Ф/км)].

**Length (km):**

[Длина линии (км)].

**Number of pi sections:**

[Число секций линии].

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для измерения;
- Input and output voltages – входные и выходные напряжения;
- Input and output currents – входные и выходные токи;
- All voltages and currents – все напряжения и токи.

**Пример:**

На рис. 3.34 показана схема, моделирующая процессы отключения от источника и подключение к нему линии электропередачи длиной 200 км. Модель линии имеет две секции.

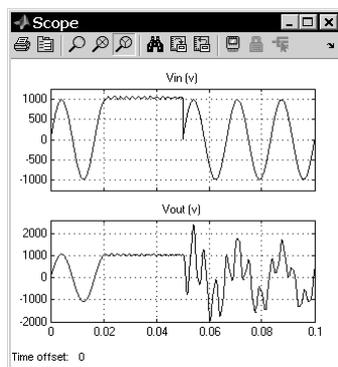
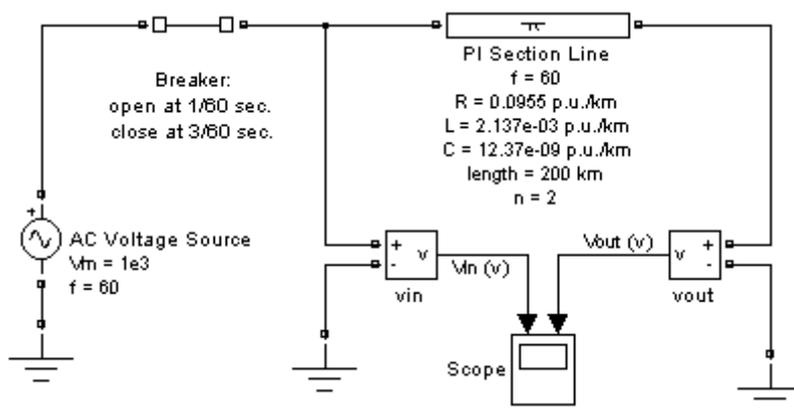
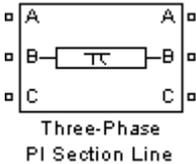


Рис. 3.34. Коммутация ЛЭП

### 3.4.17. Трехфазная линия электропередачи с сосредоточенными параметрами 3-Phase PI Section Line

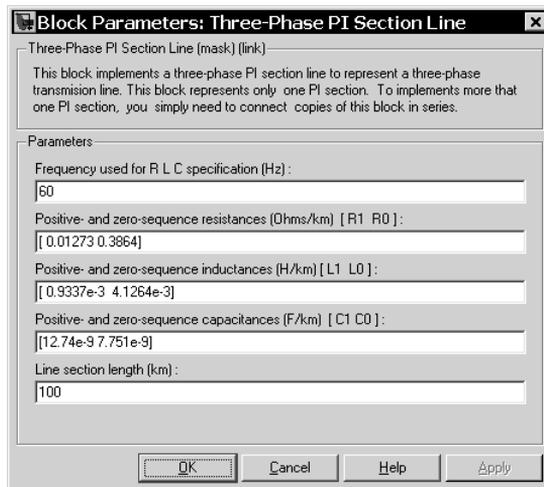
**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок 3-Phase PI Section Line моделирует трехфазную линию электропередачи с сосредоточенными параметрами с учетом взаимной индуктивности фаз линии. Модель состоит из одной секции. Для создания модели из нескольких секций необходимо последовательно включить нужное количество блоков.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Frequency used for R L C specification (Hz):**

[Частота работы линии (Гц)]. Частота, для которой определяются параметры линии R, L и C.

**Positive- and zero-sequence resistances [R1 (Ohms/km) R0 (Ohms/km)]:**

[Сопротивление прямой и нулевой последовательности линии на 1 км длины (Ом/км)]. Параметр задается в виде вектора.

**Positive- and zero-sequence inductances [L1 (H/km) L0 (H/km)]:**

[Индуктивность прямой и нулевой последовательности линии на 1 км длины (Гн/км)]. Параметр задается в виде вектора.

**Positive- and zero-sequence capacitances [C1 (F/km) C0 (F/km)]:**

[Емкость прямой и нулевой последовательности линии на 1 км длины (Ф/км)]. Параметр задается в виде вектора.

**Line section length (km):**

[Длина линейной секции (км)].

*Пример:*

На рис. 3.35 показана схема, моделирующая процессы подключения к источнику линии электропередачи длиной 100 км.

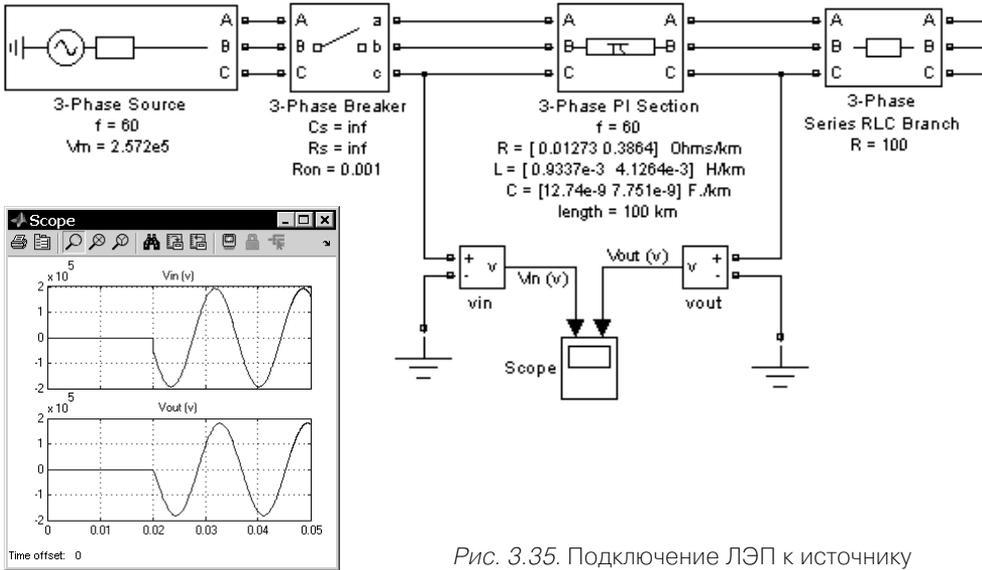
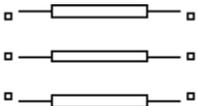


Рис. 3.35. Подключение ЛЭП к источнику

### 3.4.18. Линия электропередачи с распределенными параметрами Distributed Parameters Line

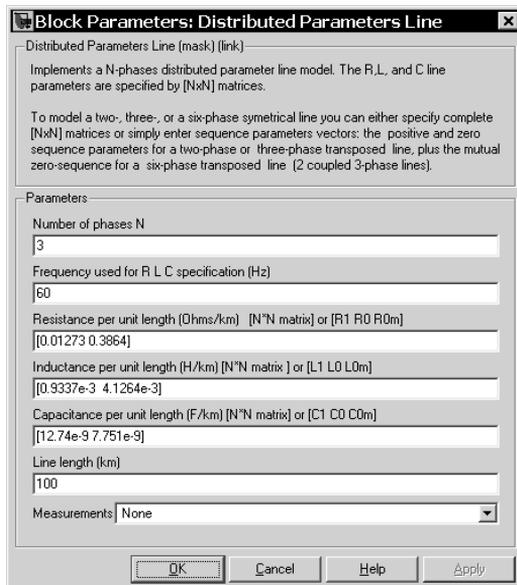
**Пиктограмма:**



Distributed Parameters Line

**Назначение:**

Блок Distributed Parameters Line моделирует многофазную линию электропередачи с распределенными параметрами. Математическое описание модели изложено в [9].

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Number of phases N:**

[Число фаз].

**Frequency used for R L C specification (Hz):**

[Частота работы линии (Гц)]. Частота, для которой определяются параметры линии R, L и C.

**Resistance per unit length (Ohms/km) [N\*N matrix] or [R1 R0 R0m]:**

[Сопротивление линии на 1 км длины (Ом/км)].

**Inductance per unit length (H/km) [N\*N matrix] or [L1 L0 L0m].**

[Индуктивность линии на 1 км длины (Гн/км)].

**Capacitance per unit length (F/km) [N\*N matrix] or [C1 C0 C0m]:**

[Емкость линии на 1 км длины (Ф/км)].

**Line length (km):**

[Длина линии (км)].

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для измерения;
- Phase-to-ground voltages – напряжения относительно земли на входе и на выходе линии.

Для моделирования двух-, трех- или шестифазной симметричной линии можно задать параметры линии в виде матриц размерностью  $N \times N$  ( $N$  – число фаз) или задать параметры прямой последовательности. Для двух- или трех-

фазной транспонированной линии можно ввести параметры прямой и нулевой последовательностей. Для шестифазной транспонированной линии нужно дополнительно задать параметры нулевой последовательности взаимного сопротивления, индуктивности и емкости. Для моделирования несимметричной линии требуется задать матрицы параметров размерностью  $N \times N$ .

*Пример:*

На рис. 3.36 показана схема, моделирующая процессы отключения от источника и подключения к нему линии электропередачи длиной 200 км. В схеме использованы те же параметры линии и источника, что и в примере для однофазной линии с сосредоточенными параметрами (рис. 3.34).

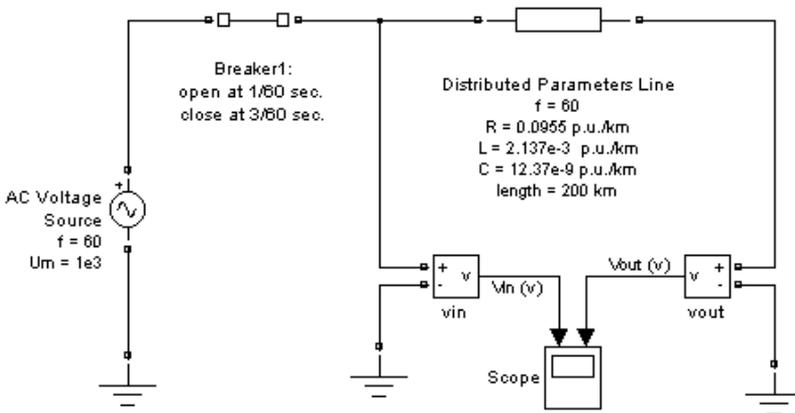
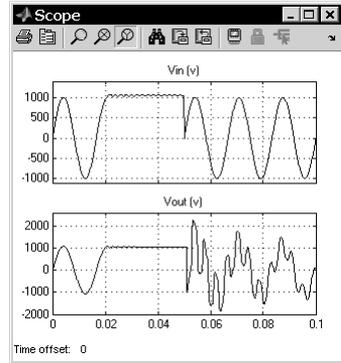
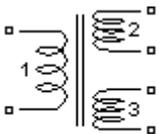


Рис. 3.36. Коммутация ЛЭП

### 3.4.19. Силовой трансформатор без учета насыщения стали сердечника Linear Transformer

*Пиктограмма:*



Linear Transformer

**Назначение:**

Блок Linear Transformer моделирует трех- или двухобмоточный однофазный трансформатор. Нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника не учитывается. Электромагнитная схема трансформатора показана на рис. 3.37.

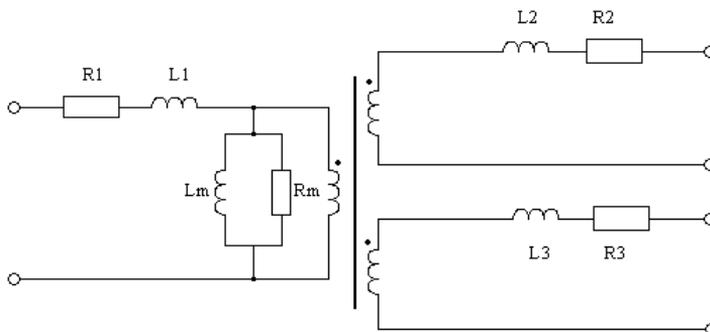
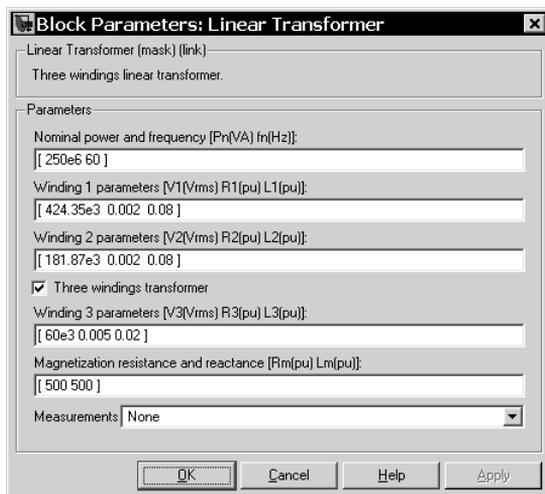


Рис. 3.37. Схема модели трансформатора

**Окно задания параметров:****Параметры блока:**

**Nominal power and frequency** [Pn (VA) fn (Hz)]:

[Номинальная полная мощность (ВА) и номинальная частота (Гц)].

**Winding 1 parameters** [V1 (Vrms) R1 (pu) L1 (pu)]:

[Параметры первой обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки].

**Winding 2 parameters:**

[Параметры второй обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки].

**Three windings transformer:**

[Трехобмоточный трансформатор]. При установленном флажке трансформатор имеет две вторичные обмотки, если флажок снят – то одну.

**Winding 3 parameters:**

[Параметры третьей обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки].

**Magnetization resistance and reactance [Rm (pu) Lm (pu)]:**

[Активное сопротивление цепи намагничивания (о.е.) и индуктивность цепи намагничивания (о.е.)].

**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 по выражениям:

$$R_* = \frac{R}{R_\phi},$$

$$L_* = \frac{L}{L_\phi},$$

где  $R_*$  и  $L_*$  – относительные значения сопротивления и индуктивности;  $R$  и  $L$  –

абсолютные значения сопротивления и индуктивности;  $R_\phi = \frac{U_n^2}{P_n}$  – базисное со-

противление;  $L_\phi = \frac{R_\phi}{2 \cdot \pi \cdot f_n}$  – базисная индуктивность;  $U_n$  – номинальное напряжение обмотки;  $f_n$  – номинальная частота.

Параметры цепи намагничивания можно найти, используя величину тока намагничивания, задаваемую в процентах относительно номинального тока. Так, например, при величине тока намагничивания, равной 0,2%, сопротивление и индуктивность цепи намагничивания будут равны  $1/(0,2/100) = 500$  о.е.

**Пример:**

На рис. 3.38 показана схема, в которой двухобмоточный линейный трансформатор используется для питания активной нагрузки.

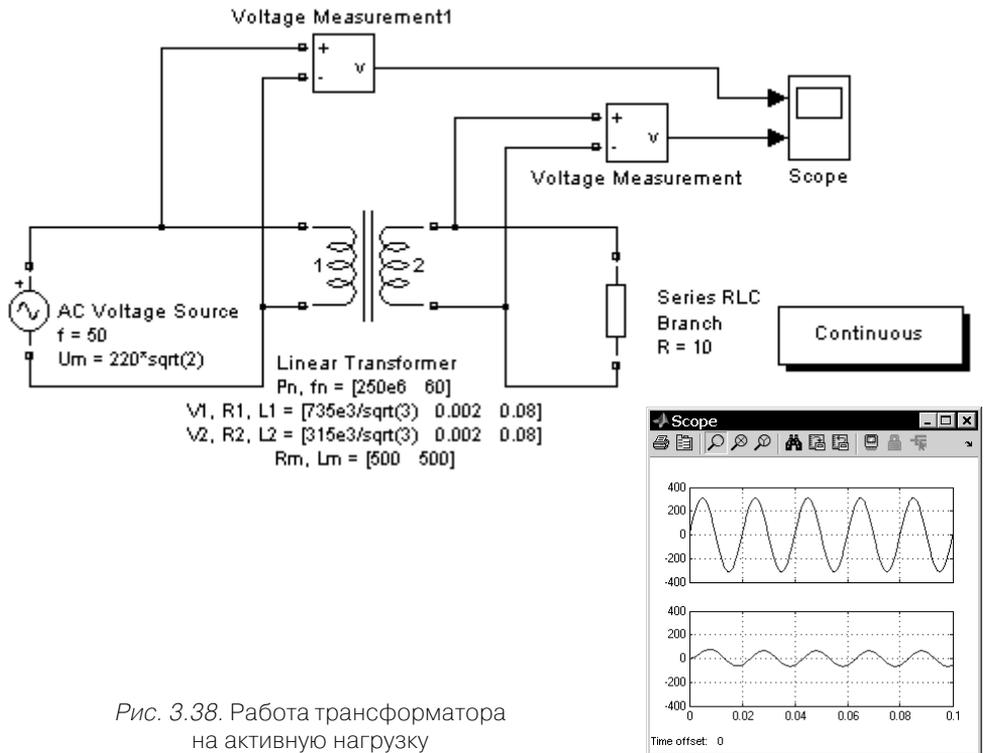
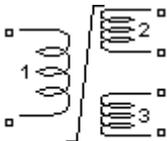


Рис. 3.38. Работа трансформатора на активную нагрузку

### 3.4.20. Силовой трансформатор с учетом насыщения стали сердечника *Saturable Transformer*

**Пиктограмма:**



Saturable Transformer

**Назначение:**

Моделирует трех- или двухобмоточный однофазный трансформатор. В модели *Saturable Transformer* учитывается нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника. Электромагнитная схема трансформатора показана на рис. 3.39.

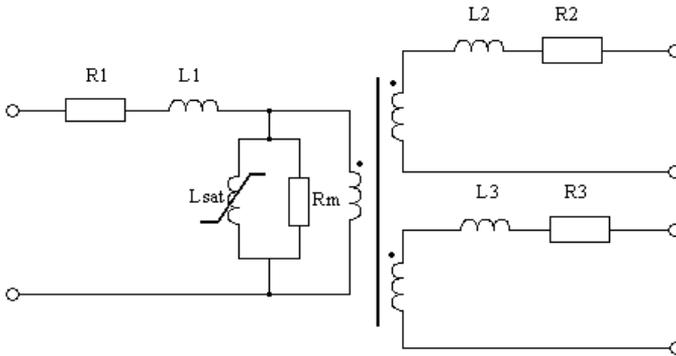


Рис. 3.39. Схема модели трансформатора

В модели сопротивление цепи намагничивания  $R_m$  учитывает активные потери в сердечнике. Нелинейная индуктивность  $L_{sat}$  учитывает насыщение сердечника трансформатора.

Нелинейная характеристика в модели задается как кусочно-линейная зависимость между магнитным потоком сердечника и током намагничивания (рис. 3.40 а). В модели имеется возможность задать остаточный магнитный поток в сердечнике. В этом случае вторая точка нелинейной характеристики должна соответствовать нулевому току (рис. 3.40 б).

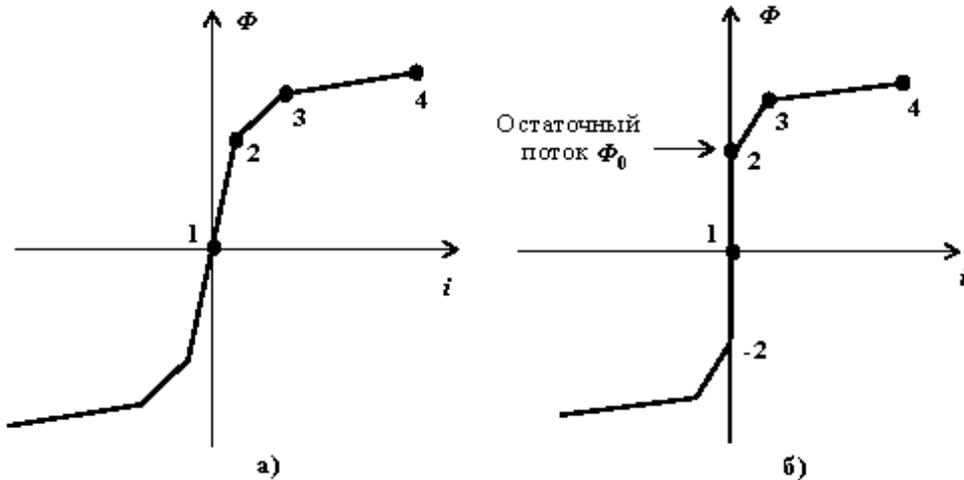
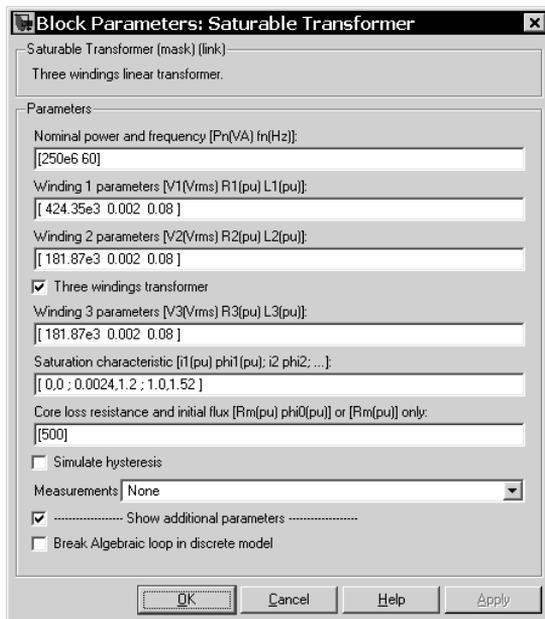


Рис. 3.40. Зависимость  $F(i)$  трансформатора

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Nominal power and frequency [Pn (VA) fn (Hz)]:**

[Номинальная полная мощность (ВА) и номинальная частота (Гц)].

**Winding 1 parameters [V1 (Vrms) R1 (pu) L1 (pu)]:**

[Параметры первой обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки].

**Winding 2 parameters [V2 (Vrms) R2 (pu) L2 (pu)]:**

[Параметры второй обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки].

**Three windings transformer:**

[Трехобмоточный трансформатор]. При установленном флажке трансформатор имеет две вторичные обмотки, если флажок снят – то одну.

**Winding 3 parameters [V3 (Vrms) R3 (pu) L3 (pu)]:**

[Параметры третьей обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) 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:**

[Моделировать гистерезис]. 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 напряжения, токи и поток.

**Show additional parameters:**

[Показать дополнительные параметры]. При установке флажка в окне диалога будут отображены дополнительные параметры модели.

**Break Algebraic loop in discrete model:**

[Разрывать алгебраический контур в дискретной модели].

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также сопротивления цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели трансформатора без учета насыщения сердечника.

Характеристика намагничивания задается значениями намагничивающего тока и потока в относительных единицах, начиная с точки (0, 0). Относительные значения тока и потока определяются по выражениям:

$$I_* = \frac{I}{I_\sigma},$$

$$\Phi_* = \frac{\Phi}{\Phi_\sigma},$$

где  $I_*$  и  $\Phi_*$  – относительные значения тока и магнитного потока;  $I$  и  $\Phi$  – абсолютные значения тока и магнитного потока;  $I_\sigma = \frac{S_n}{U_1} \sqrt{2}$  – базисный ток;

$\Phi_\sigma = \frac{U_1}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \sqrt{2}$  – базисный поток;  $U_1$  – номинальное напряжение первичной обмотки;  $f_n$  – номинальная частота.

**Пример:**

На рис. 3.41 показана схема, в которой двухобмоточный трансформатор используется для питания активной нагрузки. На осциллограмме хорошо виден не синусоидальный характер тока первичной обмотки, обусловленный нелинейной характеристикой трансформатора.

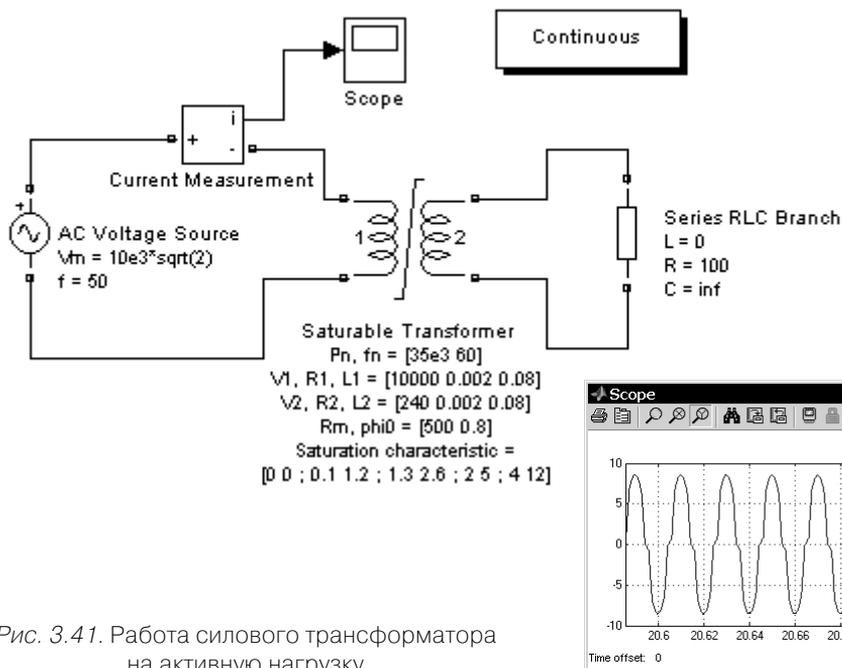
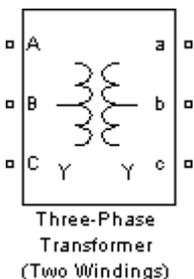


Рис. 3.41. Работа силового трансформатора на активную нагрузку

### 3.4.21. Трехфазный двухобмоточный трансформатор *Three-phase Transformer (Two Windings)*

*Пиктограмма:*



*Назначение:*

Моделирует двухобмоточный трехфазный трансформатор. Модель Three-phase Transformer (Two Windings) построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.

**Окно задания параметров:**

Three-Phase Transformer (Two Windings) (mask) [link]

This block implements a three-phase transformer by using three single-phase transformers. Set the winding connection to 'Yn' when you want to access the neutral point of the Wye.

Parameters

Nominal power and frequency [ Pn(VA) , fn(Hz) ]  
 [ [ 250e6 , 60 ] ]

Winding 1 (ABC) connection : Y

Winding parameters [ V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu) ]  
 [ [ 735e3 , 0.002 , 0.08 ] ]

Winding 2 (abc) connection : Y

Winding parameters [ V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu) ]  
 [ [ 315e3 , 0.002 , 0.08 ] ]

Saturable core

Magnetization resistance Rm (pu)  
 [ 500 ]

Magnetization reactance Lm (pu)  
 [ 500 ]

Measurements None

Show additional parameters

Break Algebraic loop in discrete model

OK Cancel Help Apply

**Параметры блока:****Nominal power and frequency [ Pn (VA) fn (Hz)]:**

[Номинальная полная мощность (ВА) и частота (Гц) трансформатора].

**Winding 1 (ABC) connection [ Y, Yn, Yg, Delta (D1), Delta (D11)]:**

[Схема соединения первичной обмотки]. Значение параметра выбирается из списка:

- Y – звезда;
- Yn – звезда с нейтралью;
- Yg – звезда с заземленной нейтралью;
- Delta (D1) – треугольник первой группы (сдвиг напряжений на  $30^0$  эл. в сторону отставания по сравнению с соединением в звезду);
- Delta (D11) – треугольник одиннадцатой группы (сдвиг напряжений на  $30^0$  эл. в сторону опережения по сравнению с соединением в звезду).

**Winding parameters [ V1 Ph-Ph (V), R1 (pu), L1 (pu)]:**

[Параметры первичной обмотки [ V1 Ph-Ph (В), R1 (о.е.), L1 (о.е.)]]. Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.).

**Winding 2 (abc) connection [ Y, Yn, Yg, Delta (D1), Delta (D11)]:**

[Схема соединения вторичной обмотки]. Значение параметра выбирается из списка:

- Y – звезда;
- Yn – звезда с нейтралью;
- Yg – звезда с заземленной нейтралью;
- Delta (D1) – треугольник первой группы;
- Delta (D11) – треугольник одиннадцатой группы.

**Winding parameters** [V2 Ph-Ph (V), R2 (pu), L2 (pu)]:

[Параметры вторичной обмотки [V2 Ph-Ph (B), R2 (o.e.), L2 (o.e.)]]. Линейное напряжение (B), активное сопротивление обмотки (o.e.), индуктивность обмотки (o.e.).

**Saturable core:**

[Насыщающийся сердечник]. При установленном флажке используется модель трансформатора с учетом насыщения сердечника.

**Magnetization resistance Rm** (pu):

[Сопротивление цепи намагничивания (o.e.)].

**Magnetization inductance Lm** (pu):

[Индуктивность цепи намагничивания (o.e.)]. Параметр доступен при моделировании трансформатора без учета насыщения сердечника (флажок Saturable core не установлен).

**Saturation characteristic** (pu) [i1, phi1; i2, phi2 ;...]

[Характеристика насыщения сердечника]. Значения намагничивающего тока и магнитного потока задаются в относительных единицах. Параметр доступен при моделировании трансформатора с учетом насыщения сердечника (флажок Saturable core установлен).

**Simulate hysteresis:**

[Моделировать гистерезис]. 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.

**Specify initial fluxes** [phi0A, phi0B, phi0C]:

[Начальные потоки для фаз ABC]. Параметр доступен при моделировании трансформатора с учетом насыщения сердечника (флажок Saturable core установлен).

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для измерения;
- 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 напряжения, токи и поток.

**Show additional parameters:**

[Показать дополнительные параметры]. При установке флажка в окне диалога будут отображены дополнительные параметры модели.

**Break Algebraic loop in discrete model:**

[Разрывать алгебраический контур в дискретной модели].

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также параметры цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели трансформатора без учета насыщения сердечника.

Характеристика намагничивания задается аналогично модели трансформатора с учетом насыщения сердечника.

*Пример:*

На рис. 3.42 показана схема, в которой двухобмоточный трехфазный трансформатор используется для питания трехфазной активной нагрузки. В примере использован вариант модели трансформатора без учета насыщения сердечника.

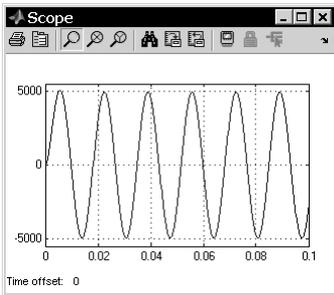
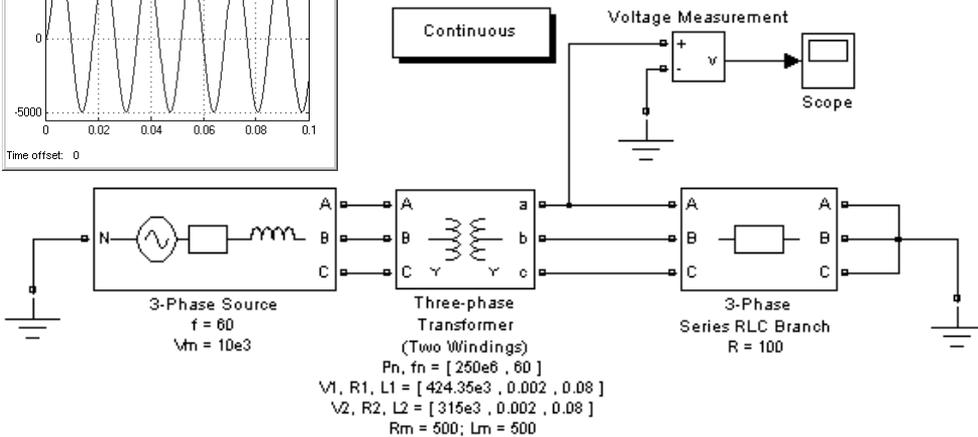
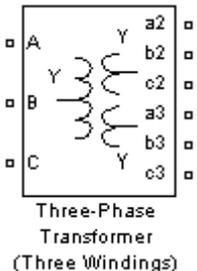


Рис. 3.42. Работа трехфазного трансформатора на активную нагрузку



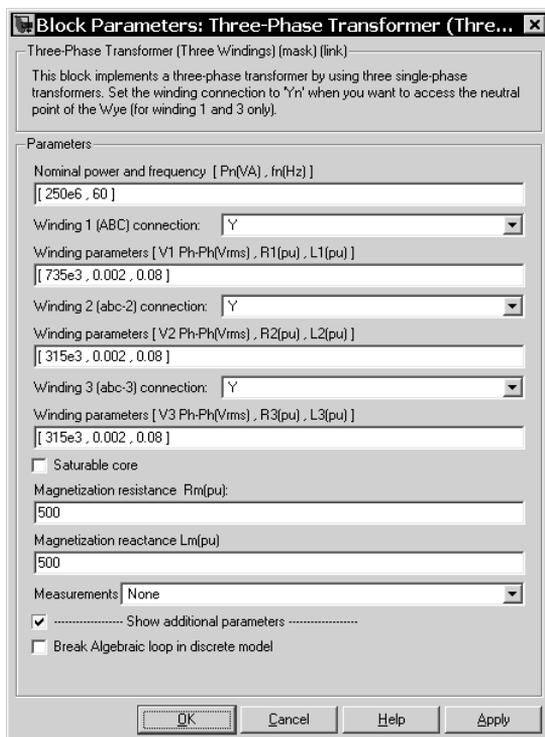
### 3.4.22. Трехфазный трехобмоточный трансформатор *Three-phase Transformer (Three Windings)*

*Пиктограмма:*



**Назначение:**

Моделирует трехобмоточный трехфазный трансформатор. Модель Three-phase Transformer (Three Windings) построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:**

**Nominal power and frequency [Pn (VA) fn (Hz)]:**

[Номинальная полная мощность (ВА) и частота (Гц) трансформатора].

**Winding 1 (ABC) connection:**

[Схема соединения первой обмотки]. Значение параметра выбирается из списка:

- Y – звезда;
- Yn – звезда с нейтралью;
- Yg – звезда с заземленной нейтралью;
- Delta (D1) – треугольник первой группы (сдвиг напряжений на  $30^0$  эл. в сторону отставания, по сравнению с соединением в звезду);
- Delta (D11) – треугольник одиннадцатой группы (сдвиг напряжений на  $30^0$  эл. в сторону опережения, по сравнению с соединением в звезду).

**Winding parameters** [V1 Ph-Ph (V), R1 (pu), L1 (pu)]:

[Параметры первой обмотки]. Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.).

**Winding 2 (abc) connection:**

[Схема соединения второй обмотки]. Значение параметра выбирается из списка:

- Y – звезда;
- Yn – звезда с нейтралью;
- Yg – звезда с заземленной нейтралью;
- Delta (D1) – треугольник первой группы;
- Delta (D11) – треугольник одиннадцатой группы.

**Winding parameters** [V2 Ph-Ph (V), R2 (pu), L2 (pu)]:

[Параметры второй обмотки]. Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.).

**Winding 3 (abc) connection:**

[Схема соединения третьей обмотки]. Значение параметра выбирается из списка:

- Y – звезда;
- Yn – звезда с нейтралью;
- Yg – звезда с заземленной нейтралью;
- Delta (D1) – треугольник первой группы;
- Delta (D11) – треугольник одиннадцатой группы.

**Winding parameters** [V3 Ph-Ph (V), R3 (pu), L3 (pu)]:

[Параметры третьей обмотки]. Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.).

**Saturable core:**

[Насыщающийся сердечник]. При установленном флажке используется модель трансформатора с учетом насыщения сердечника.

**Magnetization resistance Rm** (pu):

[Сопротивление цепи намагничивания (о.е.).]

**Magnetization inductance Lm** (pu):

[Индуктивность цепи намагничивания (о.е.).] Параметр доступен при моделировании трансформатора без учета насыщения сердечника (флажок Saturable core не установлен).

**Saturation characteristic** (pu) [i1, phi1; i2, phi2; ...]

[Характеристика насыщения сердечника]. Значения намагничивающего тока и магнитного потока задаются в относительных единицах. Параметр доступен при моделировании трансформатора с учетом насыщения сердечника (флажок Saturable core установлен).

**Simulate hysteresis:**

[Моделировать гистерезис]. 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. Параметр доступен при установленном флажке Simulate hysteresis.

**Specify initial fluxes** [phi0A, phi0B, phi0C]:

[Начальные потоки для фаз ABC]. Параметр доступен при моделировании трансформатора с учетом насыщения сердечника (флажок Saturable core установлен).

**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 напряжения, токи и поток.

**Show additional parameters:**

[Показать дополнительные параметры]. При установке флажка в окне диалога будут отображены дополнительные параметры модели.

**Break Algebraic loop in discrete model:**

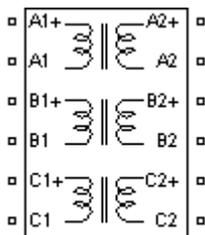
[Разрывать алгебраический контур в дискретной модели].

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также параметры цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели трансформатора без учета насыщения сердечника.

Характеристика намагничивания задается аналогично модели трансформатора с учетом насыщения сердечника.

### **3.4.23. Трехфазный трансформатор без учета насыщения сердечника (12 выводов) Three-phase Linear Transformer (12-terminals)**

**Пиктограмма:**

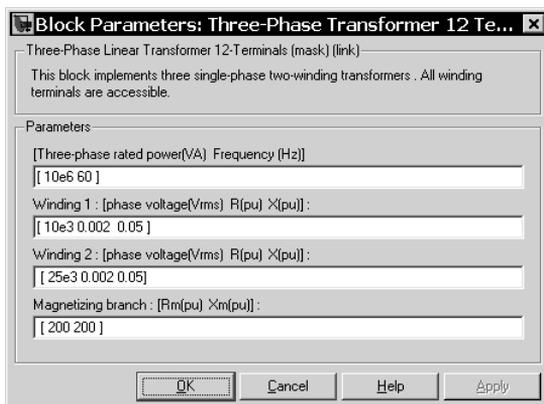


Three-Phase Transformer  
12 Terminals

**Назначение:**

Моделирует трехфазный трансформатор без учета насыщения сердечника. Модель Three-phase Linear Transformer (12-terminals) построена на основе трех однофазных трансформаторов без учета насыщения сердечника. Блок имеет отдельные зажимы для всех выводов обмоток трансформатора.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Three-phase rated power and frequency** [ $P_n$  (VA)  $f_n$  (Hz)]:

[Трехфазная номинальная полная мощность (ВА) и номинальная частота (Гц)].

**Winding 1 parameters** [ $V_1$  (Vrms)  $R_1$  (pu)  $L_1$  (pu)]:

[Параметры первичной обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки].

**Winding 2 parameters:**

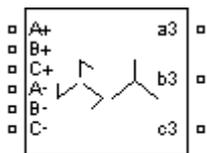
[Параметры вторичной обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки].

**Magnetization branch** [ $R_m$  (pu)  $L_m$  (pu)]:

[Сопротивление цепи намагничивания (о.е.) и индуктивность цепи намагничивания (о.е.)].

### 3.4.24. Трехфазный трансформатор с первичной обмоткой, соединенной в зигзаг **Zigzag Phase-Shifting Transformer**

**Пиктограмма:**



Zigzag

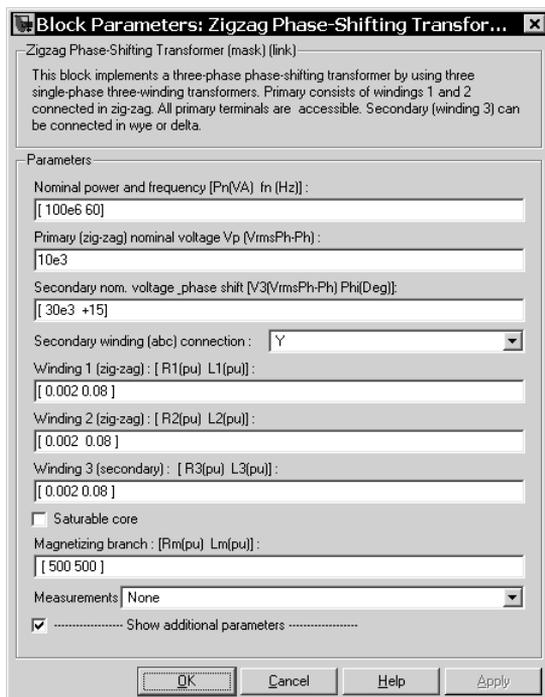
Phase-Shifting Transformer

**Назначение:**

Моделирует трехфазный трансформатор, первичные обмотки которого соединены в зигзаг. Модель Zigzag Phase-Shifting Transformer построена на основе трех

однофазных трехобмоточных трансформаторов. Все зажимы первичных обмоток доступны. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Nominal power and frequency** [Pn (VA) fn (Hz)]:

[Номинальная полная мощность (ВА) и частота (Гц) трансформатора].

**Primary (zig-zag) nominal voltage Vp** [Vrms Ph-Ph]:

[Действующее значение номинального линейного напряжения первичной обмотки трансформатора].

**Secondary nominal voltage and phase shift** [V3 (Vrms Ph-Ph) Phi (Deg)]:

[Действующее значение номинального линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора и фазовый сдвиг напряжения вторичной обмотки (эл. град)].

**Secondary winding (abc) connection:**

[Схема соединения вторичной обмотки]. Значение параметра выбирается из списка:

- Y – звезда;
- Yn – звезда с нейтралью;
- Yg – звезда с заземленной нейтралью;

- Delta (D1) – треугольник первой группы;
- Delta (D11) – треугольник одиннадцатой группы.

**Winding 1 (zig-zag):** [R1 (pu) L1 (pu)]:

[Параметры первой обмотки]. Активное сопротивление (о.е.) и индуктивность (о.е.) первой обмотки однофазного трехобмоточного трансформатора.

**Winding 2 (zig-zag):** [R2 (pu) L2 (pu)]:

[Параметры второй обмотки]. Активное сопротивление (о.е.) и индуктивность (о.е.) второй обмотки однофазного трехобмоточного трансформатора.

**Winding 3 (secondary):** [R3 (pu) L3 (pu)]:

[Параметры третьей обмотки]. Активное сопротивление (о.е.) и индуктивность (о.е.) третьей (вторичной) обмотки однофазного трехобмоточного трансформатора.

**Saturable core:**

[Насыщающийся сердечник]. При установленном флажке используется модель трансформатора с учетом насыщения сердечника.

**Magnetizing branch:** [Rm (pu) Lm (pu)]:

[Параметры цепи намагничивания]. Активное сопротивление (о.е.) и индуктивность (о.е.) цепи намагничивания. Параметр доступен, если флажок Saturable core не установлен (моделируется трансформатор без учета насыщения сердечника).

**Magnetization resistance Rm (pu):**

[Сопротивление цепи намагничивания (о.е.)]. Параметр доступен, если установлен флажок Saturable core.

**Saturation characteristic (pu)** [i1, phi1; i2, phi2; ...]:

[Характеристика насыщения сердечника]. Значения намагничивающего тока и магнитного потока задаются в относительных единицах. Параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора (флажок Saturable core установлен).

**Measurements:**

- None – нет переменных для измерения;
- Phase voltages – фазные напряжения обмоток;
- Phase currents – фазные токи обмоток;
- Fluxes and excitation currents (Imag + IRm) – потоки и токи холостого хода;
- Fluxes and magnetization currents (Imag) – поток и ток намагничивания;
- All measurements (V I Fluxes) – все напряжения, токи и поток.

**Show additional parameters:**

[Показать дополнительные параметры]. При установке флажка в окне диалога будут отображены дополнительные параметры модели.

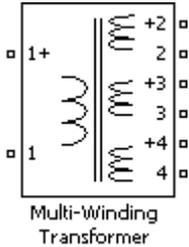
**Break Algebraic loop in discrete model:**

[Разрывать алгебраический контур в дискретной модели].

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также параметры цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели трансформатора без учета насыщения сердечника.

### 3.4.25. Многообмоточный трансформатор Multi-Winding Transformer

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок Multi-Winding Transformer моделирует однофазный многообмоточный трансформатор с произвольным числом обмоток как на первичной, так и на вторичной стороне. Эквивалентная схема трансформатора аналогична схеме однофазного трансформатора с учетом насыщения сердечника. Предусматривается также возможность моделирования обмоток с отпайками. Отпайки могут быть заданы либо для первой обмотки на первичной стороне (верхняя левая), либо для первой обмотки на вторичной стороне (верхняя правая). Число витков между отпайками одной и той же обмотки одинаково. Активное сопротивление и индуктивность каждой секции обмотки находятся делением всего сопротивления обмотки и ее индуктивности на число секций обмотки (число отпайков + 1). На рис. 3.43 показана схема модели многообмоточного трансформатора.

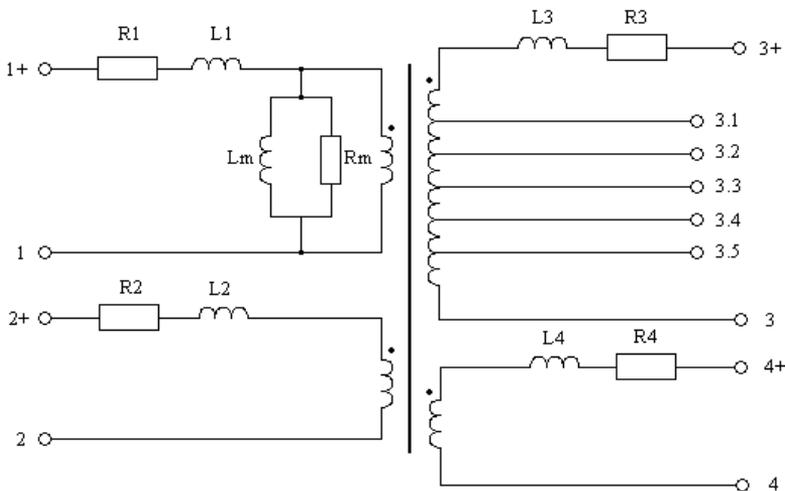


Рис. 3.43. Схема модели многообмоточного трансформатора

**Окно задания параметров:**

Block Parameters: Multi-Winding Transformer

Multi-Winding Transformer (mask) (link)

Implements a transformer with multiple windings. The number of windings can be specified for the left side and for the right side of the block. Taps can be added to the upper left winding or to the upper right winding.

Parameters

Number of windings on left side  
[ 1 ]

Number of windings on right side  
[ 3 ]

Tapped winding [ no taps ]

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]  
[ 75e3 60 ]

Winding nominal voltages [U1 U2 ... Un] (Vrms)  
[ 14400 120 120 120 ]

Winding resistances [R1 R2 ... Rn] (pu)  
[ 0.005 0.005 0.005 0.005 ]

Winding leakage inductances [L1 L2 ... Ln] (pu)  
[ 0.02 0.02 0.02 0.02 ]

Saturable core

Magnetization resistance Rm (pu)  
[ 50 ]

Magnetization reactance Lm (pu)  
[ 50 ]

Measurements [ None ]

..... Show additional parameters .....

OK Cancel Help Apply

**Параметры блока:****Number of windings on left side:**

[Количество обмоток на первичной стороне].

**Number of windings on right side:**

[Количество обмоток на вторичной стороне].

**Tapped winding:**

[Обмотки с отпайками]. Параметр позволяет выбрать обмотку, для которой будет задано число отпайк. Значение параметра выбирается из списка:

- no taps – нет обмоток с отпайками;
- taps on upper left winding – отпайки на первой обмотке первичной стороны (верхняя левая);
- taps on upper right winding – отпайки на первой обмотке вторичной стороны (верхняя правая).

**Number of taps (equally spaced):**

[Число отпайк]. Параметр доступен, если выбрана обмотка, для которой необходимо задать отпайки.

**Nominal power and frequency** [ $P_n$  (VA)  $f_n$  (Hz)]:

[Номинальная полная мощность (ВА) и номинальная частота (Гц)]. Номинальные параметры трансформатора.

**Winding nominal voltages** [ $U_1$   $U_2$  ...  $U_n$ ] ( $V_{rms}$ ):

[Номинальные напряжения обмоток [ $U_1$   $U_2$  ...  $U_n$ ] (В)]. Параметр задается в виде вектора. Каждый элемент вектора определяет действующее значение напряжения обмотки, номер которой соответствует порядковому номеру элемента в векторе.

**Winding resistances** [ $R_1$   $R_2$  ...  $R_n$ ] (pu):

[Активные сопротивления обмоток [ $R_1$   $R_2$  ...  $R_n$ ] (о.е.)]. Параметр задается в виде вектора. Каждый элемент вектора определяет активное сопротивление обмотки, номер которой соответствует порядковому номеру элемента в векторе.

**Winding leakage inductances** [ $L_1$   $L_2$  ...  $L_n$ ] (pu):

[Индуктивности рассеяния обмоток [ $L_1$   $L_2$  ...  $L_n$ ] (о.е.)]. Параметр задается в виде вектора. Каждый элемент вектора определяет индуктивность обмотки, номер которой соответствует порядковому номеру элемента в векторе.

**Saturable core:**

[Насыщающийся сердечник]. При установленном флажке используется модель трансформатора с учетом насыщения сердечника.

**Magnetization resistance**  $R_m$  (pu):

[Активное сопротивление цепи намагничивания (о.е.)].

**Magnetization reactance**  $L_m$  (pu):

[Индуктивность цепи намагничивания (о.е.)]. Параметр доступен при моделировании трансформаторов без учета насыщения сердечника (флажок Saturable core не установлен).

**Saturation characteristic** (pu) [ $i_1, \phi_1; i_2, \phi_2 ; \dots$ ]

[Характеристика насыщения сердечника]. Значения намагничивающего тока и магнитного потока задаются в относительных единицах. Параметр доступен при моделировании трансформатора с учетом насыщения сердечника (флажок Saturable core установлен).

**Simulate hysteresis:**

[Моделировать гистерезис]. 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 ( $I_{mag\_IRm}$ ) – поток и ток холостого хода;
- Flux and magnetization current ( $I_{mag}$ ) – намагничивания;
- All Measurements (V, I, Flux) – все напряжения, токи и поток.

**Show additional parameters:**

[Показать дополнительные параметры]. При установке флажка в окне диалога будут отображены дополнительные параметры модели.

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

Характеристика намагничивания задается аналогично модели нелинейного трансформатора.

*Пример:*

На рис. 3.44 показана схема, в которой многообмоточный трансформатор работает на активную нагрузку. Первая обмотка на вторичной стороне имеет одну отпайку.

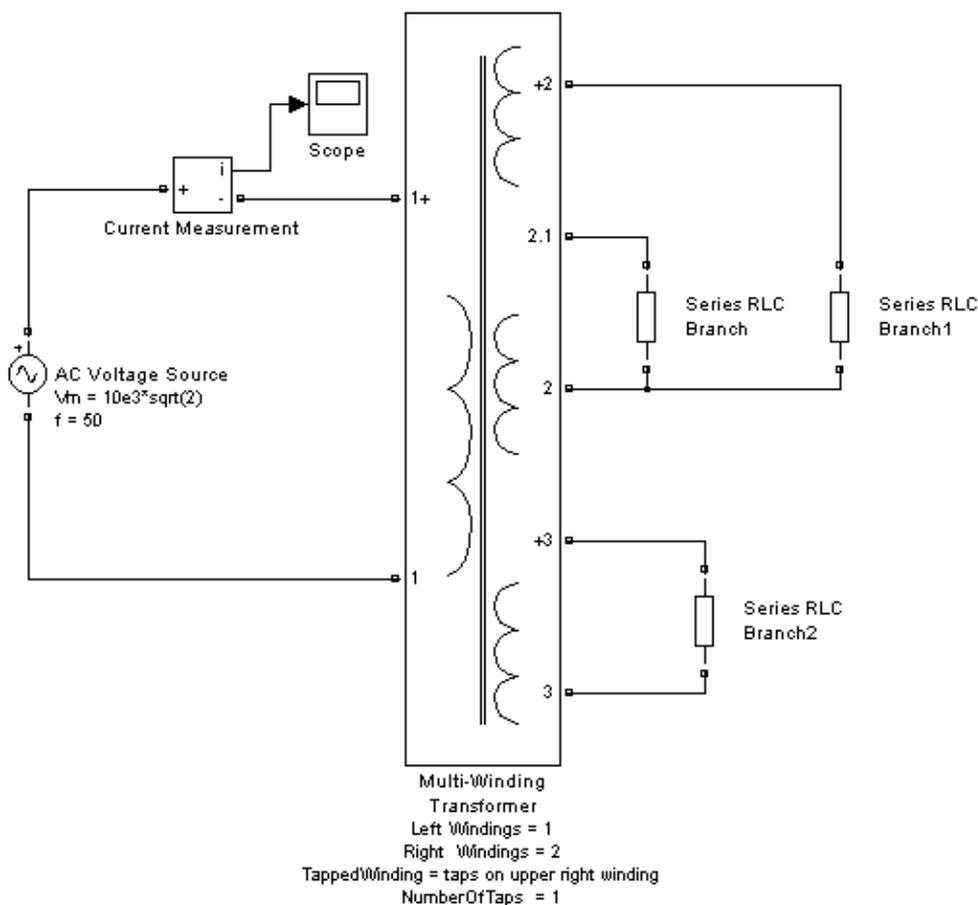
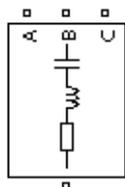


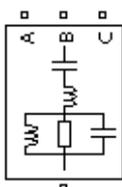
Рис. 3.44. Работа трехфазного многообмоточного трансформатора на активную нагрузку

## 3.4.26. Трехфазный фильтр *Three-Phase Harmonic Filter*

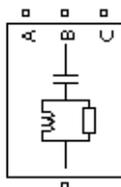
**Пиктограмма:**



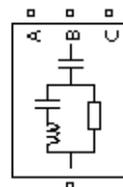
Three-Phase Harmonic Filter  
FilterType = Single-tuned



Three-Phase Harmonic Filter  
FilterType = Double-tuned



Three-Phase Harmonic Filter  
FilterType = High-pass



Three-Phase Harmonic Filter  
FilterType = C-type High-pass

**Назначение:**

Блок Three-Phase Harmonic Filter моделирует 4 типа трехфазных гармонических фильтров, используя RLC-элементы. Фильтры подобного рода используются в энергетических системах для снижения искажений напряжения и тока, а также повышения коэффициента мощности.

**Окно задания параметров:**

Block Parameters: Three-Phase Harmonic Filter

Three-Phase Harmonic Filter (mask) (link)

Implements a three-phase harmonic filter.  
The filter is built up from passive RLC components. Their values are computed using the specified nominal reactive power, tuning frequency (ies) and quality factor.

Parameters

Type of filter: Double-tuned

Filter connection: Y (neutral)

Nominal L-L voltage and frequency [Vn[Vrms] fn[Hz]]:  
[315e3 60]

Nominal reactive power [var]:  
[49e6]

Tuning frequencies [Fr1 [Hz] Fr2 [Hz]]:  
[11\*60 13\*60]

Quality factor (Q):  
[16]

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

**Параметры блока:**

**Type of filter:**

[Тип фильтра]. Значение параметра выбирается из списка:

- Single-tuned – однорезонансный фильтр;
- Double-tuned – двухрезонансный фильтр;

- High-pass – фильтр верхних частот;
- C-type High-pass – фильтр верхних частот C-типа.

**Filter connection:**

[Соединение]. Параметр задает схему соединения фильтра. Значение выбирается из списка:

- Y (grounded) – звезда с заземленной нейтралью;
- Y (floating) – звезда без нулевого провода;
- Y (neutral) – звезда с нулевым проводом;
- Delta – треугольник.

**Nominal L-L voltage and frequency** [ $V_n$  ( $V_{rms}$ )  $f_n$  (Гц)]:

[Номинальное линейное напряжение и частота [ $U_n$  (В)  $f_n$  (Гц)]]. В качестве номинального напряжения задается действующее значение линейного напряжения.

**Nominal reactive power** (var):

[Номинальная реактивная мощность (ВАр)].

**Tuning frequency** (Гц):

[Резонансная частота (Гц)]. Параметр задается для однорезонансных фильтров.

**Tuning frequencies** [Fr1 (Гц) Fr2 (Гц)]:

[Резонансные частоты [Fr1 (Гц) Fr2 (Гц)]]. Параметр задается для двухрезонансных фильтров.

**Quality factor** (Q):

[Добротность (Q)].

**Measurements:**

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Score. Значения параметра выбираются из списка:

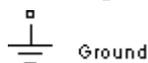
- None – нет переменных для отображения;
- Branch voltage Voltage – напряжение на зажимах цепи;
- Branch current – ток цепи;
- Branch voltage and current – напряжение и ток цепи.

*Пример:*

На рис. 3.45 приведена схема, в которой трехфазный гармонический фильтр обеспечивает существенное снижение пятой гармоники тока в нагрузке. В качестве трехфазного источника напряжения использованы управляемые источники напряжения, соединенные в звезду с нулевым проводом. Управление источниками осуществляется от блоков Sine Wave, генерирующих первую и пятую гармоники сигнала.

### 3.4.27. Заземление Ground

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок Ground обеспечивает соединение с землей.

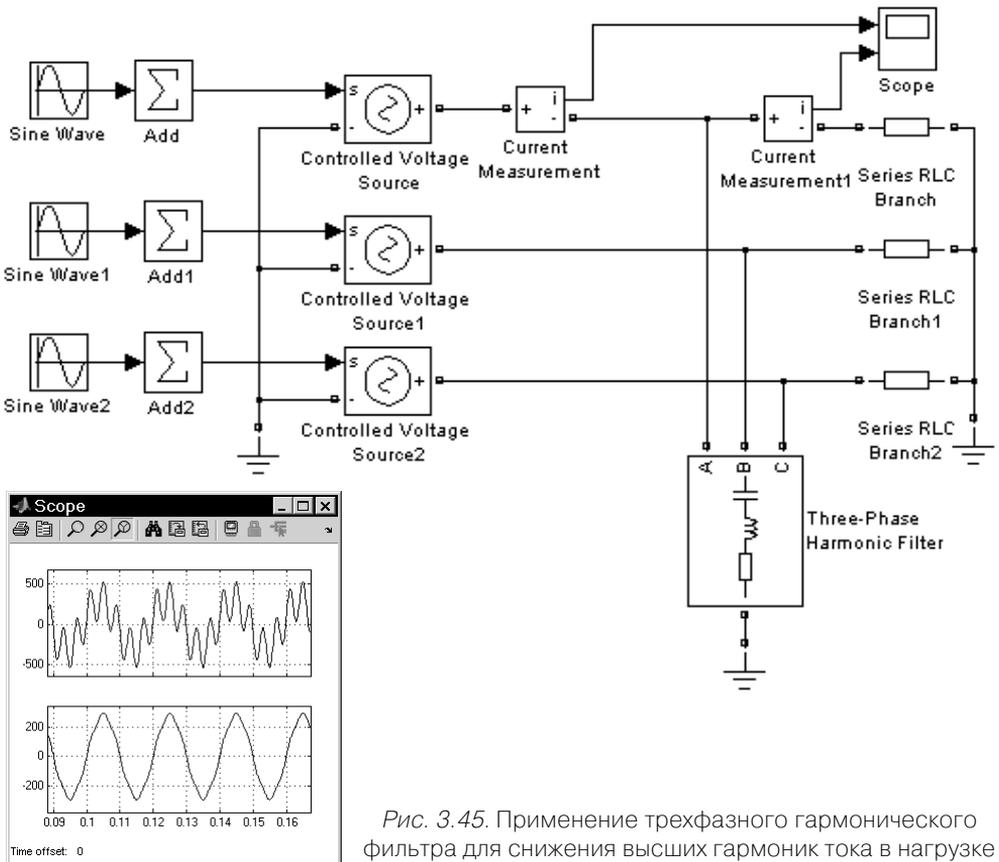


Рис. 3.45. Применение трехфазного гармонического фильтра для снижения высших гармоник тока в нагрузке

### Окно задания параметров:



### Параметры блока:

Нет.

### Пример:

На рис. 3.46 показан пример использования блоков Ground. В примере источник и оба элемента нагрузки одним из портов подключены к блоку Ground, что обеспечивает электрическую связь между ними.

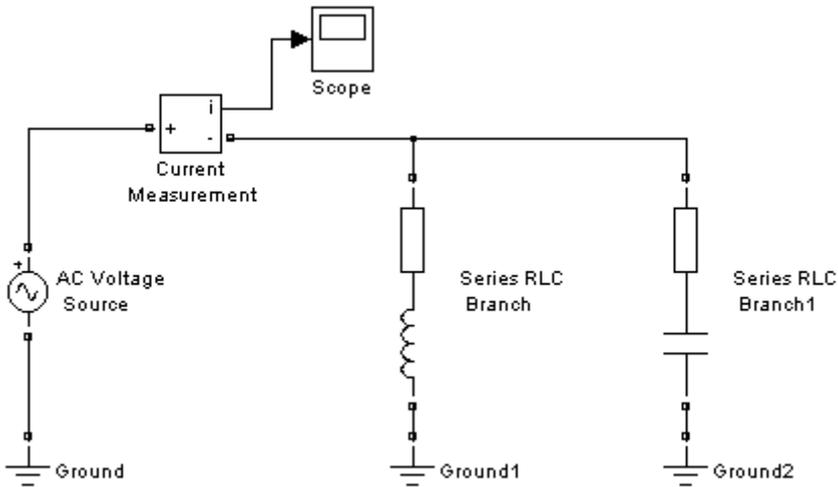
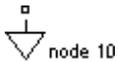


Рис. 3.46. Пример использования блоков Ground

### 3.4.28. Нейтраль Neutral

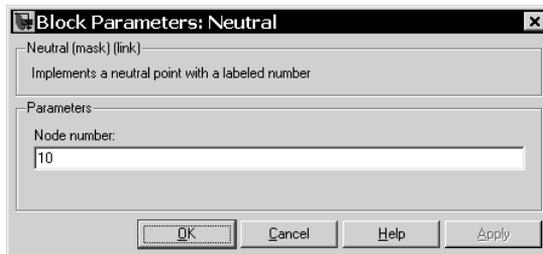
**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок Neutral обеспечивает электрическое соединение между блоками с одинаковыми номерами узлов.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Node number:**

[Номер узла].

Блок позволяет соединить между собой далеко отстоящие на схеме электрические узлы без видимых линий связи (проводов). Блок с номером узла, равным нулю, обеспечивает соединение с землей.

*Пример:*

На рис. 3.47 показана схема, использующая блоки Neutral. Два блока с номером узла 10 электрически связаны между собой. Блок Neutral с нулевым номером обеспечивает связь с землей.

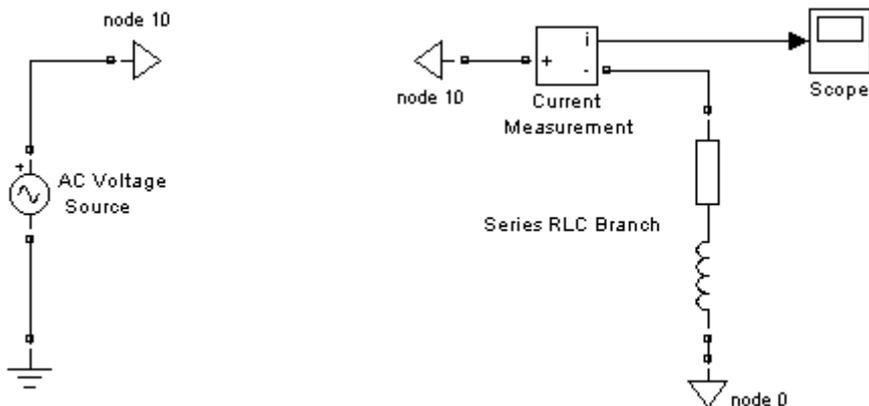


Рис. 3.47. Использование блоков Neutral

### 3.4.29. Клемма Connection Port

*Пиктограмма:*

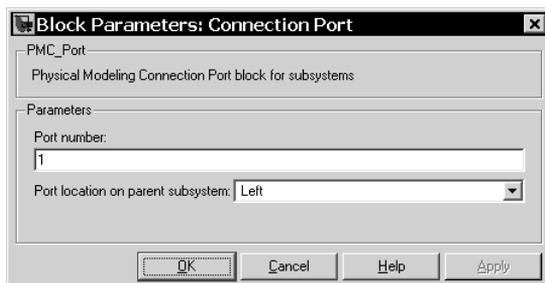


Connection  
Port

*Назначение:*

Блок Connection Port создает порт в подсистеме для соединения с блоками SimPowerSystem. При установке блока внутри подсистемы на пиктограмме появляется порт, аналогичный портам стандартных блоков SimPowerSystem.

*Окно задания параметров:*



**Параметры блока:**

**Node number:**

[Номер узла].

**Port location on parent subsystem:**

[Расположение порта на пиктограмме подсистемы]. Значение параметра выбирается из списка:

- Left – порт расположен слева;
- Right – порт расположен справа.

*Пример:*

На рис. 3.48 показана схема, в которой используется подсистема, состоящая из блоков SimPowerSystem. Для соединения содержимого подсистемы с внешними элементами использованы блоки Connection Port.

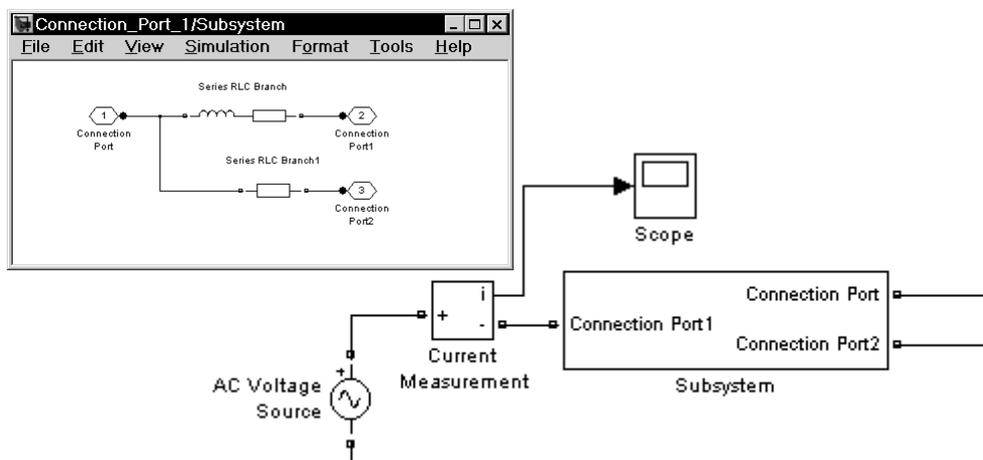
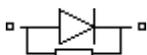


Рис. 3.48. Использование блока Connection Port в подсистеме

## 3.5. Элементы силовой электроники Power Electronics

### 3.5.1. Силовой диод Diode

*Пиктограмма:*



Diode

**Назначение:**

Блок Diode моделирует полупроводниковый силовой диод.

Модель диода состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$ , источника постоянного напряжения  $U_f$  и ключа SW (рис. 3.49). Блок логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на диоде ( $U_{ak} - U_f$ ) происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток. Размыкание ключа (выключение диода) происходит при снижении тока  $I_{ak}$ , протекающего через диод, до нуля.

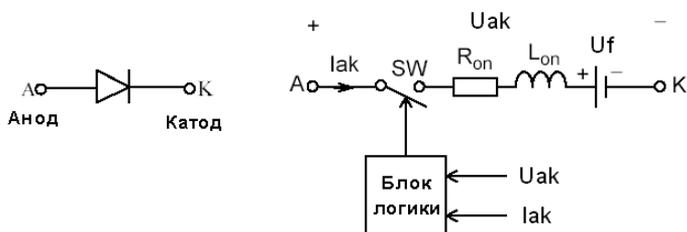


Рис. 3.49. Модель диода

Статическая вольт-амперная характеристика модели диода показана на рис. 3.50.

В модели параллельно самому диоду включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

#### Окно задания параметров:

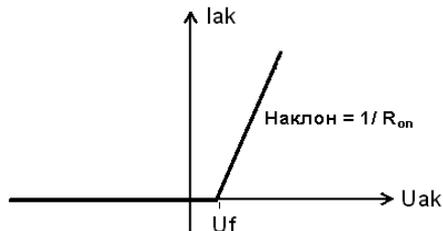


Рис. 3.50. Статическая вольт-амперная характеристика модели диода

**Block Parameters: Diode**

Diode (mask) (link)

Implements a diode in parallel with a series RC snubber circuit. In on-state the Diode model has an internal resistance ( $R_{on}$ ) and inductance ( $L_{on}$ ). For most applications the internal inductance should be set to zero. The Diode impedance is infinite in off-state mode.

Parameters

Resistance  $R_{on}$  (Ohms):

Inductance  $L_{on}$  (H):

Forward voltage  $V_f$  (V):

Initial current  $I_c$  (A):

Snubber resistance  $R_s$  (Ohms):

Snubber capacitance  $C_s$  (F):

Show measurement port

**Параметры блока:**
**Resistance Ron (Ohm):**

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)].

**Inductance Lon (H):**

[Индуктивность во включенном состоянии (Гн)].

**Forward voltage Vf (V):**

[Падение напряжения в прямом направлении (В)].

**Initial current Ic (A):**

[Начальное значение тока (А)]. При значении параметра, равном нулю, моделирование начинается при закрытом состоянии диода. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии диода.

**Snubber resistance Rs (Ohm):**

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

**Snubber capacitance Cs (F):**

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

**Show measurement port:**

[Показать измерительный порт]. При установленном флажке на пиктограмме блока появляется выходной порт m, на котором формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент – анодный ток диода, второй – напряжение анод-катод диода.

*Пример:*

На рис. 3.51 показана схема модели однополупериодного выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку. Приведены графики тока в нагрузке и напряжения на нагрузке.

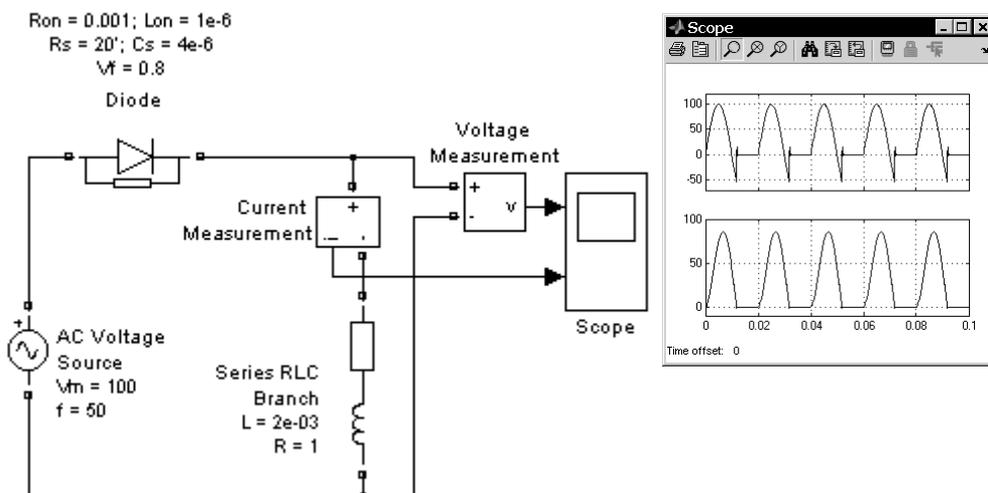
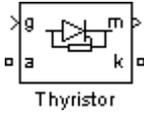


Рис. 3.51. Модель однополупериодного выпрямителя

### 3.5.2. Тиристор *Thyristor, Detailed Thyristor*

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Моделирует тиристор. В библиотеке SimPowerSystems имеются две модели тиристора: Thyristor (упрощенная модель) и Detailed Thyristor (уточненная модель).

Упрощенная модель тиристора состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$ , источника постоянного напряжения  $U_f$  и ключа SW (рис. 3.52). Блок логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на тиристоре ( $U_{ak} - U_f$ ) и наличии положительного сигнала на управляющем электроде (g) происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток. Размыкание ключа (выключение тиристора) выполняется при снижении тока  $I_{ak}$ , протекающего через тиристор, до нуля и нулевом управляющем сигнале.

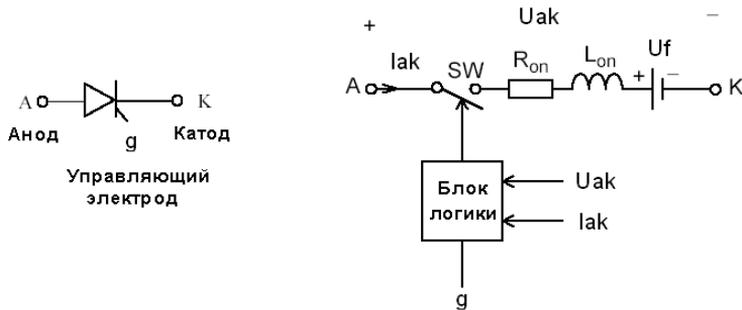


Рис. 3.52. Упрощенная модель тиристора

В уточненной модели тиристора длительность управляющего импульса должна быть такой, чтобы при включении анодный ток тиристора превысил ток удержания ( $I_H$ ). В противном случае включение не произойдет. При выключении тиристора длительность приложения отрицательного напряжения анод-катод должна превышать время выключения тиристора ( $T_q$ ). В противном случае произойдет автоматическое включение тиристора, даже если управляющий сигнал равен нулю.

Статические вольт-амперные характеристики модели тиристора для включенного и выключенного состояний показаны на рис. 3.53.

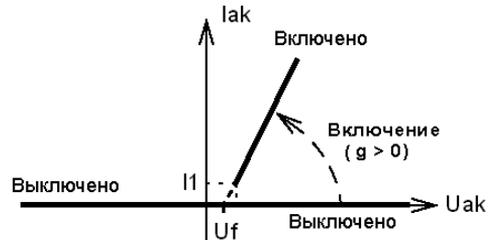
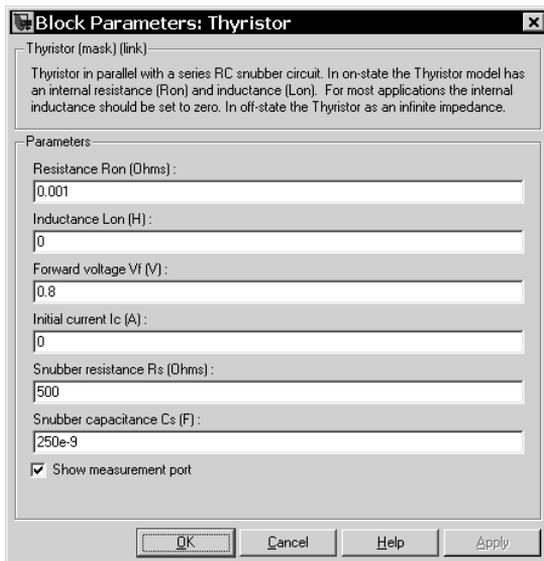


Рис. 3.53. Статические вольт-амперные характеристики модели тиристора

В модели параллельно самому тиристоры включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Resistance Ron (Ohm):**

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)],

**Inductance Lon (H):**

[Индуктивность во включенном состоянии (Гн)].

**Forward voltage Vf (V):**

[Падение напряжения в прямом направлении (В)].

**Initial current Ic (A):**

[Начальное значение тока (А)]. При значении параметра, равном нулю, моделирование начинается при закрытом состоянии тиристора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии тиристора.

**Snubber resistance Rs (Ohm):**

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

**Snubber capacitance Cs (F):**

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

**Latching current Ii (A):**

[Величина тока удержания (А)]. Параметр задается в уточненной модели тиристора.

**Turn of time Tq (s):**

[Время выключения (с)]. Параметр задается в уточненной модели тиристора.

**Show measurement port:**

[Показать измерительный порт]. При установленном флажке на пиктограмме блока появляется выходной порт m, на котором формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент – анодный ток тиристора, второй – напряжение анод-катод тиристора.

*Пример:*

На рис. 3.54 показана схема модели управляемого однополупериодного выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку. В схеме использована упрощенная модель тиристора. Импульсы управления тиристором формируются блоком Pulse Generator, при этом величина угла управления тиристором определяется длительностью фазовой задержки (Phase Delay) генератора. На рисунке приведены также графики тока в нагрузке и напряжения на нагрузке.

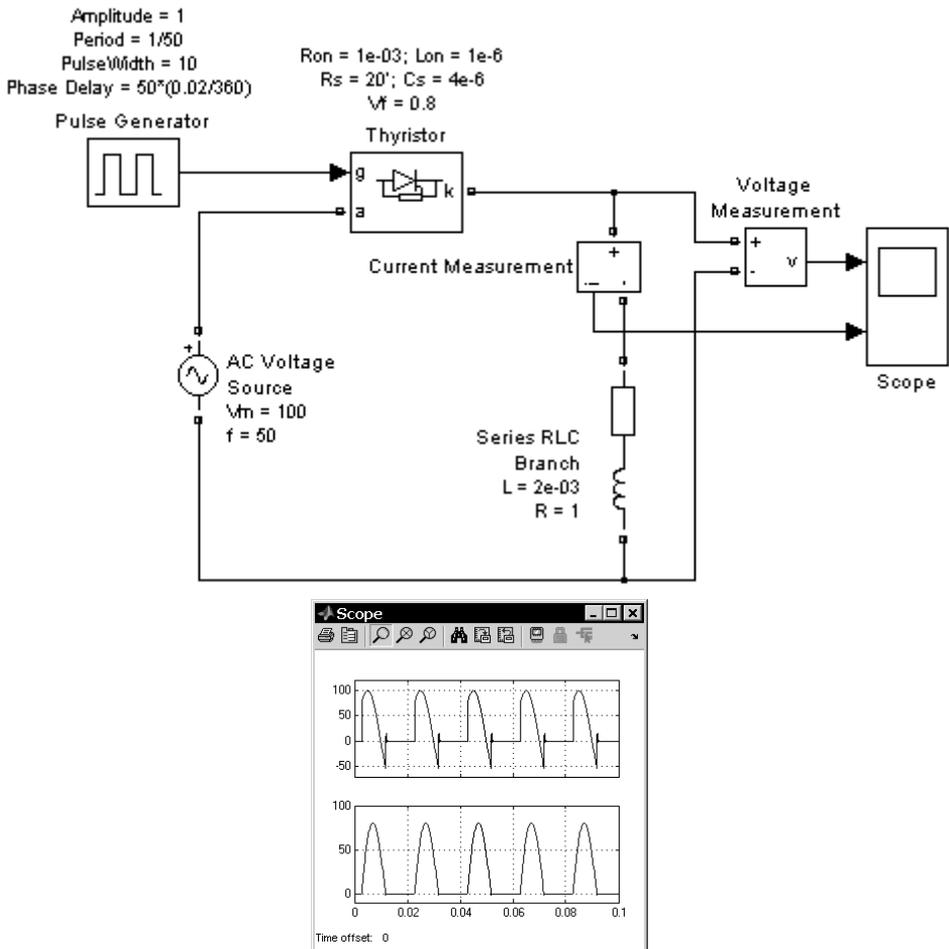
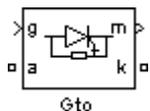


Рис. 3.54. Модель управляемого однополупериодного выпрямителя

### 3.5.3. Полностью управляемый тиристор GTO Thyristor

Пиктограмма:



**Назначение:**

Блок GTO Thyristor моделирует полностью управляемый тиристор.

Модель полностью управляемого тиристора состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$ , источника постоянного напряжения  $U_f$  и ключа SW (рис. 3.55). Блок логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на тиристоре ( $U_{ak} - U_f$ ) и наличии положительного сигнала на управляющем электроде (g) происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток. Для выключения прибора достаточно управляющий сигнал снизить до величины, равной нулю.

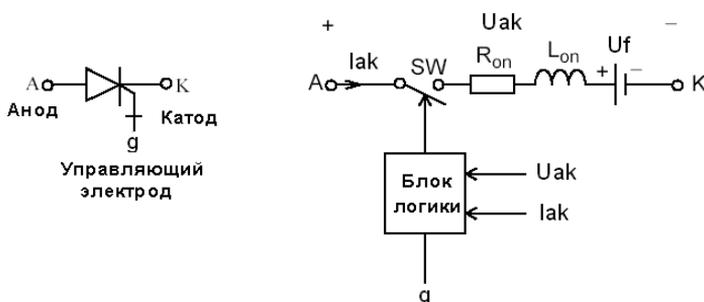


Рис. 3.55. Модель полностью управляемого тиристора

Статические вольт-амперные характеристики модели полностью управляемого тиристора для включенного и выключенного состояний показаны на рис. 3.56.

В модели параллельно самому тиристорному включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

В модели учитывается также конечное время выключения тиристора. Процесс выключения разбит на



Рис. 3.56. Статические вольт-амперные характеристики модели полностью управляемого тиристора

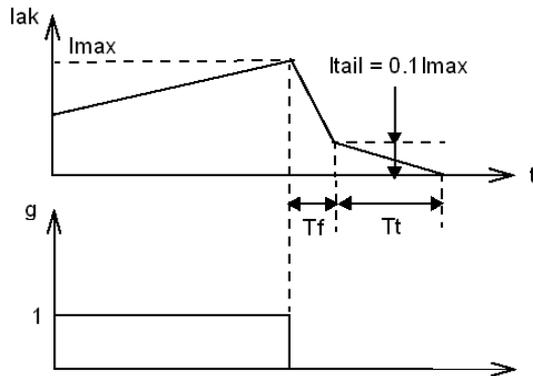


Рис. 3.57. Процесс выключения полностью управляемого тиристора

два участка (рис. 3.57) и характеризуется, соответственно, временем спада ( $T_f$ ), при котором анодный ток уменьшается до 0,1 от тока в момент выключения ( $I_{max}$ ), и временем затягивания ( $T_t$ ), при котором анодный ток уменьшается до нуля.

**Окно задания параметров:**

**Block Parameters: Gto**

Gto (mask) (link)

Implements a GTO thyristor in parallel with a series RC snubber circuit.  
 In on-state the GTO model has internal resistance ( $R_{on}$ ) and inductance ( $L_{on}$ ).  
 In off-state the GTO model has infinite impedance.

The internal inductance cannot be set to zero. Discretization of the GTO is available only through the Universal Bridge block.

Parameters

Resistance  $R_{on}$  (Ohms):

Inductance  $L_{on}$  (H):

Forward voltage  $V_f$  (V):

Current 10% fall time  $T_f$  (s):

Current tail time  $T_t$  (s):

Initial current  $I_c$  (A):

Snubber resistance  $R_s$  (Ohms):

Snubber capacitance  $C_s$  (F):

Show Measurement port

**Параметры блока:**

**Resistance Ron (Ohm):**

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)].

**Inductance Lon (H):**

[Индуктивность во включенном состоянии (Гн)].

**Forward voltage Vf (V):**

[Падение напряжения в прямом направлении (В)].

**Current 10% fall time Tf (s):**

[Время спада тока до уровня 0,1 от тока в момент выключения (с)].

**Current tail time Tt (s):**

[Время затягивания (с)]. Время, за которое ток уменьшится до нуля от уровня 0,1 тока в момент выключения.

**Initial current Ic (A):**

[Начальное значение тока (А)]. При значении параметра, равном нулю, моделирование начинается при закрытом состоянии прибора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии прибора.

**Snubber resistance Rs (Ohm):**

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

**Snubber capacitance Cs (F):**

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

**Show measurement port:**

[Показать измерительный порт]. При установленном флажке на пиктограмме блока появляется выходной порт m, на котором формируется вектор-

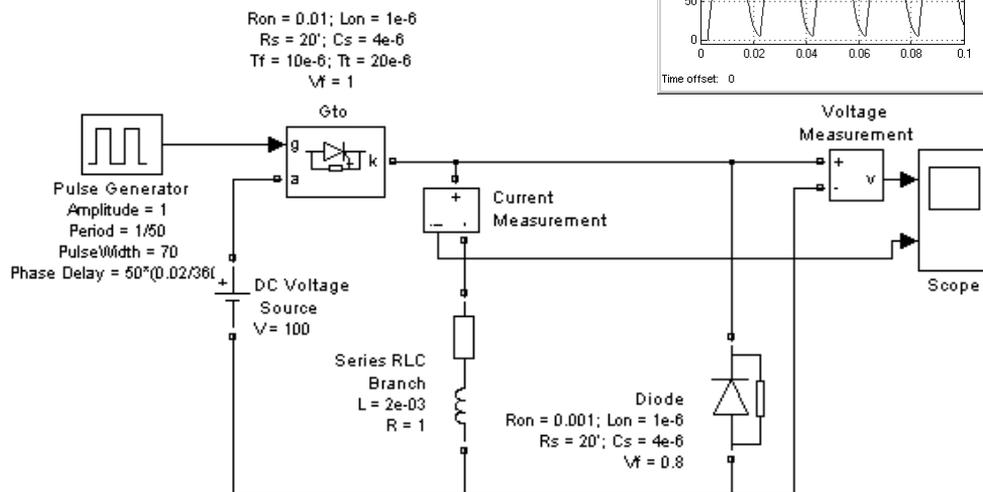
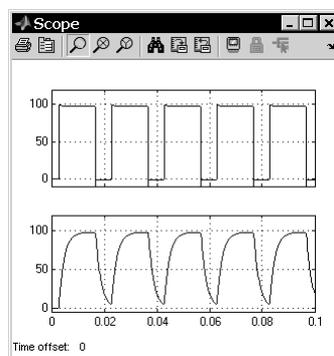


Рис. 3.58. Схема модели импульсного регулятора напряжения

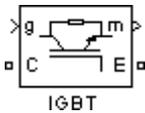
ный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент – анодный ток тиристора, второй – напряжение анод-катод тиристора.

*Пример:*

На рис. 3.58 показана схема модели импульсного регулятора напряжения. Величина среднего значения напряжения на нагрузке такого регулятора зависит от скважности управляющих импульсов. На рисунке представлены также графики напряжения и тока в нагрузке.

### 3.5.4. Биполярный транзистор IGBT

*Пиктограмма:*



*Назначение:*

Моделирует биполярный транзистор с изолированным затвором.

Модель IGBT транзистора состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$ , источника постоянного напряжения  $U_f$  и ключа SW (рис. 3.59). Блок логики управляет работой ключа. Включение прибора происходит в случае, если напряжение коллектор-эмиттер положительно и больше, чем  $U_f$ , и на затвор транзистора подан положительный сигнал ( $g > 0$ ). Выключение прибора происходит при уменьшении сигнала на затворе до нуля ( $g = 0$ ). При отрицательном напряжении коллектор-эмиттер транзистор находится в выключенном состоянии.

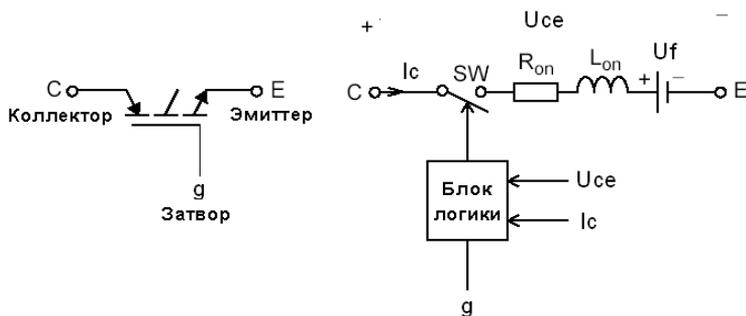


Рис. 3.59. Модель IGBT транзистора

Статические вольт-амперные характеристики модели IGBT транзистора для включенного и выключенного состояний показаны на рис. 3.60.

В модели параллельно самому прибору включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

В модели учитывается также конечное время выключения транзистора. Процесс выключения разбит на два участка (рис. 3.61) и характеризуется, соответ-

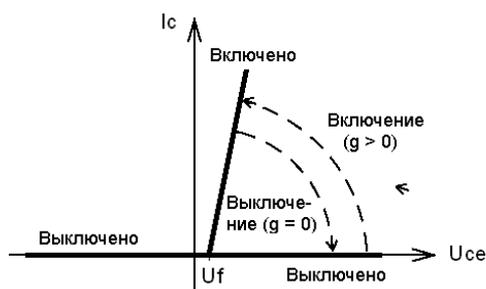


Рис. 3.60. Статические вольт-амперные характеристики модели IGBT транзистора

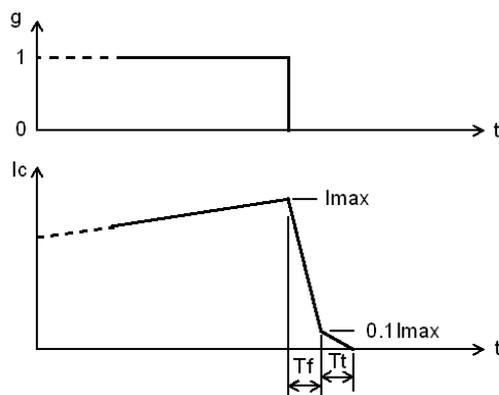
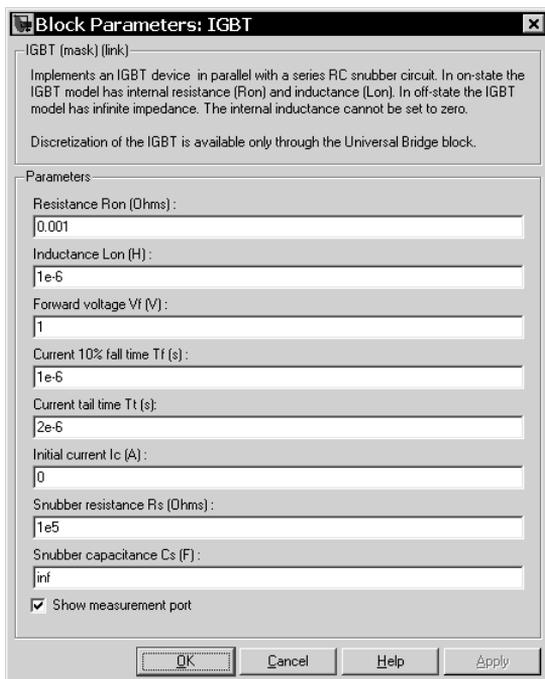


Рис. 3.61. Процесс выключения IGBT транзистора

ственно, временем спада ( $T_f$ ), при котором ток коллектор-эмиттер уменьшается до 0,1 от тока в момент выключения ( $I_{max}$ ), и временем затягивания ( $T_t$ ), при котором ток уменьшается до нуля.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:****Resistance Ron (Ohm):**

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)].

**Inductance Lon (H):**

[Индуктивность во включенном состоянии (Гн)].

**Forward voltage Vf (V):**

[Падение напряжения в прямом направлении (В)].

**Current 10% fall time Tf (s):**

[Время спада тока до уровня 0,1 от тока в момент выключения (с)].

**Current tail time Tt (s):**

[Время затягивания (с)]. Время, за которое ток уменьшится до нуля от уровня 0,1 тока в момент выключения.

**Initial current Ic (A):**

[Начальное значение тока (А)]. При значении параметра, равном нулю, моделирование начинается при закрытом состоянии прибора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии прибора.

**Snubber resistance Rs (Ohm):**

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

**Snubber capacitance Cs (F):**

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

**Show measurement port:**

[Показать измерительный порт]. При установленном флажке на пиктограмме блока появляется выходной порт m, на котором формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент – ток коллектор-эмиттер транзистора, второй – напряжение коллектор-эмиттер транзистора.

**Пример:**

На рис. 3.62 показана схема модели неперверсивного широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения

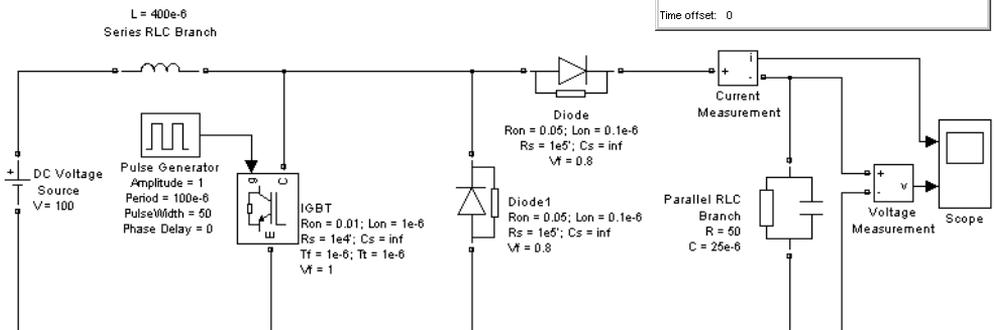
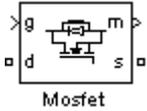


Рис. 3.62. Модель неперверсивного широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения

стоянного напряжения с параллельным включением транзистора по отношению к нагрузке. На рисунке представлены также графики напряжения и тока в активно-емкостной нагрузке.

### 3.5.5. Транзистор Mosfet

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Моделирует силовой полевой транзистор с параллельно включенным обратным диодом.

Модель Mosfet транзистора состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$  и ключа SW (рис. 3.63). Блок логики управляет работой ключа. Включение прибора происходит в случае, если напряжение сток-исток положительно и на затвор транзистора подан положительный сигнал ( $g > 0$ ). Выключение прибора происходит при уменьшении сигнала на затворе до нуля ( $g = 0$ ). При отрицательном напряжении сток-исток транзистор находится в выключенном состоянии и ток проводит обратный диод.

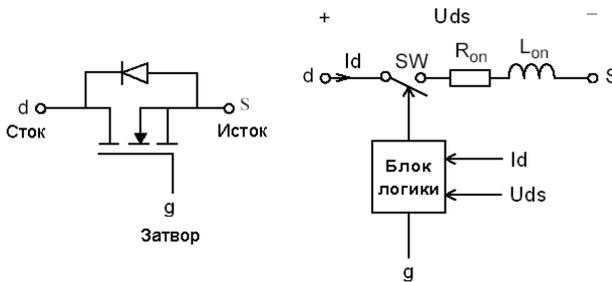


Рис. 3.63. Модель Mosfet транзистора

Статические вольт-амперные характеристики модели Mosfet транзистора для включенного и выключенного состояний показаны на рис. 3.64.

В модели параллельно самому прибору включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

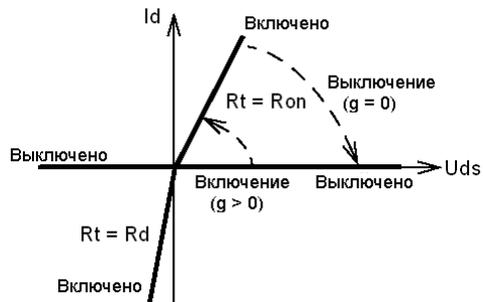
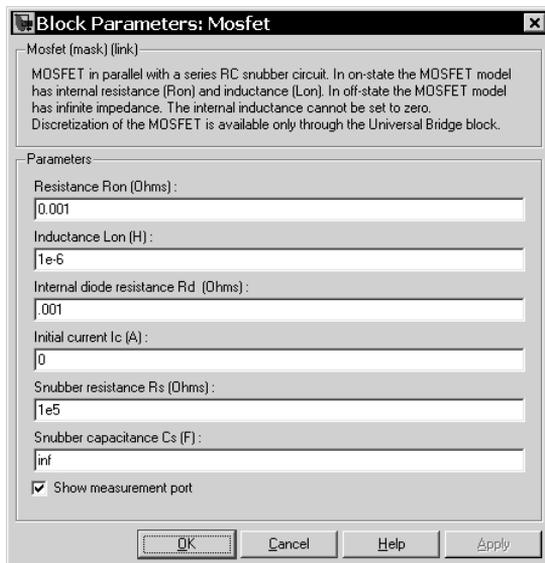


Рис. 3.64. Статические вольт-амперные характеристики модели Mosfet транзистора

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Resistance Ron (Ohm):**

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)].

**Inductance Lon (H):**

[Индуктивность во включенном состоянии (Гн)].

**Initial current Ic (A):**

[Начальное значение тока (А)]. При значении параметра, равном нулю, моделирование начинается при закрытом состоянии прибора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии прибора.

**Internal diode resistance Rd (Ohms):**

[Внутреннее сопротивление диода во включенном состоянии (Ом)].

**Snubber resistance Rs (Ohm):**

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

**Snubber capacitance Cs (F):**

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

**Show measurement port:**

[Показать измерительный порт]. При установленном флажке на пиктограмме блока появляется выходной порт  $m$ , на котором формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент – ток сток-исток транзистора, второй – напряжение сток-исток транзистора.

**Пример:**

На рис. 3.65 показана схема модели полумостового однофазного инвертора, работающего на RLC-нагрузку. На рисунке представлены также графики напряжения и тока в нагрузке.

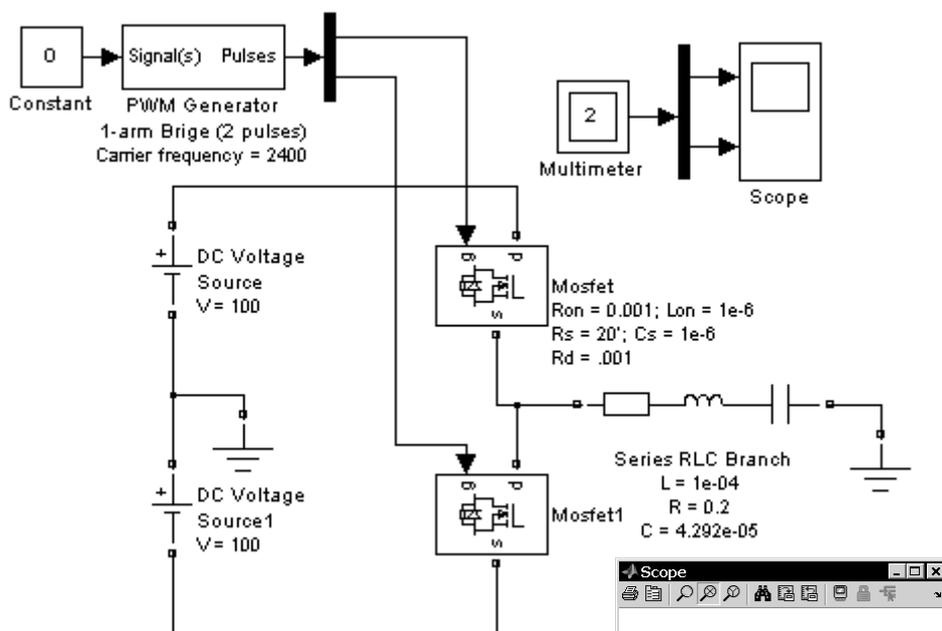
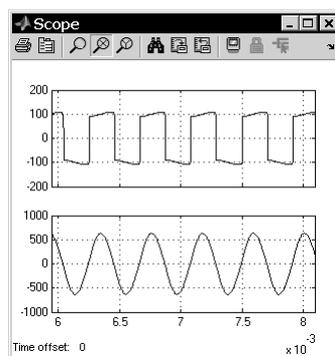
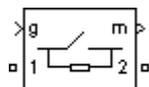


Рис. 3.65. Модель полумостового однофазного инвертора



### 3.5.6. Идеальный ключ Ideal Switch

**Пиктограмма:**



Ideal Switch

**Назначение:**

Моделирует идеальный ключ.

Модель ключа Ideal Switch состоит из последовательно соединенных резистора  $R_{on}$  и ключа SW (рис. 3.66). Блок логики управляет работой ключа. Включение прибора происходит в случае, если на управляющий вход подан единичный положительный сигнал ( $g \geq 1$ ). Выключение прибора происходит при уменьшении управляющего сигнала до нуля ( $g = 0$ ).

Статические вольт-амперные характеристики модели ключа для включенного и выключенного состояний показаны на рис. 3.67.

В модели параллельно контактам ключа подсоединена последовательная RC-цепь, выполняющая демфирующие функции.

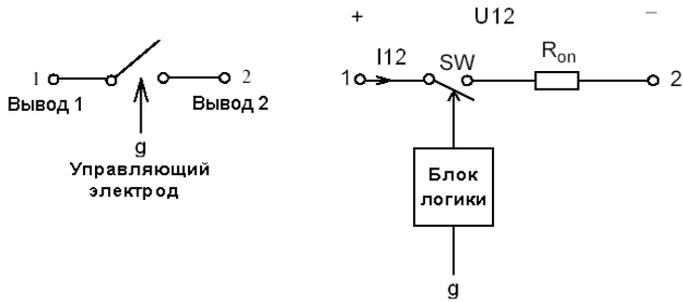
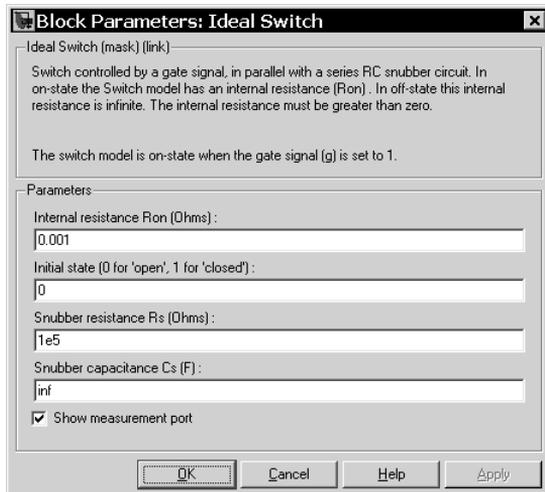


Рис. 3.66. Модель идеального ключа



Рис. 3.67. Статические вольт-амперные характеристики модели ключа

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Internal Resistance Ron (Ohms):**

[Сопrotивление во включенном состоянии (Ом)].

**Initial state (0 for 'open', 1 for 'closed):**

[Начальное состояние]. Параметр задается равным 0 для открытого состояния ключа и 1 для закрытого состояния.

**Snubber resistance Rs (Ohm):**

[Сопrotивление демпфирующей цепи (Ом)].

**Snubber capacitance Cs (F):**

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

**Show measurement port:**

[Показать измерительный порт]. При установленном флажке на пиктограмме блока появляется выходной порт m, на котором формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент – ток ключа, второй – напряжение ключа.

*Пример:*

На рис. 3.68 показана схема модели, в которой подключение питания асинхронного электродвигателя производится при замыкании трех ключей Ideal Switch. Управляющий сигнал для каждого ключа формируется блоком Step. На рисунке приведены также графики частоты вращения вала двигателя и электромагнитного момента.

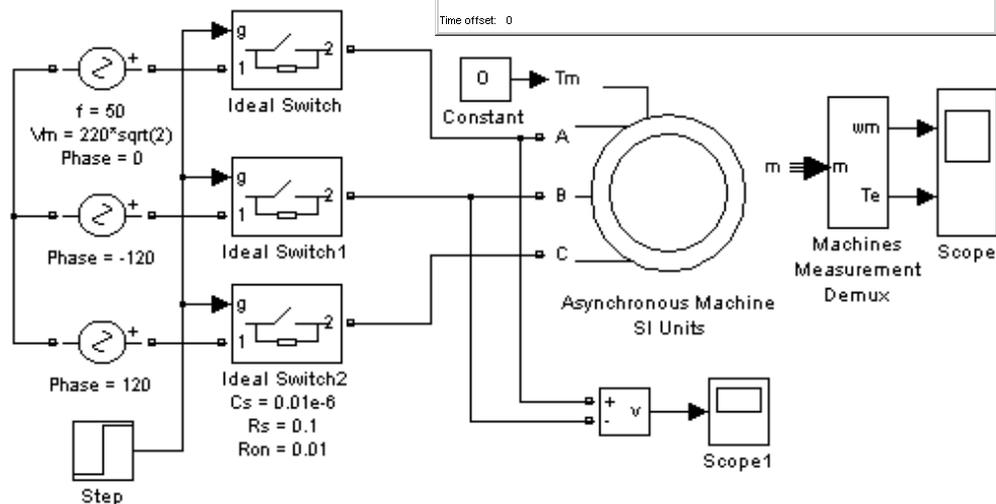
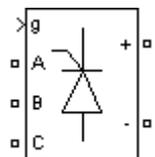


Рис. 3.68. Пуск асинхронного электродвигателя

### 3.5.7. Универсальный мост *Universal Bridge*

**Пиктограмма:**



Universal Bridge

**Назначение:**

Моделирует универсальный мост.

Модель *Universal Bridge* 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). На рис. 3.69, в качестве примера, представлена схема тиристорного трехфазного моста.

**Окно задания параметров:**

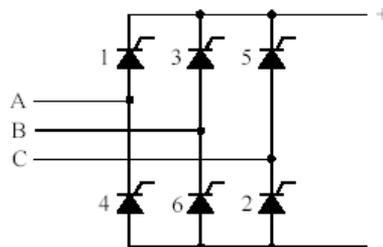
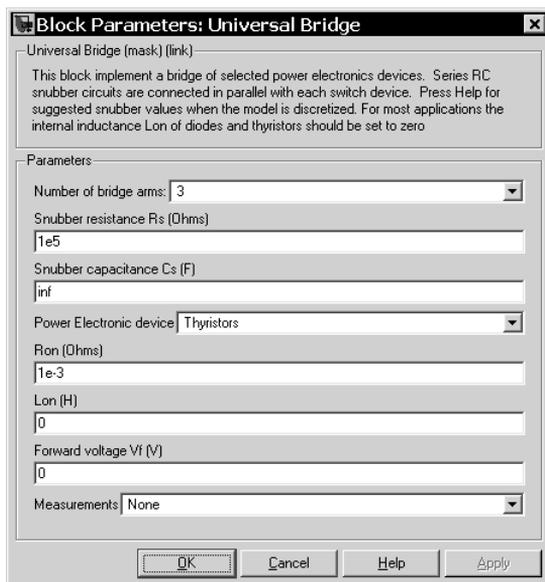


Рис. 3.69. Схема силовой части блока *Universal Bridge*



**Параметры блока:**

**Number of bridge arms:**

[Число плеч моста]. Выбирается из списка: 1, 2 или 3.

**Snubber resistance Rs (Ohm):**

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

**Snubber capacitance Cs (F):**

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

**Power Electronic device:**

[Вид полупроводниковых приборов 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 позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть 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 ключей;
- Isw1, Isw2, Isw3, Isw4, Isw5, Isw6 – токи ключей;
- Uab, Ubc, Uca, Udc – напряжения на зажимах моста.

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

*Пример 1:*

На рис. 3.70 показана схема трехфазного тиристорного выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку. В момент времени, равный 0,06 с, выполняется перевод выпрямителя в инверторный режим. На графиках хорошо видно, что выходное напряжение выпрямителя при этом меняет знак. После того как вся энергия, запасенная в индуктивности, отдана, происходит выключение выпрямителя.

*Пример 2:*

На рис. 3.71 показана схема однофазного инвертора на IGBT-транзисторах, шунтированных обратными диодами. Нагрузка инвертора носит резонансный характер, что объясняет синусоидальный характер выходного напряжения инвертора. На рисунке показаны дополнительно графики тока в нагрузке и напряжения на нагрузке.

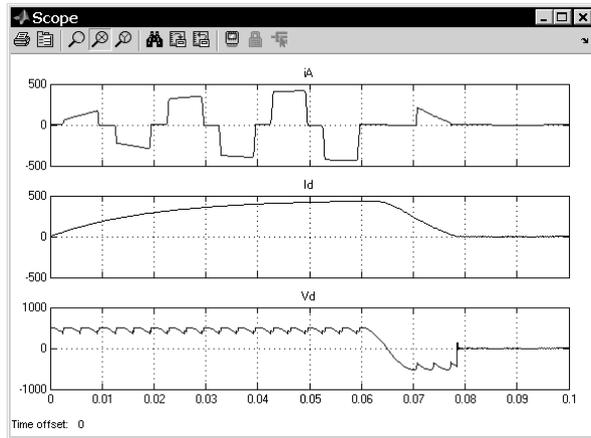
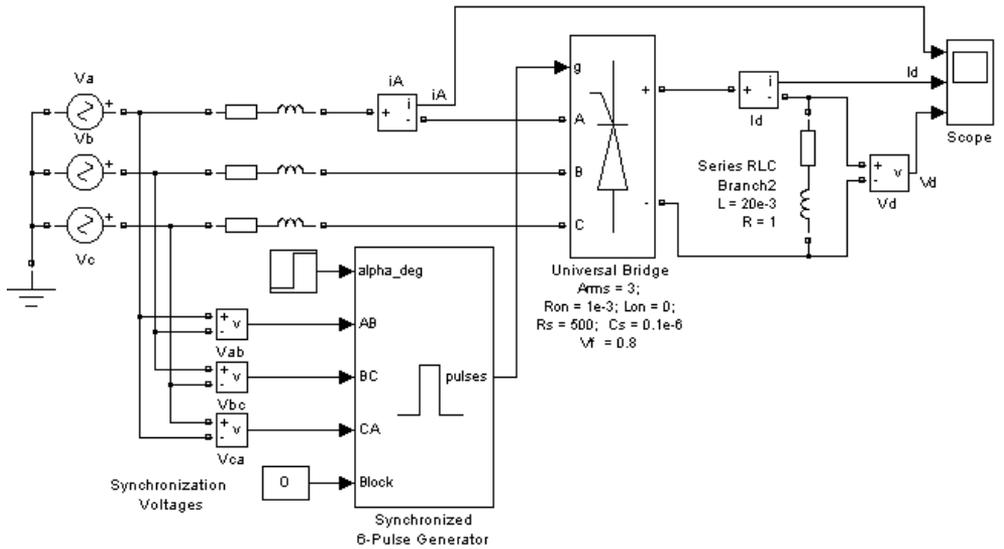
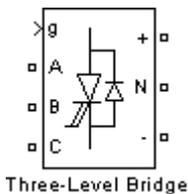


Рис. 3.70. Трехфазный тиристорный выпрямитель

### 3.5.8. Трехуровневый мост Three-Level Bridge

Пиктограмма:



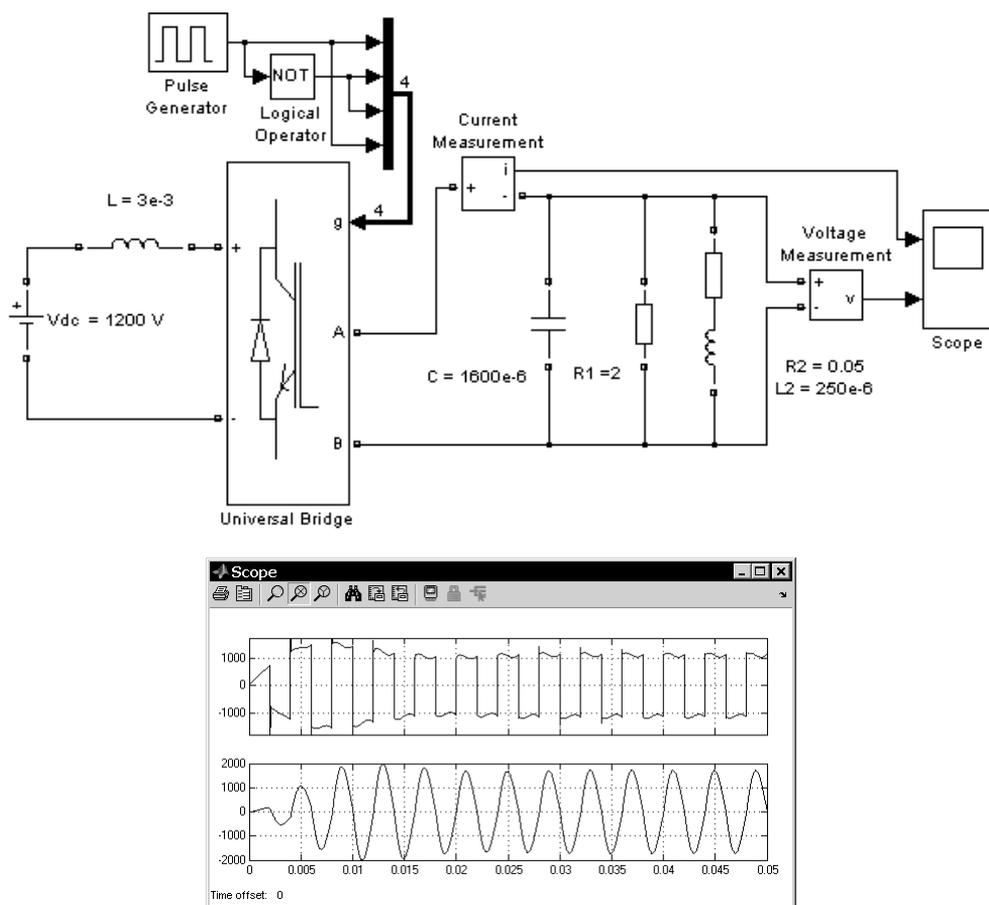


Рис. 3.71. Однофазный инвертор

### Назначение:

Моделирует трехуровневый мост.

Модель Three-Level Bridge позволяет выбирать количество плеч моста (от 1 до 3) и вид полупроводниковых приборов (полностью управляемые тиристоры, IGBT и MOSFET транзисторы, шунтированные обратными диодами, а также идеальные ключи). На рис. 3.72 представлена схема устройства для случая, когда каждое из коммутирующих устройств состоит из полупроводникового прибора и обратного диода.

На рис. 3.73 показана схема трехуровневого моста, когда в качестве коммутирующих устройств выбраны идеальные ключи.

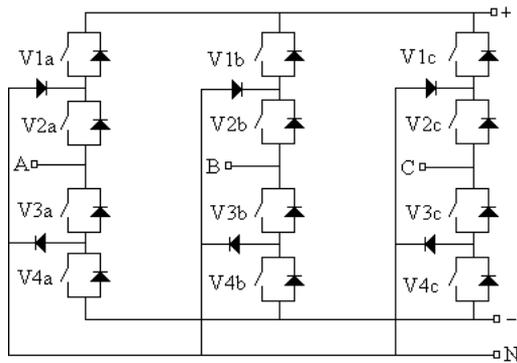


Рис. 3.72. Схема трехуровневого моста с полупроводниковыми приборами

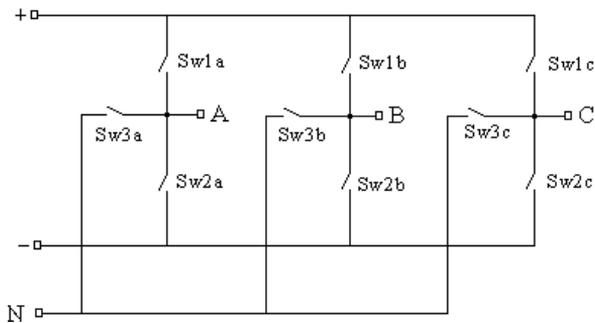
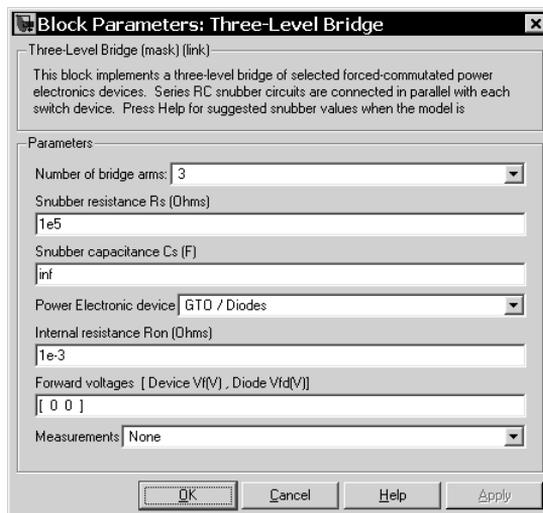


Рис. 3.73. Схема трехуровневого моста с идеальными ключами

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Number of bridge arms:**

[Число плеч моста]. Выбирается из списка: 1, 2 или 3.

**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:

- 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 позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

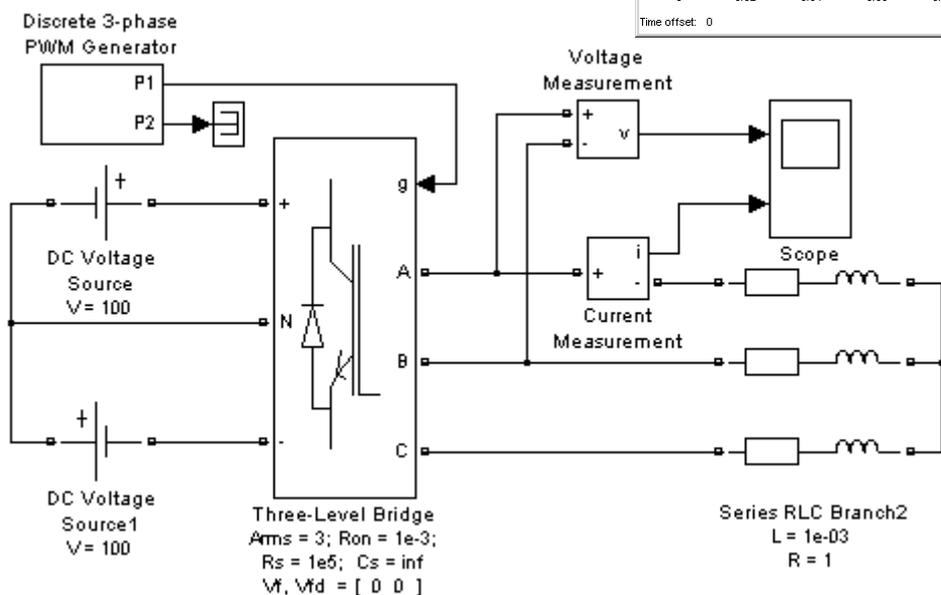
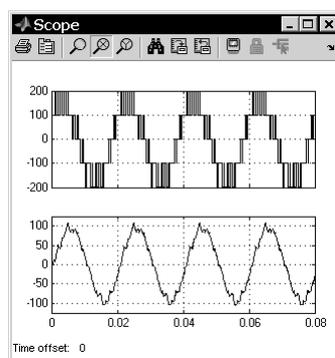


Рис. 3.74. Трехуровневый инвертор

- None – нет переменных для отображения;
- All device currents – токи полупроводниковых устройств;
- Phase-to-neutral and DC voltages – фазные напряжения и напряжение между клеммами «+» и «-» моста;
- All voltages and currents – все напряжения и токи моста.

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

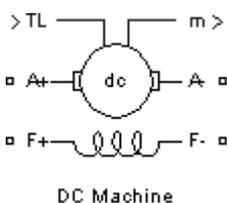
*Пример:*

На рис. 3.74 показана схема трехуровневого инвертора, работающего на активно-индуктивную нагрузку. На графиках показаны напряжение и ток одной фазы нагрузки.

## 3.6. Электрические машины Machines

### 3.6.1. Машина постоянного тока DC Machine

*Пиктограмма:*



*Назначение:*

Моделирует электрическую машину постоянного тока.

Порты модели A+ и A- являются выводами обмотки якоря машины, а порты F+ и F- представляют собой выводы обмотки возбуждения. Порт TL предназначен для подачи момента сопротивления движению. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из четырех элементов: частота вращения, ток якоря, ток возбуждения и электромагнитный момент машины.

Схема блока DC Machine представлена на рис. 3.75.

Цепь якоря машины представлена последовательно включенными элементами:  $R_a$  – активное сопротивление якорной цепи,  $L_a$  – индуктивность якорной цепи и  $E_{FCEM}$  – ЭДС обмотки якоря (управляемый источник напряжения). Величина ЭДС обмотки якоря вычисляется по выражению:

$$E = K_E \times \omega,$$

где  $E$  – ЭДС обмотки якоря;  $\omega$  – частота вращения вала электродвигателя;  $K_E$  – коэффициент пропорциональности между угловой частотой вращения и ЭДС.

Коэффициент пропорциональности между частотой вращения и ЭДС зависит от величины тока обмотки возбуждения машины:

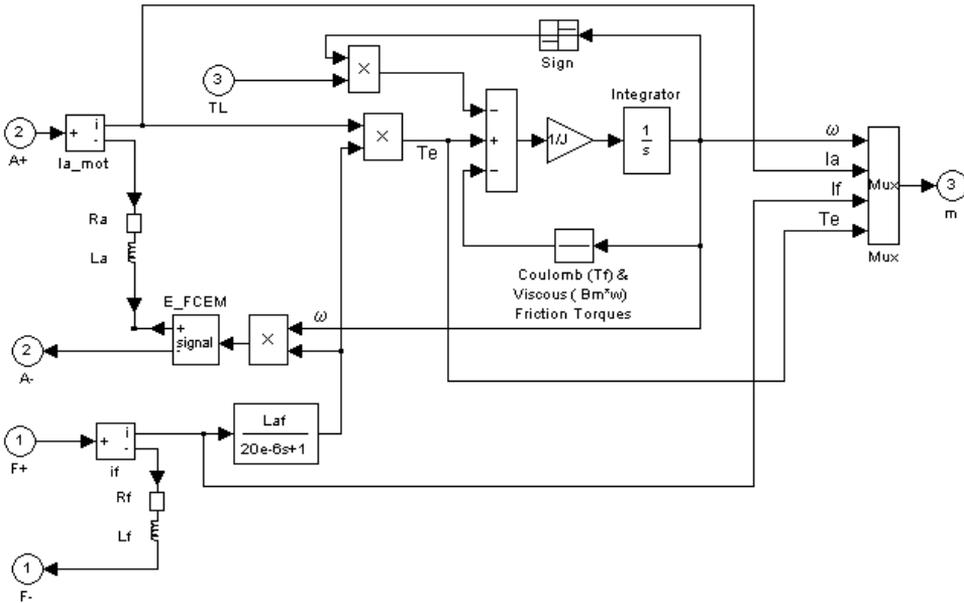


Рис. 3.75. Схема модели машины постоянного тока

$$K_E = L_{af} \times I_f,$$

где  $L_{af}$  – взаимоиנדуктивность между обмоткой якоря и обмоткой возбуждения;  $I_f$  – ток возбуждения машины.

Цепь возбуждения машины представлена на схеме элементами  $R_f$  и  $L_f$  – активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения.

Механическая часть модели вычисляет угловую частоту вращения вала машины в соответствии с уравнением

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L \text{sign}(\omega) - B_m \omega - T_f,$$

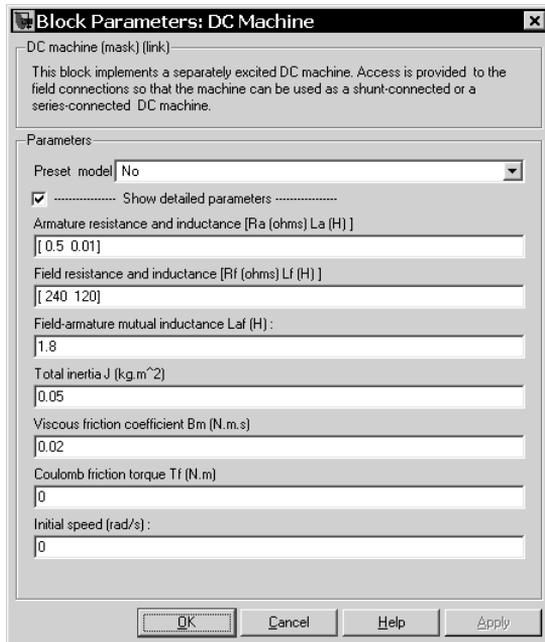
где  $T_e$  – электромагнитный момент машины;  $B_m$  – коэффициент вязкого трения;  $T_f$  – момент сухого трения;  $T_L$  – момент сопротивления.

Механическая часть модели представлена интегратором и усилителем с коэффициентом передачи  $1/J$ , а также соответствующими сумматорами и умножителем.

Величина электромагнитного момента машины вычисляется в соответствии с выражением

$$T_e = K_T \times I_a,$$

где  $I_a$  – ток якоря;  $K_T$  – коэффициент пропорциональности между электромагнитным моментом и током якоря. По величине коэффициент  $K_T$  равен  $K_E$ .

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Preset model:**

[Выбор модели]. Параметр позволяет выбрать модель машины из каталога.

**Show detailed parameters:**

[Показать параметры модели]. При установленном флажке параметры модели доступны для просмотра и изменения.

**Armature resistance and inductance [Ra (Ohms) La (H)]:**

[Активное сопротивление Ra (Ом) и индуктивность La (Гн) цепи якоря].

**Field resistance and inductance [Rf (Ohms) Lf (H)]:**

[Активное сопротивление Rf (Ом) и индуктивность Lf (Гн) цепи возбуждения].

**Field-armature mutual inductance Laf (H):**

[Взаимная индуктивность между цепью якоря и цепью возбуждения двигателя (Гн)].

**Total inertia J (kg.m^2):**

[Момент инерции двигателя J (кг\*м^2)].

**Viscous friction coefficient Bm (N.m.s):**

[Коэффициент вязкого трения Bm (Н\*м\*с)].

**Coulomb friction torque Tf (N.m):**

[Величина момента сухого трения Tf (Н\*м)].

**Initial speed (rad/s):**

[Начальная угловая частота вращения вала двигателя (рад/с)].

Параметры машины постоянного тока с независимым возбуждением можно определить на основе ее каталожных данных по следующим выражениям [2]:

$$I_f = \frac{U_f}{R_\sigma},$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{30P_n}{\pi n_n},$$

$$I_{an} = \frac{P_n}{U_{an}\eta_n} - I_f,$$

$$L_{af} = \frac{M_n}{I_{an}I_f},$$

$$L_f \geq (2-5) \frac{L_a R_f}{R_a},$$

$$J \geq \frac{(5-10) L_a P_n^2}{R_a^2 \cdot \omega_n^2 \cdot I_{an}^2},$$

$$P_{\text{мех}} = (0,005 - 0,02) P_n,$$

$$T_f \cong \frac{P_{\text{мех}}}{2\omega_n},$$

$$B_m \cong \frac{P_{\text{мех}}}{2\omega_n^2},$$

где  $I_f$  – ток обмотки возбуждения;  $U_f$  – напряжение обмотки возбуждения;  $R_f$  – активное сопротивление обмотки возбуждения;  $L_f$  – индуктивность обмотки возбуждения;  $I_{an}$  – номинальный ток обмотки якоря;  $U_{an}$  – номинальное напряжение обмотки якоря;  $R_a$  – активное сопротивление обмотки якоря;  $M_n$  – номинальный момент;  $P_n$  – номинальная мощность;  $n_n$  – номинальная частота вращения якоря (об/мин);  $\omega_n$  – номинальная угловая частота вращения якоря (рад/с);  $P_{\text{мех}}$  – общие механические потери машины.

Индуктивность якорной цепи может быть найдена по формуле:

$$L_a = C \frac{U_{an}}{I_{an} n_n p},$$

где  $C = (1-2,5)$  для машин с компенсационной обмоткой (большая величина относится к тихоходным двигателям);  $C = 6$  для машин без компенсационной обмотки;  $p$  – число пар полюсов.

*Пример:*

На рис. 3.76 показана схема, обеспечивающая пуск двигателя с помощью трехступенчатого пускового устройства (блок Motor Starter). На рисунке показаны также графики изменения угловой частоты вращения и электромагнитного момента двигателя в функции времени и динамическая механическая характеристика машины, построенная с помощью блока XY-Graph. В примере момент сопро-

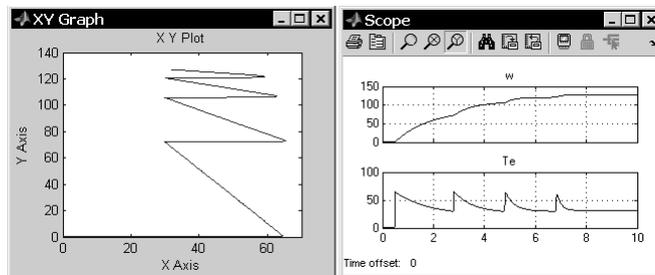
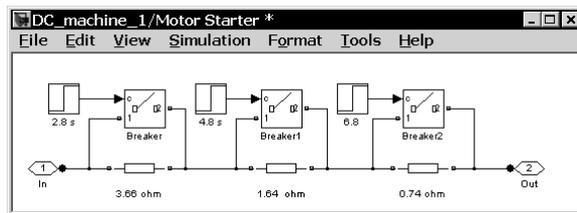
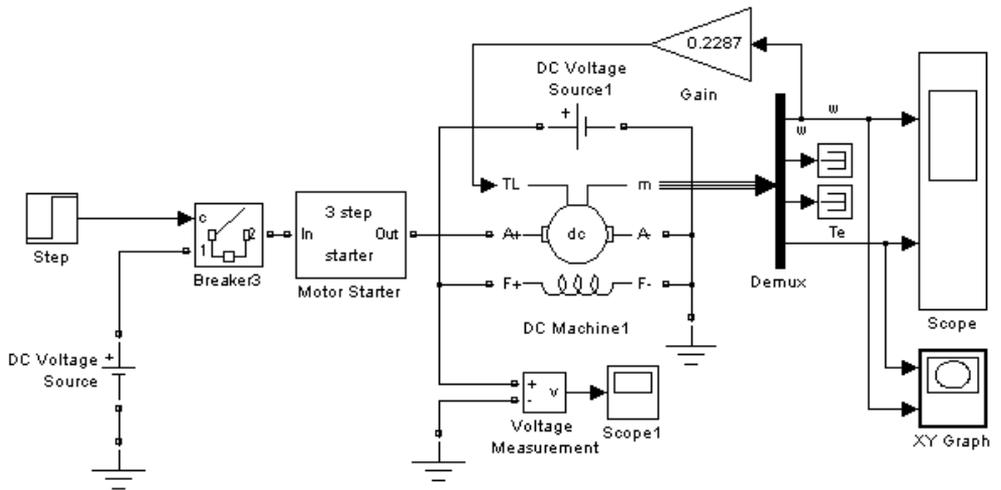


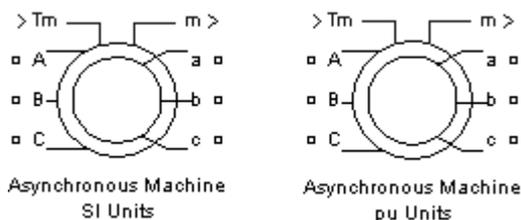
Рис. 3.76. Схема пуска двигателя постоянного тока

тивления движению, зависящий от угловой частоты вращения, задается с помощью усилителя Gain.

В библиотеке Machines представлена также дискретная модель машины постоянного тока – Discrete DC Machine. Модель отличается от рассмотренной выше использованием блоков дискретных передаточных функций. В окне диалога блока также присутствует параметр **Sample time** (s) – шаг дискретизации.

## 3.6.2. Асинхронная машина *Asynchronous Machine*

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок *Asynchronous Machine* моделирует асинхронную электрическую машину в двигательном или генераторном режимах. Режим работы определяется знаком электромагнитного момента машины.

Порты модели A, B и C являются выводами статорной обмотки машины, а порты a, b и c – обмотки ротора машины. Порт Tm предназначен для подачи момента сопротивления движению. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из 21 элемента: токов, потоков и напряжений ротора и статора в неподвижной и вращающейся системах координат, электромагнитного момента, угловой частоты вращения вала, а также его углового положения. Для удобства извлечения переменных машины из вектора в библиотеке *SimPowerSystems* предусмотрен блок *Machines Measurement Demux*. Модель асинхронной машины включает в себя модель электрической части, представленной моделью пространства состояний четвертого порядка, и модель механической части в виде системы второго порядка. Все электрические переменные и параметры машины приведены к статору. Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной (*dq*-оси) системы координат. На рис. 3.77 приведена схема замещения машины и ее уравнения.

Уравнения электрической части машины имеют вид:

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega \psi_{ds},$$

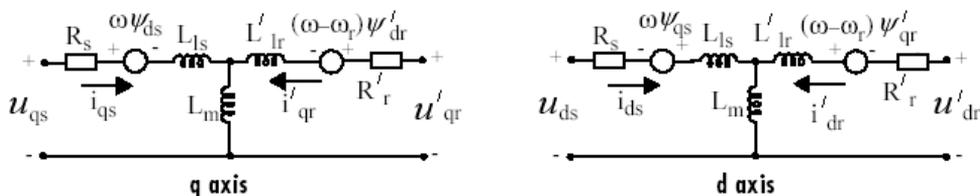


Рис. 3.77. Схема замещения асинхронной машины

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega \psi_{qs},$$

$$u'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \psi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \psi'_{dr},$$

$$u'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \psi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi'_{qr},$$

$$T_e = 1.5(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}),$$

где  $\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$ ,  $\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$ ,  $\psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$ ,  $\psi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$ ,  $L_s = L_{ls} + L_m$ ,  $L'_r = L'_{lr} + L_m$ .

Индексы в системе уравнений машины имеют следующие значения:

$d$  – проекция переменной на ось  $d$ ;

$q$  – проекция переменной на ось  $q$ ;

$r$  – индекс, обозначающий параметр или переменную ротора;

$s$  – индекс, обозначающий параметр или переменную статора;

$l$  – индуктивность рассеяния;

$m$  – индуктивность цепи намагничивания.

Механическая часть машины описывается двумя уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m),$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m.$$

Переменные в уравнениях машины имеют следующие значения:

$R_s, L_{ls}$  – активное сопротивление и индуктивность рассеяния статора;

$R'_r, L'_{lr}$  – активное сопротивление и индуктивность рассеяния ротора;

$L_m$  – индуктивность цепи намагничивания;

$L_s, L'_r$  – полные индуктивности статора и ротора;

$U_{qs}, i_{qs}$  – проекции напряжения и тока статора на ось  $q$ ;

$u'_{qr}, i'_{qr}$  – проекции напряжения и тока ротора на ось  $q$ ;

$u_{ds}, i_{ds}$  – проекции напряжения и тока статора на ось  $d$ ;

$u'_{dr}, i'_{dr}$  – проекции напряжения и тока ротора на ось  $d$ ;

$Y_{ds}, Y_{qs}$  – проекции потокосцепления статора на оси  $d$  и  $q$ ;

$\psi'_{dr}, \psi'_{qr}$  – проекции потокосцепления ротора на оси  $d$  и  $q$ ;

$\omega_m$  – угловая частота вращения ротора;

$\theta_m$  – угловое положение ротора;

$p$  – число пар полюсов;

$\omega_\gamma$  – электрическая угловая частота вращения ротора ( $\omega_m \times p$ );

$\theta_\gamma$  – электрическое угловое положение ротора ( $\theta_m \times p$ );

$T_e$  – электромагнитный момент;

$T_m$  – механический момент на валу;

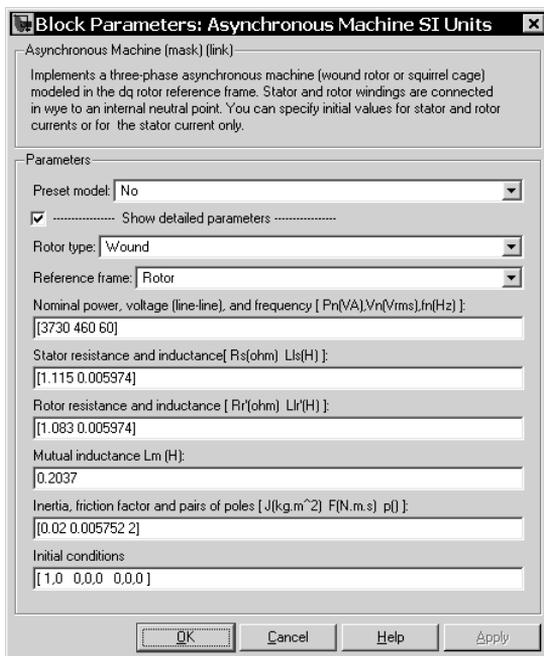
$J$  – суммарный момент инерции машины и нагрузки;

$H$  – суммарная инерционная постоянная машины и нагрузки;

$F$  – суммарный коэффициент вязкого трения (машины и нагрузки).

С Simulink-моделью асинхронной машины можно ознакомиться, открыв библиотеку powerlib\_models.mdl в папке ...toolbox\physmod\powersys\ powersys.

### **Окно задания параметров:**



### **Параметры блока:**

#### **Preset model:**

[Выбор модели]. Параметр позволяет выбрать модель машины из каталога.

#### **Show detailed parameters:**

[Показать параметры модели]. При установленном флажке параметры модели доступны для просмотра и изменения.

#### **Rotor type:**

[Тип ротора]. Значение параметра выбирается из списка:

- Squirrel-Cage – короткозамкнутый ротор, или «беличья клетка»;
- Wound – фазный ротор.

#### **Reference frame:**

[Система координат]. Значение параметра выбирается из списка:

- Rotor – неподвижная относительно ротора;
- Stationary – неподвижная относительно статора;
- Synchronous – вращающаяся вместе с полем.

**Nom. power, L-L volt. and frequency** [ $P_n$  (VA),  $V_n$  (V),  $f_n$  (Hz)]:

[Номинальная мощность  $P_n$  (ВА), действующее линейное напряжение  $U_n$  (В) и номинальная частота  $f_n$  (Гц)].

**Stator** [ $R_s$  (Ohm)  $L_s$  (H)]:

[Активное сопротивление  $R_s$  (Ом) и индуктивность  $L_s$  (Гн) статора].

**Rotor** [ $R_r$  (Ohm)  $L_r$  (H)]:

[Активное сопротивление  $R_r$  (Ом) и индуктивность  $L_r$  (Гн) ротора].

**Mutual inductance  $L_m$**  (H):

[Взаимная индуктивность (Гн)].

**Inertia, friction factor and pairs of poles** [ $J$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )  $F$  ( $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ )  $p$ ]:

[Момент инерции  $J$  ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ), коэффициент трения  $F$  ( $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ ) и число пар полюсов  $p$ ].

**Initial conditions** [ $s$  th (deg)  $isa$ ,  $isb$ ,  $isc$  (A)  $phA$ ,  $phB$ ,  $phC$  (deg)]:

[Начальные условия]. Параметр задается в виде вектора, каждый элемент которого имеет следующие значения:

- $s$  – скольжение;
- th – фаза (град.);
- $isa$ ,  $isb$ ,  $isc$  – начальные значения токов статора (А);
- $phA$ ,  $phB$ ,  $phC$  – начальные фазы токов статора (град.).

Начальные условия машины могут быть вычислены с помощью блока Powergui.

Исходными данными для расчета параметров машины являются следующие:

$P_n$  – номинальная мощность [Вт];

$U_n$  – номинальное линейное напряжение [В];

$f_1$  – частота сети [Гц];

$n_n$  – номинальная угловая частота вращения вала [об/мин];

$p$  – число пар полюсов;

$\eta$  – коэффициент полезного действия [о.е.];

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности [о.е.];

$I_n$  – номинальный ток статора [А];

$k_1$  – кратность пускового тока [о.е.];

$m_{II}$  – кратность пускового момента [о.е.];

$m_{\max}$  – кратность максимального момента [о.е.];

$J$  – момент инерции [ $\text{кг} \times \text{м}^2$ ].

Параметры асинхронной машины рассчитываются по следующим выражениям [2]:

$U = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$  – номинальное фазное напряжение [В] при схеме соединения обмотки – звезда;

ки – звезда;

$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$  – частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения) [об/мин];

$$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} - \text{номинальное скольжение [о.е.]};$$

$$s_{кр} = s_n (m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1}) - \text{критическое скольжение [о.е.]};$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} - \text{угловая частота вращения магнитного поля (синхронная частота)} \\ \text{[рад/с];}$$

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} - \text{номинальная угловая частота вращения вала [рад/с];}$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} - \text{номинальный момент [Нм];}$$

$$M_{\max} = m_{\max} M_n - \text{максимальный момент [Нм];}$$

$$M_{\Pi} = m_{\Pi} M_n - \text{пусковой момент [Нм];}$$

$$P_{\text{мех}} = (0,01 \div 0,05) P_n - \text{механические потери [Вт];}$$

$C = (1,01 \div 1,05)$  – расчетный коэффициент (меньшее значение для машин большей мощности);

$$R_r = \frac{1}{3} \frac{P_n + P_{\text{мех}}}{I_n^2 \frac{1-s_n}{s_n}} - \text{приведенное активное сопротивление ротора [Ом];}$$

$$R_s = \frac{U \cos \varphi (1-\eta)}{I_n} - C^2 R_r - \frac{P_{\text{мех}}}{3I_n^2} - \text{активное сопротивление статора [Ом];}$$

$$L_{sp} = L_{rp} = \frac{U}{4\pi f_1 (1+C^2) k_l I_n} - \text{приведенная индуктивность рассеяния статора} \\ \text{и ротора [Гн];}$$

$$L_s = \frac{U}{2\pi f_1 I_n \sqrt{1 - \cos^2(\varphi)} - \frac{2}{3} \frac{2\pi f_1 M_{\max} s_n}{pU s_{кр}}} - \text{индуктивность статора [Гн];}$$

$$L_m = L - L_{sp} - \text{индуктивность цепи намагничивания [Гн].}$$

По окончании расчета необходимо определить расчетный коэффициент

$$C1 = 1 + \frac{L_{sp}}{L_m}$$

и сравнить его с ранее принятым коэффициентом  $C$ . При необходимости расчет следует повторить, добываясь минимальной разницы между  $C$  и  $C1$ .

*Пример:*

На рис. 3.78 показана схема, обеспечивающая прямой пуск двигателя и последующий наброс нагрузки. На рисунке приведена динамическая механическая характеристика двигателя, а также графики угловой частоты вращения вала и электромагнитного момента.

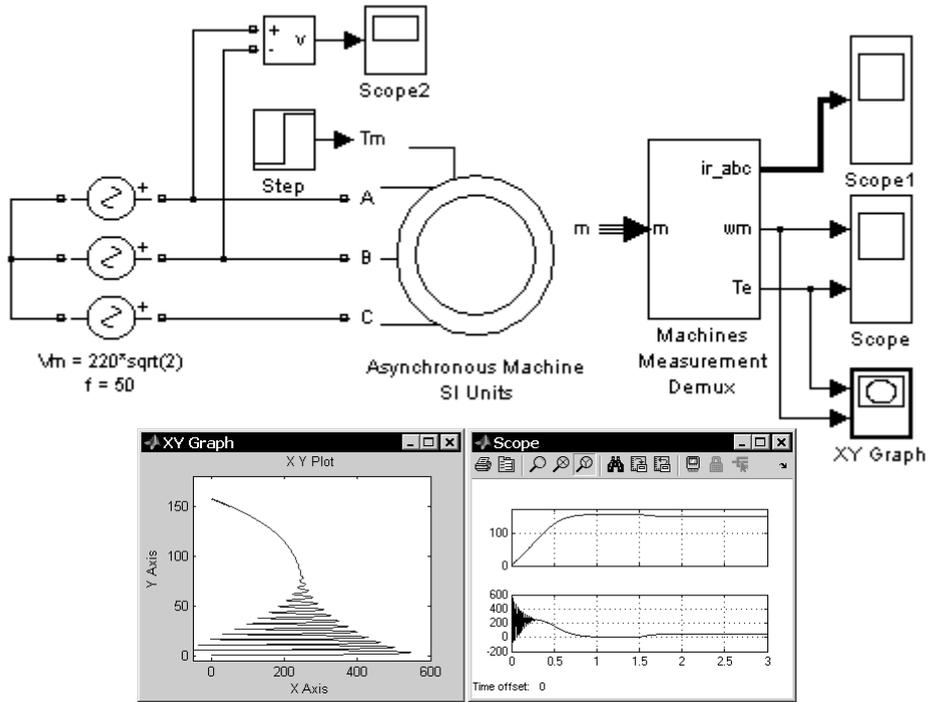
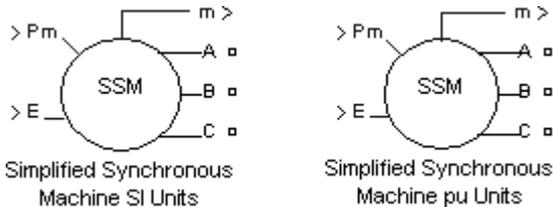


Рис. 3.78. Прямой пуск асинхронного двигателя

### 3.6.3. Упрощенная модель синхронной машины **Simplified Synchronous Machine**

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Является упрощенной моделью синхронной машины с неявнополюсным ротором. Модель выполнена в двух вариантах: Simplified Synchronous SI Units (пара-

метры машины задаются в системе единиц СИ) и Simplified Synchronous Machine pu Units (параметры машины задаются в системе относительных единиц). В зависимости от варианта входные и выходные переменные машины также измеряются в системе единиц СИ или в относительных единицах.

Порты модели А, В и С являются выводами статорной обмотки машины. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из 12 элементов: токов (isa, isb, isc), напряжений (va, vb, vc) и ЭДС (ea, eb, ec) обмотки статора, углового положения (thetam) и угловой частоты вращения ротора (vm), а также электромагнитной мощности (Pe). Для удобства извлечения переменных машины из выходного вектора измеряемых переменных в библиотеке SimPowerSystems предусмотрен блок Machines Measurement Demux.

Сигнал, равный механической мощности на валу машины, подается на входной порт Pm, а на входной порт E подается сигнал, задающий действующее значение линейных ЭДС обмотки статора.

Модель каждой фазы машины состоит из источника напряжения и последовательно с ним включенных активного сопротивления и индуктивности фазной обмотки. При этом активное сопротивление фазы может быть задано равным нулю, а индуктивность должна всегда быть больше нуля. Механическая часть модели описывается уравнениями:

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2H} \int_0^t (Tm - Te) dt - Kd \Delta\omega(t),$$

$$\omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0,$$

где  $\Delta\omega(t)$  – отклонение угловой частоты вращения ротора от синхронной;  $H$  – момент инерции ротора;  $Tm$  – механический момент;  $Te$  – электромагнитный момент;  $Kd$  – коэффициент демпфирования;  $\omega(t)$  – угловая частота вращения ротора;  $\omega_0$  – синхронная угловая частота вращения (1 о.е.).

На рис. 3.79 представлена структурная схема механической части модели.

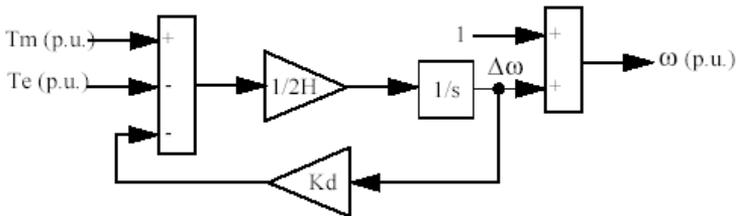
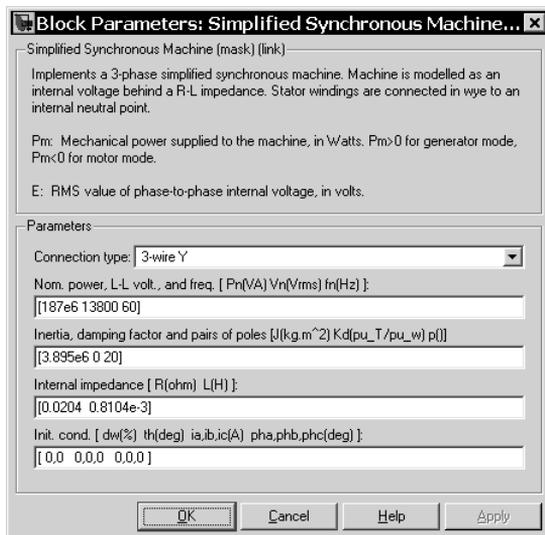


Рис. 3.79. Структурная схема механической части модели

На структурной схеме хорошо видно, что в модели вычисляется отклонение угловой частоты вращения ротора от синхронной, а не само значение частоты.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Connection type:**

[Тип соединения обмотки статора]. Значение параметра выбирается из списка:

- 3-wire Y – звезда без нулевого провода;
- 4-wire Y – звезда с нулевым проводом.

**Nom. power, L-L volt. and freq.** [Pn (VA) Vn (Vrms) fn (Hz)]:

[Номинальная мощность Pn (ВА), действующее линейное напряжение Un (В) и номинальная частота fn (Гц)].

**Inertia, damping friction factor and pairs of poles** [J (kg\*m<sup>2</sup>) Kd (pu\_T/pu\_w) p]:

[Момент инерции J (кг\*м<sup>2</sup>), коэффициент демпфирования Kd (о.е.\_T/о.е.\_w) и число пар полюсов p].

**Internal impedance** [R (Ohm) L (H)]:

[Активное сопротивление и индуктивность обмотки статора R (Ом) L (Гн)].

**Init. cond.** [dw (%) th (deg) ia, ib, ic (A) pha, phb, phc (deg)]:

[Начальные условия]. Параметр задается в виде вектора, каждый элемент которого имеет следующие значения:

- dw (%) – отклонение угловой частоты вращения (в %);
- th (deg) – угловое положение ротора (град.);
- ia, ib, ic – начальные значения токов статора (А);
- pha, phB, phC – начальные фазы токов статора (град.).

**Пример:**

На рис. 3.80 показана схема, в которой синхронный генератор включается на трехфазную сеть. На рисунке приведены угловая частота вращения ротора (n, об/мин) и электромагнитной мощности (Pe, МВт), а также график изменения угла между ЭДС и напряжением одной из фаз обмотки статора.

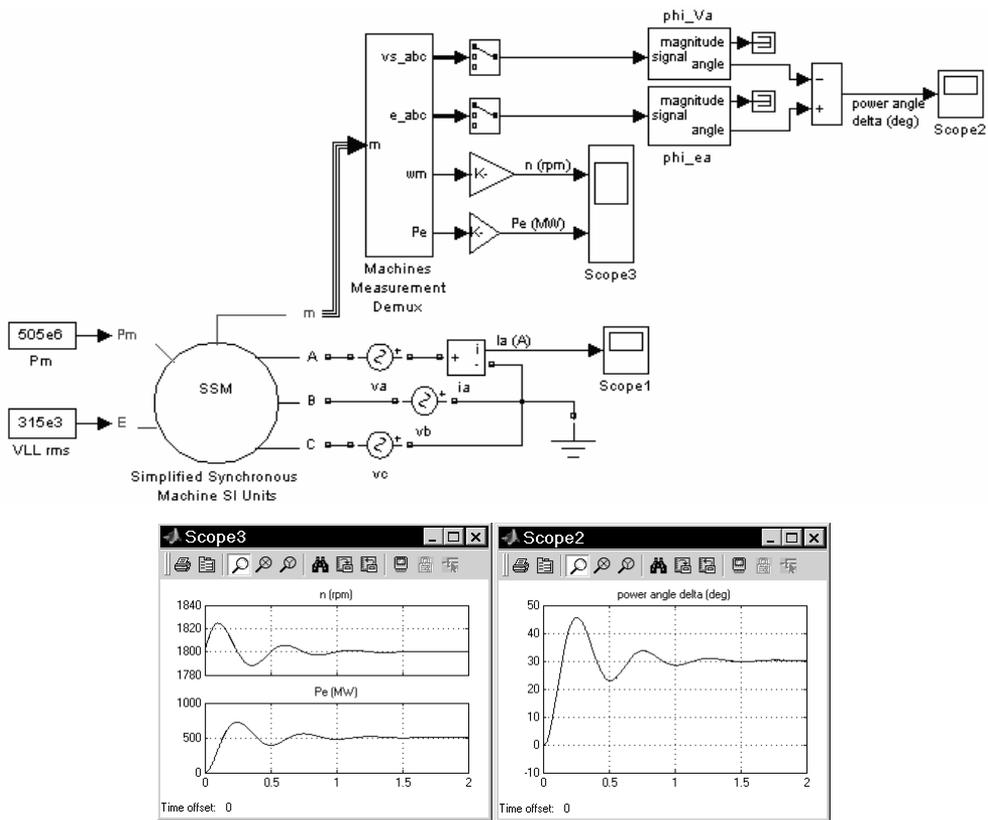
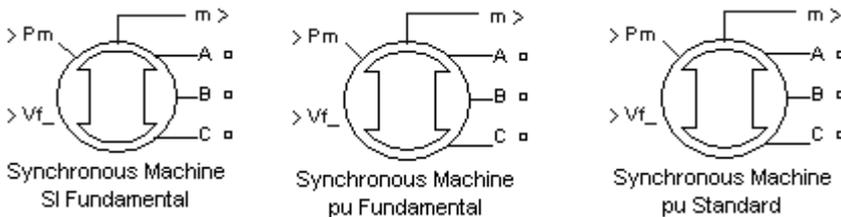


Рис. 3.80. Подключение синхронного генератора к сети

### 3.6.4. Синхронная машина Synchronous Machine

Пиктограмма:



Назначение:

Является моделью классической синхронной машины с демферной обмоткой. Модель выполнена в трех вариантах: Synchronous Machine SI Fundamental

(параметры машины задаются в системе единиц СИ), Synchronous Machine pu Fundamental (параметры машины задаются в системе относительных единиц) и Synchronous Machine pu Standard (используются параметры схемы замещения машины в относительных единицах). В зависимости от варианта входные и выходные переменные машины также измеряются в системе единиц СИ или в относительных единицах.

Порты модели А, В и С являются выводами статорной обмотки машины. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из 16 элементов:

- 1–3: токи обмотки статора –  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ;
- 4–5: проекции токов статора на оси  $d$  и  $q$  –  $i_d$  и  $i_q$ ;
- 6–8: ток возбуждения  $i_{fd}$  и проекции токов демпферной обмотки  $i_{kd}$  и  $i_{kq}$ ;
- 9–10: проекции намагничивающего потока на оси  $q$  и  $d$  –  $\Phi_{md}$  и  $\Phi_{mq}$ ;
- 11–12: проекции напряжений статора на оси  $d$  и  $q$  –  $u_d$  и  $u_q$ ;
- 13: отклонение угла ротора  $\Delta\theta$  (угол нагрузки  $\delta$ );
- 14: угловая частота вращения ротора  $\omega_r$ ;
- 15: электромагнитная мощность  $P_e$ ;
- 16: отклонение угловой частоты вращения ротора  $d\omega$ .

Для удобства извлечения переменных машины из выходного вектора измеряемых переменных в библиотеке SimPowerSystems предусмотрен блок Machines Measurement Demux.

Сигнал, равный механической мощности на валу машины, подается на входной порт Pm, а на входной порт Vf – сигнал, задающий напряжение обмотки возбуждения.

Схема замещения синхронной машины в системе координат, связанной с ротором ( $d$ - $q$  оси), использованная при создании модели, показана на рис. 3.81.

Все параметры ротора и его переменные приведены к статору. Индексы переменных и параметров обозначают следующее:

- $d, q$  – проекции переменных на оси  $d$  и  $q$ ;
- $R, s$  – параметры ротора и статора;

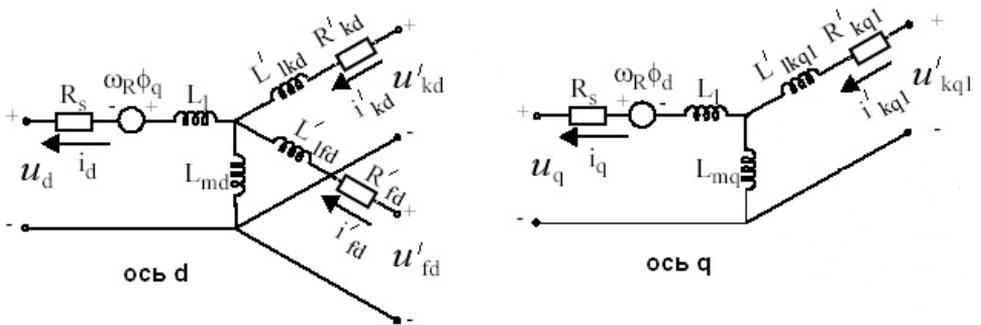


Рис. 3.81. Схема замещения синхронной машины в системе координат, связанной с ротором

$l, m$  – индуктивности рассеяния и цепи намагничивания;  
 $f, k$  – переменные цепи возбуждения и демпферной обмотки.

Приведенная на рис. 3.77 схема замещения описывается системой дифференциальных уравнений 5-го порядка:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \Phi_d - \omega_R \Phi_q,$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \Phi_q + \omega_R \Phi_d,$$

$$u'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt} \Phi'_{fd},$$

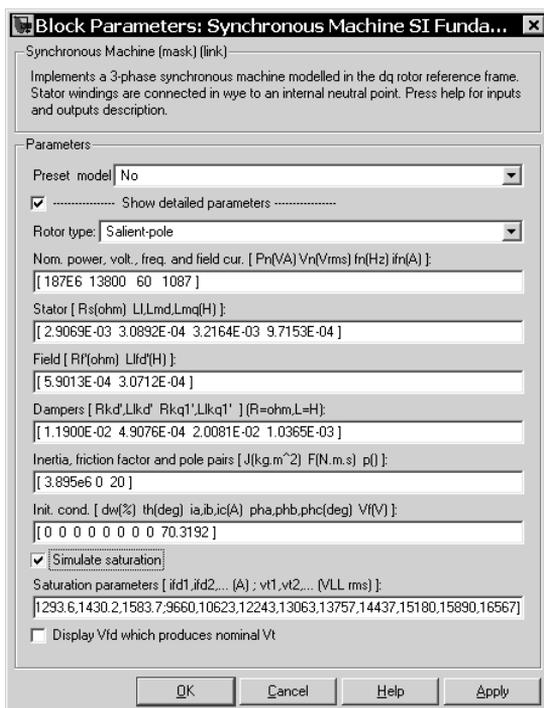
$$u'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kd},$$

$$u'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kq1},$$

где  $\Phi_d = L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd})$ ,  $\Phi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kq1}$ ,  $\Phi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd})$ ,  $\Phi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd})$ ,  $\Phi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q$ .

Модель механической части машины выполнена точно так же, как и в блоке Simplified Synchronous Machine.

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:****Preset model:**

[Выбор модели]. Параметр позволит выбрать модель машины из каталога.

**Show detailed parameters:**

[Показать параметры модели]. При установленном флажке параметры модели доступны для просмотра и изменения.

**Rotor type:**

[Тип ротора]. Выбирается из списка:

- Salient-pole – явнополюсный ротор;
- Round – неявнополюсный ротор.

**Nom. power, volt., freq. and field cur.** [Pn (VA) Vn (Vrms) fn (Hz) ifn (A)]:

[Номинальные полная мощность Pn (ВА), действующее линейное напряжение Vn (В), частота fn (Гц), ток возбуждения ifn (А)].

**Stator** [Rs (Ohm) Ll, Lmd, Lmq (H)]:

[Параметры статора: активное сопротивление Rs (Ом), индуктивность рассеяния Ll (Гн), индуктивность по продольной оси Lmd (Гн), индуктивность по поперечной оси Lmq (Гн)].

**Field** [Rf' (Ohm) Llf'd' (H)]:

[Приведенные параметры обмотки возбуждения ротора: сопротивление Rf' (Ом) и индуктивность Llf'd' (Гн)].

**Dampers** [Rkd', Llkd' Rkq1', Llqk1'] (R=Ohm,L=H):

[Приведенные параметры демферной обмотки: сопротивление (Ом) и индуктивность (Гн) по продольной и поперечной осям].

**Inertia, friction factor and pole pairs** [J (kg.m<sup>2</sup>) F (N.m.s) p ()]:

[Момент инерции J (кг\*м<sup>2</sup>), коэффициент трения F (Н\*м\*с) и число пар полюсов p].

**Init. cond.** [dw (%) th (deg) ia, ib, ic (A) pha, phb, phc (deg) Vf (V)]:

[Начальные условия]. Параметр задается в виде вектора, каждый элемент которого имеет следующие значения:

- dw (%) – отклонение угловой частоты вращения (%);
- th (deg) – угловое положение ротора (град.);
- ia, ib, ic – начальные значения токов статора (А);
- pha, phb, phc – начальные фазы токов статора (град.);
- Vf – напряжение обмотки возбуждения (В).

**Simulate saturation:**

[Моделировать насыщение]. При установленном флажке появляется дополнительное поле Saturation parameters.

**Saturation parameters** [ifd1, ifd2, ... (A); vt1, vt2, ... (VLL rms)]:

[Характеристика насыщения]. Параметр задается в виде матрицы, задающей характеристику холостого хода. Первая строка матрицы содержит значения тока возбуждения (А), а вторая – значения выходного напряжения (В).

**Display Vfd which produces nominal Vt:**

[Отобразить значение напряжения обмотки возбуждения Vfd (В), при котором выходное напряжение Vt (В) будет номинальным].

Для варианта модели синхронной машины Synchronous Machine pu Standard вместо параметров статорной, роторной и обмотки возбуждения задаются реактивные сопротивления машины и постоянные времени по продольной и поперечной осям.

*Пример:*

На рис. 3.82 показана схема, в которой синхронная машина работает в двигательном режиме. В момент времени, равный 2 с, происходит наброс нагрузки. На рисунке приведены графики тока действующего значения статора  $i_s$ , частоты вращения вала  $n$  и активной мощности машины  $P_e$ .

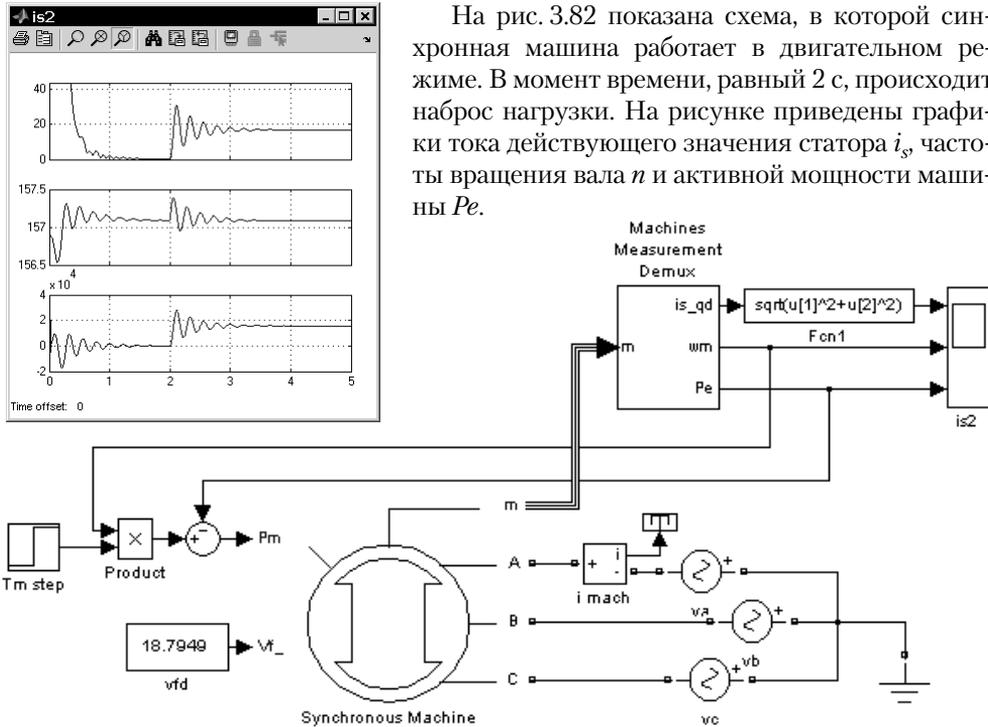
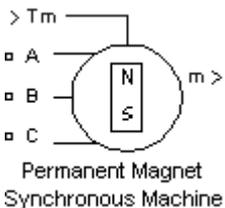


Рис. 3.82. Двигательный режим синхронной машины

### 3.6.5. Синхронная машина с постоянными магнитами *Permanent Magnet Synchronous Machine*

*Пиктограмма:*



**Назначение:**

Блок Permanent Magnet Synchronous Machine является моделью синхронной машины с постоянными магнитами. В модели не учитывается насыщение магнитной цепи, поскольку такие машины имеют, как правило, повышенный воздушный зазор. Порты модели А, В и С являются выводами статорной обмотки машины. Входной порт Тm служит для задания момента сопротивления. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из 10 элементов:

- 1–3: токи обмотки статора –  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ;
- 4–5: проекции токов статора на оси  $d$  и  $q$  –  $i_d$  и  $i_q$ ;
- 6–7: проекции напряжений статора на оси  $q$  и  $d$  –  $u_d$  и  $u_q$ ;
- 8: угловая частота вращения ротора  $\omega_r$ ;
- 9: угол поворота ротора  $\theta$ ;
- 10: электромагнитный момент  $T_e$ .

Для удобства извлечения переменных машины из выходного вектора измеряемых переменных в библиотеке SimPowerSystems предусмотрен блок Machines Measurement Demux.

Электрическая часть модели машины описывается системой уравнений, связанных с ротором:

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q,$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q},$$

$$T_e = 1.5 p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q].$$

Все параметры ротора и его переменные приведены к статору.

В системе уравнений приняты следующие обозначения:

$L_d, L_q$  – индуктивности статора по осям  $d$  и  $q$ ;

$R$  – активное сопротивление обмотки статора;

$i_d, i_q$  – проекции тока статора на оси  $d$  и  $q$ ;

$u_d, u_q$  – проекции напряжения статора на оси  $d$  и  $q$ ;

$\omega_r$  – угловая частота вращения ротора;

$\lambda$  – магнитный поток постоянных магнитов, сцепленный с обмоткой статора;

$p$  – число пар полюсов;

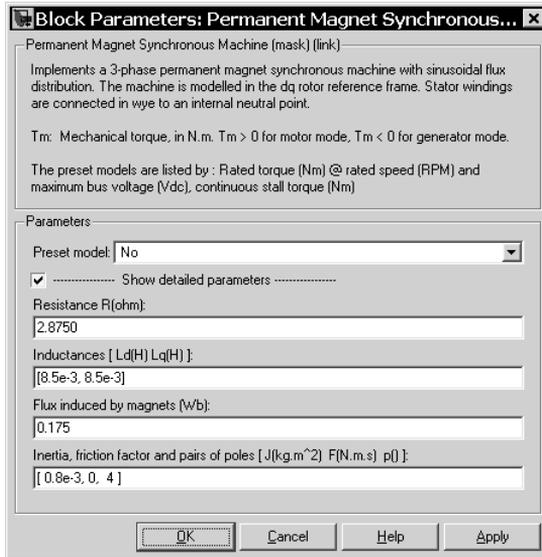
$T_e$  – электромагнитный момент.

Механическая часть модели описывается следующими уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m),$$

$$\frac{d}{dt} \theta = \omega_r,$$

где  $J$  – суммарный момент инерции ротора и нагрузки;  $F$  – коэффициент трения;  $\theta$  – угол положения ротора;  $T_m$  – момент сопротивления.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Preset model:**

[Выбор модели]. Параметр позволяет выбрать модель машины из каталога.

**Show detailed parameters:**

[Показать параметры модели]. При установленном флажке параметры модели доступны для просмотра и изменения.

**Resistance R (Ohm):**

[Активное сопротивление статора R (Ом)].

**Inductances [Ld (H) Lq (H)]:**

[Индуктивности статора по продольной и поперечной осям Ld (Ом) Lq (Ом)].

**Flux induced by magnets (Wb):**

[Поток возбуждения (Вб)].

**Inertia, friction factor and pairs of poles [J (kg.m<sup>2</sup>) F (N.m.s) p ()]:**

[Момент инерции J (кг\*м<sup>2</sup>), коэффициент трения F (Н\*м\*с) и число пар полюсов p].

*Пример:*

На рис. 3.83 показана схема, в которой используется модель синхронной машины с постоянными магнитами в двигательном режиме. Там же приведены диаграммы токов обмотки статора, угловой частоты вращения и электромагнитного момента при пуске и последующем набросе нагрузки.

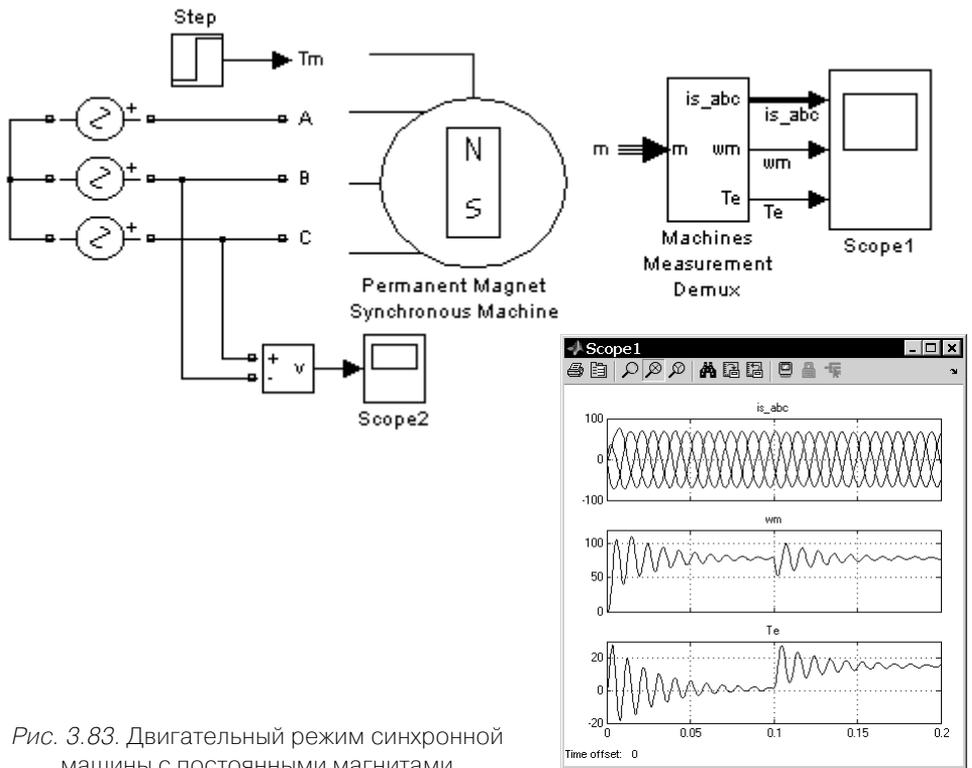
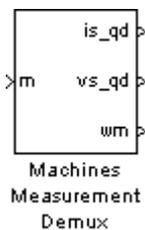


Рис. 3.83. Двигательный режим синхронной машины с постоянными магнитами

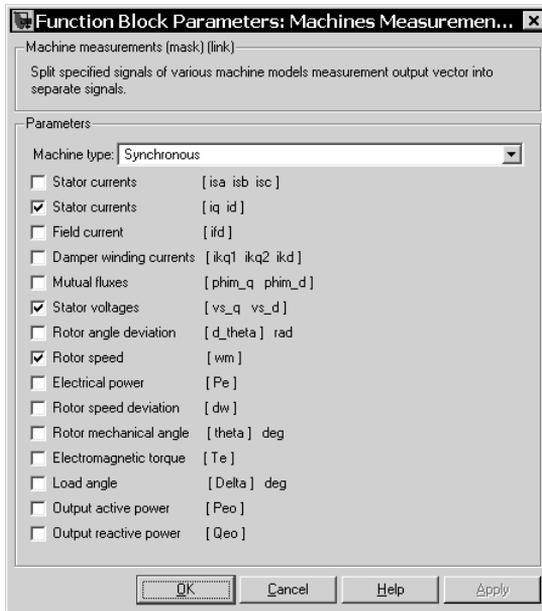
### 3.6.6. Блок измерения переменных электрической машины *Machines Measurement Demux*

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок *Machines Measurement Demux* предназначен для извлечения переменных состояния из вектора измеряемых переменных электрической машины. Блок работает совместно с моделями синхронных и асинхронных машин.

**Окно задания параметров:****Параметры блока:****Machine type:**

[Тип машины]. Выбирается из списка:

- Simplified synchronous – упрощенная синхронная машина;
- Synchronous – синхронная машина;
- Asynchronous – асинхронная машина;
- Permanent magnet synchronous – синхронная машина с постоянными магнитами.

В зависимости от выбранного типа машины в окне параметров будет отображаться разный набор выходных переменных машины. Ниже приведены доступные для измерения переменные различных типов машин.

**Синхронная машина:**

- Stator currents [isa isb isc] – токи обмотки статора;
- Stator currents [iq id] – проекции токов статора на оси  $q$  и  $d$ ;
- Field current [ifd] – ток возбуждения синхронной машины;
- Damper winding currents [ikq1 ikq2 ikd] – проекции токов демпферной обмотки синхронной машины;
- Mutual fluxes [phim\_q phim\_d] – проекции намагничивающего потока на оси  $q$  и  $d$ ;
- Stator voltages [vs\_q vs\_d] – проекции напряжений статора на оси  $q$  и  $d$ ;

- Rotor angle deviation [d\_theta] rad – отклонение угла ротора  $\Delta\theta$  синхронной машины (угол нагрузки  $\delta$ );
- Rotor speed [wm] – угловая частота вращения ротора;
- Electrical power [Pe] – электромагнитная мощность;
- Rotor speed deviation [dw] – отклонение угловой частоты вращения ротора;
- Rotor mechanical angle [theta] deg – угол поворота ротора (град);
- Electromagnetic torque [Te] – электромагнитный момент;
- Load angle [Delta] deg – угол нагрузки синхронной машины;
- Output active power [Peo] – выходная активная мощность;
- Output reactive power [Qeo] – выходная реактивная мощность.

Упрощенная модель синхронной машины:

- Line currents [isa isb isc] – фазные токи статора;
- Terminal voltages [va vb vc] – напряжения на зажимах обмотки статора (фазные напряжения);
- Internal voltages [ea eb ec] – фазные ЭДС статора;
- Rotor angle [thetam] rad – угол поворота ротора;
- Rotor speed [wm] – угловая частота вращения ротора;
- Electrical power [Pe] – электромагнитная мощность.

Синхронная машина с постоянными магнитами:

- Stator currents [ia ib ic] – токи статора;
- Stator currents [is\_q is\_d] – проекции токов статора на оси  $q$  и  $d$ ;
- Stator voltages [vs\_q vs\_d] – проекции напряжений статора на оси  $q$  и  $d$ ;
- Rotor speed [wm] – угловая частота вращения ротора;
- Rotor angle [thetam] rad – угол поворота ротора;
- Electromagnetic torque [Te] N.m – электромагнитный момент.

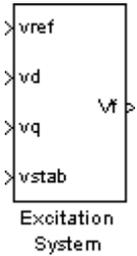
Асинхронная машина:

- Rotor currents [ira irb irc] – токи обмотки ротора;
- Rotor currents [ir\_q ir\_d] – проекции токов ротора на оси  $q$  и  $d$ ;
- Rotor fluxes [phir\_q phir\_d] – проекции потоков ротора на оси  $q$  и  $d$ ;
- Rotor voltages [vr\_q vr\_d] – проекции напряжений статора на оси  $q$  и  $d$ ;
- Stator currents [ia, ib, ic] A – токи статора;
- Stator currents [is\_q is\_d] A – проекции токов статора на оси  $q$  и  $d$ ;
- Stator fluxes [phis\_q phis\_d] – проекции потоков статора на оси  $q$  и  $d$ ;
- Stator voltages [vs\_q vs\_d] V – проекции напряжений статора на оси  $q$  и  $d$ ;
- Rotor speed [wm] rad/s – угловая частота вращения ротора;
- Electromagnetic torque [Te] N.m – электромагнитный момент;
- Rotor angle [thetam] rad – угол поворота ротора.

Для извлечения требуемой переменной необходимо отметить ее флажком.

### 3.6.7. Система возбуждения синхронной машины *Excitation System*

*Пиктограмма:*



**Назначение:**

Блок Excitation System является моделью системы возбуждения для синхронной машины. Позволяет регулировать напряжение на зажимах машины, работающей в генераторном режиме. За основу модели блока взят возбудитель, описанный в [10], без учета насыщения магнитной цепи. Основными элементами системы возбуждения (рис. 3.84) являются регулятор напряжения и возбудитель.

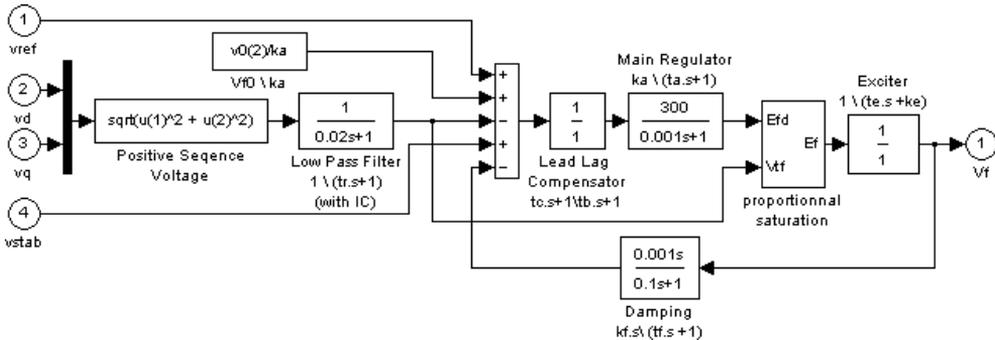


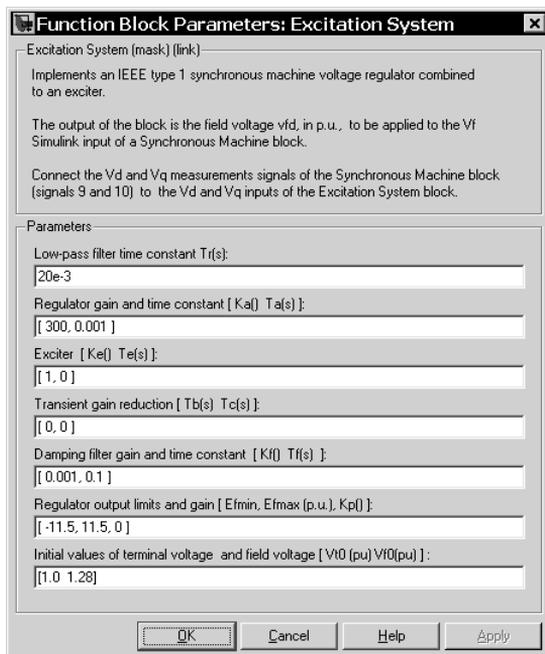
Рис. 3.84. Модель системы возбуждения

На первый вход блока ( $v_{ref}$ ) подается требуемое значение напряжения на зажимах статора. На второй ( $v_d$ ) и третий ( $v_q$ ) входы подаются текущие значения проекций напряжений статора на оси  $q$  и  $d$ . Четвертый вход может быть использован для создания контура стабилизации мощности машины. Все входные переменные и выходная переменная имеют размерность относительных единиц (р.у.).

Модель возбудителя представлена в виде передаточной функции между напряжением возбуждения ( $V_f$ ) и выходным напряжением регулятора ( $E_f$ ):

$$\frac{V_{fd}(s)}{E_f(s)} = \frac{1}{K_e + sT_e}$$

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Low-pass filter time constant  $T_r$  (s):**

[Постоянная времени фильтра нижних частот  $T_r$  (с)]. Постоянная времени фильтра датчика напряжения (см. рис. 3.79).

**Regulator gain and time constant [Ka () Ta (s)]:**

[Коэффициент усиления  $K_a$  и постоянная времени  $T_a$  регулятора].

**Exciter [Ke () Te (s)]:**

[Коэффициент усиления  $K_e$  и постоянная времени  $T_e$  модели возбудителя].

**Transient gain reduction [Tb (s) Tc (s)]:**

[Постоянные времени  $T_b$  и  $T_c$  стабилизатора].

**Damping filter gain and time constant [Kf () Tf (s) ]:**

[Коэффициент усиления  $K_f$  и постоянная времени  $T_f$  реального дифференцирующего звена]. Параметры блока, вычисляющего производную напряжения возбуждения, используемую для осуществления обратной связи.

**Regulator output limits and gain [E<sub>fmin</sub>, E<sub>fmax</sub> (p.u.), K<sub>p</sub> ()]:**

[Минимальное E<sub>fmin</sub> и максимальное E<sub>fmax</sub> значения выходного напряжения регулятора в о.е. и его коэффициент усиления K<sub>p</sub>]. Верхний предел может быть постоянным и равным E<sub>fmax</sub> или переменным и равным значению выпрямленного напряжения на зажимах генератора V<sub>tf</sub>, умноженному на коэффициент усиления K<sub>p</sub>. Если коэффициент усиления задан равным нулю, то используется первый вариант, если K<sub>p</sub> задан положительным значением, то используется второй вариант.

**Initial values of terminal voltage and field voltage [V<sub>t0</sub> (pu) V<sub>f0</sub> (pu)]:**

[Начальное значение напряжения на зажимах генератора V<sub>t</sub> и начальное значение напряжения возбуждения V<sub>f</sub>]. При правильно выбранных начальных условиях процесс моделирования может быть начат с установившегося режима. Начальное значение напряжения на зажимах генератора для этого обычно задается равным 1 о.е. Начальное значение напряжения возбуждения можно вычислить с помощью утилиты Load Flow блока Power Gui.

*Пример:*

На рис. 3.85 показана схема, в которой синхронная машина работает совместно с системой возбуждения. В момент времени  $t = 0,2$  с происходит скачкообразное изменение задания на выходное напряжение генератора. Осциллограммы на рисунке показывают, как синхронная машина и система возбуждения обрабатывают изменение задания.

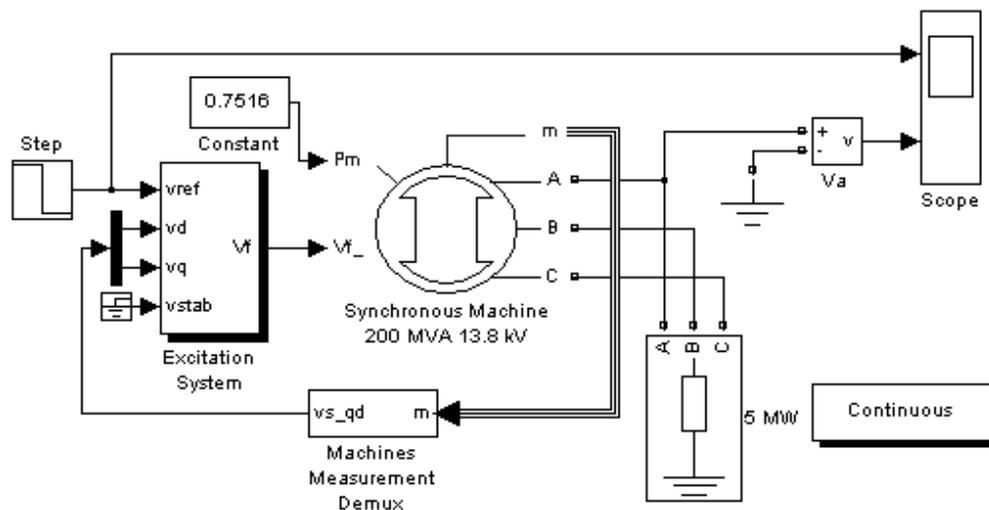
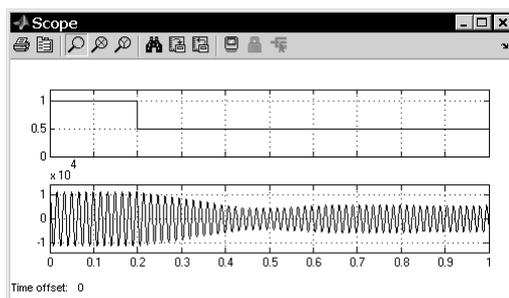
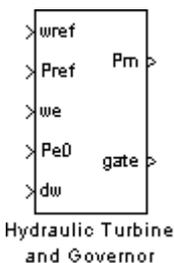


Рис. 3.85. Работа синхронной машины при регулировании возбуждения

### 3.6.8. Гидравлическая турбина с регулятором Hydraulic Turbine and Governor

Пиктограмма:



**Назначение:**

Блок Hydraulic Turbine and Governor является моделью гидравлической турбины с системой регулирования [11]. Система регулирования включает пропорционально-дифференциальный (ПИД) регулятор и управляющий сервомотор. Общая схема модели показана на рис. 3.86.

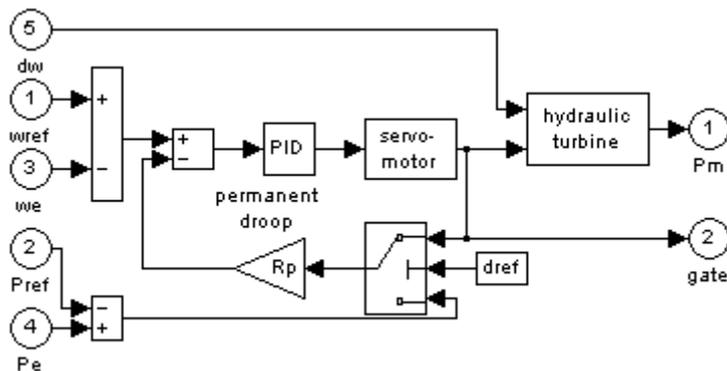


Рис. 3.86. Модель системы регулирования

На первые два входа блока подаются требуемые значения угловой частоты вращения ( $w_{ref}$ ) и мощности ( $P_{ref}$ ). На третий и четвертый входы блока поступают фактические значения угловой частоты вращения ( $w_e$ ) и активной мощности ( $P_e$ ). На пятый вход подается отклонение угловой частоты вращения ротора синхронного генератора ( $dw$ ). Выходными сигналами являются механическая мощность, которая должна подаваться на соответствующий вход блока синхронной машины ( $P_m$ ), и величина открытия затвора гидротурбины ( $gate$ ). Входы 2 и 4 могут оставаться неподключенными, если в качестве обратной связи будет использоваться сигнал о положении затвора, а не отклонении частоты вращения. Все входные и выходные величины измеряются в относительных единицах.

Сама гидравлическая турбина моделируется нелинейной системой, показанной на рис. 3.87.

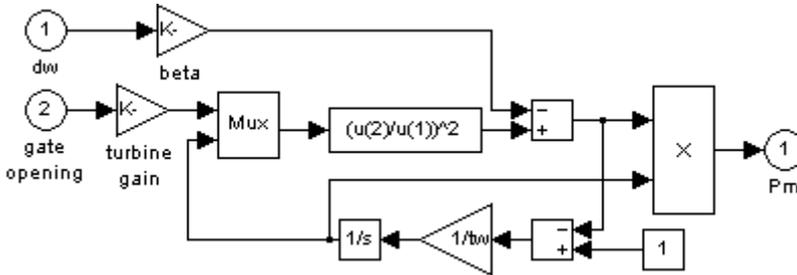


Рис. 3.87. Модель гидравлической турбины

Серводвигатель, управляющий затвором турбины, моделируется системой второго порядка (рис. 3.88).

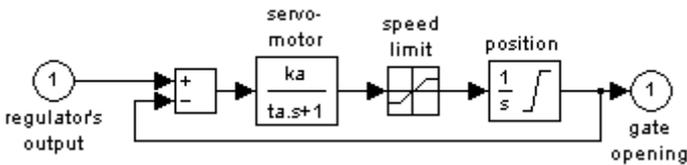
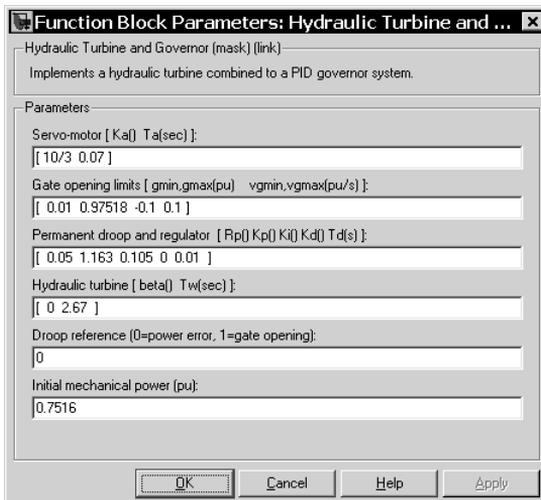


Рис. 3.88. Модель серводвигателя

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:****Servo-motor** [Ka () Ta (sec)]:

[Параметры серводвигателя] Параметры модели серводвигателя: коэффициент усиления Ka и постоянная времени Ta.

**Gate opening limits** [gmin, gmax (pu) vgmin, vgmax (pu/s)]:

[Пределы регулирования затвора gmin, gmax (o.e.) vgmin, vgmax (o.e./c)]. Максимальное и минимальное значения координаты затвора gmin, gmax (o.e.), а также максимальное и минимальное значения скорости перемещения затвора vgmin, vgmax (o.e./c).

**Permanent droop and regulator** [Rp () Kp () Ki () Kd () Td (s)]:

[Параметры регулятора]. Коэффициент передачи в цепи обратной связи регулятора Rp, коэффициенты усиления пропорциональной (Kp) и интегральной (Ki) части ПИД-регулятора, коэффициент усиления (Kd) реального дифференцирующего звена ПИД-регулятора и его постоянная времени (Td).

**Hydraulic turbine** [beta () Tw (sec)]:

[Параметры гидравлической турбины beta () Tw (c)]. Коэффициент демпфирования отклонения угловой частоты вращения beta и постоянная времени модели гидравлической части турбины Tw (c).

**Droop reference** (0=power error, 1=gate opening):

[Вид обратной связи]. Задаёт вид сигнала обратной связи: 1 – положение затвора, 0 – девиация электрической мощности.

**Initial mechanical power** (pu):

[Начальное значение механической мощности (o.e.)].

*Пример:*

На рис. 3.89 показана схема модели с гидрогенератором, работающим с номинальной мощностью. Там же приведены графики угловой частоты вращения вала турбины и выходного напряжения фазы C генератора.

### 3.6.9. Паровая турбина с регулятором Steam Turbine and Governor

*Пиктограмма:*

|           |          |
|-----------|----------|
| > wref    | dw_5-2 > |
| > Pref    | Tr5-2 >  |
| > wref    | gate >   |
| > d_theta | Pm >     |

Steam Turbine  
and Governor

**Назначение:**

Блок Steam Turbine and Governor является моделью паровой турбины с системой регулирования. Вал турбины может моделироваться как многомассовая (до четырех масс) система. Схема модели показана на рис. 3.90.

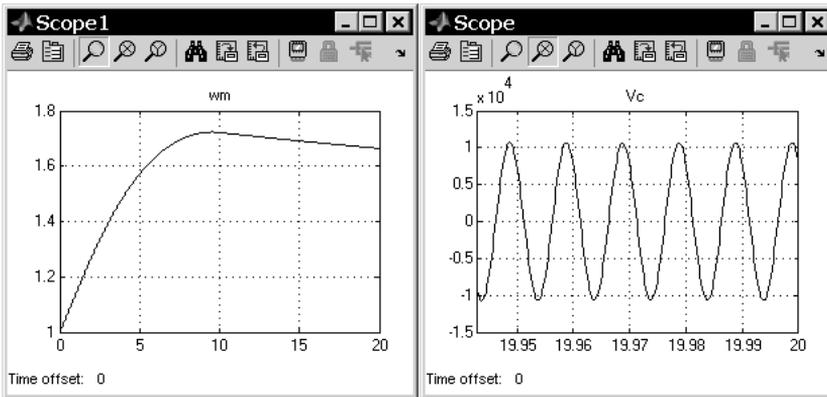
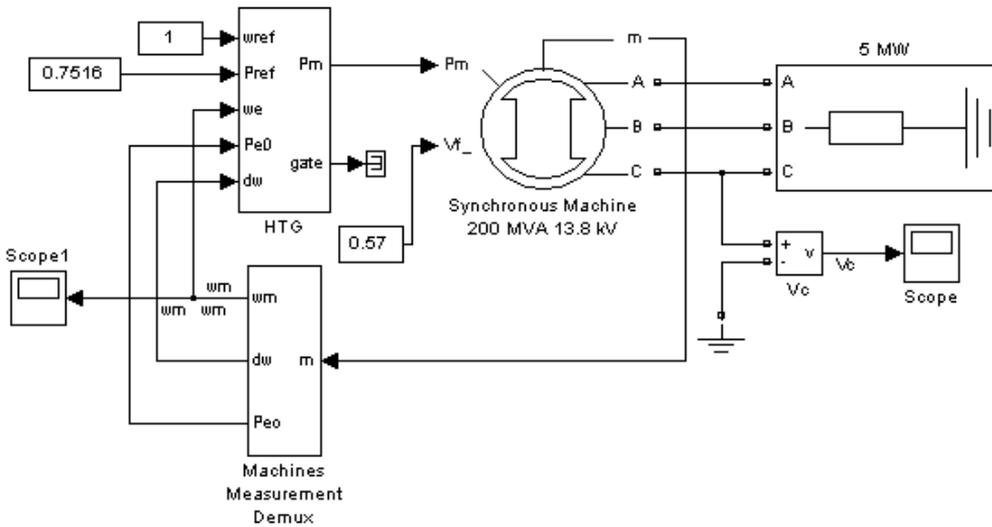


Рис. 3.89. Модель с гидрогенератором, работающим на активную нагрузку

На первые два входа блока подаются требуемые значения угловой частоты вращения ( $w_{ref}$ ) и мощности ( $P_{ref}$ ). На третий и четвертый входы блока поступают фактическое значение угловой частоты вращения ( $w_m$ ) и угол нагрузки синхронного генератора ( $d\_theta$ ). Выходными сигналами являются вектор отклонений частоты вращения для каждой части многомассовой модели вала ( $dw_{5-2}$ ), вектор значений момента также для каждой части многомассовой модели вала ( $Tr_{5-2}$ ), механическая мощность, которая должна подаваться на соответствующий вход блока синхронной машины ( $P_m$ ), и величина открытия затвора турбины ( $gate$ ). Все входные и выходные величины, за исключением угла нагрузки, измеряются в относительных единицах.

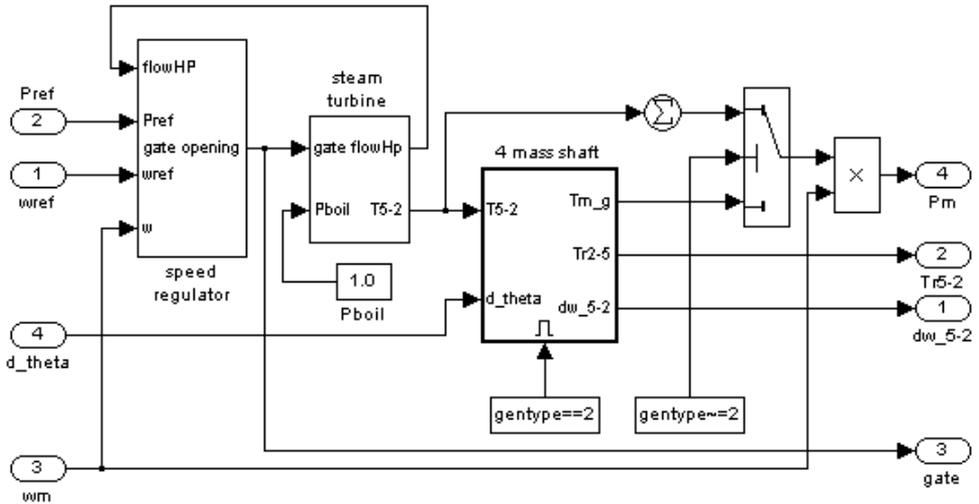


Рис. 3.90. Модель паровой турбины

Система регулирования включает пропорционально-дифференциальный (ПИД) регулятор, реле скорости и управляющий сервомотор [12]. Общая схема модели показана на рис. 3.91.

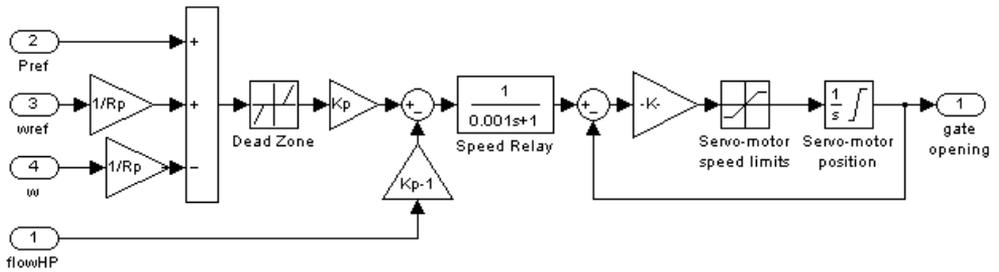


Рис. 3.91. Модель системы регулирования

Сама паровая турбина моделируется четырехкомпонентной нелинейной системой, показанной на рис. 3.92.

Паровая турбина имеет четыре каскада, каждый из которых смоделирован передаточной функцией первого порядка. Первый каскад представляет паросборник, в то время как три других каскада представляют или трубопровод, или вторичный подогреватель. Котел не смоделирован. Давление котла задается постоянным и равным 1,0 о.е. Элементы F2–F5 используются для распределения мощности турбины по различным каскадам вала.

Модель вала турбины представляет собой четырехмассовую систему (рис. 3.93). Масса, ближайшая к турбине, имеет номер 2, а масса, наиболее близкая к синхронному генератору, имеет номер 5.

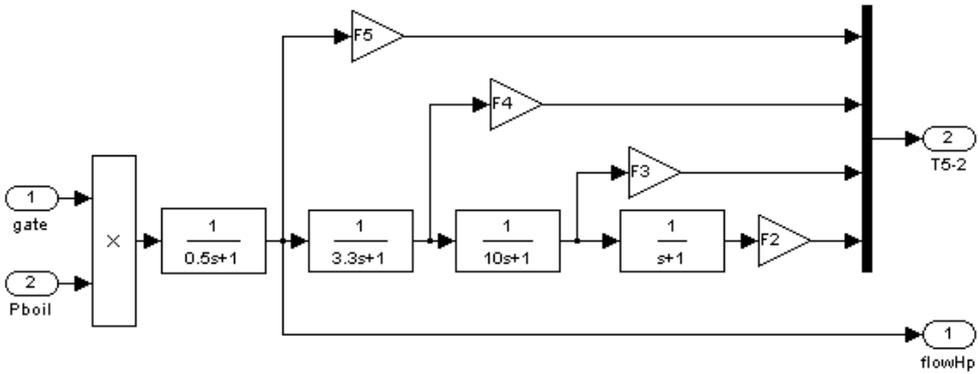


Рис. 3.92. Модель паровой турбины

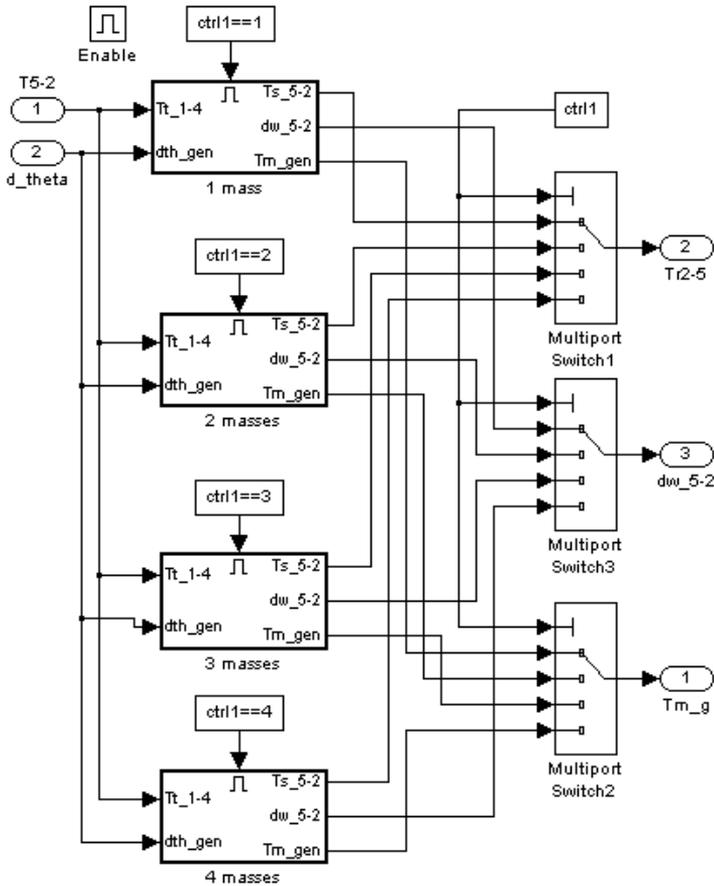


Рис. 3.93. Модель вала турбины

**Окно задания параметров:**

Function Block Parameters: Steam Turbine and Gov... (link)

Steam Turbine and Governor (mask) (link)

Implements a complete tandem-compound steam prime mover system, including speed regulator, steam turbine and a shaft with up to 4 masses. The generator's mass is labelled mass #1 and is not included here. The shaft mass closest to the generator is #2, the farthest is #5. If a mass is not to be included, set it's inertia H to zero. The damping factor and rigidity coefficients corresponding to omitted masses are not considered and can be left as is. When masses are omitted, the remaining system is "compressed" towards the generator i.e. if only 2 masses are used, it will be masses #2 and #3. The input data for the masses considered is shifted accordingly.

Parameters

Generator type: Tandem-compound (multi-mass)

Regulator gain, perm. droop, dead zone [ Kp Rp(p.u.) Dz(p.u.) ]:  
[ 1 0.05 0 ]

Speed relay and servo-motor time constants [ Tsr Tsm ] (s):  
[ 0.001 0.15 ]

Gate opening limits [ vgmin,vgmax (p.u./s) gmin,gmax (p.u.) ]:  
[ -0.1 0.1 0 4.496 ]

Steam turbine time constants [ T2 T3 T4 T5 ] (s):  
[ 0 10 3.3 0.5 ]

Turbine torque fractions [ F2 F3 F4 F5 ]:  
[ 0 0.36 0.36 0.28 ]

Coeff. of inertia [ H2 H3 H4 H5 ] (s):  
[ 0.046 1.430 1.465 0.192 ]

Stiffness coeff. [ K12 K23 K34 K45 ] (pu/rad):  
[ 90.44 53.88 64.59 62.94 ]

Damping factors [ D2 D3 D4 D5 ] (p.u. T/p.u. dw):  
[ 0.0115 0.3575 0.3663 0.0137 ]

Initial power and generator rotor angle [ Pm0 (p.u.) th0(deg) ]:  
[ 250.35/555 -51.2424 ]

OK Cancel Help Apply

**Параметры блока:****Generator type:**

[Тип генератора]. Выбирается из списка:

- Tandem-compound (single mass) – одномассовый;
- Tandem-compound (multi-mass) – многомассовый.

**Regulator gain, perm. droop, dead zone [Kp Rp (p.u.) Dz (p.u.)]:**

[Параметры регулятора]. Коэффициент усиления регулятора Kp, коэффициент ослабления обратной связи Rp (о.е.) и ширина мертвой зоны Dz (о.е.).

**Speed relay and servo-motor time constants [Tsr Tsm] (s):**

[Постоянные времени реле скорости и серводвигателя [Tsr Tsm] (с)].

**Gate opening limits [vgmin,vgmax (p.u./s) gmin,gmax (p.u.)]:**

[Пределы регулирования затвора [gmin, gmax (о.е.) vgmin, vgmax (о.е./с)]]. Максимальное и минимальное значения координаты затвора gmin, gmax (о.е.), а также максимальное и минимальное значения скорости перемещения затвора vgmin, vgmax (о.е./с).

**Steam turbine time constants** [T2 T3 T4 T5] (s):

[Постоянные времени турбины [T2 T3 T4 T5] (с)].

**Turbine torque fractions** [F2 F3 F4 F5]:

[Коэффициенты распределения момента по валу [F2 F3 F4 F5]].

**Coeff. of inertia** [H2 H3 H4 H5] (s):

[Постоянные инерции составляющих вала [H2 H3 H4 H5] (с)].

**Stiffness coeff.** [K12 K23 K34 K45] (pu/rad):

[Коэффициенты жесткости составляющих вала [K12 K23 K34 K45] (о.е./рад):]

**Damping factors** [D2 D3 D4 D5] (p.u. T/p.u. dw):

[Коэффициенты демпфирования составляющих вала [D2 D3 D4 D5] (о.е. T/о.е. dw):]

**Initial power and generator rotor angle** [Pm0 (p.u.) th0 (deg)]:

[Начальное значение механической мощности и угол поворота вала генератора [Pm0 (о.е.) th0 (град)]]. Параметры могут быть вычислены с помощью блока PowerGui. При одномассовой системе требуется задать только начальное значение механической мощности.

Если все четыре массы в многомассовой системе моделировать не требуется, то необходимо для соответствующих частей вала задать постоянную инерции, равную нулю. Коэффициенты жесткости и декременты затухания, соответствующие опущенным массам, при этом не используются. Когда часть масс вала не модели-

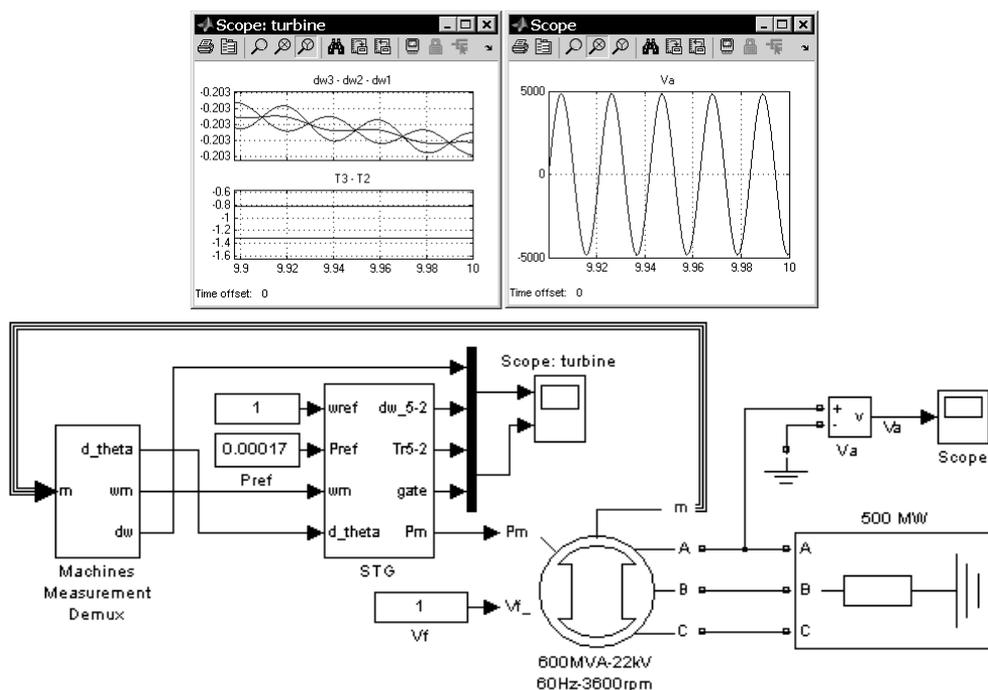


Рис. 3.94. Синхронный генератор, вращаемый паровой турбиной

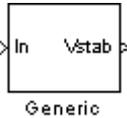
руется, оставшиеся массы сдвигаются в направлении генератора. Для исключенных масс коэффициенты распределения момента по валу должны быть заданы равными нулю. Допускается задавать коэффициенты распределения момента по валу ненулевыми при нулевых коэффициентах инерции тех же частей вала.

*Пример:*

На рис. 3.94 показана схема модели паровой турбины и синхронного генератора, работающего на активную нагрузку. Там же приведены графики переменных модели генератора для установившегося режима.

### 3.6.10. Универсальный стабилизатор энергосистемы **Generic Power System Stabilizer**

**Пиктограмма:**



Power System Stabilizer

**Назначение:**

Блок универсального стабилизатора энергосистемы Generic Power System Stabilizer может использоваться для улучшения демпфирующих свойств ротора синхронного генератора путем управления его возбуждением. Нарушения в работе энергосистемы могут приводить к возникновению колебаний частоты вращения ротора генератора. Эти колебания должны подавляться для сохранения устойчивости энергосистемы. Выходной сигнал блока (Vstab) является входным для системы возбуждения генератора. Входным сигналом блока может быть ошибка по частоте вращения ротора ( $d\omega$ ) или сигнал, пропорциональный разности между механической мощностью и электрической мощностью генератора:

$$P_a = P_m - P_{eo}.$$

Для того чтобы гарантировать жесткое демпфирование, блок PSS должен обеспечивать умеренное фазовое опережение на частотах, представляющих интерес, и тем самым производить компенсацию естественного отставания между возбуждением магнитного поля и электрическим вращающим моментом, вызванным действием PSS. Модель стабилизатора включает в себя фильтр нижних частот, основной усилитель, а также фильтр высших частот, подавляющий низкочастотные составляющие, которые присутствуют во входном сигнале. Фазокомпенсирующая система состоит из двух последовательно включенных звеньев первого порядка, используемых для компенсации фазового запаздывания между напряжением возбуждения и электромагнитным вращающим моментом синхронной машины. Схема модели стабилизатора показана на рис. 3.95.

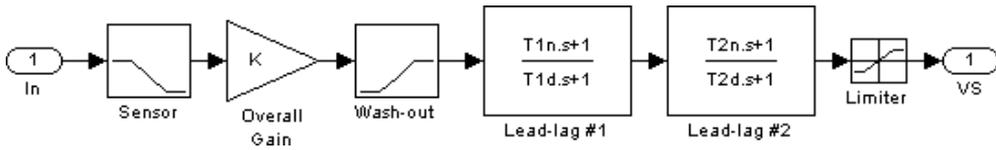
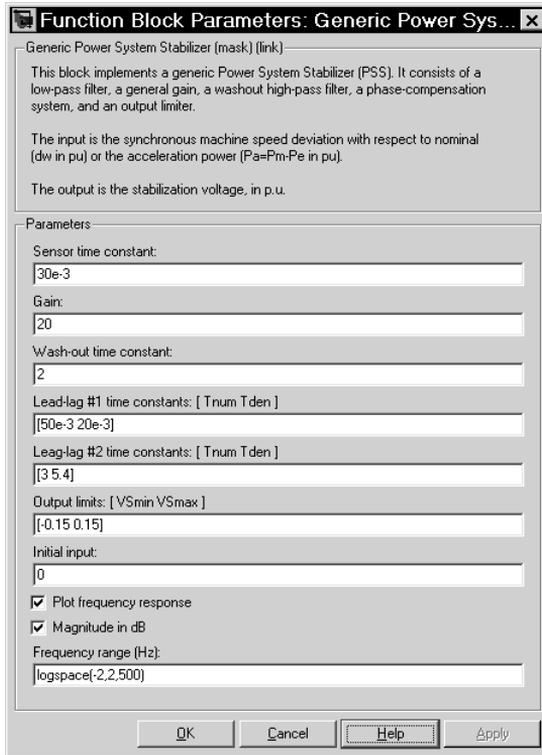


Рис. 3.95. Модель стабилизатора

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Sensor time constant:**

[Постоянная времени датчика]. Постоянная времени фильтра нижних частот (с), используемого для фильтрации входного сигнала.

**Gain:**

[Коэффициент усиления]. Общий коэффициент усиления стабилизатора.

**Wash-out time constant:**

[Постоянная времени фильтра высших частот].

**Lead-lag #1 time constants:** [Tnum Tden]

[Постоянные времени первого звена системы фазовой компенсации [Tnum Tden]]. Tnum – постоянная времени числителя, Tden – постоянная времени знаменателя.

**Leag-lag #2 time constants:** [Tnum Tden]

[Постоянные времени второго звена системы фазовой компенсации [Tnum Tden]]. Tnum – постоянная времени числителя, Tden – постоянная времени знаменателя.

**Output limits:** [VSmin VSmax]

[Минимальное и максимальное значения выходного сигнала [VSmin VSmax]].

**Initial input:**

[Начальное значение входного сигнала].

**Plot frequency response:**

[Построение частотного отклика стабилизатора]. При установке флажка производится построение частотного отклика.

**Magnitude in dB:**

[Измерение амплитуды сигнала в дБ]. При установке флажка амплитуда сигнала на частотной характеристике измеряется в дБ, в противном случае – в относительных единицах.

**Frequency range (Hz):**

[Частотный диапазон (Гц)]. В качестве параметра задается вектор частот, для которого должна быть построена частотная характеристика.

### **3.6.11. Многополосный стабилизатор энергосистемы *Multiband Power System Stabilizer***

**Пиктограмма:**

Power System Stabilizer

**Назначение:**

Блок Multiband Power System Stabilizer является моделью многополосного стабилизатора энергосистемы.

Неполадки, случающиеся в энергетической системе, приводят к электромеханическим колебаниям электрических генераторов. Эти колебания должны быть эффективно подавлены, чтобы сохранить стабильность системы. Электромеханические колебания могут быть классифицированы по четырем главным категориям:

- локальные колебания: между генератором и остальной частью электростанции, а также между электростанцией и остальной частью энергети-

ческой системы. Частоты таких колебаний обычно находятся в диапазоне от 0,8 до 4,0 Гц;

- межстанционные колебания: между двумя электрически близкими электрическими станциями. Частоты колебаний могут изменяться от 1 до 2 Гц;
- групповые колебания: между двумя большими группами электростанций. Частоты – обычно в пределах от 0,2 до 0,8 Гц;
- глобальные колебания: характеризуются общими, совпадающими по фазе колебаниями всех генераторов в изолированной системе. Частота таких глобальных колебаний – обычно около 0,2 Гц.

Таким образом, необходимо обеспечить подавление колебаний в широком (почти две декады) диапазоне частот.

Упрощенная структурная схема стабилизатора показана на рис. 3.96.

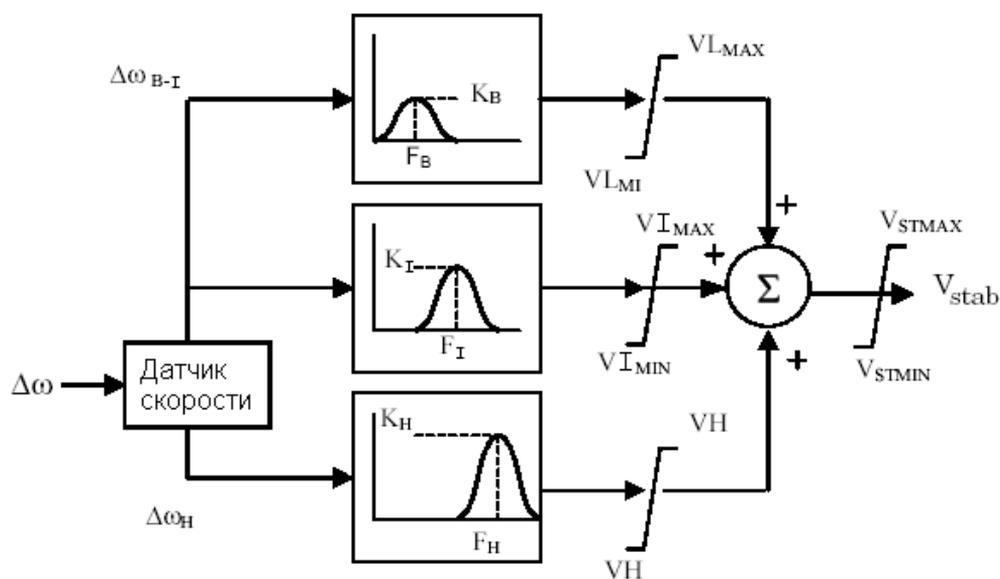


Рис. 3.96. Упрощенная структурная схема стабилизатора

Сигнал от датчика частоты вращения вала генератора разделяется на три канала, для каждого из которых используется полосовой фильтр, работающий в соответствующем диапазоне частот. После фильтрации все три сигнала складываются. Дополнительно осуществляется ограничение выходного сигнала по амплитуде как в каждом из трех каналов, так и суммарного выходного сигнала. Выходной сигнал блока ( $V_{stab}$ ) является входным для системы возбуждения генератора. Подробная структурная схема показана на рис. 3.97.

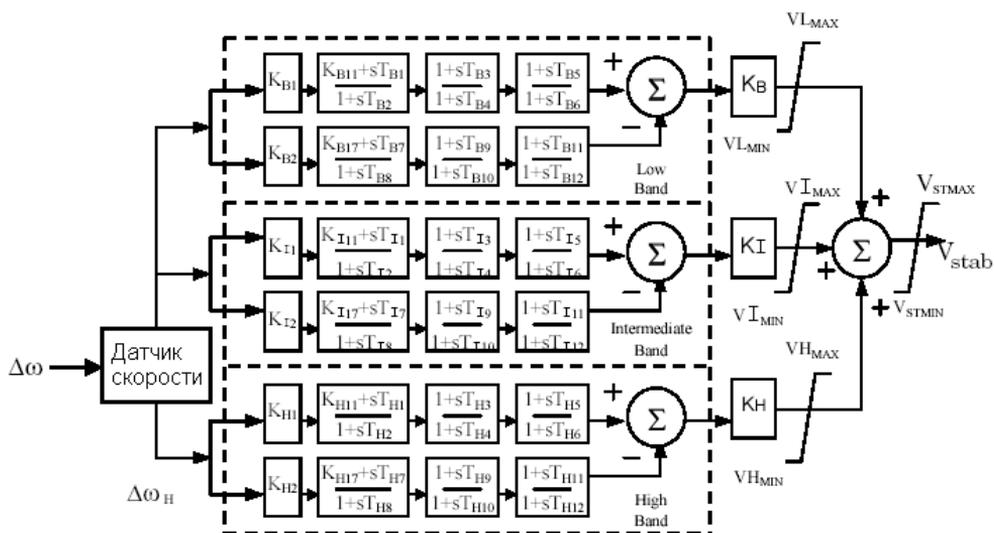


Рис. 3.97. Подробная структурная схема стабилизатора

**Окно задания параметров:**

**Function Block Parameters: Multi-Band Power Syst...**

Multi-Band Power System Stabilizer [mask] [link]

This block implements a Multi-band Power System Stabilizer (MB-PSS). Two operation modes are available: Detailed setting and simplified setting (IEEE Std 421.5).

When "Detailed settings" is used, the low(L)-, intermediate(I)- and high(H)-frequency time constants must be given in the following order: Tx1 to Tx12 followed by Kx11 and Kx17 (where x=L, I or H).

Parameters

Mode of operation:

Global gain:

Low frequency band: [ FL(Hz), KL ]

Intermediate frequency band: [ FI(Hz), KI ]

High frequency band: [ FH(Hz), KH ]

Signals Limits [VLmax, VImax, VHmax, VSmax]

Plot frequency response  
 Magnitude in dB

Frequency range (Hz):

OK Cancel Help Apply

**Параметры блока:****Mode of operation:**

[Режим задания параметров]. Значение параметра выбирается из списка:

- Simplified settings – упрощенное задание параметров;
- Detailed settings – подробное задание параметров.

**Global gain:**

[Общий коэффициент усиления]. Общий коэффициент усиления стабилизатора.

**Low frequency band:** [FL (Hz), KL]

[Параметры низкочастотного фильтра [FL (Гц), KL]]. Параметр задается в виде вектора. Первый элемент – центральная частота (Гц), второй – максимальное значение коэффициента передачи фильтра. Параметр доступен для режима Simplified settings.

**Intermediate frequency band:** [FI (Hz), KI]

[Параметры среднечастотного фильтра [FL (Гц), KL]]. Параметр задается в виде вектора. Первый элемент – центральная частота (Гц), второй – максимальное значение коэффициента передачи фильтра. Параметр доступен для режима Simplified settings.

**High frequency band:** [FH (Hz), KH]

[Параметры высокочастотного фильтра [FL (Гц), KL]]. Параметр задается в виде вектора. Первый элемент – центральная частота (Гц), второй – максимальное значение коэффициента передачи фильтра. Параметр доступен для режима Simplified settings.

**Low frequency gains:** [KL1, KL2, KL]

[Коэффициенты усиления низкочастотного канала [KL1, KL2, KL]]. Параметр доступен для режима Detailed settings.

**Low frequency time constants (s):**

[Постоянные времени низкочастотного канала]. Параметры задаются в виде вектора [ $T_{B1}$   $T_{B2}$   $T_{B3}$   $T_{B4}$   $T_{B5}$   $T_{B6}$   $T_{B7}$   $T_{B8}$   $T_{B9}$   $T_{B10}$   $T_{B11}$   $T_{B12}$   $K_{B11}$   $K_{B17}$ ]. Параметр доступен для режима Detailed settings.

**Intermediate frequency gains:** [KI1, KI2, KI]

[Коэффициенты усиления среднечастотного канала [KI1, KI2, KI]]. Параметр доступен для режима Detailed settings.

**Intermediate frequency time constants (s):**

[Постоянные времени среднечастотного канала]. Параметры задаются в виде вектора [ $T_{I1}$   $T_{I2}$   $T_{I3}$   $T_{I4}$   $T_{I5}$   $T_{I6}$   $T_{I7}$   $T_{I8}$   $T_{I9}$   $T_{I10}$   $T_{I11}$   $T_{I12}$   $K_{I11}$   $K_{I17}$ ]. Параметр доступен для режима Detailed settings.

**High frequency gains:** [KH1, KH2, KH]

[Коэффициенты усиления высокочастотного канала [KH1, KH2, KH]]. Параметр доступен для режима Detailed settings.

**High frequency time constants (s):**

[Постоянные времени высокочастотного канала]. Параметры задаются в виде вектора [ $T_{H1}$   $T_{H2}$   $T_{H3}$   $T_{H4}$   $T_{H5}$   $T_{H6}$   $T_{H7}$   $T_{H8}$   $T_{H9}$   $T_{H10}$   $T_{H11}$   $T_{H12}$   $K_{H11}$   $K_{H17}$ ]. Параметр доступен для режима Detailed settings.

**Signals Limits (VLmax, VImax, VNmax, VSmax)**

[Уровни ограничения]. Уровни ограничения выходного сигнала: VLmax – в низкочастотном канале, VImax – в среднечастотном канале, VNmax – в высокочастотном канале, VSmax – уровень ограничения суммарного сигнала.

**Plot frequency response:**

[Построение частотной характеристики стабилизатора]. При установке флажка производится построение частотной характеристики.

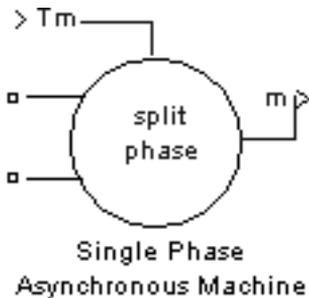
**Magnitude in dB:**

[Измерение амплитуды сигнала в дБ]. При установке флажка амплитуда сигнала на частотной характеристике измеряется в дБ, в противном случае – в относительных единицах.

**Frequency range (Hz):**

[Частотный диапазон (Гц)]. В качестве параметра задается вектор частот, для которого должна быть построена частотная характеристика.

## 3.6.12. Однофазная асинхронная машина Single Phase Asynchronous Machine

**Пиктограмма:****Назначение:**

Блок Single Phase Asynchronous Machine моделирует однофазную асинхронную электрическую машину с короткозамкнутым ротором. Машина имеет две обмотки – основную и вспомогательную. Блок позволяет моделировать машину с расщепленной обмоткой, пусковым конденсатором, пусковым и рабочим конденсатором, а также с отдельными основной и вспомогательной обмотками. Модель не учитывает насыщения и потерь в стали.

**Окно задания параметров:**

Block Parameters: Single Phase Asynchronous Ma... [X]

Single Phase Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a single phase asynchronous machine (split-phase, capacitor-start, capacitor-start-run, main and auxiliary windings accessible) modeled in the dq stator reference frame. Main and auxiliary windings are in quadrature. You can specify initial speed that will make the machine run without the auxiliary winding.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Parameters

Units: SI

Type of machine: Capacitor-Start-Run

Nominal power, voltage, and frequency [ Pn(VA), Vn(Vrms), f(HZ) ]  
[ 1.25746 110 60 ]

Main winding stator [ Rs(ohm), Lls(H) ]  
[ 2.02 7.4e-3 ]

Main winding rotor [ Rr(ohm), Llr(H) ]  
[ 4.12 5.6e-3 ]

Main winding mutual inductance Lms(H)  
[ 0.1772 ]

Auxiliary winding stator [ RS(ohm), LIS(H) ]  
[ 7.14 8.5e-3 ]

Inertia, friction factor, pairs of poles, ratio of turns [ J(kg.m<sup>2</sup>), F(N.m.s), p, N ]  
[ 0.0146 0 2 1.18 ]

Capacitor-Start [ Rst(ohm), Cs(farad) ]  
[ 2 254.7e-6 ]

Capacitor-Run [ Rru(ohm), Cru(farad) ]  
[ 18 21.1e-6 ]

Disconnection speed wc (% synchronous speed)  
[ 75 ]

Initial speed w0 (% synchronous speed)  
[ 0 ]

OK Cancel Help Apply

**Параметры блока:****Units:**

[Система единиц]. Параметры машины можно задавать в абсолютных единицах в системе СИ (SI) или в относительных (pu).

**Type of single phase asynchronous machine:**

[Тип машины]. Параметр задает тип машины:

- split-phase – с расщепленной обмоткой;
- capacitor-start – с пусковым конденсатором;
- capacitor-start-capacitor-run – с пусковым и рабочим конденсатором;
- main & auxiliary windings – с отдельными основной и вспомогательной обмотками.

**Nominal power, voltage, and frequency** [ $P_n$  (VA),  $V_n$  (Vrms),  $f$  (HZ)]:

[Номинальная мощность, напряжение и частота [ $P_n$  (ВА),  $V_n$  (В),  $f$  (Гц)]]. Параметр задается в виде вектора из трех элементов – номинальная полная мощность (ВА), действующее значение напряжения (В) и частота (Гц).

**Main winding stator** [ $R_s$  (Ohm),  $L_s$  (H)]:

[Активное сопротивление и индуктивность основной обмотки статора [ $R_s$  (Ом),  $L_s$  (Гн)]].

**Main winding rotor** [ $R_r'$  (Ohm),  $L_r'$  (H)]:

[Приведенные активное сопротивление и индуктивность обмотки ротора [ $R_r'$  (Ом),  $L_r'$  (Гн)]].

**Main winding mutual inductance**  $L_{ms}$  (H):

[Индуктивность намагничивания основной обмотки статора (Гн)].

**Auxiliary winding stator** [ $R_S$  (Ohm),  $L_S$  (H)]:

[Активное сопротивление и индуктивность вспомогательной обмотки статора [ $R_S$  (Ом),  $L_S$  (Гн)]].

**Inertia, friction factor, pairs of poles, ratio of turns** [ $J$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ),  $F$  (N.m.s),  $p$ ,  $N$ ]:

[Момент инерции  $J$  ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ), коэффициент трения  $F$  ( $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ ), число пар полюсов  $p$  и отношение чисел эффективных витков вспомогательной и основной обмоток].

**Capacitor-Start** [ $R_{st}$  (Ohm),  $C_s$  (farad)]:

[Емкость пускового конденсатора и величина резистора, включенного последовательно с конденсатором, [ $R_{st}$  (Ом),  $C_s$  (Ф)]].

**Capacitor-Run** [ $R_{ru}$  (Ohm),  $C_{ru}$  (farad)]:

[Емкость рабочего конденсатора и величина резистора, включенного последовательно с конденсатором, [ $R_{ru}$  (Ом),  $C_{ru}$  (Ф)]].

**Disconnection speed**  $w_c$  (% synchronous speed):

[Частота вращения ротора  $w_c$ , при которой происходит отключение вспомогательной обмотки (в % от синхронной частоты)].

**Initial speed**  $w_0$  (% synchronous speed):

[Начальная частота вращения ротора (в % от синхронной частоты)].

На выходном порту  $m$  блока формируется вектор из 14 переменных машины:

1. Rotor current  $i_{r\_a}$  – ток обмотки ротора  $a$ ;
2. Rotor current  $i_{r\_b}$  – ток обмотки ротора  $b$ ;
3. Rotor current  $i_q$  – проекция тока обмотки ротора на ось  $q$ ;
4. Rotor current  $i_d$  – проекция тока обмотки ротора на ось  $d$ ;
5. Rotor flux  $\text{phir\_}q$  – проекция потока ротора на ось  $q$ ;
6. Rotor flux  $\text{phir\_}d$  – проекция потока ротора на ось  $d$ ;
7. Rotor voltage  $V_r\_q$  – проекция напряжения ротора на ось  $q$ ;
8. Rotor voltage  $V_r\_d$  – проекция напряжения ротора на ось  $d$ ;
9. Main winding stator current  $i_a$  – ток основной обмотки статора;
10. Auxiliary winding stator current  $i_b$  – ток вспомогательной обмотки статора;
11. Voltage capacitor  $V_c$  – напряжение на конденсаторе;
12. Stator flux  $\text{phis\_}q$  – проекция потока статора на ось  $q$ ;
13. Stator flux  $\text{phis\_}d$  – проекция потока статора на ось  $d$ ;
14. Rotor speed – частота вращения ротора;

- 15. Electromagnetic torque  $T_e$  – электромагнитный момент;
- 16. Rotor angle  $\theta$  – угловое положение ротора.

*Пример:*

На рис. 3.98 показана схема, обеспечивающая конденсаторный пуск однофазного асинхронного двигателя и последующий наброс нагрузки. По достижении частоты вращения ротора, равной 75% синхронной, пусковой конденсатор отключается. На рисунке приведены также графики токов основной и вспомогательной обмоток, напряжение пускового конденсатора, частота вращения ротора и электромагнитный момент.

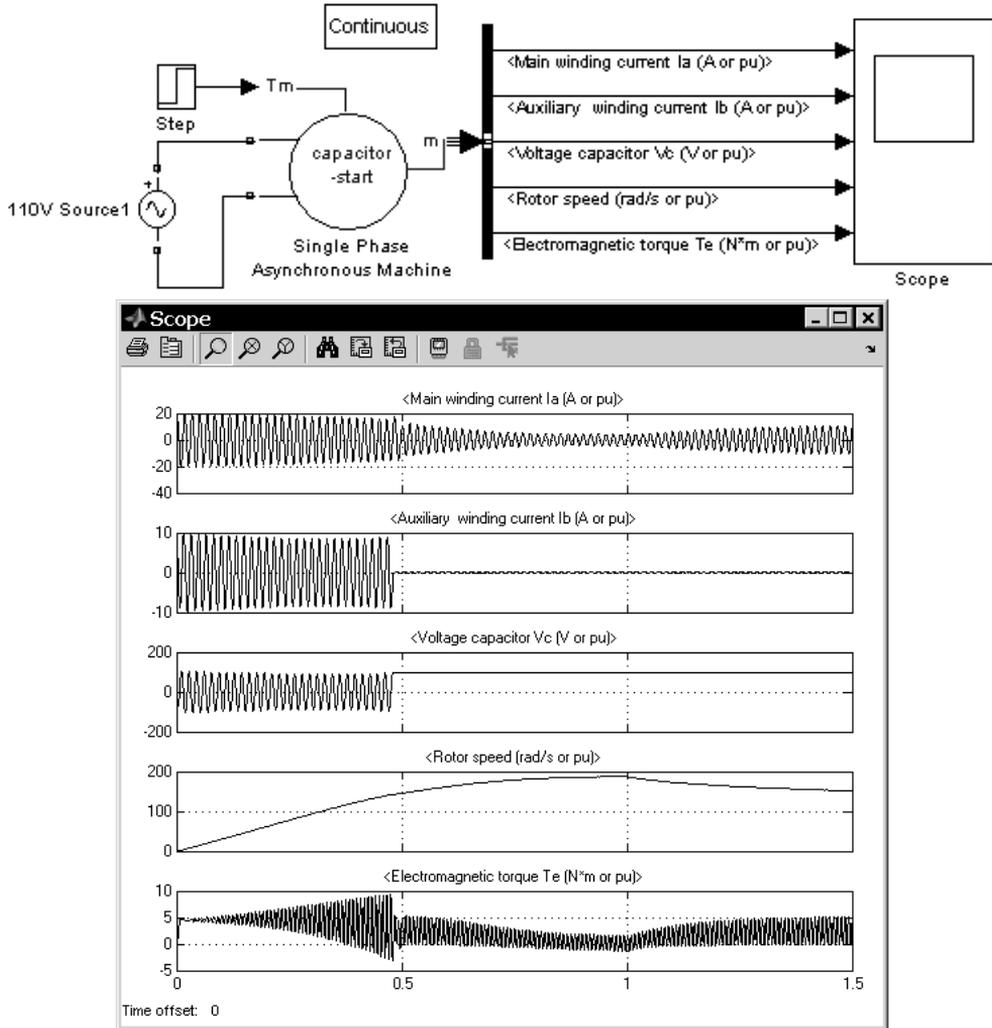
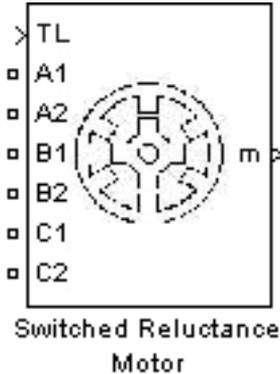


Рис. 3.98. Пуск однофазного асинхронного двигателя

### 3.6.13. Вентильный реактивный двигатель *Switched Reluctance Motor*

*Пиктограмма:*



**Назначение:**

Блок Switched Reluctance Motor моделирует вентильный реактивный двигатель. Модель может быть представлена в двух вариантах: Specific model (уточненная модель) и Generic model (обобщенная модель).

**Параметры блока:**

**Type:**

[Тип двигателя]. Параметр задает тип двигателя в зависимости от числа полюсов статора и ротора:

- 6/4 – 6 полюсов на статоре и 4 полюса на роторе;
- 8/6 – 8 полюсов на статоре и 6 полюсов на роторе;
- 10/8 – 10 полюсов на статоре и 8 полюсов на роторе.

**Plot magnetization curves:**

[Построить кривые намагничивания]. При установке флажка и закрытии окна параметров блока будут построены зависимости потокосцепления машины от тока статора при различном угловом положении ротора.

**Stator resistance (Ohm):**

[Активное сопротивление статора (Ом)].

**Inertia (kg.m.m):**

[Момент инерции J (кг\*м<sup>2</sup>)].

**Friction (N.m.s):**

[Коэффициент трения F (Н\*м\*с)].

**Initial speed and position [wo (rad/s) Theta0 (rad)]:**

[Начальная частота и угловое положение ротора [wo (рад/с) Theta0 (рад)]].

**Unaligned inductance (H):**

[Индуктивность при несовпадении осей полюсов статора и ротора]. Индуктивность при совпадении оси статора с осью межполюсного пространства ротора.

**Окно задания параметров:**

**Block Parameters: Switched Reluctance Motor**

Depending on the motor configuration specified by the Type parameter, this block models:

- A three-phase Switched Reluctance Motor having 6 stator poles and 4 rotor poles.
- A four-phase Switched Reluctance Motor having 8 stator poles and 6 rotor poles.
- A five-phase Switched Reluctance Motor having 10 stator poles and 8 rotor poles.

You can use a generic model or a specific model:

The generic model is characterized by the aligned and unaligned inductances, the saturated aligned inductance, the maximum current, and the maximum flux linkage.

The specific model is characterized by the magnetization characteristic given as a table of flux linkage in function of the rotor position and the stator current.

Parameters

Type: 6/4

Machine model: Generic model

Plot magnetization curves

Stator resistance (Ohm): 0.01

Inertia (kg.m.m): 0.0082

Friction (N.m.s): 0.01

Initial speed and position [wo (rad/s) Theta0 (rad)]: [0 0]

Unaligned inductance (H): 0.67e-3

Aligned inductance (H): 23.6e-3

Saturated aligned inductance (H): 0.15e-3

Maximum current (A): 450

Maximum flux linkage (V.s): 0.486

OK Cancel Help Apply

**Aligned inductance (H):**

[Индуктивность при совпадении осей полюсов статора и ротора].

**Saturated aligned inductance (H):**

[Индуктивность при совпадении осей полюсов статора и ротора в режиме насыщения (Гн)].

**Maximum current (A):**

[Максимальный ток (A)].

**Maximum flux linkage (V.s):**

[Максимальное потокосцепление (Вс)]. Потокосцепление, соответствующее максимальному току.

**Magnetisation characteristic table (MAT file):**

[Таблица характеристики намагничивания (MAT-файл)].

На выходном порту  $m$  блока формируется вектор из 6 переменных машины:

1.  $V$  – вектор напряжений статора;
2. flux – потокосцепление;
3.  $I$  – вектор токов статора;
4.  $T_e$  – электромагнитный момент;
5.  $\omega$  – частота вращения ротора;
6.  $teta$  – угловое положение ротора.

*Пример:*

На рис. 3.99 показана схема электропривода на базе вентильного реактивного двигателя.

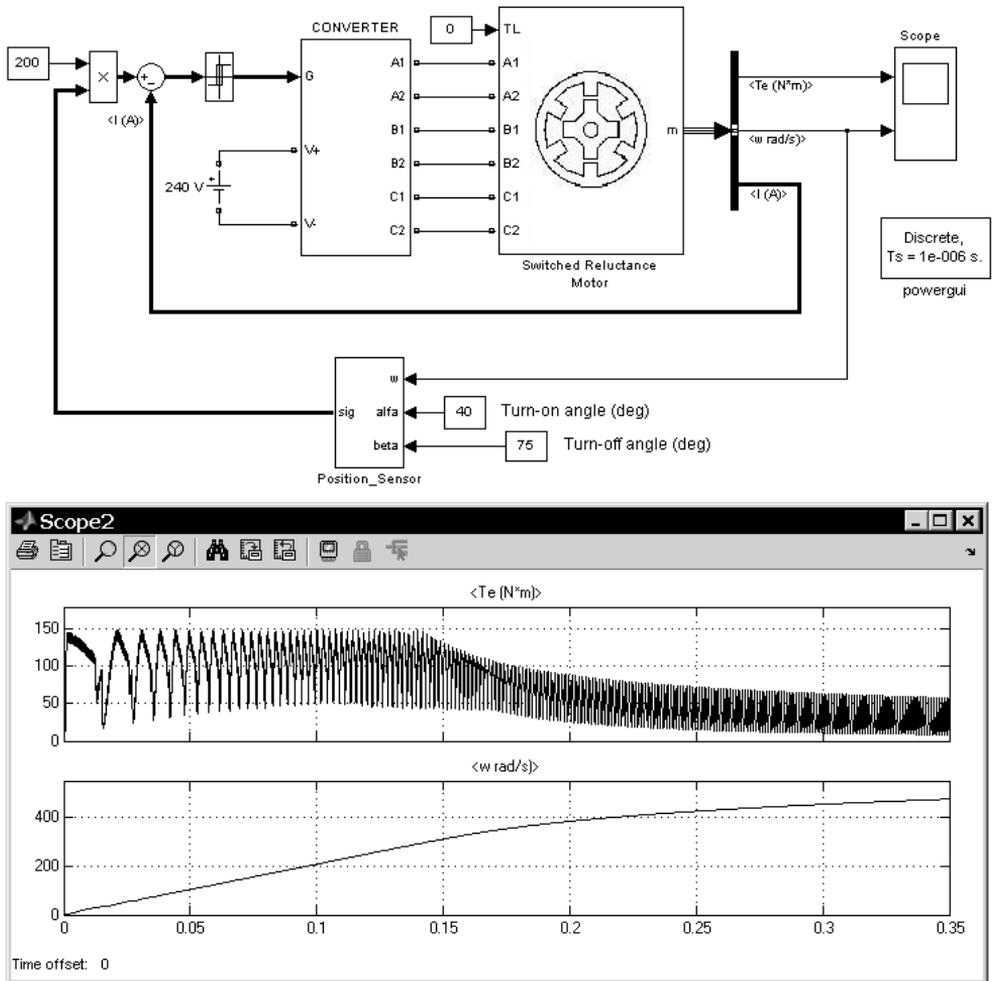
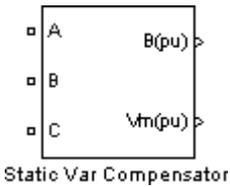


Рис. 3.99. Электропривод на базе синхронного реактивного двигателя

## 3.7. Модели для расчета векторным методом Phasor Elements

### 3.7.1. Статический компенсатор реактивной мощности Static Var Compensator

**Пиктограмма:**



**Назначение:**

Блок Static Var Compensator моделирует трехфазный статический компенсатор реактивной мощности. Схема модели компенсатора представлена на рис. 3.100.

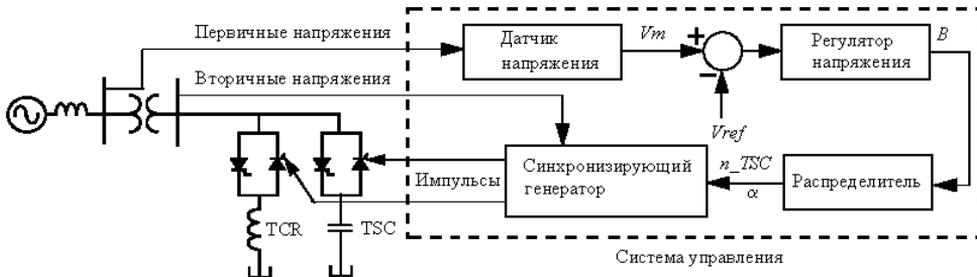


Рис. 3.100. Схема модели статического компенсатора реактивной мощности

В состав системы управления входят:

- датчик напряжения, измеряющий напряжение прямой последовательности, которым необходимо управлять;
- стабилизатор напряжения, который использует ошибку по напряжению (разность между измеренным напряжением  $V_m$  и опорным напряжением  $V_{ref}$ ), чтобы определить реактивную проводимость  $B$  системы TSC, необходимую для поддержания постоянства линейного напряжения;
- распределитель, определяющий, на какую группу тиристоров должны подаваться импульсы управления, а также угол управления тиристорами;
- синхронизирующий генератор, который вырабатывает импульсы управления тиристорами.

Блок предназначен для работы только при расчете схемы векторным методом. Выбор векторного метода расчета необходимо выполнить с помощью блока

Powergui. Модель статического компенсатора может использоваться при расчетах трехфазных энергетических систем, включающих синхронные генераторы, двигатели и динамические нагрузки, для определения динамической устойчивости и влияния статического компенсатора на электромеханические колебания в системе, а также на емкость линии передачи. Данный блок содержит упрощенные модели входящих в него систем, которые представлены довольно простыми передаточными функциями и элементами задержки, дающими правильные результаты на основной частоте системы.

Статический компенсатор реактивной мощности может работать в двух режимах:

- Voltage regulation – регулирование напряжения;
- Var control (Fixed susceptance Bref) – режим управления реактивной мощностью (поддержание постоянства реактивной проводимости).

Вольт-амперная характеристика компенсатора в режиме регулирования напряжения показана на рис. 3.101.

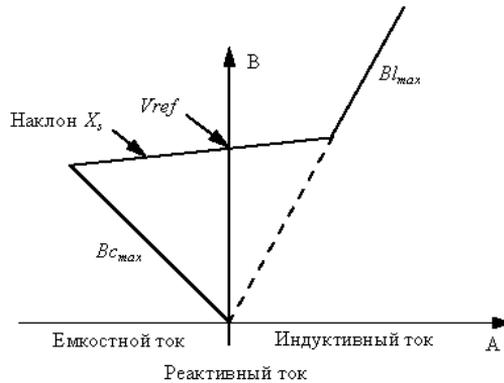


Рис. 3.101. Вольт-амперная характеристика статического компенсатора реактивной мощности

Пока реактивная проводимость компенсатора  $B$  не выходит за пределы ограничений  $B_{c_{\max}}$  и  $B_{l_{\max}}$ , определяемых величинами реактивных мощностей конденсаторов и реакторов, значение напряжения определяется величиной опорного напряжения  $V_{ref}$ . При этом обычно имеет место некоторый спад напряжения (при значениях выходной реактивной мощности в пределах 1–4% от максимального значения), что и показано на рис. 3.101. Вся вольт-амперная характеристика компенсатора в данном режиме описывается тремя уравнениями:

$$V = V_{ref} + X_s \times I \text{ – режим регулирования } (B_{c_{\max}} < B < B_{l_{\max}}),$$

$$V = \frac{I}{B_{c_{\max}}} \text{ – режим выработки максимальной емкостной мощности } (B = B_{c_{\max}}),$$

$$V = \frac{I}{B_{l_{\max}}} \text{ – режим выработки максимальной индуктивной мощности } (B = B_{l_{\max}}),$$

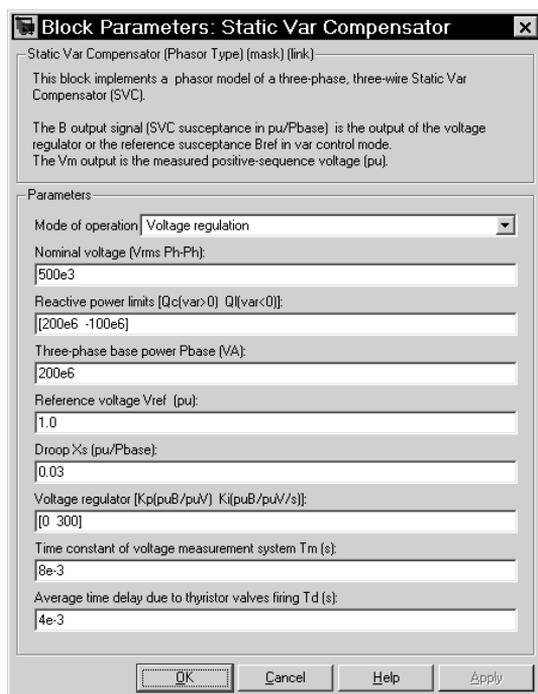
где  $V$  – напряжение прямой последовательности (о.е.);  $I$  – реактивный ток (о.е./Pbase). Значение  $I > 0$  указывает на индуктивный характер тока;  $Xs$  – наклон или реактивное сопротивление на участке спада (о.е./Pbase);  $Bc_{max}$  – максимальная емкостная проводимость (о.е./Pbase);  $Bl_{max}$  – максимальная индуктивная проводимость (о.е./Pbase); Pbase – базисная мощность (суммарная для трех фаз).

Когда компенсатор работает в режиме стабилизации напряжения, скорость реакции на изменение напряжения в системе зависит от параметров регулятора напряжения (коэффициента усиления пропорциональной части  $Kp$  и интегральной части  $Ki$ ), реактивного сопротивления  $Xs$  и устойчивости энергосистемы. Для интегрирующего регулятора напряжения ( $Kp = 0$ ), если постоянной времени  $Tm$  системы измерения и величиной задержки включения тиристоров  $Td$  можно пренебречь, то замкнутая система регулирования, состоящая из компенсатора реактивной мощности и энергетической системы, может быть аппроксимирована системой первого порядка с величиной постоянной времени замкнутого контура, равной:

$$T_c = \frac{1}{Ki \cdot (Xs + Xn)},$$

где  $T_c$  – постоянная времени замкнутого контура;  $Kp$  – коэффициент усиления пропорциональной части регулятора напряжения (о.е.\_V/о.е.\_V);  $Ki$  – коэффициент усиления интегрирующей части регулятора напряжения (о.е.\_V/о.е.\_V/с);  $Xs$  – наклон, или реактивное сопротивление на участке спада (о.е./Pbase);  $Xn$  – эквивалентное реактивное сопротивление энергосистемы (о.е./Pbase).

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:****Mode of operation:**

[Режим работы]. Модель может работать в двух режимах:

- Voltage regulation – регулирование напряжения;
- Var control (Fixed susceptance Bref) – режим управления реактивной мощностью (поддержание постоянства реактивной проводимости).

**Reactive power limits** [ $Q_c$  (var>0)  $Q_l$  (var<0)]:

[Пределы изменения реактивной мощности]. Параметр задается в виде вектора, первое значение которого  $Q_c$  – значение реактивной мощности батареи конденсаторов,  $Q_l$  – значение реактивной мощности реактора.

**Three-phase base power Pbase** (VA):

[Базисная мощность Pbase (ВА) (суммарная для трех фаз)].

**Reference voltage Vref** (pu):

[Опорное напряжение Vref (о.е.)].

**Droop Xs** (pu/Pbase):

[Наклон  $X_s$  о.е./Pbase]. Наклон, или реактивное сопротивление на участке спада.

**Voltage regulator** [ $K_p$  (puB/puV)  $K_i$  (puB/puV/s)]:

[Параметры регулятора напряжения [ $K_p$ (о.е.\_B/о.е.\_V)  $K_i$ (о.е.\_B/о.е.\_V/c)]]. Коэффициент усиления пропорциональной части  $K_p$  и интегральной части  $K_i$  регулятора.

**Bref for var control mode** (pu/Pbase):

[Опорное значение реактивной проводимости Bref в режиме управления реактивной мощностью (о.е./Pbase).]

**Time constant of voltage measurement system Tm** (s):

[Постоянная времени датчика напряжения Tm (с)].

**Average time delay due to thyristor valves firing Td** (s):

[Среднее время задержки включения тиристоров Td (с):]

*Пример:*

На рис. 3.102 показана схема, иллюстрирующая работу статического компенсатора реактивной мощности в энергосистеме напряжением 500 кВ, частотой 60 Гц и мощностью 3000 МВА.

Блок статического компенсатора имеет батарею конденсаторов мощностью 200 МВА и реактор мощностью 100 МВА. Для компенсатора задан режим регулирования напряжения (опорное напряжение  $V_{ref} = 1$  о.е.). Реактивная проводимость  $X_s$  равна 0.03 о.е./200 МВА, благодаря чему напряжение энергосистемы может изменяться в пределах от 0.97 о.е. до 1.015 о.е. в случае, если реактивная мощность компенсатора не превышает мощности батареи конденсаторов или реактора. Блок трехфазного программируемого источника напряжения Three-Phase Programmable Voltage Source используется в качестве генератора энергосистемы. В начальный момент времени напряжение генератора равно номинальному значению (1 о.е., 500 кВ). Затем, в момент времени  $t = 0.1$  с, напряжение скачкообразно уменьшается до 0.97 о.е., в момент времени  $t = 0.4$  с напряжение увеличивается до 1.03 о.е. и, наконец, снова становится равным номинальному в момент времени  $t = 0.7$  с. Диаграммы работы модели энергосистемы показаны на рис. 3.103.

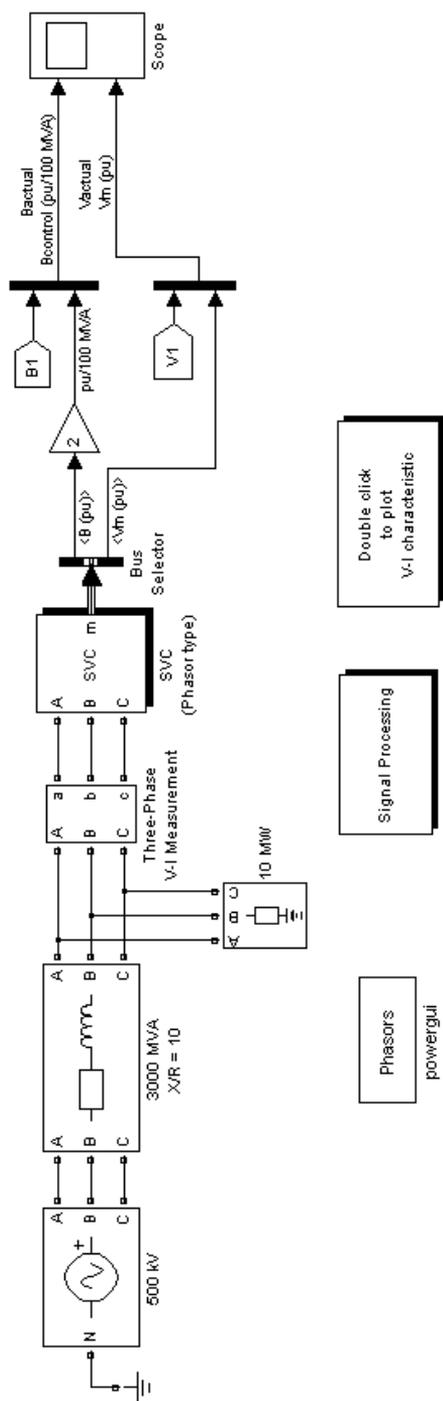


Рис. 3.102. Модель энергосистемы со статическим компенсатором реактивной мощности

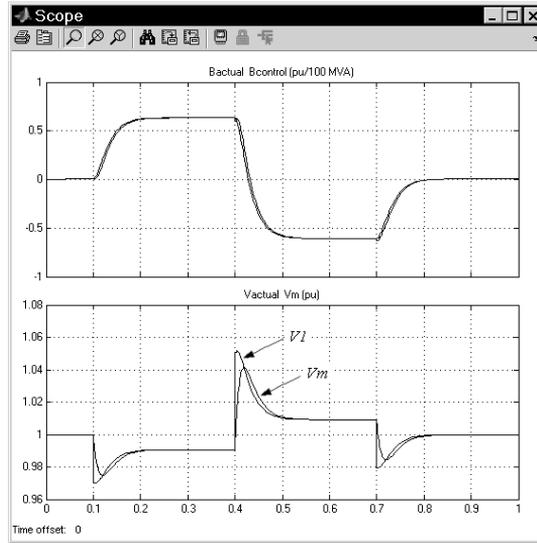


Рис. 3.103. Диаграммы работы модели

На верхней диаграмме рис. 3.104 показаны фактическое значение реактивной проводимости прямой последовательности  $B1$  и сигнал управления реактивной проводимостью регулятора напряжения. На нижней диаграмме показаны фактическое значение напряжения прямой последовательности  $V1$  и выходной сигнал  $Vm$  датчика напряжения.

Быстродействие системы (с учетом перечисленных выше допущений) определяется постоянной времени замкнутого контура  $T_c$ , которая равна 0,0345 при заданных параметрах модели ( $K_p = 0$ ;  $K_i = 300$ ;  $X_n = 0.0667$  о.е./200 МВА;  $X_s = 0.03$  о.е./200 МВА).

Если в данной модели увеличивать коэффициент усиления пропорциональной части регулятора или уменьшать устойчивость системы, пренебрегая  $T_m$  и  $T_d$ , то можно получить колебательную реакцию системы и в конечном счете неустойчивость. На рис. 3.104, иллюстрирующем данную ситуацию, показан сигнал с выхода  $B$  регулятора напряжения для двух энергосистем с разными параметрами.

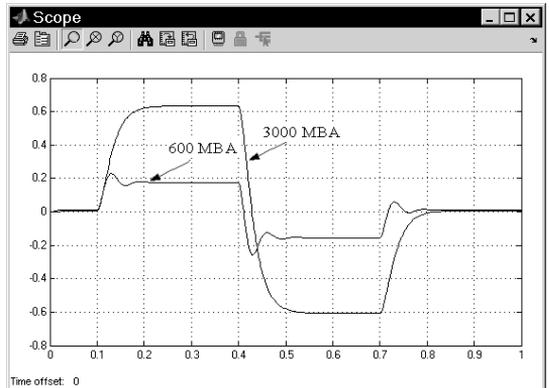
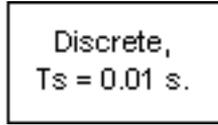


Рис. 3.104. Сравнение двух энергосистем с различными параметрами

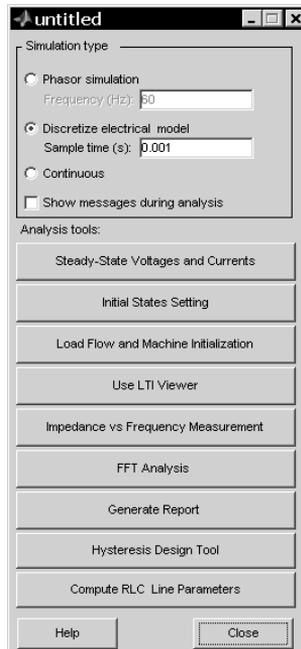
# Графический интерфейс пользователя Powergui

|   |     |
|---|-----|
| 4.1. Расчет схемы векторным методом .....                                       | 218 |
| 4.2. Дискретизация модели .....   | 220 |
| 4.3. Расчет установившегося режима .....  | 221 |
| 4.4. Инициализация трехфазных схем,<br>содержащих электрические<br>машины ..... | 223 |
| 4.5. Использование Simulink LTI-Viewer для<br>анализа электрических схем .....  | 226 |
| 4.6. Определение импеданса цепи .....   | 226 |
| 4.7. Гармонический анализ .....   | 228 |
| 4.8. Создание отчета .....  | 230 |
| 4.9. Инструмент расчета характеристики<br>намагничивания .....                  | 232 |
| 4.10. Расчет параметров линии<br>электропередачи .....                          | 234 |

**Пиктограмма:****Назначение:**

Блок Powergui является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение следующих задач:

- расчет схемы векторным методом;
- расчет установившегося режима;
- дискретизация модели;
- задание начальных условий;
- инициализация трехфазных схем, содержащих электрические машины, таким образом, чтобы расчет начался с установившегося режима;
- анализ схемы с помощью инструмента Simulink LTI-Viewer;
- определение полного сопротивления (импеданса) цепи;
- выполнение гармонического анализа;
- создание отчета;
- создание файла характеристик намагничивания для модели трансформатора с учетом насыщения сердечника;
- вычисление параметров линии электропередачи.

**Окно задания параметров:**

**Параметры блока:****Simulation type:**

[Вид расчета]. Вид расчета выбирается с помощью одного из трех переключателей:

**➤ Phasor simulation:**

[Расчет схемы векторным методом]. При выбранном переключателе выполняется расчет схемы векторным методом. При этом необходимо задать частоту источников в графе Frequency;

**➤ Discretize electrical model:**

[Дискретизация электрической модели]. При выбранном переключателе выполняется дискретизация модели. При этом необходимо задать шаг дискретизации в графе Sample time;

**➤ Continuous:**

[Режим расчета при непрерывном времени].

**Show messages during analysis:**

[Показывать сообщения при проведении анализа]. Если флажок не установлен, то подавляется вывод сообщений в командном окне **MATLAB** при выполнении расчетов.

**Steady State Voltages and Currents:**

[Установившиеся значения напряжений и токов]. Расчет установившихся значений переменных. При нажатии на кнопку открывается окно, в котором будут показаны соответствующие значения.

**Initial states Setting:**

[Установка начальных значений]. При нажатии на кнопку открывается окно, в котором отображаются начальные значения переменных. Эти значения можно изменять. Новые значения используются при расчете переходных процессов.

**Load Flow and Machine Initializations:**

[Инициализация схем, содержащих электрические машины].

**Use LTI Viewer:**

[Использование LTI Viewer]. Применение инструмента Simulink LTI Viewer для анализа схемы.

**Impedance vs Frequency Measurements:**

[Определение импеданса цепи].

**FFT Analysis:**

[Гармонический анализ].

**Generate Report:**

[Создание отчета].

**Hysteresis Design Tool:**

[Инструмент расчета характеристики намагничивания].

**Compute RLC Line Parameters:**

[Вычисление параметров линии электропередачи].

## 4.1. Расчет схемы векторным методом

Расчет схемы векторным методом (Phasor simulation) производится для электрической схемы, имеющей ключевые элементы в тех случаях, когда пользователя интересуют только установившиеся значения переменных схемы. Вид расчета установившегося режима Steady-State в этом случае не очень удобен, поскольку он выполняется лишь для начального состояния ключей схемы. Если в линейной цепи нужно определить только значения амплитуды и фазы всех напряжений и токов, то нет необходимости решать полную систему уравнений модели (система уравнений в пространстве состояний), получаемых при описании совокупности элементов модели. Вместо этого достаточно решить намного более простой набор алгебраических уравнений, связывающих векторы напряжения и тока элементов модели. Именно это делает векторный метод решения. Метод вычисляет напряжения и токи как векторы (комплексные числа, отображающие синусоидальные напряжения и токи определенной частоты). Векторы могут быть представлены декартовой (действительная и мнимая часть числа) или в полярной системе координат (амплитуда и фаза). Поскольку переходные процессы при таком способе расчета не учитываются, то моделирование происходит намного быстрее. Однако необходимо всегда помнить, что эта более быстрая методика решения дает результат только для одной определенной частоты.

Для проведения расчета векторным методом необходимо в окне Powergui выбрать режим расчета Phasor simulation и задать частоту источников в графе Frequency. В режиме Phasor simulation пользователь может проследить, как меняются установившиеся значения переменных при различных коммутациях в схеме.

*Пример:*

На рис. 4.1 показаны пример схемы и результаты расчета схемы векторным методом. Представленная схема является упрощенной моделью трехфазной схемы с частотой сети 60 Гц и напряжением сети 230 кВ, в которой изображена только одна фаза. Эквивалентный источник моделируется источником напряжения (230 кВ RMS /  $\sqrt{3}$ ) или 132.8 кВ, 60 Гц), соединенным последовательно с полным внутренним сопротивлением ( $R_s$  и  $L_s$ ). Источник подключен к RL-нагрузке линией с распределенными параметрами длиной 150 км, которая моделируется блоком PI section 1-го порядка (цепь RL1 и 2 шунтирующих конденсатора, C1 и C2). В цепи установлен выключатель, используемый для подключения нагрузки (75 МВт, 20 МВАр) к приемному концу линии передачи. В качестве отображаемых переменных выбраны амплитудные значения тока и напряжения, которые рассчитываются на основе комплексных значений с помощью блоков Complex to Magnitude-Angle (в данном случае эти блоки вычисляют модуль комплексного числа). На графики, для сравнения, наложены графики расчета переходных процессов схемы. Из графиков видно, что расчет векторным методом дает, по сути, огибающие графиков переходных процессов. Следует отметить, что в режиме Continuous закрывание выключателя Breaker происходит при переходе тока через нулевое значение, следующее после поступления сигнала на отпирание, в случае же использования метода векторного моделирования выключение наступает не-

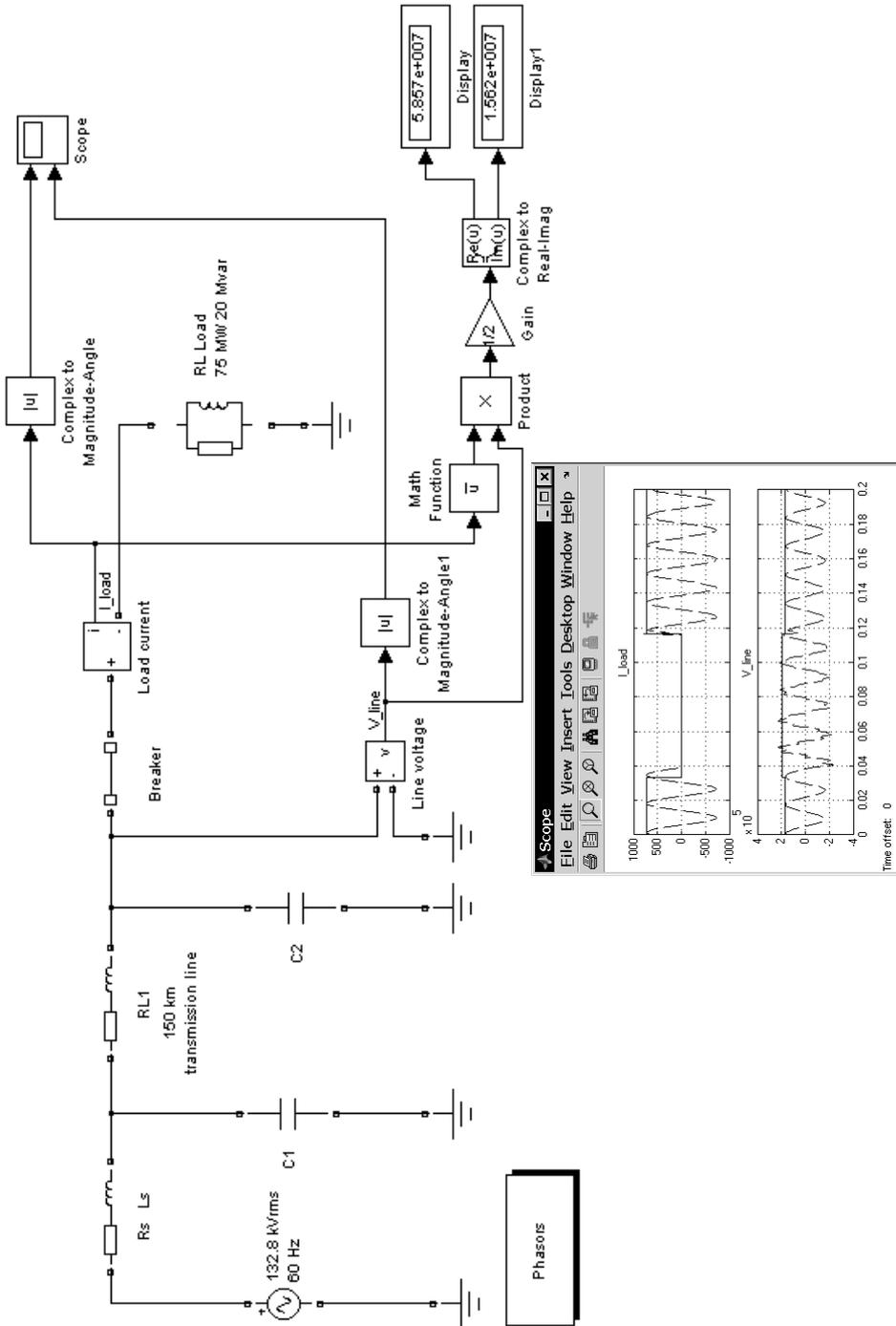


Рис. 4.1. Расчет схемы векторным методом

замедлительно. Это происходит потому, что при векторном моделировании нет понятия перехода через ноль.

Расчет схемы векторным методом позволяет использовать математику комплексных чисел для проведения дополнительных вычислений в модели. Например, для вычисления мощности может быть использовано выражение:

$$\dot{S} = P + jQ = \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{U} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} I^* = \frac{1}{2} \dot{U} \cdot I^*$$

где  $\dot{U}$  – вектор напряжения;  $I^*$  – комплексно-сопряженный вектор тока.

В нижней части схемы рис. 4.1 показана реализация данного выражения с помощью блоков Simulink. Значения активной и реактивной мощностей в нагрузке выводятся на блоки Display.

Данный вид расчета может быть использован и для очень сложных схем, когда расчет переходных процессов не дает устойчивого решения.

## 4.2. Дискретизация модели

Дискретизация электрической модели (Discretize electrical model) позволяет, как правило, существенно увеличить скорость ее расчета. Величина шага дискретизации задается в окне параметров блока Powergui. Дискретизация выполняется с использованием метода Тастина (интегрирование методом трапеций с фиксированным шагом). Для того чтобы устранить замкнутые алгебраические контуры при дискретизации моделей электрических машин, применяется прямой метод Эйлера. Точность расчета определяется величиной шага дискретизации. При большом шаге дискретизации точность может быть не высока. Для выбора нужного значения шага требуется выполнить несколько расчетов с разными значениями величины шага дискретизации и сравнить результаты с расчетом по непрерывной модели. После сравнения следует выбрать наибольшее значение шага, при котором разницу с расчетом по непрерывной модели можно считать несущественной. Обычно, для расчета систем, работающих на частотах 50–60 Гц, шаг дискретизации может быть выбран равным 20–50 мкс. Для систем, содержащих полностью управляемые ключи (IGBT-транзисторы, GTO-тиристоры, схемы с искусственной коммутацией и т. п.), шаг дискретизации должен быть существенно снижен. Так, например, для расчета инвертора с широтно-импульсной модуляцией, работающего на частоте 8 кГц, шаг дискретизации должен быть задан не менее чем 1 мкс. В дискретных моделях системы управления могут быть как непрерывными, так и дискретными, но наибольшая скорость расчета может быть достигнута только в последнем случае.

При выполнении дискретизации существуют некоторые ограничения.

Дискретизация полностью управляемых полупроводниковых устройств (IGBT, GTO или MOSFET) может выполняться только в том случае, если они входят в состав блока Universal Bridge. Если же такие устройства используются по отдельности, то дискретизация выполнена не будет, а появится окно с сообщением об ошибке при попытке запуска модели на расчет.

При моделировании электрических машин в дискретном режиме возможно возникновение колебаний решения. Для устранения этого источники питания к зажимам машины необходимо подключать через резистор с малым сопротивлением. Величина сопротивления определяется мощностью машины и величиной шага дискретизации. При шаге дискретизации 25 мкс для системы, работающей на частоте 60 Гц, выделяемая активная мощность на резисторе должна составлять примерно 2,5% от номинальной мощности машины. При увеличении шага дискретизации мощность резистора должна быть увеличена. Например, для синхронной машины мощностью 200 МВА и шагом дискретизации модели 50 мкс требуется, чтобы на дополнительном резисторе выделялось 5% от номинальной мощности машины, или 10 МВт. При уменьшении шага дискретизации до 20 мкс мощность резистора может быть уменьшена до 4 МВт.

Индуктивность диодов и тиристорov во включенном состоянии ( $L_{on}$ ) должна быть задана равной нулю. Если параметр  $L_{on}$  задан не равным нулю, то этот параметр будет обнулен принудительно и SimPowerSystems выдаст предупреждающее сообщение об этом.

*Пример:*

На рис. 4.2 показана модель однофазного мостового выпрямителя, работающего на активно-емкостную нагрузку. На рисунке приведены также осциллограммы напряжения на нагрузке и токи вентиляев моста.

### 4.3. Расчет установившегося режима

Режим Steady-State позволяет выполнить расчет установившихся значений переменных. Расчет производится для состояния схемы в момент времени  $t = 0$ . В этом режиме расчета в окне блока Powergui отображаются значения переменных состояния модели, а также измеряемых переменных источников и нелинейных элементов. Расчет проводится для одной фиксированной частоты, равной частоте источников схемы, либо для нулевой частоты, если в схеме присутствуют только источники постоянного напряжения. Результаты могут быть представлены как в виде действующих, так и в виде амплитудных значений. При расчете на переменном напряжении будут показаны также фазовые сдвиги соответствующих переменных. При наличии в схеме ключевых элементов следует иметь в виду, что расчет будет выполнен для начального состояния ключев.

Для отображения результатов возможно использование следующих настроек:

**Units:**

[Система измерения]. Выбор системы измерения:

- Peak values – амплитудные значения;
- RMS values – действующие значения.

**Frequency:**

[Частота]. Частота источников (Гц).

**Display:**

[Отображаемые переменные]. При установке флажков отображаются следующие расчетные переменные:

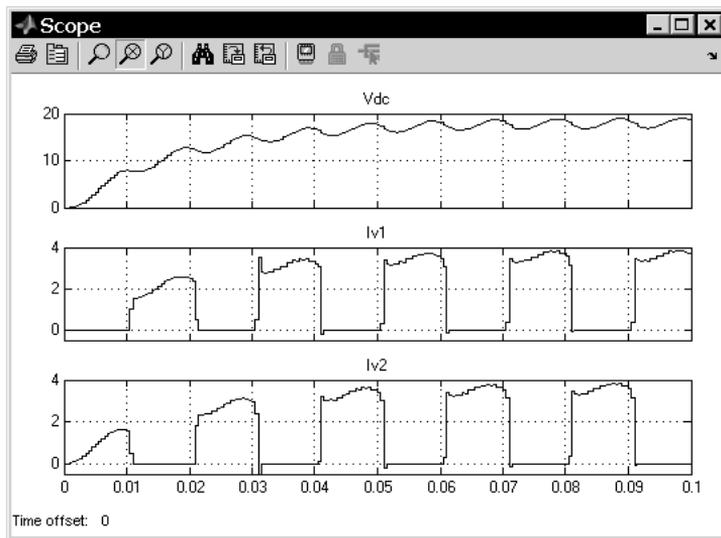
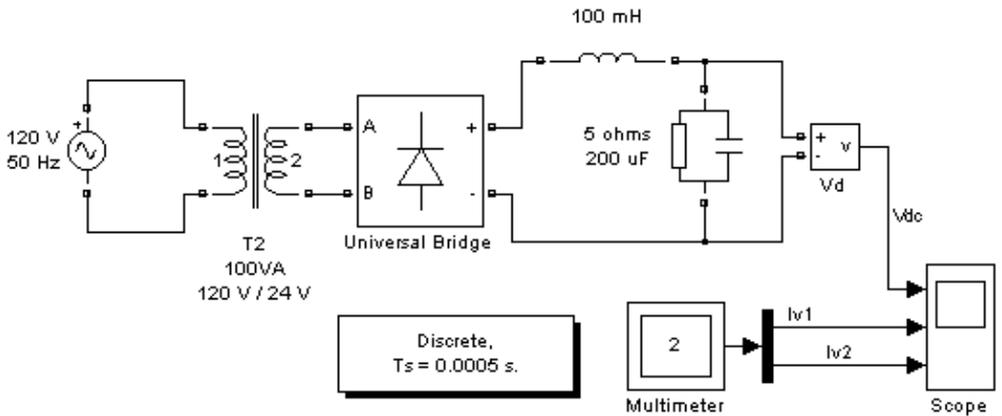


Рис. 4.2. Дискретная модель выпрямителя

- States – переменные состояния (токи в индуктивностях и напряжения на конденсаторах);
- Measurements – измеряемые переменные, то есть переменные, для измерения которых в модели установлены датчики тока или напряжения;
- Sources – напряжения и токи источников;
- Nonlinear – токи и напряжения нелинейных элементов.

*Пример:*

На рис. 4.3 показаны пример схемы и результаты ее расчета для установившегося режима.

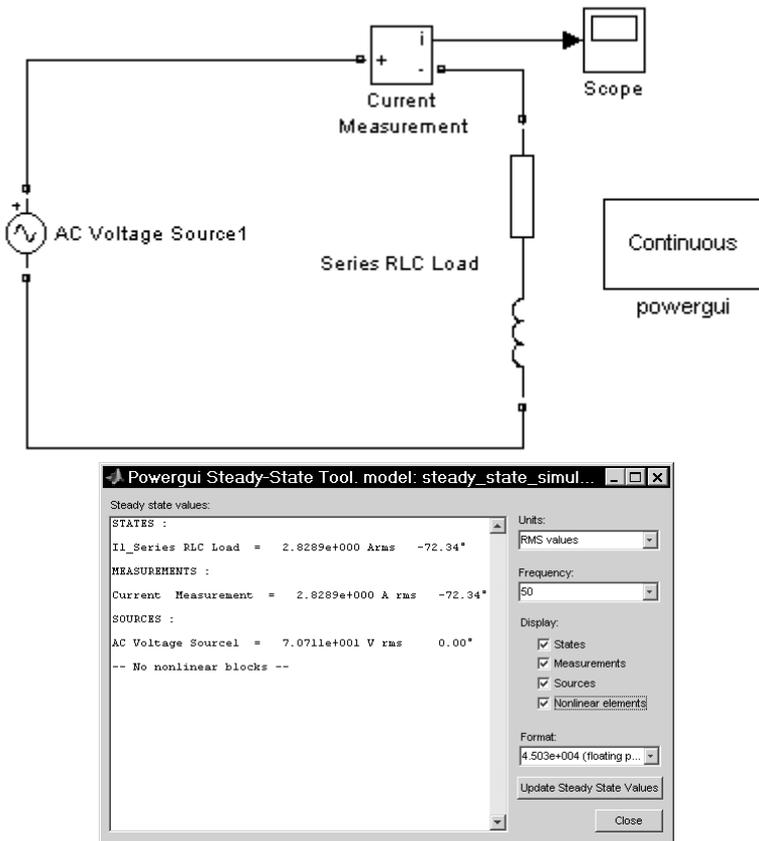


Рис. 4.3. Расчет установившегося режима

## 4.4. Инициализация трехфазных схем, содержащих электрические машины

Для того чтобы начать расчет схемы, содержащей электрические машины, с установившегося режима (при синусоидальных токах и постоянных скоростях), предварительно необходимо инициализировать схему должным образом. Такая инициализация осуществляется инструментом Load Flow and Machine Initialization. Инициализация выполняется для схем, содержащих синхронные и асинхронные машины, а также блоки 3-Phase Dynamic Load. Для выполнения инициализации необходимо ввести исходные данные в правой части окна инструмента (рис. 4.4).

В зависимости от вида электрической машины состав исходных данных может меняться.

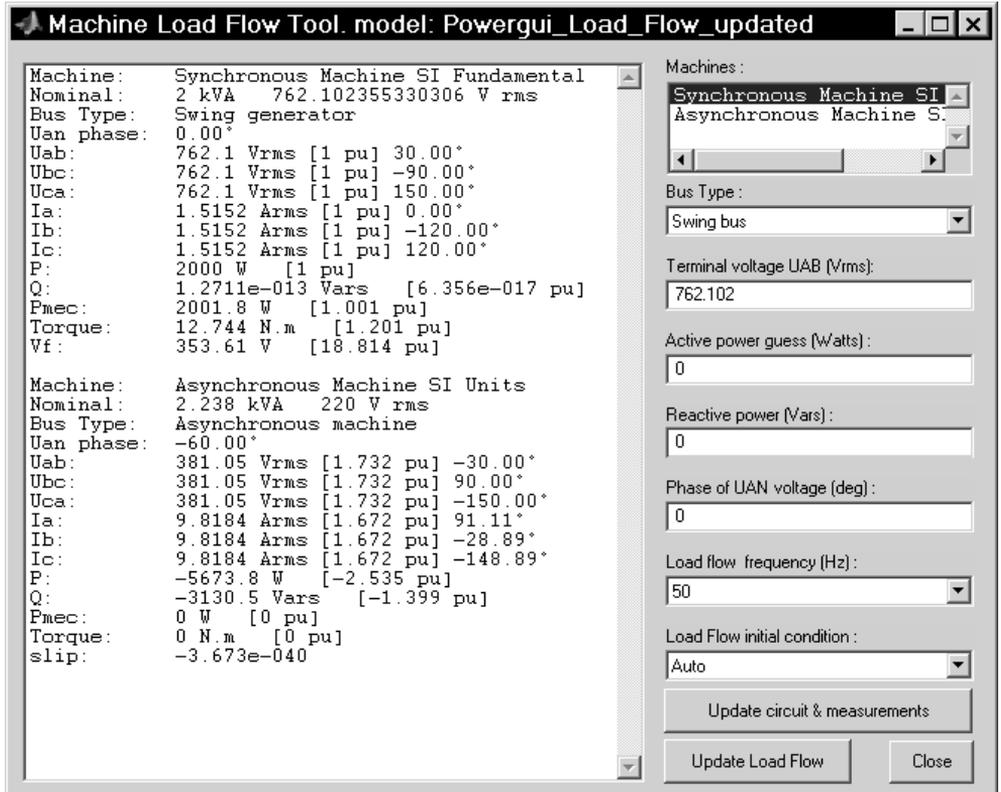


Рис. 4.4. Окно инструмента Load Flow and Machine Initialization

**Machines:**

[Машины]. Список электрических машин, имеющих в модели.

**Bus type:**

[Входные данные]. Параметр определяет перечень задаваемых параметров машины. Значение выбирается из списка:

- P&V Generator – задаются активная мощность и номинальное линейное напряжение (действующее значение);
- P&Q Generator – задаются активная и реактивная мощности;
- Swing Bus – задаются линейное напряжение (действующее значение), предполагаемая активная мощность и начальная фаза напряжения  $U_{AN}$  (эл. град). Данный тип шины предполагает двунаправленную передачу мощности, поэтому этот тип шины должен быть установлен хотя бы для одной синхронной машины в схеме.

**Terminal voltage  $U_{AB}$  (Vrms):**

[Напряжение  $U_{AB}$  (действующее значение)].

**Active power (Watts):**

[Активная мощность (Вт)].

**Reactive power (Vars):**

[Реактивная мощность (ВАр)].

**Phase of U<sub>AN</sub> voltage (deg):**[Начальная фаза напряжения  $U_{AN}$  (эл. град)].**Mechanical power (Watts):**

[Механическая мощность (Вт)]. Параметр задается для асинхронной машины.

**Load flow frequency:**

[Частота].

**Load Flow initial condition:**

[Начальные условия]. Значения параметра выбираются из списка:

- Auto – расчет выполняется для найденных начальных условий;
- Start from previous solution – результаты предыдущего расчета являются начальными условиями для следующего.

При внесении изменений в схему пересчет начальных условий необходимо выполнить кнопкой Update circuit & measurements.

После нажатия кнопки Update Load Flow произойдет автоматическая запись рассчитанных начальных условий в параметры блоков электрических машин. Кроме того, если потребуются изменения и во входных сигналах блоков (момент нагрузки, входная мощность и т. п.), то будут выведены сообщения с нужными значениями. Эти значения необходимо задать с помощью блоков IC.

*Пример:*

На рис. 4.5 показана схема, в которой синхронный генератор, работающий на активную нагрузку, приводится во вращение асинхронным двигателем. На осциллограмме показано напряжение фазы C генератора. Как видно на осциллограмме, начальное значение напряжения не равно нулю, как это имело бы место при нулевых начальных условиях.

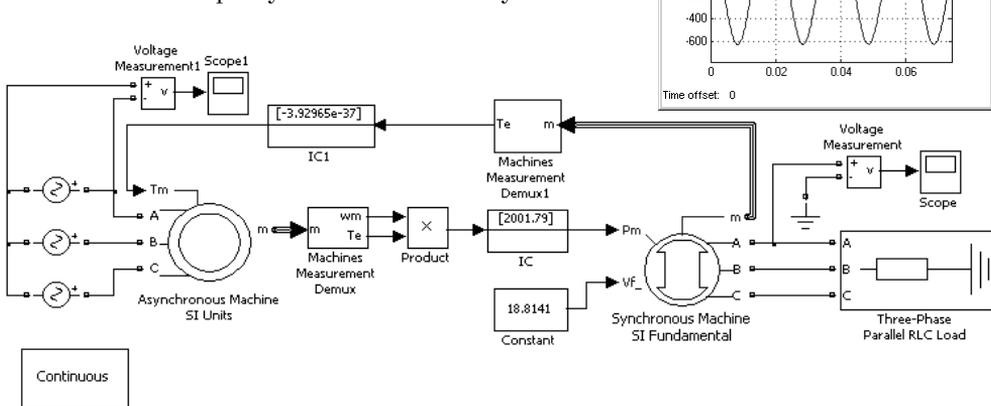


Рис. 4.5. Расчет схемы с ненулевыми начальными значениями

## 4.5. Использование Simulink LTI-Viewer для анализа электрических схем

Инструмент Simulink LTI-Viewer, входящий в состав инструмента Control System Toolbox, является очень удобным инструментом для анализа линейных систем в Simulink. С помощью него можно определить реакцию системы на единичное импульсное и ступенчатое воздействия, построить частотные характеристики, найти нули и полюса общей передаточной функции системы, построить годограф Найквиста и т. д. Все эти возможности доступны и при анализе электрических схем. Вызов Simulink LTI-Viewer для анализа электрической схемы выполняется из среды Powergui с помощью кнопки **Use LTI Viewer**. При запуске LTI-Viewer пользователю предоставляется возможность указать входные (System inputs) и выходные переменные (System outputs) для выполнения анализа (рис. 4.6).

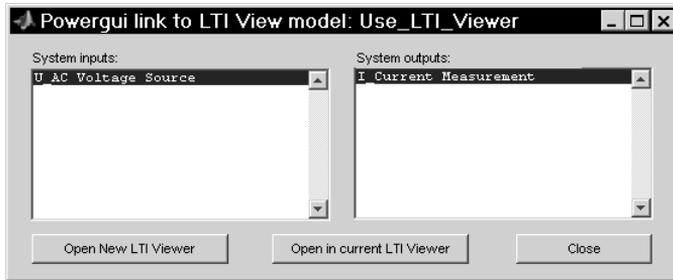


Рис. 4.6. Окно выбора входных и выходных переменных

Для просмотра результатов линейного анализа необходимо нажать кнопку **Open new LTI Viewer** и выбрать вид графика в окне **LTI Viewer**.

*Пример:*

На рис. 4.7 показаны пример электрической схемы и результаты ее анализа. На графиках представлены графики изменения амплитуды и фазы тока источника питания при изменении его частоты.

## 4.6. Определение импеданса цепи

Для проведения расчета полного сопротивления электрической цепи на схеме модели должен быть установлен блок Impedance Measurements. Электрическая цепь обязательно должна быть замкнута. Если же требуется измерить импеданс отдельного (разомкнутого) участка цепи, то его следует шунтировать резистором с достаточно большим сопротивлением, не изменяющим существенно общее сопротивление цепи. Для просмотра результатов необходимо нажать кнопку **Impedance vs Frequency Measurements**. После чего будет открыто окно **Powergui Impedance Measurement**.

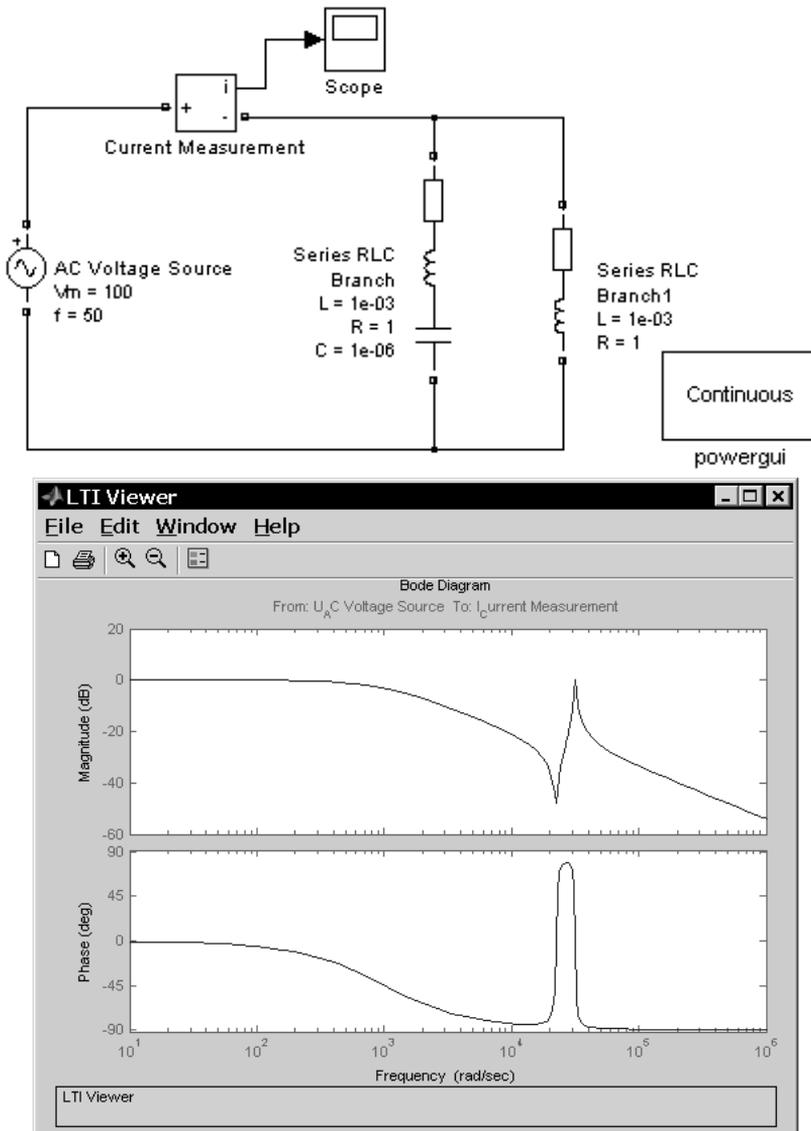


Рис. 4.7. Анализ электрической схемы с помощью Simulink LTI-Viewer

Для отображения результатов возможно использование следующих настроек:  
**Axis:**

- [Оси]. Настройка свойств осей графиков;
- Logarithmic Impedance – логарифмическая шкала импеданса;
- Linear Impedance – линейная шкала импеданса;

- Logarithmic Frequency – логарифмическая шкала частоты;
- Linear Frequency – линейная шкала частоты.

**Range (Hz):**

[Частота (Гц)]. Диапазон по частоте для расчета импеданса. Параметр задается в виде вектора. При использовании логарифмической шкалы частоты удобно задать диапазон с помощью функции **logspace**.

**Grid:**

[Сетка]. Нанесение масштабной сетки на графики.

**Save data to workspace:**

[Запись данных в рабочую область MATLAB]. При установленном флажке выполняется запись результатов в область MATLAB.

**Variable name:**

[Имя переменной]. Имя переменной для записи результатов в рабочей области MATLAB. Данные будут сохранены в виде матрицы, первый столбец которой – частота, а второй – значение импеданса (комплексное число).

*Пример:*

На рис. 4.8 показана схема для измерения полного сопротивления цепи. Изменяемая цепь зашунтирована резистором сопротивлением 1 МОм. Результаты расчета полного сопротивления участка исследуемой цепи в функции частоты показаны там же.

## 4.7. Гармонический анализ

Для проведения гармонического анализа необходимо предусмотреть вывод исследуемых сигналов в рабочую область MATLAB. Это можно выполнить путем соответствующей настройки осциллографа Scope или с помощью блока To Workspace. Формат выводимых данных должен быть задан как Structure With Time (структура с полем «время»). После того как процесс расчета модели завершен, необходимо открыть окно блока **Powergui** и нажать кнопку **FFT Analysis** – быстрое преобразование Фурье (БПФ). После этого откроется окно **Powergui FFT Tools**, в котором необходимо нажать кнопку **Display** для отображения результатов. Настройка процедуры гармонического анализа выполняется с помощью параметров, задаваемых в окне **Powergui FFT Tools**:

**Structure:**

[Структура]. Имя переменной, содержащей исследуемые данные.

**Input:**

[Вход]. Метка входного сигнала (параметр Signal name линии связи).

**Signal number:**

[Номер сигнала].

**Start time (s):**

[Начальное время (с)]. Время начала временного интервала, для которого проводится гармонический анализ.

**Number of cycles:**

[Число периодов]. Число периодов исследуемого сигнала, для которого выполняется анализ.

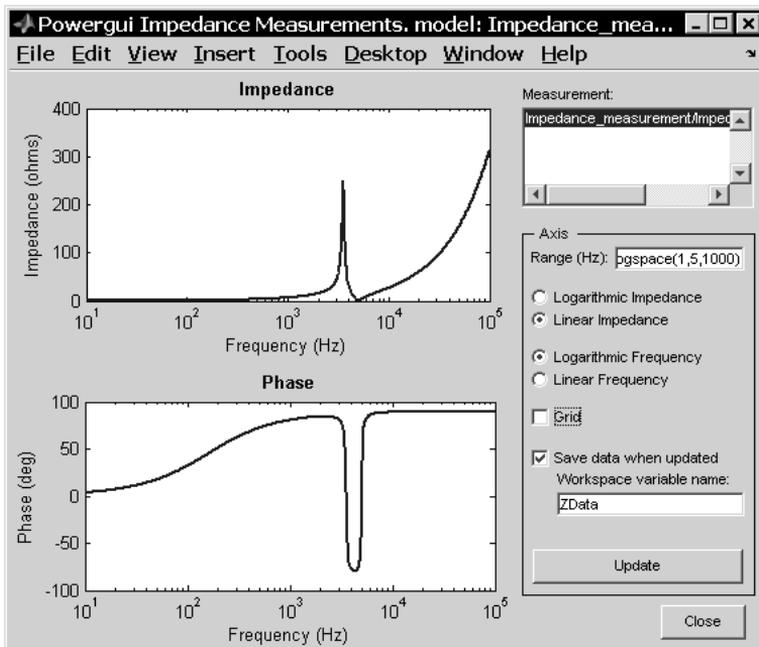
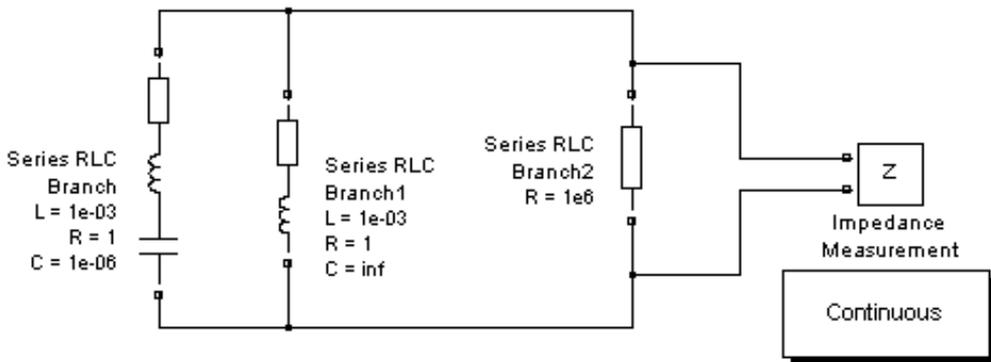


Рис. 4.8. Расчет импеданса электрической цепи

### Display FFT window:

[Показывать окно БПФ]. Показывать сигнал на временном интервале, для которого выполняется гармонический анализ. Если выбран данный параметр, то на верхнем графике окна будет отображаться входной сигнал только для заданного временного интервала.

### Display entire signal:

[Показывать весь сигнал]. При выборе данного параметра на верхнем графике окна будет показан входной сигнал для всего рассчитанного интервала.

**Fundamental frequency (Hz):**

[Базовая частота]. Частота первой гармоники исследуемого сигнала.

**Max frequency (Hz):**

[Максимальная частота]. Частота наивысшей гармоники, до которой необходимо выполнить расчет.

**Frequency axis:**

[Ось частот]. Градуировка оси частот:

- Hertz – по горизонтальной оси откладывается частота гармоник в Гц;
- Harmonic order – по горизонтальной оси откладываются номера гармоник.

**Display style:**

[Стиль отображения]. Параметр задает способ отображения результатов:

- Bar (relative to Fund. or DC) – гистограмма (в % относительно первой или нулевой гармоник);
- List (relative to Fund. or DC) – список (в % относительно первой или нулевой гармоник);
- Bar (relative to specified base) – гистограмма (в о.е. по отношению к заданному базовому значению);
- List (relative to specified base) – список (в о.е. по отношению к заданному базовому значению).

**Base value:**

[Базовое значение].

*Пример:*

На рис. 4.9 приведены схема трехфазного мостового выпрямителя и окно инструмента гармонического анализа. На верхнем графике рисунка показано выходное напряжение выпрямителя, а на нижнем – гистограмма амплитуд гармоник.

## 4.8. Создание отчета

Блок Powergui может создавать отчет, включающий в себя значения измеряемых переменных в установленном режиме, токов и напряжений источников, нелинейных моделей и переменных состояния схемы. Отчет сохраняется в текстовом файле с расширением *rep*. Для создания отчета необходимо нажать кнопку **Create report** в окне блока **Powergui**. После чего появится окно **Generate report** (рис. 4.10), в котором можно задать разделы, включаемые в отчет.

При настройке содержания отчета можно изменять следующие параметры:

**Items to include in the report:**

[Разделы, включаемые в отчет]. В отчет можно включить следующие разделы:

- Steady-State – значения измеряемых переменных в установленном режиме;
- Initial states – начальные значения переменных;
- Machine load flow – параметры нагрузки электрических машин.

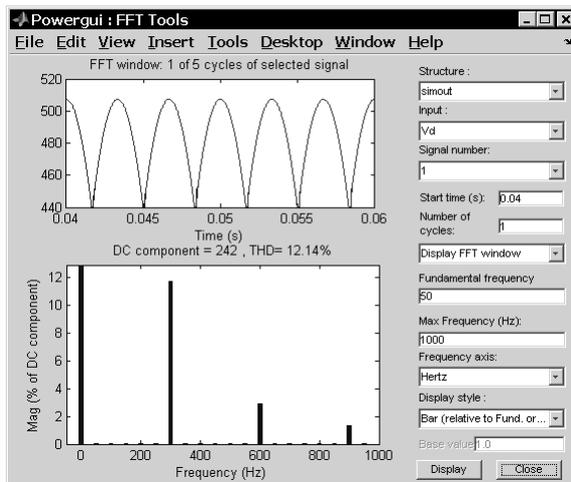
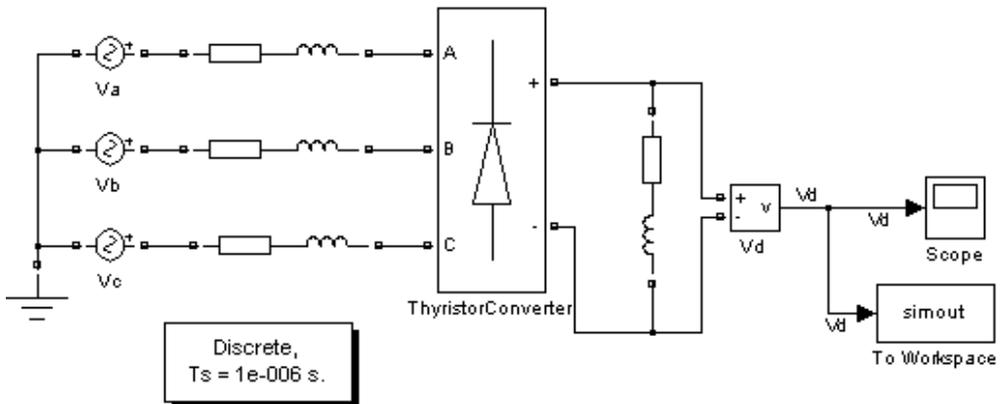


Рис. 4.9. Определение гармонического состава напряжения выпрямителя

### Frequency used in the report:

[Частота, используемая в отчете]. С помощью параметра можно выбрать значения частот, для которых будут сохраняться данные.

### Units:

[Система измерения]. Выбор системы измерения:

- Peak values – амплитудные значения;
- RMS values – действующие значения.

### Format:

[Формат чисел].

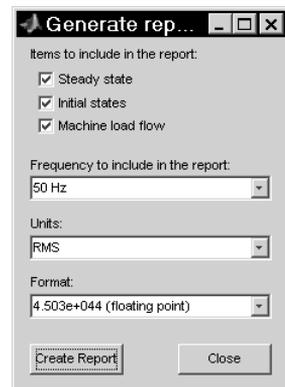


Рис. 4.10. Окно настройки отчета

*Пример:*

Ниже приведен отчет для схемы рис. 4.3. В отчет включены все разделы. Значения переменных выводятся как действующие значения.

```
SimPowerSystems Report.  
generated by powergui,  
11-Jan-2007 14:37:45
```

```
Model : C:\Users\Mlab_7\Work\steady_state_simulation.mdl.
```

```
[1] Steady-State voltages and currents:
```

```
States at 50 Hz :
```

```
I1_Series RLC Load = 2.8289e+000 Arms -72.34°
```

```
Measurements at 50 Hz :
```

```
Current Measurement = 2.8289e+000 A rms -72.34°
```

```
Sources at 50 Hz :
```

```
AC Voltage Source1 = 7.0711e+001 V rms 0.00°
```

```
Nonlinear elements at 50 Hz :
```

```
[2] Initial values of States Variables:
```

```
1: (I1) Series RLC Load = -3.8122e+000 A
```

```
[3] Machine Load Flow solution:
```

```
There is no machine block in the model
```

## 4.9. Инструмент расчета характеристики намагничивания

Инструмент позволяет создать mat-файл с данными кривой намагничивания. Файл может быть использован при моделировании электрических машин и трансформаторов.

Для запуска инструмента необходимо нажать кнопку **Hysteresis Design Tool** в окне **Powergui**. В открывшемся окне (рис. 4.11) необходимо задать следующие параметры:

**Segments:**

[Участки]. Число линейных участков, аппроксимирующих кривую намагничивания.

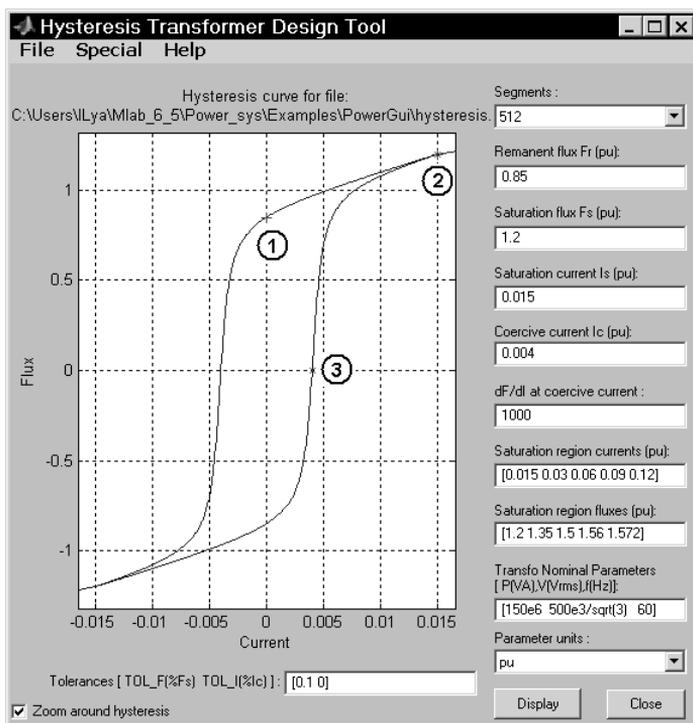


Рис. 4.11. Окно инструмента расчета характеристики намагничивания

**Remanent flux  $F_r$  (pu):**

[Остаточный магнитный поток  $F_r$  (о.е.)]. Значение потока в точке 1 на графике (рис. 4.11).

**Saturation Flux  $F_s$  (pu):**

[Поток насыщения  $F_s$  (о.е.)]. Значение потока в точке 2 на графике.

**Saturation current  $I_s$  (pu):**

[Ток насыщения (о.е.)]. Значение тока в точке 2 на графике.

**Coercive current  $I_c$  (pu):**

[Размагничивающий ток (о.е.)]. Значение тока в точке 3 на графике.

**$dF/dI$  at coercive current:**

[Коэффициент  $dF/dI$  для значения размагничивающего тока]. Коэффициент наклона кривой для значения размагничивающего тока.

**Saturation region currents (pu):**

[Значения токов (о.е.)]. Вектор значений токов для участка насыщения. Число элементов в векторе должно быть равно размерности вектора параметра Saturation region fluxes. Требуется задать только положительную ветвь характеристики.

**Saturation region fluxes (pu):**

[Значения потоков (о.е.)]. Вектор значений потоков для участка насыщения. Число элементов в векторе должно быть равно размерности вектора параметра Saturation region currents. Требуется задать только положительную ветвь характеристики.

**Transfo Nominal Parameters [P (VA), V (Vrms), f (Hz)]:**

[Номинальные параметры преобразования [P (ВА), V (В), f (Гц)]. Данные значения используются для перехода к системе абсолютных единиц, если кривая гистерезиса задана в относительных единицах.

**Parameter units:**

[Система единиц измерения]. Значение выбирается из списка:

- pu – система относительных единиц;
- SI – международная система СИ.

**Zoom around hysteresis:**

[Увеличить область гистерезиса]. При установленном флажке на графике отображается только область гистерезиса, в противном случае – вся характеристика.

**Tolerances [TOL\_F (% Fs) TOL\_I (% Ic)]:**

[Погрешности расчета потока (в % от Fs) и тока (в % от Ic)]. Параметр доступен, если предварительно была выполнена команда **Tools** ⇒ **Tolerances** из меню **Special**.

Для записи кривой намагничивания необходимо воспользоваться командой **Save this model** меню **File**. Значения кривой можно сохранить также и в текстовом файле с помощью команды **Special** ⇒ **EMTP** ⇒ **Save in EMTP format**.

## 4.10. Расчет параметров линии электропередачи

Инструмент Compute RLC Line Parameters обеспечивает вычисление параметров моделей линий электропередачи на основании характеристик проводов и геометрических размеров линии (рис. 4.12).

Окно инструмента показано на рис. 4.13.

Для расчета параметров ЛЭП необходимо ввести следующие данные:

**Units:**

[Система единиц]. Возможен выбор одной из двух систем счисления:

- metric – геометрические размеры задаются в метрах;
- english – геометрические размеры провода (фазы) задаются в дюймах, а размеры, определяющие расположение провода (фазы), – в футах.

**Frequency (Hz):**

[Частота]. Частота (Гц), для которой будут рассчитываться параметры.

**Ground resistivity (Ohm·m):**

[Сопротивление земли (Ом·м)]. Удельное сопротивление земли (Ом·м). Параметр может иметь значение, равное 0.

**Number of phase conductors (bundles):**

[Количество фазных проводов (расщепленных фаз)].

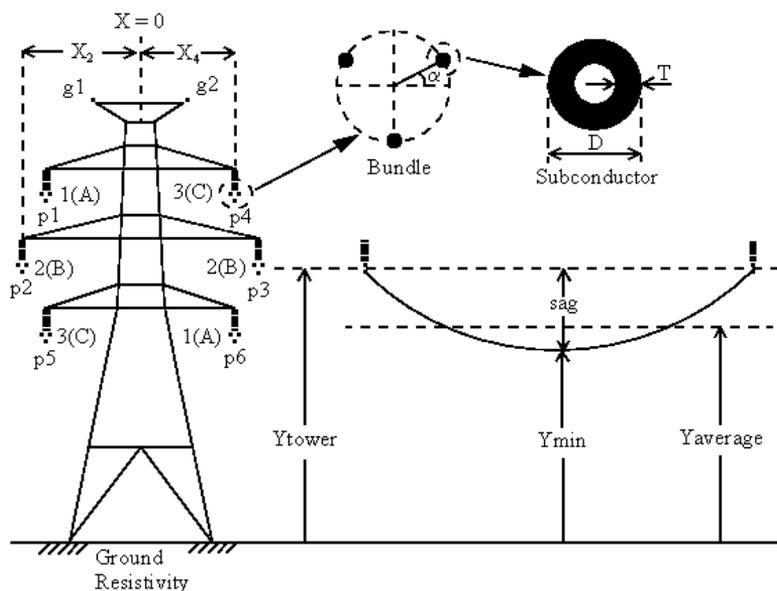


Рис. 4.12. Расчетная модель ЛЭП

Power\_lineparam. Line Data of DefaultLineParameters.mat

Units:

Frequency (Hz):

Ground resistivity (ohm.m):

Comments:  
 Example of a 735-kV three-phase line.  
 Three bundles of 4 Berstorf ACSR 1355 MCM conductors ; two 1/2 inch-diameter steel ground wires.  
 Ytower and Ymin are the average heights of conductors.

Line Geometry

Number of phase conductors (bundles):

Number of ground wires (bundles):

| Conductor (bundle) | Phase number | X (m)    | Y tower (m) | Y min (m) | Conductor (bundle) type |
|--------------------|--------------|----------|-------------|-----------|-------------------------|
| p 1                | 1            | -12.8016 | 20.7265     | 20.7265   | 1                       |
| p 2                | 2            | 0        | 20.7265     | 20.7265   | 1                       |
| p 3                | 3            | 12.8016  | 20.7265     | 20.7265   | 1                       |
| g 1                | 0            | -8.99163 | 32.9185     | 32.9185   | 2                       |
| g 2                | 0            | 8.99163  | 32.9185     | 32.9185   | 2                       |

Conductor and Bundle Characteristics

Number of conductor types or bundle types:

Conductor internal inductance evaluated from:

Include conductor skin effect

| Conductor (bundle) type | Conductor outside diameter (cm) | Conductor T/D ratio | Conductor GMR (cm) | Conductor DC resistance (Ohm/km) | Conductor relative permeability | Number of conductors per bundle | Bundle diameter (cm) | Angle of conductor 1 (degrees) |
|-------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| 1                       | 3.556                           | 0.375               | 1.4274             | 0.0430486                        | 1                               | 4                               | 64.6582              | 45                             |
| 2                       | 1.27                            | 0.5                 | 0.49454            | 3.10686                          | 1                               | 1                               | 0                    | 0                              |

Buttons: Load, Save, Compute RLC line parameters, Help, Close

Рис. 4.13. Окно инструмена Compute RLC Line Parameters

**Number of ground wires:**

[Количество заземленных проводов]. Параметр задает число грозозащитных тросов ЛЭП.

**Conductor (bundle):**

[Обозначение провода (расщепленная фаза)]. Фазные проводники обозначаются как p1, p2, p3 и т. д. Грозозащитные тросы – как g1, g2 и т. д.

**Phase number:**

[Номер фазы]. Фазы нумеруются 1, 2, 3 и т. д. Грозозащитные тросы имеют номер 0.

**X (m):**

[Расстояние X (м)]. Горизонтальное положение проводника (см. рис. 4.12).

**Ytower (m):**

[Расстояние Ytower (м)]. Расстояние от точки крепления проводника до земли (см. рис. 4.12).

**Y min (m):**

[Расстояние Y min (м)]. Минимальное расстояние от проводника до земли (см. рис. 4.12).

**Conductor (bundle) type:**

[Тип проводника (фазы)]. Номер типа проводника для данной фазы. Количество типов проводников и их параметры задаются в панели **Conductor and Bundle Characterisc**, которая расположена в нижней части окна.

**Number of conductor types or bundle types:**

[Количество типов проводов или расщепленных фаз]. Параметр задает количество типов фазных проводов (включая расщепленные фазы).

**Include conductor skin effect:**

[Учитывать скин-эффект]. При установке флажка учитывается эффект вытеснения тока на поверхность проводника.

**Conductor internal inductance evaluated from:**

[Вычислять собственную индуктивность исходя из]. Параметр определяет набор исходных данных, по которым рассчитывается собственная индуктивность провода. Параметр может иметь следующие значения:

- T/D ratio – отношение T/D для полого проводника, где T – толщина проводника и D – наружный диаметр. Этот параметр может измениться между 0 и 0,5. Значение 0,5 задает сплошную жилу;
- Geometric Mean Radius (GMR) – средний геометрический радиус. Величина параметра обычно предоставляется производителем провода;
- Reactance Xa at 1-foot spacing (or 1-meter spacing if the Units parameter is set to metric) – реактивное сопротивление проводника на единицу длины (1 м или 1 фут, в зависимости от выбранной системы единиц).

**Conductor outside diameter (cm):**

[Внешний диаметр проводника (см)].

**Conductor DC resistance (Ohm/km):**

[Удельное активное сопротивление проводника (Ом/км)]. Удельное активное сопротивление проводника на единицу длины.

**Conductor relative permeability:**

[Относительная магнитная проницаемость проводника].

**Number of conductors per bundle:**

[Количество проводников в расщепленной фазе].

**Bundle diameter (cm):**

[Диаметр расщепленного проводника (см)]. В случае если в фазе только один проводник, значение параметра равно 0.

**Angle of conductor 1 (degrees):**

[Угол проводника № 1 (град)]. Угол  $\alpha$  расположения первого проводника в расщепленной фазе относительно линии, параллельной земле (см. рис. 4.12). Параметр определяет ориентацию проводников в расщепленной фазе. В случае если в фазе только один проводник, значение параметра равно 0.

Для вычисления параметров линии необходимо нажать кнопку **Compute RLC Line Parameters** в нижней части окна. Результаты расчета будут выведены в отдельное окно (рис. 4.14.).

Полученные результаты можно передать в блок модели линии кнопкой **Selected block** (предварительно блок должен быть выделен), сохранить в Workspace (кнопка **Send RLC parameters to workspace**) или поместить в отчет (кнопка **Create a report**).

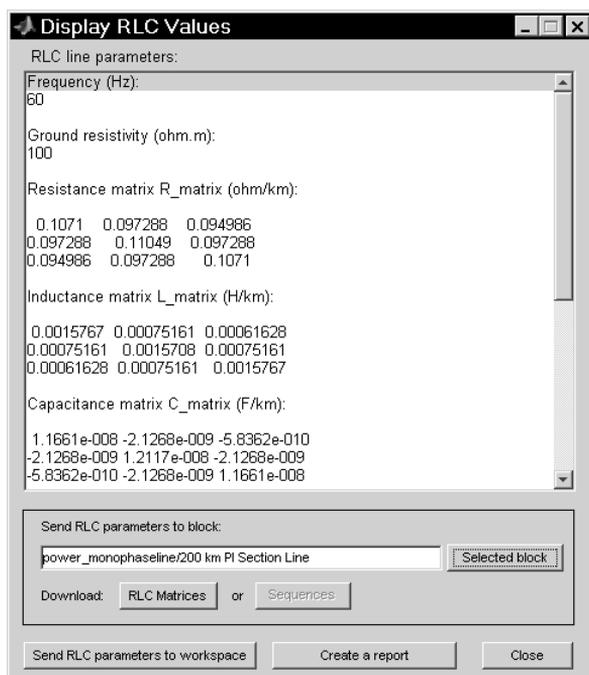


Рис. 4.14. Окно результатов расчета параметров ЛЭП

# Создание электротехнических блоков пользователя

|  |     |
|--|-----|
| 5.1. Принцип создания<br>электротехнических блоков<br>пользователя .....   | 239 |
| 5.2. Модель нелинейного резистора .....                                    | 240 |
| 5.3. Модель насыщающегося реактора ....                                    | 241 |
| 5.4. Модель двигателя постоянного тока<br>с независимым возбуждением ..... | 243 |

## 5.1. Принцип создания электротехнических блоков пользователя

Библиотека блоков SimPowerSystems достаточно обширна, однако иногда требуемая пользователю модель устройства может в ней отсутствовать. Это касается, например, нелинейных резисторов, насыщающихся реакторов, новых типов электродвигателей и т. п. В этом случае пользователь может сам создать нужную модель на основе блоков Simulink и блоков SPS. Общая структура модели показана на рис. 5.1.

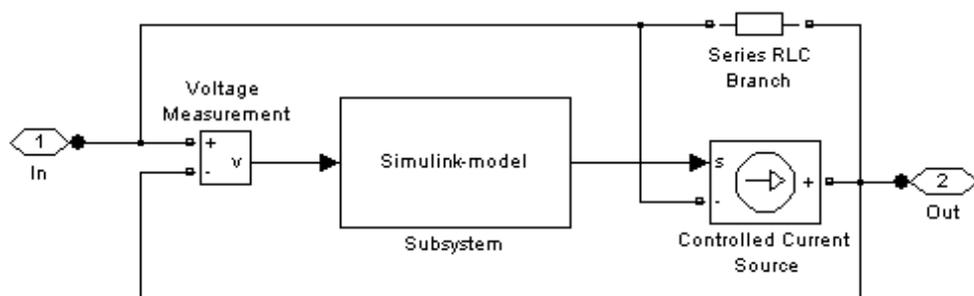


Рис. 5.1. Общая структура модели

На схеме к управляемому источнику тока параллельно подключен измеритель напряжения. Между выходом измерителя напряжения и входом источника тока включена Simulink-модель, реализующая нужную вольт-амперную характеристику устройства. Параллельно источнику также подключен развязывающий резистор. Его наличие обусловлено тем, что большое число блоков SPS выполнено на базе источников тока. При последовательном соединении таких блоков источники тока оказываются включенными последовательно, что недопустимо. Наличие же развязывающего резистора позволяет включать такие блоки последовательно. Величина сопротивления резистора должна выбираться достаточно большой, чтобы его влияние на характеристики создаваемого блока было минимально (обычно его величина для силовых электротехнических блоков выбирается в пределах 500–1000 Ом). Зажимами блока являются входной и выходной порты. Таким образом, для создания электротехнического блока пользователь прежде всего должен создать обычную Simulink-модель, входом которой является сигнал, пропорциональный напряжению на зажимах устройства, а выходом – сигнал, пропорциональный току устройства, а затем использовать эту модель в схеме, представленной на рис. 5.1. При создании многофазных устройств, как правило, требуется создать модели отдельных фаз, а затем уже включить их по нужной схеме.

## 5.2. Модель нелинейного резистора

Пусть вольт-амперная характеристика нелинейного резистора задана выражением:

$$i = I_0 \left( \frac{u}{U_0} \right)^\alpha,$$

где  $i$  и  $u$  – мгновенные значения тока и напряжения;  $U_0$  – пороговое значение напряжения;  $I_0$  – величина тока устройства при значении напряжения, равном пороговому;  $\alpha$  – показатель степени, определяющий нелинейность вольт-амперной характеристики резистора (обычно лежит в пределах от 0 до 50).

Схема блока нелинейного резистора показана на рис. 5.2. Модель Simulink резистора реализована с помощью блока Fcn. Численные значения параметров приняты следующими:

$$U_0 = 110 \text{ КВ};$$

$$I_0 = 500 \text{ А};$$

$$\alpha = 25.$$

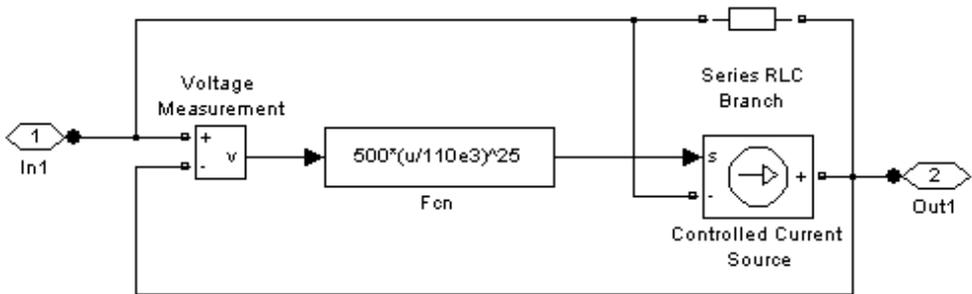


Рис. 5.2. Схема блока нелинейного резистора

Схема всей модели и диаграммы ее работы показаны на рис. 5.3.

На схеме показаны датчики тока и напряжения, снимающие сигналы, пропорциональные этим переменным. Графопостроитель XY-Graph по этим сигналам строит вольт-амперную характеристику резистора. Временные диаграммы тока и напряжения также иллюстрируют нелинейность характеристики резистора.

Некоторым недостатком такой модели резистора является наличие безынерционного замкнутого контура, образованного датчиком напряжения, блоком Fcn и управляемым источником тока (рис. 5.2). Simulink выполняет расчет таких моделей, используя итерационную процедуру, что несколько снижает скорость расчета. Также при наличии замкнутых алгебраических контуров становится невозможным расчет модели в ускоренном режиме (Acceleration mode). Для того чтобы разорвать безынерционный контур, достаточно включить в линию между датчиком напряжения и источником тока фильтр с малой постоянной времени. Величина постоянной времени должна выбираться таким образом, чтобы изменение динамических свойств модели было минимальным (обычно величина постоянной

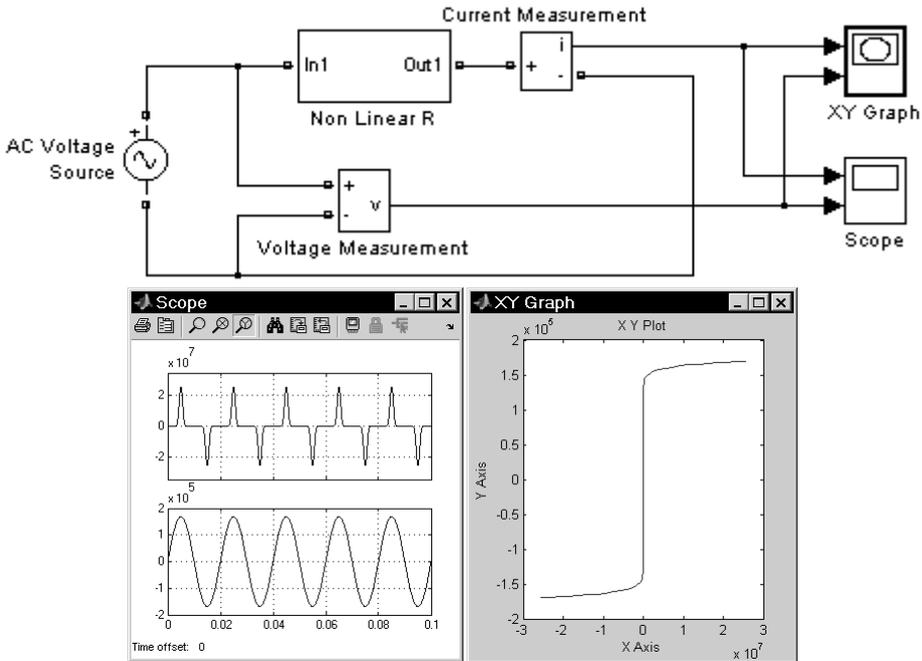


Рис. 5.3. Схема модели с нелинейным резистором

времени фильтра выбирается в пределах от  $10^{-8}$  до  $10^{-6}$  с). Схема модели нелинейного резистора с использованием фильтра показана на рис. 5.4.

Временные диаграммы работы такой модели практически ничем не отличаются от представленных на рис. 5.3.

### 5.3. Модель насыщающегося реактора

Методика создания модели нелинейной индуктивности ничем не отличается от аналогичной методики для нелинейного резистора.

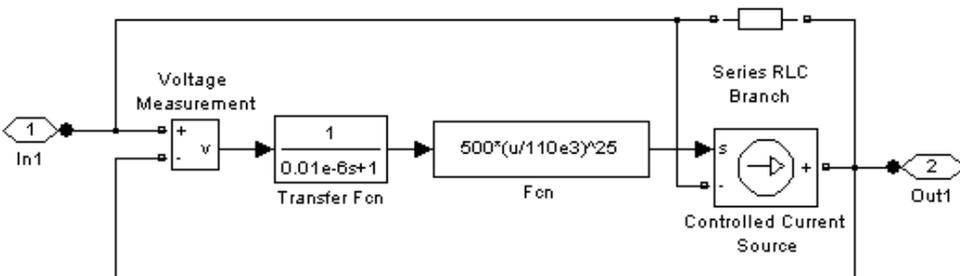


Рис. 5.4. Схема модели нелинейного резистора с использованием фильтра

Уравнения, описывающие насыщающийся реактор, выглядят следующим образом:

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt},$$

$$i = a\psi + b\psi^3,$$

где  $i$ ,  $u$ ,  $\psi$  – мгновенные значения тока, напряжения и потокосцепления;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты нелинейной зависимости между потокосцеплением и током.

Первое из уравнений есть дифференциальное уравнение для напряжения на реакторе, а второе – алгебраическая зависимость между потокосцеплением и током реактора. Последнее уравнение может быть и другим, в зависимости от требований к точности аппроксимации нелинейности реактора.

Для создания Simulink-модели реактора требуется сначала перейти к операторной форме записи дифференциального уравнения для напряжения реактора (при нулевых начальных условиях):

$$u(p) = Ri(p) + p\psi(p),$$

а затем получить передаточную функцию (ПФ), связывающую потокосцепление и напряжение:

$$\psi(p) = [u(p) - Ri(p)] \frac{1}{p}.$$

Полученная передаточная функция и нелинейная зависимость между током и потокосцеплением дают возможность создать Simulink-модель реактора. Схема Simulink-модели показана на рис. 5.5.

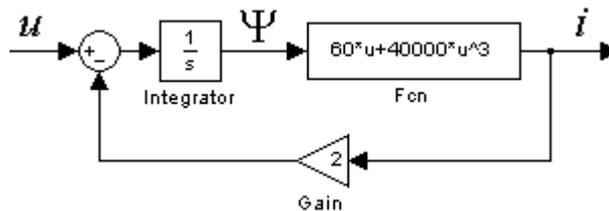


Рис. 5.5. Simulink-модель насыщающегося реактора

На схеме величина активного сопротивления реактора принята равной 2 Ом, а коэффициенты  $a = 60$  и  $b = 40\,000$ . Далее, используя шаблон SPS-модели (рис. 5.1), нетрудно создать модель насыщающегося реактора полностью. Схема всей модели, SPS-модель реактора и временные диаграммы работы модели показаны на рис. 5.6.

Несинусоидальный характер тока реактора иллюстрирует нелинейные свойства реактора.

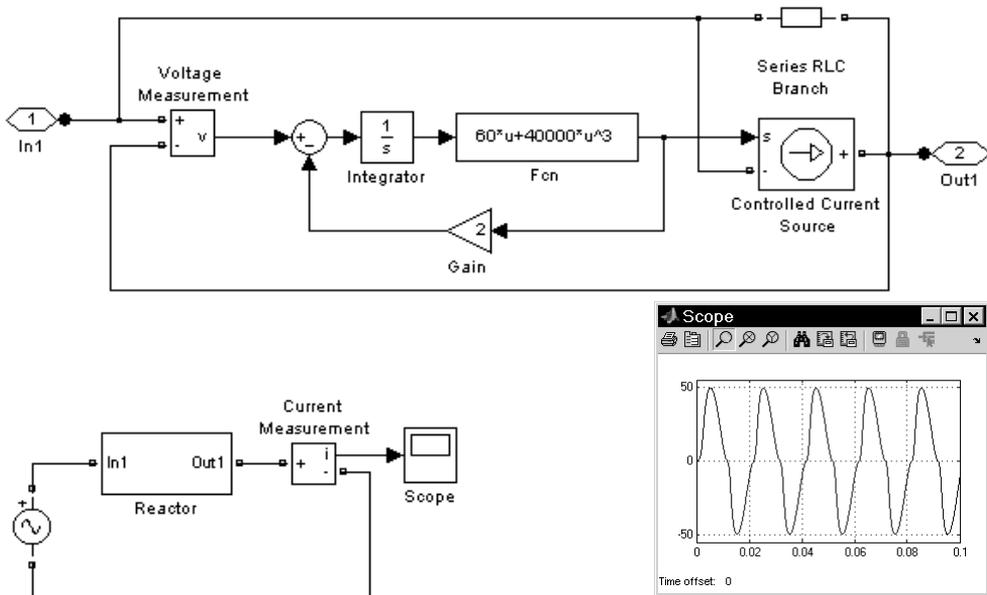


Рис. 5.6. SPS-модель насыщающегося реактора

## 5.4. Модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

### 5.4.1. Математическое описание ДПТ НВ и его Simulink-модель

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения (рис. 5.7) описывается следующей системой дифференциальных и алгебраических уравнений в абсолютных единицах:

$$u = e + R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}, \tag{1}$$

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \tag{2}$$

$$M = C_M \times \Phi \times i, \tag{3}$$

$$e = C_\omega \times \Phi \times \omega, \tag{4}$$

где  $u$  – напряжение на якорной обмотке двигателя;  $e$  – электродвижущая сила (ЭДС) якоря;  $i$  – ток якоря;  $\Phi$  – поток, создаваемый обмоткой возбуждения;  $M$  – электромагнитный момент двигателя;  $M_C$  – момент сопротивления движению;  $\omega$  – угловая частота вращения вала двигателя;  $R$  – активное сопротивление якор-

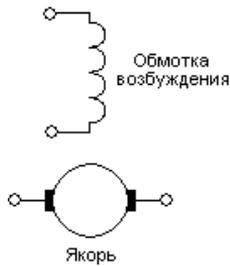


Рис. 5.7. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

ной цепи;  $L$  – индуктивность якорной цепи;  $J$  – суммарный момент инерции якоря и нагрузки;  $C_\omega$  – коэффициент связи между угловой частотой вращения и ЭДС;  $C_M$  – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом.

С точки зрения будущей модели входными воздействиями являются напряжения якоря  $u$  и момент сопротивления движению  $M_c$ , выходными переменными – электромагнитный момент двигателя  $M$  и угловая частота вращения вала двигателя  $\omega$ , а переменными состояниями – переменные, стоящие под знаком производной (ток якоря  $i$  и угловая частота вращения вала двигателя  $\omega$ ). Остальные переменные, входящие в состав уравнений (1)–(4), являются параметрами, численные значения которых необходимо будет задавать при проведении расчетов.

Для создания модели, так же как и в случае насыщающегося реактора, сначала необходимо получить передаточные функции, применив к дифференциальным уравнениям преобразование Лапласа для нулевых начальных условий. Дифференциальное уравнение (1) даст ПФ, связывающую ток якоря и падение напряжения на якоре:

$$i(p) = [u(p) - e(p)] \frac{1}{R + Lp}. \quad (5)$$

Уравнение (2) дает передаточную функцию, связывающую динамический момент и угловую частоту вращения вала двигателя:

$$\omega(p) = [M(p) - M_c(p)] \frac{1}{Jp}. \quad (6)$$

Уравнения (3) и (4) остаются без изменений.

В итоге, используя уравнения (3)–(6), нетрудно составить Simulink-модель двигателя. Схема модели, а также графики электромагнитного момента и частоты вращения при прямом пуске двигателя показаны на рис. 5.8. В примере приняты следующие значения параметров двигателя (в единицах СИ):  $L = 0,001$ ,  $R = 0,1$ ,  $J = 10$ ,  $C_M = 10$ ,  $C_\omega = 10$ ,  $U = 220$ ,  $F_i = 1$ . Наброс нагрузки производится в момент времени 0,2 с, величина момента нагрузки равна 2500 Нм.

### 5.4.2. Модель двигателя на базе источника тока

Для создания SPS-модели двигателя на базе управляемого источника тока также можно воспользоваться общей схемой, приведенной на рис. 5.1. Выход датчика напряжения должен быть подключен к первому входу сумматора, а на управляющий вход источника тока должен быть подан сигнал, пропорциональный току

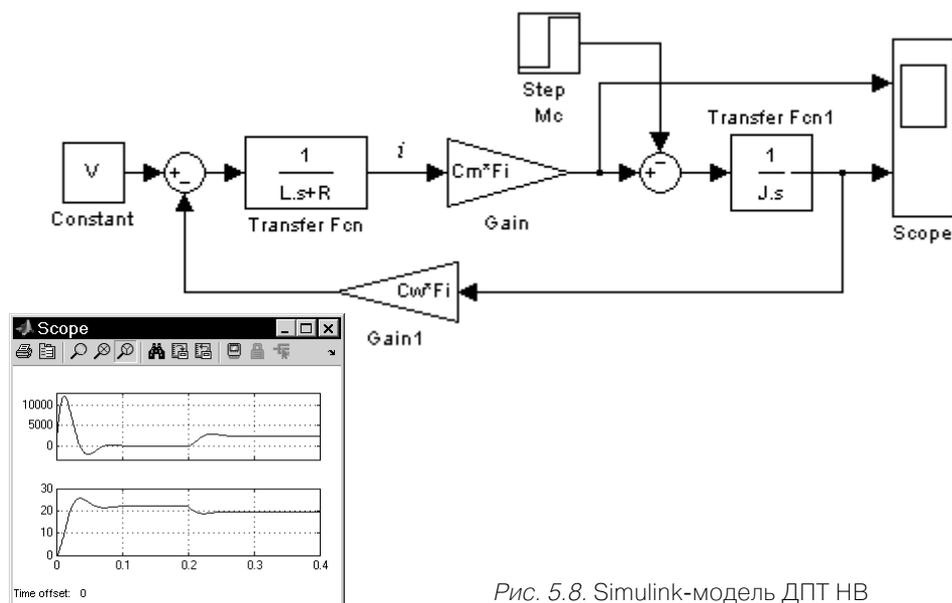


Рис. 5.8. Simulink-модель ДПТ НВ

якоря двигателя (выходной сигнал блока Transfer Fcn на рис. 5.8). Схема блока SPS-модели двигателя, полная схема модели, а также графики тока якоря и угловой частоты вращения вала показаны на рис. 5.9.

При работе с моделью двигателя следует иметь в виду, что она не является электротехнической в чистом виде, поскольку выходные сигналы электромагнитного момента и частоты вращения являются обычными однонаправленными безразмерными сигналами Simulink. Графики переменных, представленные на рис. 5.9, полностью повторяют соответствующие графики обычной Simulink-модели двигателя, показанные на рис. 5.8.

### 5.4.3. Модель двигателя на базе источника напряжения

Модель двигателя постоянного тока можно создать также и на базе управляемого источника напряжения и датчика тока. Схема замещения цепи якоря двигателя содержит источник ЭДС, индуктивность и резистор. Последние два элемента можно исключить из Simulink-модели, исключив соответственно и уравнение (1), а также передаточную функцию (5). Сами резистор и индуктивность можно добавить к модели с помощью стандартного блока Series RLC Branch. В результате будет получена комбинированная модель двигателя (рис. 5.10). На рис. 5.10 показана также полная схема модели с подключенным источником питания двигателя (DC Voltage Source).

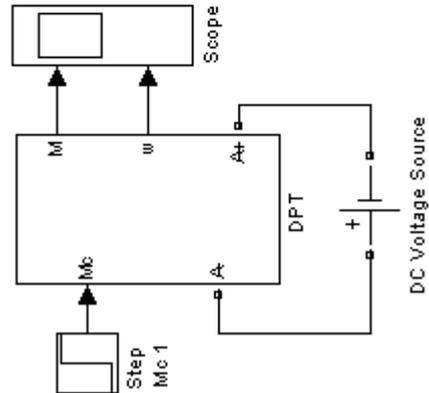
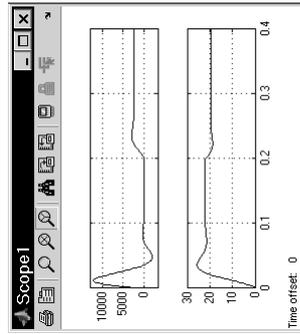
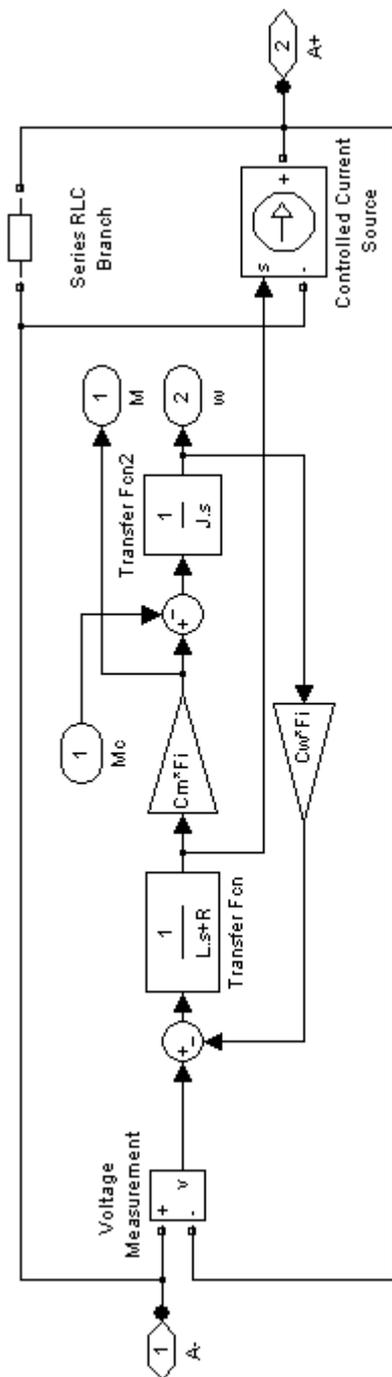


Рис. 5.9. SPS-модель ДПТ НВ на базе источника тока

Графики переменных двигателя на рис. 5.10 не приведены, поскольку они полностью совпадают с представленными на рис. 5.8 и 5.9.

Таким образом, используя изложенную выше методику, пользователь может создавать модели электротехнических устройств различной степени сложности.

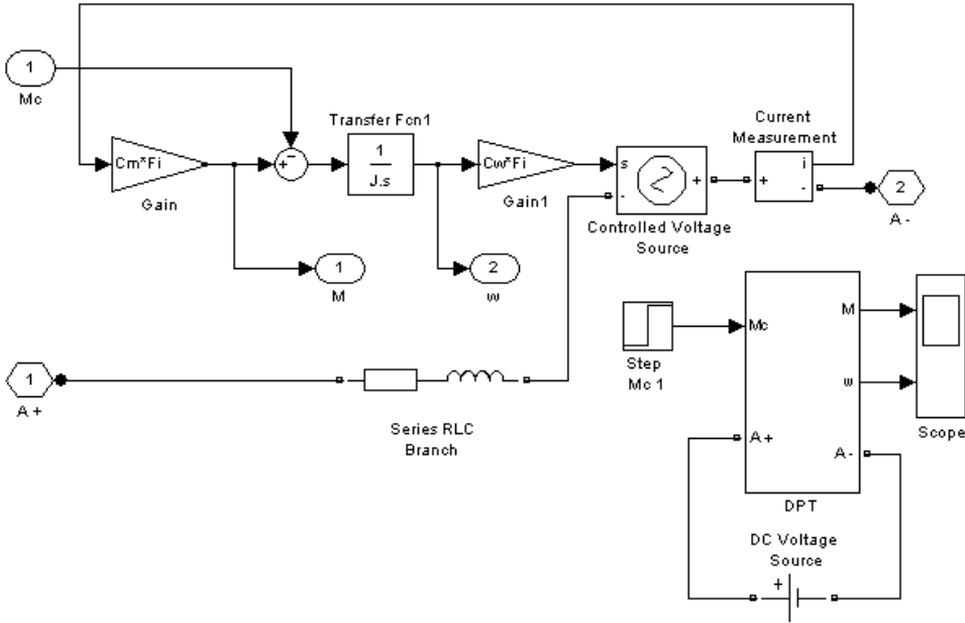


Рис. 5.10. SPS-модель ДПТ НВ на базе источника напряжения

**Библиотека  
нелинейных моделей**

---



Нелинейные модели электротехнических блоков являются обычными Simulink-моделями, имеющими однонаправленные входы и выходы, и используются в процессе составления эквивалентной расчетной модели непосредственно перед началом моделирования (см. главу 8). Электротехнические блоки, представленные в библиотеке SimPowerSystems, как правило, недоступны для просмотра и редактирования их содержимого. Однако доступ к устройству блоков SimPowerSystems все-таки может быть получен. Для этого необходимо открыть библиотеку нелинейных моделей `powerlib_models.mdl` из папки `...toolbox\physmod\powersys\powersys`. Открыть библиотеку также можно и из основного окна MATLAB, набрав в командной строке `powerlib_models`.

Библиотека нелинейных моделей (рис. 6.1) содержит 5 разделов:

- Continuous – непрерывные модели;
- Discrete – дискретные модели;
- Switch Current Source – модели ключей;
- Phasors – модели устройств для расчета векторным методом;
- Sources – модели источников.

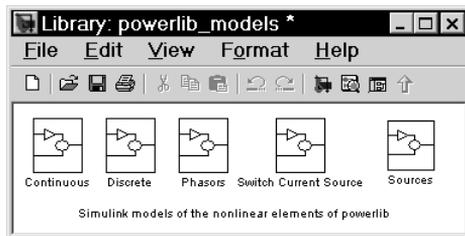


Рис. 6.1. Библиотека нелинейных моделей

Знакомство с библиотекой `powerlib_models` может быть полезно для того, чтобы лучше понять устройство блоков SimPowerSystems и научиться делать их самому. Блоки из библиотеки нелинейных моделей можно использовать и для непосредственного создания пользовательских моделей. Для создания своей модели разработчику необходимо лишь дополнить нелинейную модель источниками тока и датчиками напряжения, как изложено в главе 4, посвященной пользовательским моделям. Для этого каждый блок имеет вход  $v$ , на который нужно подать сигнал, пропорциональный напряжению, и выход  $i$ , подключаемый к источнику тока.

Библиотека непрерывных моделей Continuous (рис. 6.2) содержит два типа блоков:

- схемы для использования в SPS-моделях, созданных на базе источников тока (модели электрических машин, насыщающегося трансформатора, грозозащитного разрядника и линии электропередачи с распределенными параметрами);
- блоки логики переключения полупроводниковых устройств с естественной коммутацией (Breaker, Diode, Thyristor и Universal Bridge).

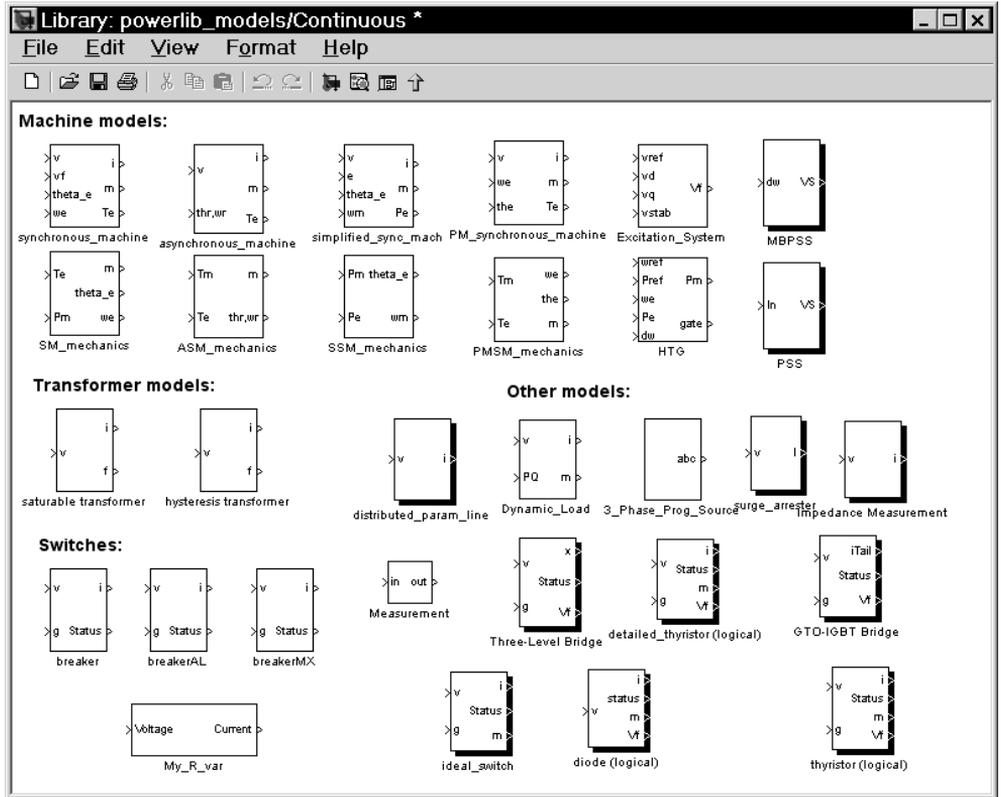


Рис. 6.2. Библиотека непрерывных моделей

Блоки первого типа используют входное напряжение (выход модели пространства-состояния) и выходной ток, который подается на вход модели пространства-состояния. Для сложных моделей типа электрических машин, с несколькими входами и выходами, используются векторные сигналы. Все нужные внутренние сигналы передаются большинством моделей в выходной вектор измерений  $m$ . Например, модель асинхронной машины сохранена в блоке с названием `Asynchronous_Machine`. На вход модели подается вектор, состоящий из четырех напряжений: два напряжения ротора ( $V_{abR}$  и  $V_{bcR}$ ) и два напряжения статора ( $V_{abS}$  и  $V_{bcS}$ ). На выходе модели – вектор из четырех токов: два тока ротора ( $I_{aR}$  и  $I_{bR}$ ) и два тока статора ( $I_{aS}$  и  $I_{bS}$ ). Модель также выдает более 20 измеренных сигналов в выходной вектор  $m$ . Когда в SPS-модели используется блок асинхронной машины, этот вектор выходных измерений доступен через выход  $m$ , отображаемый на пиктограмме машины.

Блоки второго типа содержат только логическую схему переключения устройства. Они определяют статус ключа («открыто» или «закрыто»). Статус ключа передается в S-функцию, которая производит вычисление переменных состояния

модели ключа каждый раз, когда статус ключа изменяется. В выходной вектор  $m$  SPS-модели передаются значения тока и напряжения ключа. На выходе  $i$  блоков вырабатывается значение тока для ключей с принудительной коммутацией (IGBT, GTO и т. п.). Все логические схемы ключей векторизованы, то есть одна и та же схема используется для моделирования всех устройств одного вида.

Дискретная библиотека содержит дискретные варианты блоков библиотеки Continuous.

Библиотека Phasors (рис. 6.3) включает модели электрических машин, ключей и линии электропередачи, предназначенные для расчета схемы векторным методом.

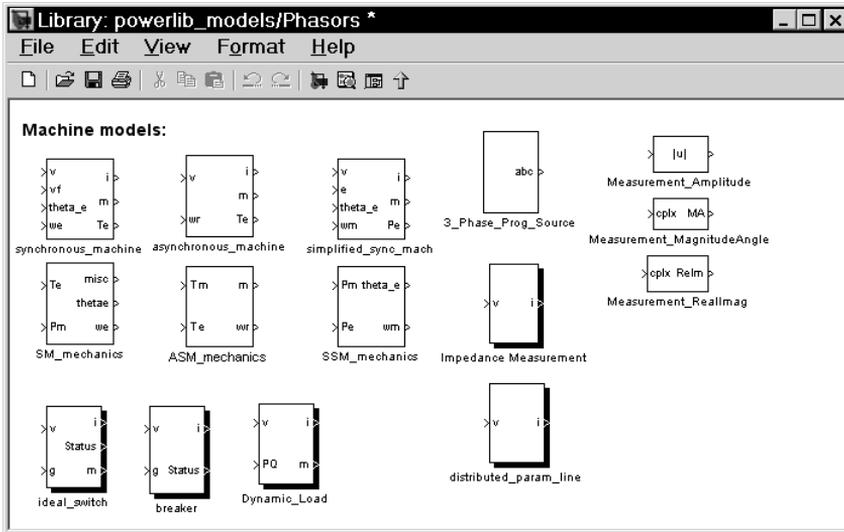


Рис. 6.3. Библиотека моделей для расчета векторным методом

Библиотека Switch Current Source (рис. 6.4) содержит модели силовых электронных устройств, которые смоделированы с использованием источников тока. Эти устройства – диод и тиристор, для которых индуктивность во включенном состоянии  $L_{on} > 0$ , и три устройства с принудительной коммутацией: запираемый тиристор (GTO), каналный полевой униполярный МОП-транзистор (MOSFET) и биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT). Все эти модели непрерывные и содержат внутреннюю индуктивность, которая позволяет осуществлять быстрые переключения преобразователей с принудительной коммутацией. Что касается электрических машин, эти блоки используют входное напряжение (выход модели пространства-состояния) и выходной ток, который подается на вход модели пространства-состояния. Все эти модели векторизованы.

При использовании моделей на базе источников тока следует иметь в виду, что такие модели нельзя включать последовательно с индуктивностью. Для устране-

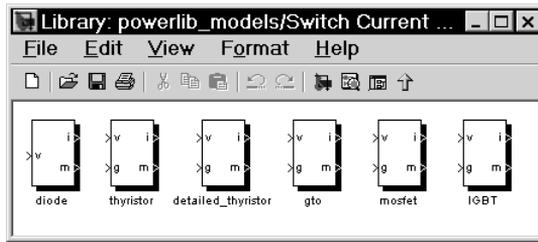


Рис. 6.4. Библиотека моделей ключей

ния этого ограничения следует шунтировать либо индуктивность, либо саму модель резистором с достаточно большим сопротивлением.

Блок выключателя Breaker и блоки силовых электронных ключей имеют встроенную демпфирующую RC-цепь. Демпфирующая цепь может быть и чисто активной при  $C_s = \text{Inf}$  или реактивной при  $R_s = 0$ . Для устранения демпфирующей цепи необходимо задать  $R_s = \text{Inf}$  и  $C_s = 0$ .

Библиотека Sources (рис. 6.5) содержит модели источников.

В состав библиотеки входят Simulink-модели источников постоянного и переменного напряжений для расчета переходных процессов и расчета векторным методом.

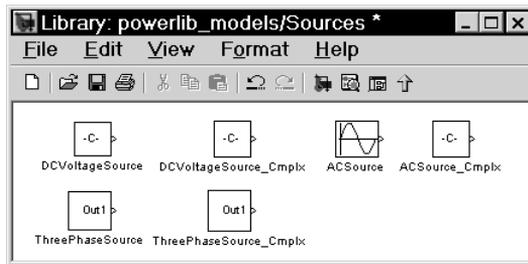


Рис. 6.5. Библиотека источников

Текущая версия SimPowerSystems не позволяет пользователю добавлять блоки в библиотеку powerlib.mdl и, соответственно, в библиотеку нелинейных моделей powerlib\_models.mdl. Однако пользователь может изменять блоки в нелинейной библиотеке. Для этого необходимо файл библиотеки powerlib\_models.mdl скопировать в текущую (рабочую для данного сеанса работы с MATLAB) или иную директорию. Во втором случае необходимо задать путь к данной папке с помощью меню **Set Path** основного окна **MATLAB**. При этом путь к данной папке должен быть определен раньше, чем путь к стандартной папке SimPowerSystems.

После выполнения описанной выше процедуры пользователь может менять содержимое блоков, их названия, номера входов и выходов, а также параметры в окне диалога. Все изменения в библиотеке вступят в действие при следующем сеансе моделирования.

## Основные команды MATLAB для управления SPS-моделью

|   |     |
|---|-----|
| 7.1. Функция инициализации SPS-модели<br>power_init .....   | 254 |
| 7.2. Функция для определения<br>математической модели линейной<br>части электрической схемы<br>power_statespace ..... | 255 |
| 7.3. Функция для анализа модели<br>электрической схемы power_analyze ..   | 258 |
| 7.4. Функция для расчета параметров<br>линии электропередачи<br>power_lineparam .....                                 | 259 |

При разработке графического интерфейса пользователя, создании S-функций и тому подобных задач, требующих управления конфигурацией, параметрами и работой Simulink- и SimPowerSystems-моделей, допускается использовать специальные команды (функции) языка MATLAB. Для работы с SPS-моделью допускается применять те же самые команды, что и для Simulink-моделей (`add_line`, `add_block`, `get_param`, `set_param` и т. д.). При этом следует иметь в виду, что некоторые Simulink-команды будут иметь ограничения. Так, например, команда **set\_param** не позволяет изменять параметры SPS-блоков в процессе расчета как для Simulink-блоков.

Для SPS-моделей есть и свои особенные команды. Их всего три:

- `powerinit` – задание начальных условий SPS-модели;
- `power_statespace` – нахождение математического описания линейной модели электрической цепи в уравнениях пространства состояний;
- `power2sys` – анализ электрической схемы, построенной с помощью SimPowerSystems.

В большинстве случаев пользователю нет необходимости принудительно вызывать эти функции, поскольку они вызываются SimPowerSystems автоматически при начале расчета либо из графической среды пользователя Powergui.

## 7.1. Функция инициализации SPS-модели `power_init`

### *Назначение:*

Задание начальных условий.

### *Синтаксис:*

`power_init('system','look')` – команда выводит начальные значения переменных модели `system`.

`power_init('system','reset')` – команда устанавливает нулевые начальные значения переменных модели `system`.

`power_init('system','steady')` – команда устанавливает начальные значения переменных модели `system` таким образом, чтобы расчет начался из точки установившегося режима.

`power_init('system','set',p)` – команда устанавливает начальные значения переменных модели `system`, заданные в векторе `p`. Порядок следования переменных можно определить командой `powerinit('system','look')`.

`power_init('system','setb','StateVariableName',value)` – команда устанавливает начальное значение `value` переменной `StateVariableName` модели `system`.

### *Пример 1:*

На рис. 7.1 показана модель последовательного колебательного контура, подключенного к источнику постоянного тока. Имя файла модели – `sys.mdl`.

Выполнение команды `powerinit(sys,'look')` в окне **MATLAB** позволяет увидеть начальные значения переменных модели:

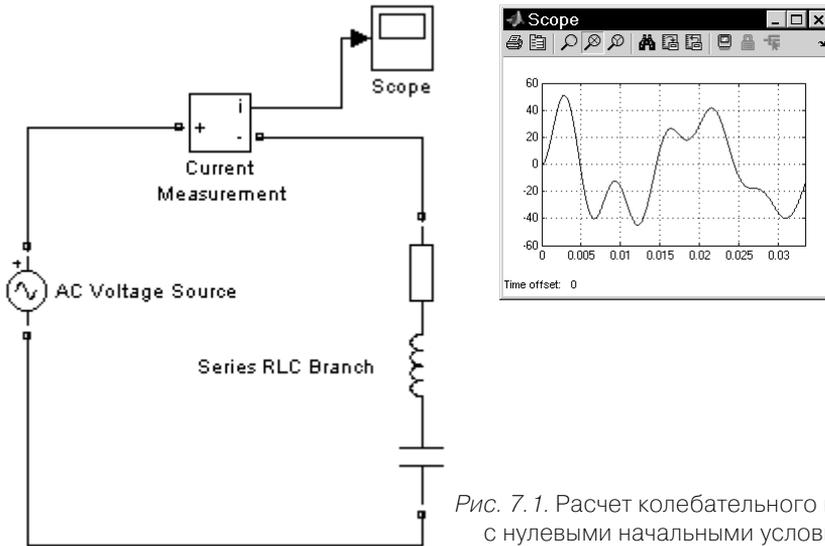


Рис. 7.1. Расчет колебательного контура с нулевыми начальными условиями

Current values of the 2 electrical initial states of your model.  
 Note that your model have a total of 2 Simulink states

- 1: Il\_Series RLC Branch = 0
- 2: Uc\_Series RLC Branch = 0.

На осциллограмме видно, что начальное значение тока контура равно значению, найденному с помощью функции `powerinit`.

*Пример 2:*

Команда `power_init('sys','setb','Il_Series RLC Branch',-50)` задает значение тока в RLC-цепи, равное  $-50$  A. На рис. 7.2 показана осциллограмма тока для расчета схемы с указанным начальным значением тока.

## 7.2. Функция для определения математической модели линейной части электрической схемы `power_statespace`

**Назначение:**

Функция рассчитывает матрицы A, B, C, D в уравнений пространства-состояния, описывающих линейную часть электрической схемы:

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

$$y = Cx + Du,$$

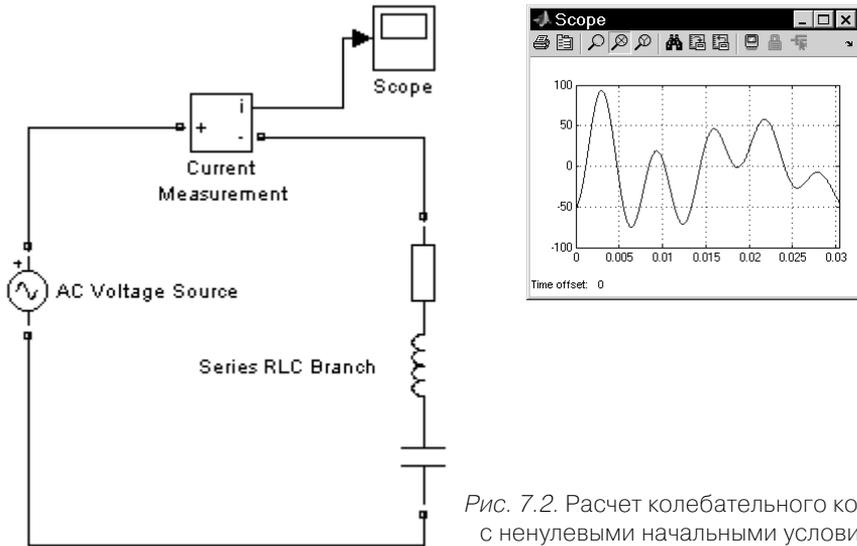


Рис. 7.2. Расчет колебательного контура с ненулевыми начальными условиями

где  $x$  – вектор состояния (токи индуктивностей и напряжения конденсаторов);  $u$  – вектор входных воздействий;  $y$  – вектор выходных сигналов;  $A, B, C, D$  – матрицы: системы, входа, выхода и обхода соответственно.

Функция **power\_statespace** вызывается автоматически функцией **power\_analyze** при начале расчета модели. Можно также запускать функцию на выполнение непосредственно из командного окна **MATLAB** или из *m*-файла. Функция позволяет использовать возможности SimPowerSystems, которые недоступны из графического интерфейса, например с ее помощью можно определить трансформатор и взаимную индуктивность с более чем тремя обмотками.

Линейная часть схемы может содержать любую комбинацию источников напряжения и тока, RLC-цепей, многообмоточных трансформаторов, взаимноиндуктивностей и ключей. Переменными состояниями будут являться токи индуктивностей и напряжения конденсаторов. Модель пространства-состояния линейной части электрической схемы (матрицы  $A, B, C, D$  и вектор начальных значений  $x_0$ ), вычисленная функцией **power\_statespace**, может использоваться в системе Simulink с помощью блока State-Space.

Нелинейные элементы электрической схемы (механические или электронные выключатели, трансформаторы с насыщающимися сердечниками, электрические машины, линии с распределенными параметрами и т. д.) могут быть соединены с линейной частью схемы. Нелинейные Simulink-модели соединяются с линейной частью схемы с помощью входных (напряжения) и выходных (токи) переменных.

#### **Синтаксис:**

Вызов функции должен выполняться минимум для 7 аргументов:

```
[A,B,C,D,states,x0,x0sw,r1sw,u,x,y,freq,Asw,Bsw,Csw,Dsw,Hlin] =  
power_statespace(rlc,switches,source,line_dist,yout,y_type,unit),
```

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – матрицы: системы, входа, выхода и обхода соответственно для случая, когда все ключи схемы разомкнуты;  $states$  – строковая матрица, содержащая имена переменных состояния. Каждое имя должно находиться в отдельной строке и иметь следующий формат:

- $I_{bxx\_nzz1\_zz2}$  – ток индуктивности;
- $U_{c\_bxx\_nzz1\_zz2}$  – напряжение на конденсаторе, где  $xx$  – номер ветви;  $zz1$  – номер первого узла ветви;  $zz2$  – номер второго узла ветви;
- $x0$  – вектор начальных значений переменных состояния;
- $x0sw$  – вектор начальных значений токов ключей;
- $rlsw$  – матрица размерностью  $(nswitch, 2)$  содержащая значения  $R$  (Ом) и  $L$  (Гн) ключей, где  $nswitch$  – число ключей в схеме;
- $u$ ,  $x$ ,  $y$  – матрицы, содержащие комплексные значения установившихся величин:  $u(ninput, nfreq)$  – входные величины,  $y(noutput, nfreq)$  – выходные величины,  $x(nstates, nfreq)$  – переменные состояния, где  $nfreq$  – размерность вектора  $freq$ , содержащего значения частот источников схемы;
- $Asw, Bsw, Csw, Dsw$  – матрицы уравнений пространства-состояния схемы для закрытых состояний ключей. Каждый закрытый ключ, имеющий внутреннюю индуктивность, добавляет одну переменную состояния схемы;
- $Нlin$  – трехмерный массив  $(nfreq, noutput, ninput)$  комплексных взаимных сопротивлений вход-выход для каждого значения частоты;
- $rlc$  – матрица цепей, задающая топологию схемы;
- $switches$  – матрица ключей, содержащая параметры ключей. Является пустой, если ключи в схеме не используются;
- $source$  – матрица источников, содержащая параметры источников. Является пустой, если источники в схеме не используются;
- $line\_dist$  – матрица линий с распределенными параметрами. Является пустой, если линии с распределенными параметрами в схеме не используются;
- $yout$  – строковая матрица, задающая выражения для расчета выходных переменных. Каждое выражение может содержать линейную комбинацию значений переменных состояния и их производных;
- $y\_type$  – вектор целых чисел, определяющий вид выходной переменной (0 – напряжение, 1 – ток);
- $unit$  – строковый параметр, задающий единицы измерения. Если значение параметра равно “ОНМ”, то значения  $R$ ,  $L$  и  $C$  задаются в Ом для базовой частоты, определяемой параметром  $freq\_sys$  (по умолчанию – 60 Гц). Если значение параметра равно “ОНУ”, то значение  $R$  задается в Ом,  $L$  – в мГн и  $C$  – в мкФ.

Функция **power\_statespace** может вызываться также с 12, 13, 14 или 16 аргументами. Подробности о форматах каждого аргумента и использовании функции можно найти в руководстве пользователя для SimPowerSystems [13].

## 7.3. Функция для анализа модели электрической схемы `power_analyze`

### Назначение:

Функция `power_analyze` рассчитывает матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  уравнений пространства-состояния, описывающих модель:

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

$$y = Cx + Du,$$

где  $x$  – вектор состояния (токи индуктивностей и напряжения конденсаторов);  $u$  – вектор входных воздействий;  $y$  – вектор выходных сигналов;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – матрицы: системы, входа, выхода и обхода соответственно.

Функция `power_analyze` вызывается автоматически из Simulink при начале расчета модели. Можно также запускать функцию на выполнение непосредственно из командного окна **MATLAB** или из `m`-файла.

### Синтаксис:

```
power2sys('sys','structure')
```

Команда создает структуру для модели `sys`. Поля структуры имеют тот же смысл, что и данные, возвращаемые функцией `power_statespace`.

Подробности о способах использования функции `power_analyze` можно найти в руководстве пользователя для SimPowerSystems [13].

### Пример:

Для модели, показанной на рис. 7.1, вызов функции

```
psb = power_analyze('sys','structure')
```

дает следующий результат:

```
psb =
```

```

circuit: "sys"
states: [2x21 char]
inputs: "U_AC Voltage Source"
outputs: "I_Current Measurement"
    A: [2x2 double]
    B: [2x1 double]
    C: [1 0]
    D: 0
    x0: [2x1 double]
Aswitch: [2x2 double]
Bswitch: [2x1 double]
Cswitch: [1 0]
Dswitch: 0
x0switch: [0x1 double]
    uss: 100
    xss: [2x1 double]
    yss: 1.2135+34.8138i

```

```
        Hlin: 0.0121+ 0.3481i
    frequencies: 50
        LoadFlow: []
    OscillatoryModes: [2x39 char]
```

Значения полей структуры `psb` могут быть найдены следующим образом:

```
>> A=psb.A
```

```
A =
```

```
    -100  -1000
    1000     0
```

```
>> B=psb.B
```

```
B =
```

```
    1000
     0
```

```
>> C=psb.C
```

```
C =
```

```
    1  0
```

```
>> D=psb.C
```

```
D =
```

```
    1  0
```

Остальные поля структуры находятся аналогично.

## 7.4. Функция для расчета параметров линии электропередачи `power_lineparam`

Для расчета параметров линии электропередачи используется функция `power_lineparam`. Функция открывает графический интерфейс для ввода исходных данных и нахождения параметров ЛЭП. Она может быть вызвана также командой **Compute RLC Line Parameters** из блока `Powergui`.

Основные особенности функции рассмотрены в п. 4.10, посвященном графическому интерфейсу пользователя `Powergui`.

## Как SimPowerSystems работает

|  |     |
|--|-----|
| 8.1. Алгоритм расчета<br>SimPowerSystems-модели .....            | 261 |
| 8.2. Выбор метода интегрирования .....                           | 263 |
| 8.3. Особенности моделирования схем<br>силовой электроники ..... | 264 |

## 8.1. Алгоритм расчета SimPowerSystems-модели

После того как SimPowerSystems-модель построена, она может быть запущена на расчет так же, как любая модель Simulink. Перед началом каждого расчета происходит инициализация модели. При инициализации вычисляется модель пространства состояний электрической схемы и строится эквивалентная модель, ко-

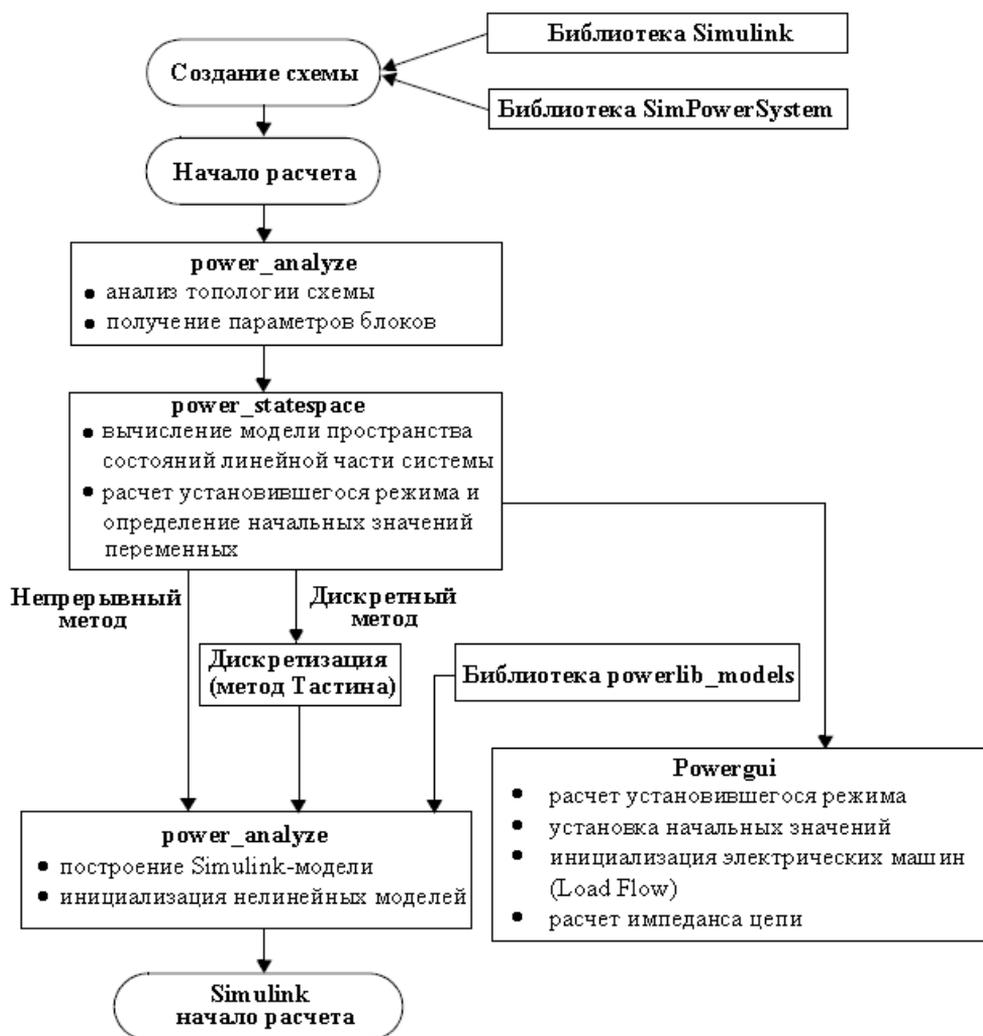


Рис. 8.1. Алгоритм расчета

торая может рассчитываться в Simulink. Вызов функции **power\_analyze** начинает этот процесс (рис. 8.1).

Функция **power\_analyze** выполняет при инициализации несколько этапов.

1. Сортировка SimPowerSystems-блоков, получение параметров блоков, определение топологии схемы и автоматическое присвоение номеров узлам схемы. При сортировке блоки разделяются на блоки Simulink и SimPowerSystems-блоки. Кроме того, SPS-блоки делятся на линейные и нелинейные.
2. Вычисление модели пространства состояний линейной части системы функцией **power\_statespace**. На этом же этапе происходит расчет установившегося режима и определение начальных значений переменных. Если задана дискретизация модели, то определяется дискретная модель схемы в пространстве состояний. При этом используется метод Тастина.
3. Строится Simulink-модель схемы и запоминается внутри одного из измерительных блоков. Это означает, что на схеме должен присутствовать хотя бы один измерительный блок (Current Measurement, Voltage Measurement, Three-Phase VI Measurement или Multimeter). Связь между эквивалентной Simulink-моделью и измерительными блоками осуществляется с помощью блоков Goto и From.

В эквивалентной Simulink-модели используется блок State-Space или блок S-function для моделирования линейной части системы. Для моделирования нелинейных SimPowerSystems-блоков используются Simulink-модели из библиотеки `powerlib_models`. Для моделирования источников энергии используются блоки источников `Sources` библиотеки Simulink.

Блок Powergui, помещенный в модель, позволяет задать начальные значения переменных модели, выполнить расчет установившегося режима, осуществить инициализацию схемы, содержащей электрические машины, и найти полное сопротивление (импеданс) цепи.

Связь нелинейных моделей с Simulink-моделью показана на рис. 8.2. Нелинейные модели включаются в цепи обратных связей линейной части Simulink-модели.

После завершения инициализации функцией **power\_analyze** программа Simulink начинает расчет модели.

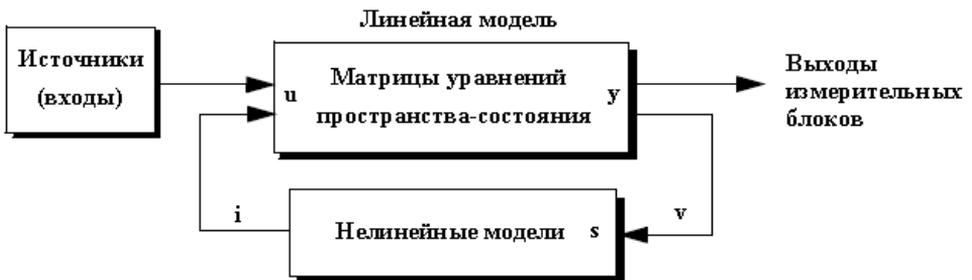


Рис. 8.2. Связь нелинейных моделей с Simulink-моделью

## 8.2. Выбор метода интегрирования

При расчете модели пользователь имеет возможность выбора метода интегрирования – непрерывного или дискретного, с переменным или фиксированным шагом. Для систем небольшого размера расчет непрерывным методом с переменным шагом, как правило, более точен. Алгоритм с переменным шагом также быстрее, поскольку число шагов оказывается меньшим, чем при расчете с фиксированным шагом и сопоставимой точностью. При расчетах устройств силовой электроники методы с переменным шагом дают большую точность, поскольку определяют прохождение через нуль токов полупроводниковых приборов с высокой точностью так, что не наблюдается разрывов сигналов. Однако для больших систем (систем, имеющих большое число переменных состояния или нелинейных блоков) высокая точность непрерывных методов приводит к замедлению расчета. При этом под большой системой понимается (условно) система, имеющая более 30 переменных состояния и более 6 ключей. В таких случаях выгодно провести дискретизацию модели.

Большинство из имеющихся в Simulink методов расчета с переменным шагом дает хорошие результаты при расчете линейных систем. Однако схемы, содержащие нелинейные элементы, требуют методов решения для жестких систем. Самая высокая скорость расчета нелинейных систем достигается методами `ode23t` или `ode15s` с параметрами, заданными по умолчанию:

- **Solver** (метод): `ode23t` или `ode15s`;
- **Relative tolerance** (относительная погрешность) =  $1e-3$ ;
- **Absolute tolerance** (абсолютная погрешность) = `auto`;
- **Maximum step size** (максимальный шаг) = `auto`,
- **Initial step size** (минимальный шаг) = `auto`;
- **Initial step size** (начальный шаг) = `auto`;
- **Maximum order** (максимальный порядок для `ode15s`) = 5.

Обычно для абсолютной погрешности и максимального размера шага можно выбирать значение `auto`. В некоторых случаях приходится ограничивать максимальный размер шага и абсолютную погрешность. Обычными рекомендациями при выборе максимального размера шага являются:

- шаг не должен превышать величины 0,1 минимальной постоянной времени системы;
- при наличии в схеме источников переменного напряжения или тока шаг расчета не должен превышать 0,01–0,02 периода источника с максимальной частотой.

Выбор абсолютной погрешности зависит от ожидаемых максимальных значений сигналов в схеме. Рекомендуемое соотношение здесь: 0,01–0,001 максимального значения сигнала. Например, если значения токов и напряжений схемы составляют тысячи ампер или вольт, то абсолютная погрешность может быть выбрана 0,1 или даже 1,0. Если же в схеме максимальные значения токов и напряжений лежат в пределах 10–100 А или В, то абсолютная погрешность должна быть выбрана на уровне 0,001–0,01.

При расчетах схемы векторным методом (Phasor Simulation) рекомендуется выбирать метод расчета ode15s или ode23t и шаг расчета, равный периоду напряжения источников.

## 8.3. Особенности моделирования схем силовой электроники

Для моделирования устройств силовой электроники используются два метода.

- Если внутреннее сопротивление ключа имеет только активный характер ( $R_{on} > 0$ ), а внутренняя индуктивность отсутствует ( $L_{on} = 0$ ), то модель ключа рассматривается как часть линейной схемы. В процессе расчета при изменении состояния ключей производится пересмотр топологии схемы и переопределение ее модели пространства-состояния. Этот метод всегда используется при наличии в схеме блоков Breaker и Ideal Switch, поскольку они не имеют внутренней индуктивности. Данный метод применяется также для блоков Diode и Thyristor, если для них задано  $R_{on} > 0$  и  $L_{on} = 0$ , а также для блока Universal Bridge в том случае, если в качестве приборов моста выбраны GTO, MOSFET, IGBT или Ideal Switches (для этих устройств в составе моста –  $L_{on} = 0$ ).
- Если ключ содержит индуктивность (Diode и Thyristor с  $L_{on} > 0$ , IGBT, MOSFET или GTO), то он моделируется как нелинейный элемент на базе источника тока в цепи обратной связи линейной схемы, как показано на рис. 8.2.

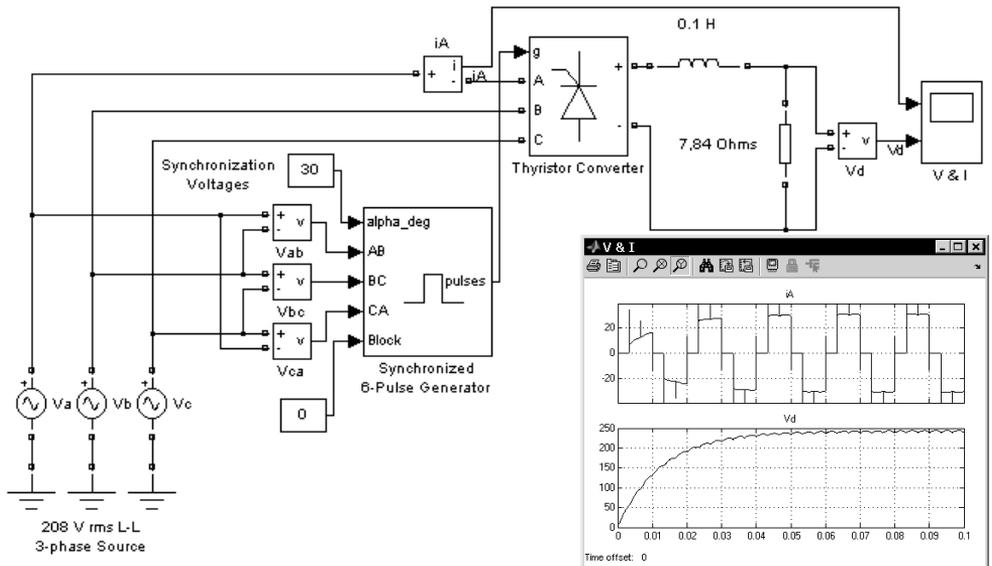


Рис. 8.3. Модель тиристорного преобразователя

*Пример:*

Для многих задач внутреннюю индуктивность ключей можно задать равной нулю. Однако для ряда задач необходимо задавать ненулевое значение индуктивности. На рис. 8.3 показана схема трехфазного тиристорного преобразователя, работающего на активно-индуктивную нагрузку. Если индуктивность  $L_{on} = 0$ , то в процессе коммутации, который происходит квазимоментально, два тиристора моста шунтируют источник питания. Ток в таком контуре ограничивается только активными сопротивлениями самих тиристорov и сопротивлением источника. Поскольку эти сопротивления весьма малы ( $R_{on} = 0,01 \text{ Ом}$ ), ток в короткозамкнутом контуре достигает очень больших значений (более 7 кА).

Для исключения этого явления следует задавать конечное значение  $L_{on}$ . На рис. 8.4 показаны осциллограммы для той же самой схемы, но при  $L_{on} = 1 \text{ мкГн}$ . Как видно из осциллограмм, броски тока отсутствуют. Коммутация вентилей в этом случае производится за время, определяемое величиной  $L_{on}$  и уровнем тока в вентилях.

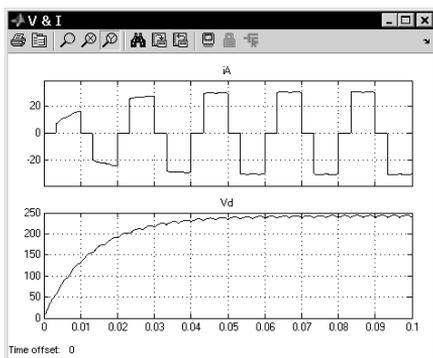


Рис. 8.4. Ток и напряжение преобразователя при  $L_{on} = 1 \text{ мкГн}$

# Советы пользователям SimPowerSystems

|   |     |
|---|-----|
| 9.1. RLC «по-русски» .....                                  | 267 |
| 9.2. Задание начальных условий<br>расчета .....             | 268 |
| 9.3. Модернизация блока Fourier .....                       | 270 |
| 9.4. Особенности блока Breaker .....                        | 271 |
| 9.5. Моделирование выбега<br>электродвигателя .....         | 271 |
| 9.6. Модель операционного усилителя .....                   | 272 |
| 9.7. Открытие и сохранение моделей<br>ранних версий .....   | 276 |
| 9.8. Проведение серии вычислительных<br>экспериментов ..... | 278 |

## 9.1. RLC «по-русски»

Условные графические обозначения элементов на пиктограммах блоков в библиотеке SimPowerSystems не полностью соответствуют принятым в России. Это существенно затрудняет восприятие и анализ моделей. Особенно сильно отличается от принятого в России изображение резистора. Также имеются отличия в изображениях индуктивности, конденсатора и других элементов. В предыдущих версиях MATLAB пользователь мог сам отредактировать нужный файл (`blocicon.m`) и получить требуемые изображения элементов. Однако в текущую версию исходный файл `blocicon.m` не включен, и отредактировать его невозможно. Но выход из создавшейся ситуации все же есть – необходимо использовать файлы более ранней версии MATLAB (MATLAB 6.5).

Процедура получения новых графических изображений элементов сводится к следующим шагам.

1. Изменить файл `blocicon.m` из MATLAB 6.5 для отображения «русских» символов элементов. Ниже приводится фрагмент файла `blocicon.m` с новыми значениями векторов, обеспечивающих построение условного изображения последовательной RLC-цепи (строки 31–38 и 144–151 для версии MATLAB 6.5):

```
rx=[0 30 30 120 120 150 120 120 30 30];
ry=[0 0 -14 -14 0 0 0 14 14 0];
lx = [0 25 25 25.15 25.45 26.1 26.8 28 29 30.5 32 33.5 35.5 37.5
39.5 41.5 43 44.5 46 47.1 48.2 49 49.45 49.85 50 50 50.15 50.45
51.1 51.8 53 54 55.5 57 58.5 60.5 62.5 64.5 66.5 68 69.5 71 72.1
73.2 74 74.45 74.85 75 75 75.15 75.45 76.1 76.8 78 79 80.5 82
83.5 85.5 87.5 89.5 91.5 93 94.5 96 97.1 98.2 99 99.45 99.85 100
100 100.2 100.5 101.1 101.8 103 104 105.5 107 108.5 110.5 112.5
114.5 116.5 118 119.5 121 122.1 123.2 124 124.5 124.8 125 125
150];
ly = [0 0 0 1.93 3.32 5.13 6.46 8.12 9.17 10.4 11.2 11.8 12.3
12.5 12.3 11.8 11.2 10.4 9.17 8.01 6.46 4.9 3.67 1.93 0 0 1.93
3.32 5.13 6.46 8.12 9.17 10.4 11.2 11.8 12.3 12.5 12.3 11.8 11.2
10.4 9.17 8.01 6.46 4.9 3.67 1.93 0 0 1.93 3.32 5.13 6.46 8.12
9.17 10.4 11.2 11.8 12.3 12.5 12.3 11.8 11.2 10.4 9.17 8.01 6.46
4.9 3.67 1.93 0 0 1.93 3.32 5.13 6.46 8.12 9.17 10.4 11.2 11.8
12.3 12.5 12.3 11.8 11.2 10.4 9.17 8.01 6.46 4.9 3.67 1.93 0 0
0];
cx1 = [0 60 60 60];
cy1 = [0 0 -25 25];
cx2 = [90 90 90 150];
cy2 = [25 -25 0 0];
```

2. Изменить имя этого файла на `blocicon_.m`.
3. Создать копию файла `powericon.m` под именем `powericon_.m`.
4. В файлах `powericon_.m` и `blocicon_.m` изменить имя функции **blocicon** на **blocicon\_**.
5. Транслировать файлы `powericon_.m` и `blocicon_.m` в `r`-файлы:

- ```

pcode('blocicon_')
pcode('powericon_') .

```
6. Поместить файлы blocicon\_.\* в папку ...powersys\powersys\private .
  7. Поместить файлы powericon\_.\* в папку ...powersys\powersys .
  8. Открыть библиотеку Elements, щелкнув на ней правой клавишей мыши и выполнив команду **Open the Elements Library**.
  9. Разблокировать библиотеку командой **Edit** ⇒ **Unlock library**.
  10. Для блока Series RLC Branch добавить на вкладку Initialization маски блока вызов функции **powericon\_** :  

```
[s1_, s2_, s3_, s4_, r1_, r2_, l1_, l2_, c1_, c2_, c3_, c4_] = powericon_
('Series RLC Branch', Resistance, Inductance, Capacitance);
```
  11. Для блока Series RLC Branch изменить на вкладке Icon маски блока команду **plot**:  

```
plot(s1_, s2_, s3_, s4_, r1_, r2_, l1_, l2_, c1_, c2_, c3_, c4_);
```
  12. Сохранить библиотеку.
  13. В главном окне **MATLAB** выполнить обновление кэша – **File** ⇒ **Preferences** ⇒ **General**. Нажать кнопку **Update Toolbox Path Cache**.
  14. Перезапустить **MATLAB**.

Результатом проделанных операций будет новое изображение пиктограммы блока (рис. 9.1).

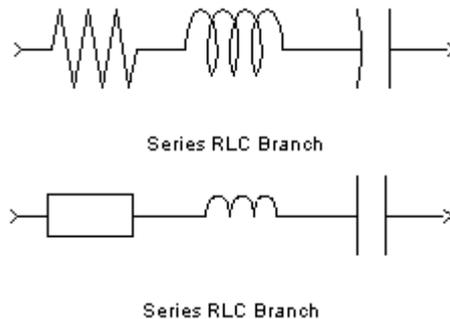


Рис. 9.1. Старое и новое изображения блока Series RLC Branch

Для изменения пиктограмм остальных блоков нужно внести изменения на вкладках Icon и Initialization маски блока, аналогичные указанным выше.

## 9.2. Задание начальных условий расчета

При выполнении расчета электрической схемы начинающий пользователь может получить довольно неожиданный результат, обусловленный не заданными специально начальными условиями. Дело в том, что перед началом расчета Simulink выполняет расчет установившегося режима и результаты этого расчета принима-

ет в качестве начальных условий для расчета на заданном интервале времени. На рис. 9.2 показана схема, в которой источник постоянного напряжения подключен к активно-индуктивной нагрузке. Как видно из графика, величина тока равна 100 А и не меняется на всем протяжении расчета, что не соответствует представлениям о переходных процессах в цепях, содержащих реактивные элементы.

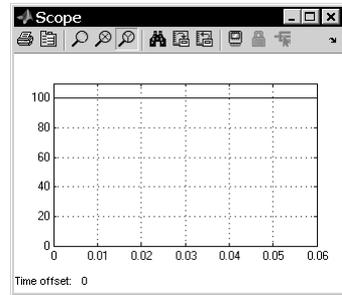
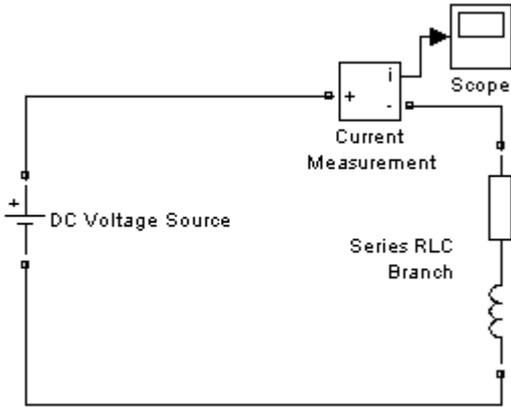


Рис. 9.2. Установившийся режим в RL-цепи

Для того чтобы принудительно задать нулевые начальные условия, требуется в окне параметров блока установить флажок для параметра Set the initial inductor current (задан начальный ток индуктивности) и ввести нулевое начальное значение тока в графе Inductor initial current.

На рис. 9.3 показана модель RL-цепи и график изменения тока в ней при нулевых начальных условиях.

Начальное значение можно также задать с помощью блока Powergui или функции `power_init`.

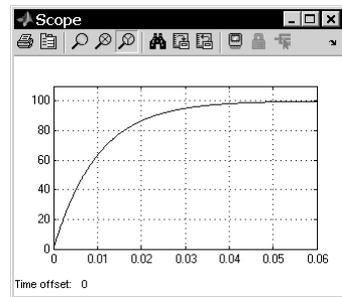
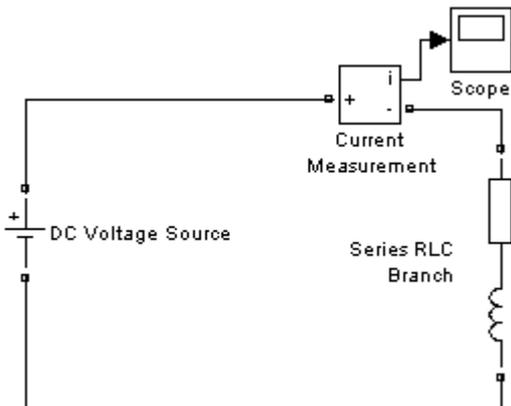


Рис. 9.3. Переходный процесс в RL-цепи

## 9.3. Модернизация блока Fourier

В состав дополнительной библиотеки измерительных блоков входит блок Fourier, позволяющий измерить амплитуду и фазу гармонических составляющих сигнала. Для определения амплитуды и фазы гармоники в параметрах блока необходимо задать Fundamental frequency (базовую частоту) и Harmonic n (номер гармоники). На выходах блока формируется magnitude (амплитуда гармоники) и angle (фаза гармоники). На практике исследователя довольно часто интересует не одна или небольшое число гармоник, а их достаточно широкий диапазон. Однако блок позволяет получить характеристики лишь одной гармоники. Это весьма неудобно при исследовании большого числа гармоник, поскольку число блоков Fourier, которые следует установить на схеме, будет равно числу исследуемых гармоник.

Для устранения этого недостатка можно модернизировать блок Fourier таким образом, чтобы в окне параметров задавать диапазон или вектор номеров гармоник, а на выходах иметь векторы амплитуд и фаз сигналов. Для модернизации блока необходимо сначала разорвать связь блока с библиотекой. Для этого требуется выделить блок и выполнить последовательность команд меню **Edit** ⇒ **Link options** ⇒ **Disable Link**. После этого можно открыть блок командой **Edit** ⇒ **Look under mask** и приступить к редактированию. Новая схема блока показана на рис. 9.4.

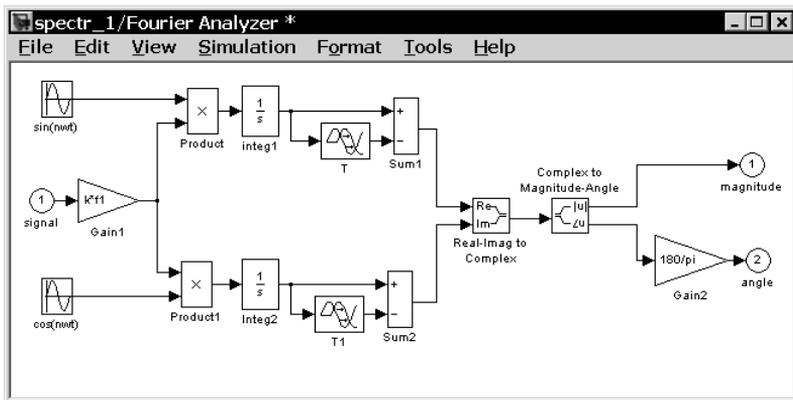


Рис. 9.4. Модернизированная схема блока Fourier

Суть модернизации заключается в том, что блоки в исходной версии, работающие со скалярами, заменяются блоками, выполняющими поэлементные матричные операции. Благодаря этому в окне параметров блока становится возможным параметр Harmonic n (номер гармоники) задавать в виде вектора. На рис. 9.5 показан пример расчета гармонического состава сигнала, синтезированного из нескольких синусоидальных сигналов с разными амплитудой, частотой и фазой.

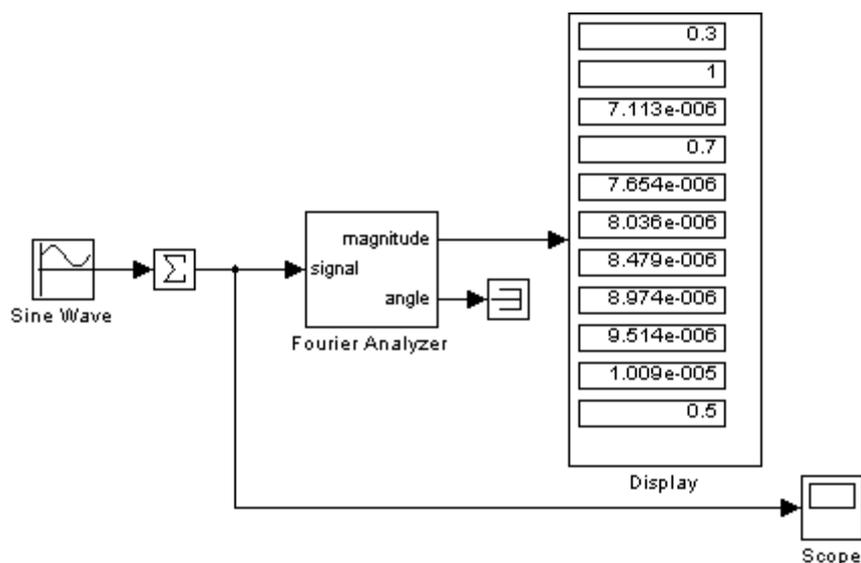


Рис. 9.5. Пример расчета гармонического состава сигнала

## 9.4. Особенности блока Breaker

Часто начинающий пользователь для коммутации в моделях с источниками постоянного напряжения использует блок Breaker. Однако при этом не учитывается тот факт, что Breaker предназначен для коммутации переменного тока. Его особенностью является то, что при снятии управляющего сигнала разрыв цепи происходит лишь при достижении током нулевого уровня. В цепях постоянного тока такого не наблюдается, и ключ остается замкнутым при снятии управляющего сигнала. Рисунок 9.6 иллюстрирует эту ситуацию. На рисунке показаны электрические цепи, коммутируемые с помощью блока Breaker. При этом в одной из цепей используется источник переменного напряжения, а в другой – постоянного. На рисунке хорошо видно, что в первой цепи отключение нагрузки от источника происходит в момент спада тока цепи до нуля, в то время как во второй цепи нагрузка остается подключенной к источнику, несмотря на отсутствие управляющего сигнала на ключе.

Для коммутации в цепях постоянного тока необходимо использовать блок Ideal Switch.

## 9.5. Моделирование выбега электродвигателя

В практических задачах моделирования электропривода часто встречается задача моделирования не только пуско-тормозных режимов, но и режима выбега электродвигателя при отключении питания. Для решения этой задачи необходимо пос-

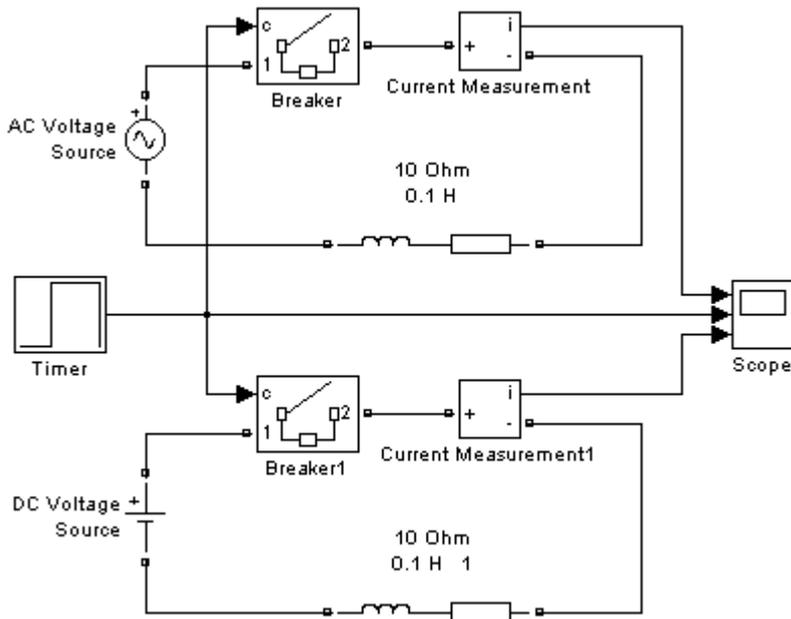
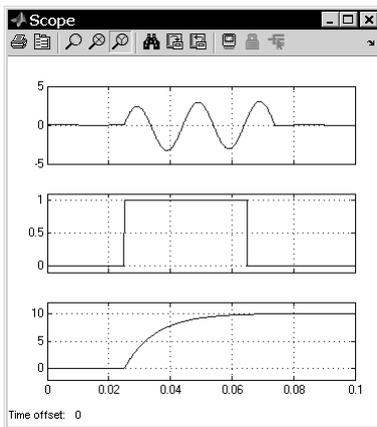


Рис. 9.6. Работа блока Breaker в цепях постоянного и переменного тока



ле источников фазных напряжений поставить ключи (Breaker или Ideal Switch) и сформировать напряжения управления ключами (для размыкания ключей нужен нулевой сигнал). В параметрах ключей требуется задать очень большое сопротивление искрогасящей цепи (в 100–500 раз большее, чем сопротивление фазы АД), а емкость этой цепи необходимо задать inf (что соответствует отсутствию конденсатора).

Схема модели и графики ее работы показаны на рис. 9.7.

## 9.6. Модель операционного усилителя

В некоторых случаях при работе с Simulink и SimPowerSystems пользователю требуется не только отработать алгоритмы управления каким-либо устройством, но и проверить схемную реализацию системы управления. Аналоговые системы управления обычно реализуются с помощью операционных усилителей (ОУ). Однако в библиотеках SPS отсутствует модель такого устройства. Вместе с тем такую модель достаточно просто создать, используя стандартные блоки Simulink и SimPowerSystems.

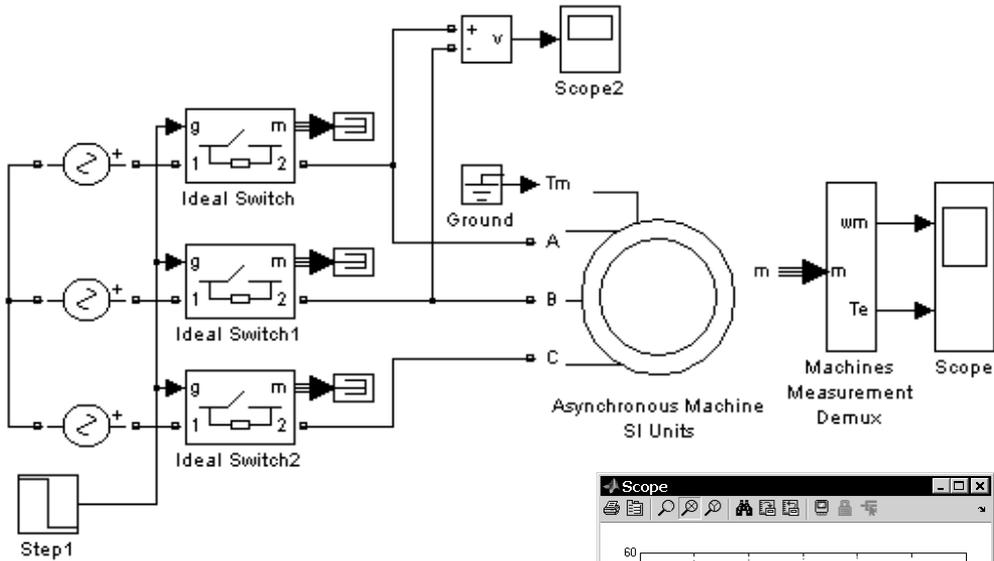


Рис. 9.7. Запуск и выбег асинхронного двигателя

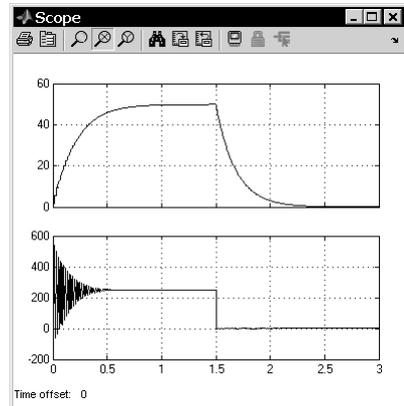
Передаточная функция идеализированного операционного усилителя определяется выражением [8]:

$$K(s) = \frac{K0}{1 + s\tau},$$

где  $K0$  – коэффициент передачи ОУ на постоянном токе;  $\tau = \frac{K0}{2\pi f_1}$  – постоянная времени передаточной функции ОУ;  $f_1$  – частота единичного усиления.

В основу модели операционного усилителя (рис. 9.8) положен управляемый источник напряжения Controlled Voltage Source. Коэффициент передачи ОУ на постоянном токе ( $K0$ ) задает усилитель Gain, на вход которого поступает разность входных напряжений усилителя. Блок передаточной функции Transfer Fcn задает частотные свойства операционного усилителя, а подсистема Subsystem обеспечивает ограничение выходного напряжения на уровне напряжений положительной и отрицательной полярностей, имитируя нелинейность характеристики реального усилителя, вызванную конечной величиной напряжений питания.

Схема подсистемы Subsystem приведена на рис. 9.9. Если сигнал на входе In подсистемы не выходит за предельные значения, подаваемые на входы  $V+$  (уровень напряжения ограничения положительной полярности) и  $V-$  (уровень напряжения ограничения отрицательной полярности), то входной сигнал прохо-



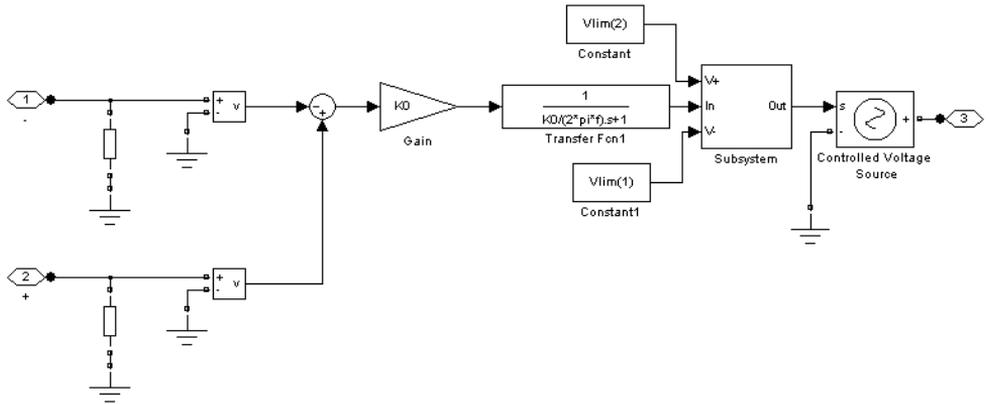


Рис. 9.8. Модель операционного усилителя

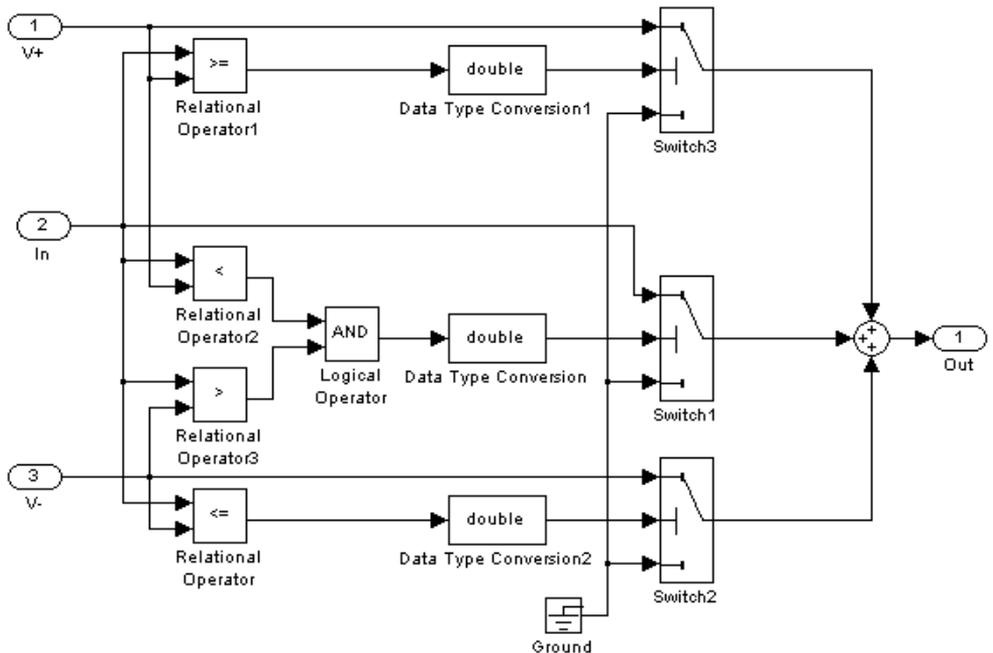
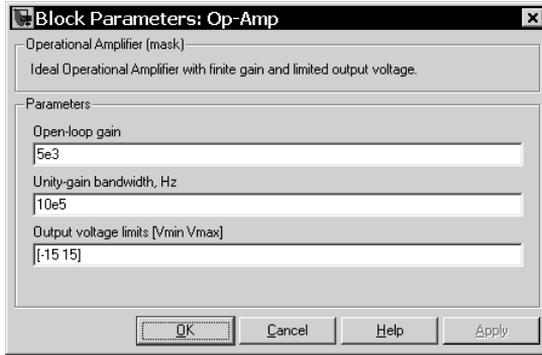


Рис. 9.9. Модель подсистемы ограничения выходного напряжения ОУ

дит на выход подсистемы без изменений. В противном случае на выход проходит сигнал, задающий напряжение ограничения усилителя (положительный, если входной сигнал положительный, и отрицательный, если входной сигнал отрицательный).

**Окно задания параметров:**



**Параметры блока:**

**Open-loop gain:**

[Коэффициент усиления на постоянном токе].

**Unity-gain bandwidth, Hz:**

[Частота единичного усиления, Гц]. Значение частоты входного сигнала, при котором коэффициент усиления ОУ уменьшается до единицы. Этот параметр определяет максимально возможную полосу пропускания ОУ.

**Output voltage limits [Vmin Vmax]:**

[Напряжения ограничения выходного напряжения]. Параметр задается в виде вектора, первый элемент которого задает положительный уровень ограничения, а второй – отрицательный.

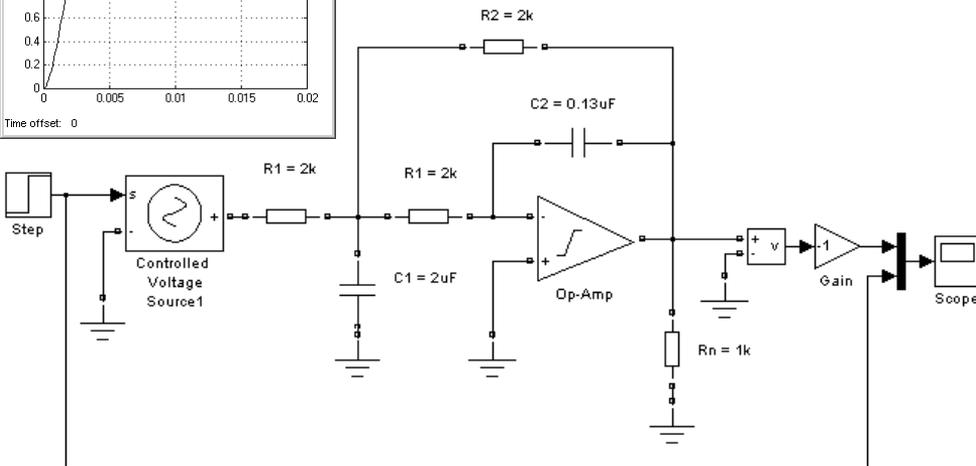
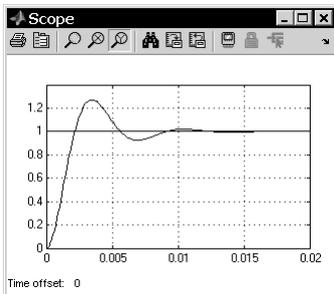


Рис. 9.10. Модель колебательного звена

*Пример 1:*

На рис. 9.10 показан пример использования ОУ для реализации колебательно-го звена. Операционный усилитель в данном примере включен по инвертирующей схеме и работает на линейном участке характеристики.

*Пример 2:*

На рис. 9.11 показан пример реализации инвертирующего интегратора на операционном усилителе. В данном примере показан выход операционного усилителя на ограничения.

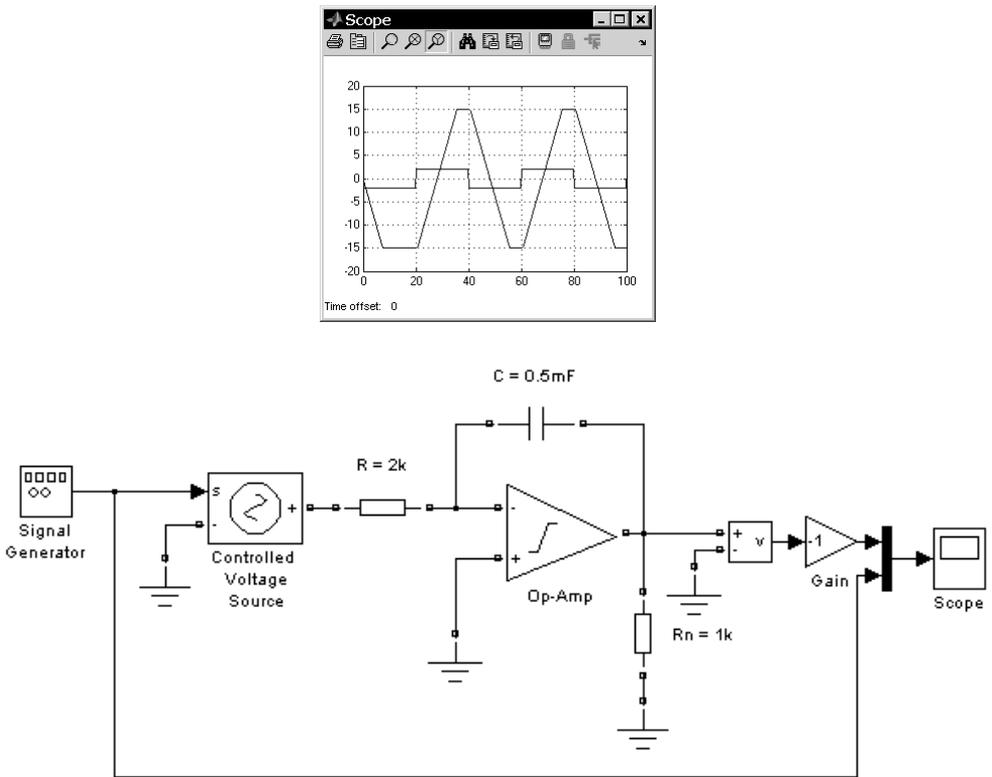


Рис. 9.11. Модель инвертирующего интегратора

*Пример 3:*

На рис. 9.12 показан пример включения ОУ по неинвертирующей схеме. Коэффициент передачи усилителя в этом случае определяется выражением

$$K = 1 + \frac{R_{oc}}{R1}$$

При заданных значениях  $R1 = 2k$  и  $R_{oc} = 5k$  коэффициент усиления равен 3,5.

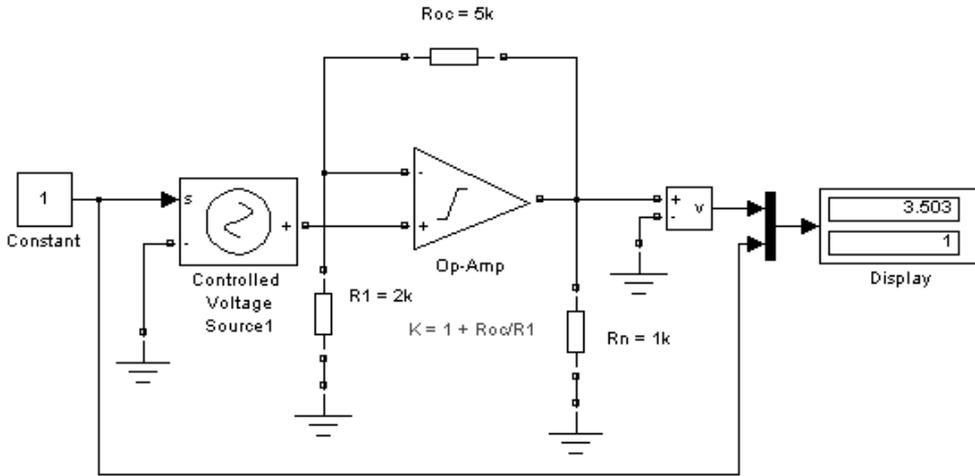


Рис. 9.12. Модель неинвертирующего усилителя

## 9.7. Открытие и сохранение моделей ранних версий

При открытии и сохранении в Simulink моделей более ранних версий возможно возникновение ошибок, связанных с особенностями версии MATLAB. Как правило, эти ошибки связаны с использованием кириллических шрифтов при создании модели. Для устранения ошибок такого рода необходимо сразу после запуска выполнить в окне **MATLAB** команду:

```
set_param(0, 'CharacterEncoding', 'windows-1251');
```

Также необходимо, чтобы имя пользователя или администратора компьютера не имело символов кириллицы, поскольку это имя записывается в файле модели и может вызвать ошибку.

Начиная с версии MATLAB 2006b (версия 7.3), кириллические шрифты являются допустимыми, но для использования их перед сеансом работы с Simulink необходимо выполнить в окне **MATLAB** команды:

```
slCharacterEncoding('windows-1251');  
feature('MultibyteCharSetChecking', 0);
```

Эти команды можно написать в файле startup.m и поместить в папку ...toolbox\local. В этом случае команды будут выполнены автоматически после запуска MATLAB.

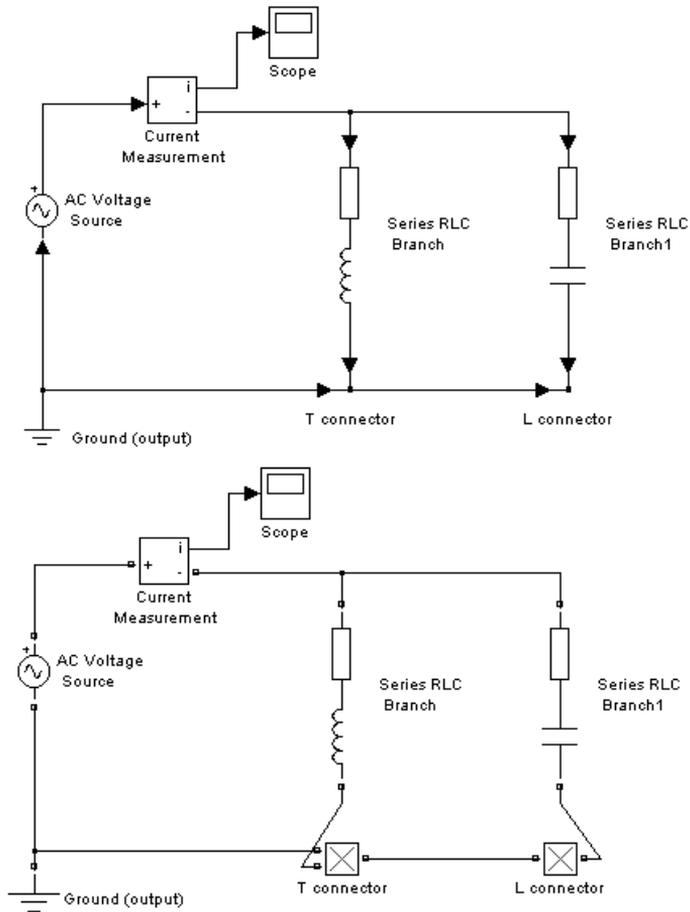


Рис. 9.13. Исходная и конвертированная модели

Ранние версии SPS-моделей необходимо конвертировать с помощью команды **psbupdate**:

```
psbupdate('Имя_модели')
```

После конвертирования файл будет открыт и сохранен в текущей папке под именем Имя\_модели\_updated.

На рис. 9.13 показаны исходная и конвертированная модели.

Как видно из рисунка, блоки библиотеки Connectors, которая отсутствует в текущей версии, в конвертированной модели заменены специальными соединителями. Их необходимо удалить вручную и восстановить схему.

## 9.8. Проведение серии вычислительных экспериментов

Довольно часто при моделировании в Simulink требуется проведение серии расчетов, например для того, чтобы проследить влияние какого-либо параметра на работу схемы. Выполнение изменения требуемого параметра вручную и последующий запуск модели также вручную весьма утомительны при проведении серии расчетов. Для решения данной задачи можно создать m-файл (сценарий), в котором организовать запуск и изменение параметра в цикле. Ниже приводится пример такого сценария, в котором реализован предложенный алгоритм (изменение параметров блока выполняется с помощью функции `set_param`):

```
clear all; % Очистка Рабочей области
open('Series_RLC_Branch_2.mdl') % Открытие модели
% Series_RLC_Branch_2
figure; % Создание окна для графиков
for R = 1:2:11, % Цикл расчета
% Присвоение значения сопротивления:
set_param('Series_RLC_Branch_2/Series RLC Branch',
'Resistance', num2str(R));
sim('Series_RLC_Branch_2'); % Запуск модели
line(time, Current); % Построение графиков
end % Окончание цикла
```

Сценарий обеспечивает построение графиков тока во времени при изменении величины сопротивления параллельного колебательного контура.

На рис. 9.14 представлены схема модели и результаты расчета.

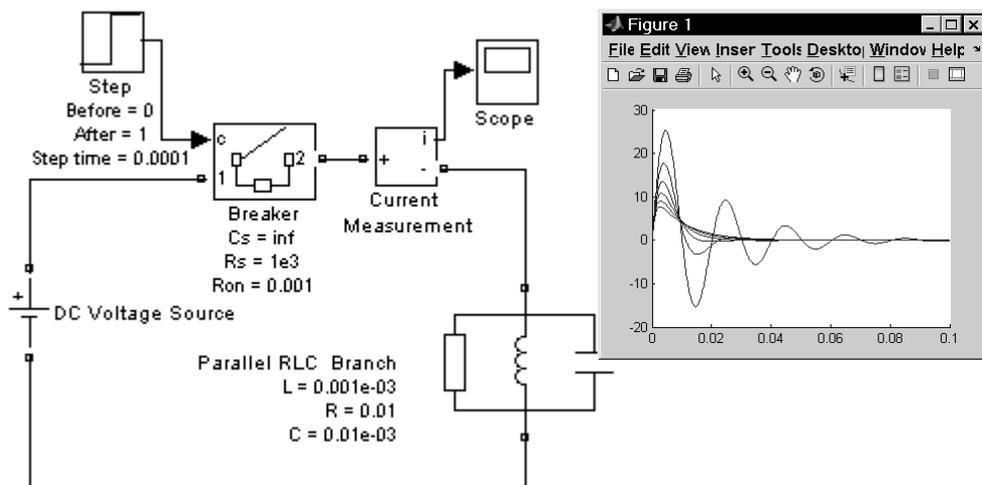


Рис. 9.14. Влияние сопротивления колебательного контура на переходные процессы

# Приложение 1

## Система меню

### обозревателя библиотек

# программы Simulink

**File** (Файл) – работа с файлами библиотек.

**Edit** (Редактирование) – добавление компонентов и их поиск.

**View** (Вид) – управление показом элементов интерфейса.

**Help** (Справка) – вывод окна справки по обозревателю библиотек.

Таблица П. 1. Меню обозревателя библиотек

| Команда                            | Назначение                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>File (Файл)</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                    |
| New                                | Открыть окно новой блок-диаграммы                                                                                                                                                                                                  |
| Model (Ctrl+N)                     | Открыть окно для создания Simulink-модели                                                                                                                                                                                          |
| Library                            | Открыть окно для создания новой библиотеки Simulink                                                                                                                                                                                |
| Open ... (Ctrl+O)                  | Открыть существующий mdl-файл. При выборе данного пункта открывается стандартная диалоговая панель файловой системы Windows, с помощью которой можно найти и открыть требуемый файл модели                                         |
| Close (Ctrl+W)                     | Закрывать окно схемы (и соответствующий mdl-файл). В том случае, если в блок-диаграмму вносились изменения, которые не были сохранены в файле на диске, то перед закрытием окна MATLAB запрашивает подтверждение на закрытие файла |
| Preferences...                     | Настройка Simulink. Задаёт параметры «по умолчанию» создаваемых моделей                                                                                                                                                            |
| <b>Edit (Редактирование)</b>       |                                                                                                                                                                                                                                    |
| Add to the current model           | Добавить выделенный блок в текущую модель                                                                                                                                                                                          |
| Find block...                      | Найти блок с заданным именем. Команда выводит окно с запросом имени блока                                                                                                                                                          |
| Find next block...                 | Найти следующий блок с заданным именем. Эту же операцию выполняет и команда Find next в окне задания слова для поиска                                                                                                              |
| <b>View (Вид)</b>                  |                                                                                                                                                                                                                                    |
| Toolbar                            | Вывод/скрытие панели инструментов                                                                                                                                                                                                  |
| Status bar                         | Вывод/скрытие строки состояния                                                                                                                                                                                                     |
| Description                        | Вывод/скрытие окна сообщений                                                                                                                                                                                                       |
| Stay on top                        | Установка статуса окна обозревателя библиотек «поверх всех окон»                                                                                                                                                                   |
| Collapse entire                    | Закрывание текущего раздела библиотеки                                                                                                                                                                                             |
| Browser                            |                                                                                                                                                                                                                                    |
| Expand entire                      | Раскрывание текущего раздела библиотеки                                                                                                                                                                                            |
| Browser                            |                                                                                                                                                                                                                                    |
| Large icons                        | Отображение пиктограмм блоков в увеличенном размере                                                                                                                                                                                |
| Small icons                        | Отображение пиктограмм блоков в уменьшенном размере                                                                                                                                                                                |
| Show Parameters for selected block | Вывод окна установки параметров отмеченного блока                                                                                                                                                                                  |
| <b>Help (Справка)</b>              |                                                                                                                                                                                                                                    |
| Help on the selected block         | Справка по выделенному блоку                                                                                                                                                                                                       |
| Simulink help                      | Вывод окна справочной системы Simulink                                                                                                                                                                                             |
| Tip of the day                     | Полезные советы на каждый день                                                                                                                                                                                                     |

# Приложение 2

## Система меню окна модели

**File** (Файл) – работа с файлами моделей.

**Edit** (Редактирование) – изменение модели и поиск блоков.

**View** (Вид) – управление показом элементов интерфейса.

**Simulation** (Моделирование) – задание настроек для моделирования и управление процессом расчета.

**Format** (Форматирование) – изменение внешнего вида блоков и модели в целом.

**Tools** (Инструментальные средства) – применение специальных средств для работы с моделью (отладчик, линейный анализ и т. п.).

**Help** (Справка) – вывод окон справочной системы.

Таблица П.2. Меню окна модели

| Команда                      | Назначение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>File (Файл)</b>           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| New                          | Открыть окно новой блок-диаграммы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Model (Ctrl+N)               | Открыть окно для создания Simulink-модели                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Library                      | Открыть окно для создания новой библиотеки Simulink                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Open ... (Ctrl+O)            | Открыть существующий mdl-файл                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Close (Ctrl+W)               | Закрыть окно схемы (и соответствующий mdl-файл). В том случае, если в схему вносились изменения, которые не были сохранены в файле на диске, то перед закрытием окна MATLAB запрашивает подтверждение на закрытие файла                                                                                                                                                                                                                      |
| Save (Ctrl+S)                | Сохранить (записать на диск) mdl-файл. Если данный файл сохраняется первый раз, то при выборе этой команды открывается стандартная диалоговая панель, с помощью которой пользователь может указать новое имя файла (вместо untitled) и каталог, в котором будет производиться запись. Если файл уже записывался на диск, то при выполнении команды Save он будет сохранен под прежним именем и в том же каталоге (без открытия окна диалога) |
| Save as...                   | Сохранение файла под новым именем или в другой папке                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Source Control...            | Управление источниками сигналов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Check in...                  | Проверка входа. Позволяет ввести расширенное текстовое описание источника                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Check out                    | Проверка выхода. Позволяет ввести расширенное текстовое описание источника                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Undo Check out               | Отмена проверки выхода                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Model Properties             | Свойства модели                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Preferences                  | Настройки «по умолчанию»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Print (Ctrl+P)               | Печать схемы модели                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Export to WEB...             | Преобразование модели к форме, удобной для публикации в сети Internet                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Print details...             | Выбор уровня детализации для печати модели: печать текущего блока, печать текущего блока и модели верхнего уровня иерархии, печать текущего блока и моделей нижнего уровня иерархии либо печать всей модели                                                                                                                                                                                                                                  |
| Print setup...               | Настройка параметров печати                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Enable Tiled Printing        | Разрешить печать с перекрытием                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Exit MATLAB                  | Завершение работы с системой MATLAB                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Edit (Редактирование)</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Undo                         | Отменить предыдущую команду редактирования. В некоторых случаях команда Undo может уточняться, например после добавления в схему линии связи она будет называться Undo Add Line (Отменить добавление линии). Если нельзя отменить предыдущее действие, то команда Undo заменяется сообщением Can't Undo                                                                                                                                      |
| Redo                         | Отменить выполнение команды Undo. Эта команда также может видоизменяться (например, Redo Add Line) либо сообщать о невозможности отмены (Can't Redo)                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Cut                          | Вырезать (переместить) в буфер обмена фрагмент схемы. Соответствующий фрагмент должен быть выделен                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Таблица П.2. Меню окна модели (продолжение)

| Команда                    | Назначение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Copy                       | Копировать фрагмент схемы. Соответствующий фрагмент должен быть выделен. Данная команда используется совместно с командой Paste                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Paste                      | Вставить копируемый или удаленный в буфер обмена участок модели. Для того чтобы указать позицию вставки, необходимо предварительно щелкнуть в соответствующей точке окна схемы (этой точке будет соответствовать верхний левый угол вставляемой области)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Paste Duplicate            | Вставить дублирующий входной порт. Перед выполнением команды исходный порт необходимо скопировать в буфер                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Inport                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Delete                     | Удалить выделенную область                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Select All (Ctrl+A)        | Выделить все элементы схемы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Copy Model to Clipboard    | Копировать модель в буфер обмена. Запись графического изображения схемы в буфер обмена Windows (Clipboard) для передачи в другие Windows-приложения в виде графического объекта. По умолчанию блок-диаграмма сохраняется в формате WMF (Windows Metafile), формат может быть изменен из командного окна MATLAB (меню File, команда Preferences)                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Find ... (Ctrl+F)          | Поиск объекта в модели                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Explore                    | Запуск Model Explorer (обозреватель модели)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Block Parameters           | Открытие окна параметров выделенного блока                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Block Properties...        | Вызов окна диалога для установки дополнительных атрибутов выбранного блока                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Signal Properties          | Команда обеспечивает вызов окна диалога для установки атрибутов сигнала, передаваемого по выделенной линии связи                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Create Subsystem (Ctrl+G)  | Создать подсистему                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Mask Subsystem... (Ctrl+M) | Маскировать подсистему. Если выделенная подсистема уже является маскированной, то команда Mask Subsystem принимает вид Edit Mask                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Look Under Mask (Ctrl+U)   | Заглянуть под маску. Команда открывает окно блок-диаграммы маскированной подсистемы. Команда доступна только в том случае, если выбранный блок является маскированной подсистемой                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Link options               | Настройка связей блока                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Go To Library Link         | Перейти к связанной библиотеке. Команда открывает раздел библиотеки, к которому относится выделенный блок. Команда доступна только в том случае, если блок взят из библиотеки пользователя или из раздела Simulink Extras                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Break Link                 | Разорвать связь с библиотекой. Команда позволяет сделать библиотечный блок «самостоятельным», не связанным с библиотекой, что обеспечивает возможность его редактирования                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Restore Link               | Восстановить связь с библиотекой                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| View Changes               | Просмотр изменений                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Unlock Library             | Открыть библиотеку. Команда доступна только в окне библиотеки (Library). После ее выполнения становится возможным редактирование соответствующего раздела, при этом на месте команды выводится признак Library Unlocked (Библиотека открыта), который сохраняется до закрытия окна редактируемого раздела                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Refresh Model blocks       | Обновить блоки модели. Команда используется, если модель содержит ссылки на другие файлы моделей                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Update Diagram (Ctrl+D)    | Обновить блок-диаграмму. Команду необходимо использовать в следующих случаях: <ul style="list-style-type: none"> <li>• после изменения (редактирования) библиотечных блоков, копии которых используются в модели;</li> <li>• после добавления в конфигурацию MATLAB нового раздела библиотеки, блоки из которого используются в открытой модели;</li> <li>• после изменения параметров одного или нескольких блоков модели из командного окна MATLAB;</li> <li>• после изменения S-функции, используемой в модели (при добавлении или удалении входных и/или выходных портов соответствующего блока)</li> </ul> |
| <b>View (Вид)</b>          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Go to Parent               | Переход из подсистемы в систему высшего уровня иерархии («родительскую систему»). Команда доступна, только если открыта подсистема                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Toolbar                    | Показать/скрыть панель инструментов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Statusbar                  | Показать/скрыть строку состояния                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Model Browser              | Работа с обозревателем модели                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Options                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Model Browser              | Вызов обозревателя модели                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

Таблица П.2. Меню окна модели (продолжение)

| Команда                             | Назначение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Show Library Links                  | Показывать в окне обозревателя библиотечные подсистемы, то есть подсистемы, созданные пользователем и включенные им в состав собственной библиотеки. При выборе этой команды окно блок-диаграммы модели дополняется подокном, отображающим ее иерархическую структуру в виде дерева                                                                                                                         |
| Show Masked Subsystems              | Показывать в окне обозревателя маскированные подсистемы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Block Data Tips Options             | Подсказка по параметрам блока. Содержит команды управления всплывающей подсказкой (tips) для блоков модели. О том, что соответствующий режим установлен, свидетельствует маркер в виде флажка. Подсказка появляется на экране, если задержать на некоторое время указатель мыши над пиктограммой блока                                                                                                      |
| Block name                          | Показывать название блока                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Parameter names and values          | Показывать имена и значения параметров настройки блока                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| User description string             | Показывать описание блока, заданное пользователем с помощью команды Edit/Block Properties...                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Library Browser System Requirements | Показывать окно обозревателя библиотек блоков                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Add link to Word selection          | Технические требования к системе. Команда позволяет добавить к контекстному меню блока ссылку на технические требования                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Add link to active Excel cell       | Добавить ссылку на выделенный фрагмент текста в программе Microsoft Word                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Edit/Add Links... Link setting...   | Добавить ссылку на выделенную ячейку в программе Microsoft Excel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Zoom In                             | Редактировать/Добавить ссылку                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Zoom Out                            | Увеличить масштаб. Увеличить масштаб изображения схемы. Каждое обращение к команде дает увеличение масштаба в полтора раза (на 50%)                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Fit system to view                  | Уменьшить масштаб. Уменьшить масштаб изображения схемы. Каждое обращение к команде дает уменьшение масштаба в полтора раза                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Port Values Show None               | Подготовить систему для просмотра. Увеличить масштаб изображения выбранного элемента схемы. Команда обеспечивает N-кратное увеличение (кратность увеличения зависит от исходного размера элемента) и позиционирует элемент по центру окна схемы                                                                                                                                                             |
| Show When Hovering                  | Значения сигналов на выходных портах блоков                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Toggle When Clicked Options...      | Не показывать                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Show Page Boundaries                | Показывать при наведении указателя мыши                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Normal (100%)                       | Включить показ после одиночного щелчка левой клавишей мыши на пиктограмме блока                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Remove highlighting                 | Параметры отображения значений сигналов (шрифт, размер, интервал обновления по времени и т. д.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                     | Показывать границы листа                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                     | Восстановить стандартный масштаб изображения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                                     | Отменить цветное выделение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Simulation (Моделирование)</b>   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Start                               | Запуск модели на исполнение. При запуске модели команда Start заменяется командой Pause, которая позволяет приостановить сеанс моделирования. Кроме того, становится доступной команда Stop, расположенная ниже. При прерывании моделирования с помощью команды Pause она заменяется альтернативной командой – Continue                                                                                     |
| Stop                                | Завершить моделирование. Команда становится доступной после запуска модели на расчет                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Configuration parameters ... Normal | Настройка параметров моделирования                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Accelerator                         | Обычный (неускоренный) режим расчета. Команда доступна, если установлено приложение Simulink Performance Tool                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                     | Ускоренный режим расчета. Команда доступна, если установлено приложение Simulink Performance Tool. В этом режиме, после запуска модели на исполнение, создается исполняемый файл модели в виде динамической библиотеки (файл с расширением dll). В результате скорость расчета возрастает в несколько раз. Ускоренный режим расчета не поддерживается для моделей, имеющих замкнутые алгебраические контуры |

Таблица П.2. Меню окна модели (продолжение)

| Команда                                  | Назначение                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| External                                 | Внешний режим. Режим обеспечивает обмен данными между Simulink-моделью и внешней программой                                                                                                                                                                                               |
| <b>Format (Форматирование)</b>           |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Font...                                  | Выбор шрифта для текстовой информации, выводимой на пиктограмме блока, и для метки (имени) блока                                                                                                                                                                                          |
| Enable TeX commands                      | Включить выполнение специальных текстовых команд для отображения математических символов, греческих букв и т. п.                                                                                                                                                                          |
| Text Alignment                           | Выравнивание текста. Задаёт способ расположения текстовой области                                                                                                                                                                                                                         |
| Flip Name                                | Изменить положение имени блока (над или под изображением блока)                                                                                                                                                                                                                           |
| Hide Name/<br>Show Name                  | Скрыть/показать имя блока                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Flip Block                               | Развернуть изображение блока относительно вертикальной оси симметрии на 180°                                                                                                                                                                                                              |
| Rotate Block                             | Повернуть изображение блока относительно вертикальной оси симметрии на 90° (по часовой стрелке)                                                                                                                                                                                           |
| Show/Hide Drop Shadow                    | Показать/скрыть «тень»                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Hide/Show Port Labels                    | Скрыть/показать метки портов блока. Данная команда применима только к блокам-подсистемам (Subsystem), содержащим внутренние входные или выходные порты, то есть блоки In и Out. Если такие блоки имеются в подсистеме, то их метки по умолчанию выводятся на пиктограмме блока-подсистемы |
| Foreground Color                         | Основной цвет. Выбор цвета контура и символов на пиктограмме выбранного блока (группы блоков)                                                                                                                                                                                             |
| Background Color                         | Цвет фона. Выбор цвета фона пиктограммы выбранного блока (группы блоков)                                                                                                                                                                                                                  |
| Screen Color                             | Выбор цвета фона схемы                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Port Signal/Displays                     | Отображение свойств сигналов/портов                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Sample Time Colors                       | Подсветка блоков, управляемых параметром Sample time. Блоки, работа которых зависит от величины шага модельного времени, а также соединяющие их линии связи при выполнении данной команды выделяются на блок-диаграмме красным цветом                                                     |
| Linearization Indicators                 | Показывать индикаторы точек линеаризации                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Port Data Types                          | Тип порта. Рядом с линиями связи отображаются наименования типов данных, установленных для портов, с которыми они соединены                                                                                                                                                               |
| Signal dimensions                        | Размерность векторных и матричных линий связи. Для векторных или матричных линий связи выводится в цифровой форме размерность передаваемого сигнала, то есть число элементов вектора                                                                                                      |
| Storage class                            | Класс памяти                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Testpoint Indicators                     | Показывать индикаторы тестовых точек                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Viewer Indicators                        | Показывать индикаторы средств просмотра сигналов                                                                                                                                                                                                                                          |
| Wide nonscalar lines                     | Широкие линии связи для не скалярных величин. Линии связи, по которым передаются векторные и матричные величины, выводятся более «жирными»                                                                                                                                                |
| Block Displays                           | Вывод порядкового номера блока в последовательности выполнения расчета                                                                                                                                                                                                                    |
| Sorted Order                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Model Block Version                      | Отображение номера версии блока                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Model Block I/O                          | Отображение несоответствия типа входных/выходных сигналов блока                                                                                                                                                                                                                           |
| Mismatch                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Execution Context Indicator              | Индикатор контекста выполнения подсистемы                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Library Link Display                     | Отображение связей с библиотеками                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Tools (Инструментальные средства)</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Simulink debugger...                     | Отладчик моделей. Позволяет в пошаговом режиме протестировать модель                                                                                                                                                                                                                      |
| Fixed-Point settings...                  | Настройка режима расчета с фиксированной точкой                                                                                                                                                                                                                                           |
| Model Advisor...                         | Запуск инструмента Model Advisor (Консультант). Инструмент анализирует модель с точки зрения наилучшей эффективности и точности                                                                                                                                                           |
| Model Dependency Viewer...               | Запуск инструмента Model Dependency Viewer (Обозреватель структуры модели). Инструмент представляет в графической форме структуру модели с точки зрения состава используемых в модели библиотек. Позволяет быстро перейти к нужной библиотеке                                             |

Таблица П.2. Меню окна модели (продолжение)

| Команда                        | Назначение                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lookup Table Editor...         | Редактор таблиц. Инструмент позволяет редактировать параметры блоков таблиц                                                                                                                                                                     |
| Data Class Designer...         | Инструмент создания классов данных                                                                                                                                                                                                              |
| Bus Editor...                  | Позволяет редактировать свойства объектов типа Bus                                                                                                                                                                                              |
| Profiler                       | Создание отчета о процессе моделирования. Команда должна быть выполнена до начала процесса моделирования. По окончании моделирования создается и выводится на экран отчет, в котором можно просмотреть временные затраты при выполнении расчета |
| Coverage Setting...            | Открытие окна настроек отчета по моделированию                                                                                                                                                                                                  |
| Requirements                   | Технические требования к системе                                                                                                                                                                                                                |
| Link Setting...                | Настройка ссылок для выделенного объекта                                                                                                                                                                                                        |
| Consistency checking           | Проверка на непротиворечивость. По данной команде выполняется проверка соответствия допущений, принятых решателями Simulink, и аналогичных допущений, используемых в S-функциях моделей                                                         |
| Generate Report...             | Создание отчета по всем системным требованиям, связанным с моделью и ее блоками                                                                                                                                                                 |
| Highlight model                | Выделить объекты модели, для которых установлены системные требования                                                                                                                                                                           |
| Signal and Scope Manager       | Инструмент для работы с генераторами сигналов и устройствами просмотра сигналов                                                                                                                                                                 |
| Real-Time Workshop             | Мастерская реального времени. Инструмент для создания приложений, работающих в реальном времени                                                                                                                                                 |
| Options...                     | Параметры                                                                                                                                                                                                                                       |
| Build Model...                 | Создать исполняемый файл для модели                                                                                                                                                                                                             |
| Build Subsystem...             | Создать исполняемый файл для выделенной подсистемы                                                                                                                                                                                              |
| Generate S-function...         | Создать S-функцию для выделенной подсистемы                                                                                                                                                                                                     |
| External Mode                  | Панель управления внешней по отношению к Simulink программы                                                                                                                                                                                     |
| Control Panel...               |                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Model differences...           | Сравнение моделей                                                                                                                                                                                                                               |
| Merge/Compare two models...    | Объединить/Сравнить две модели                                                                                                                                                                                                                  |
| Compare to last saved model... | Сравнить текущее состояние модели с вариантом, который был сохранен на диске в последний раз                                                                                                                                                    |
| Control Design                 | Инструмент проектирования систем управления. Команда доступна, если установлен инструмент Control System Toolbox (Приложение к MATLAB для исследования и разработки систем управления)                                                          |
| Linear Analysis...             | Исследование линейных стационарных систем                                                                                                                                                                                                       |
| Compensator Design...          | Определение коэффициента передачи обратной связи для замкнутой системы                                                                                                                                                                          |
| Model Descretizer...           | Дискретизация модели                                                                                                                                                                                                                            |
| Parameter Estimation...        | Инструмент подбора параметров. Инструмент позволяет подбирать параметры модели, основываясь на экспериментальных данных                                                                                                                         |
| Report Generator...            | Инструмент создания отчетов                                                                                                                                                                                                                     |
| HDL Coder                      | Создание описания модели на языке HDL                                                                                                                                                                                                           |
| Options...                     | Параметры                                                                                                                                                                                                                                       |
| Generate HDL                   | Создать описание модели на языке HDL                                                                                                                                                                                                            |
| Link for TASKING               |                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Data Object Wizard             | Мастер создания объектов данных                                                                                                                                                                                                                 |
| System Test...                 | Инструмент тестирования модели                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Help (Справка)</b>          |                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Using Simulink                 | Справка по работе с программой Simulink                                                                                                                                                                                                         |
| Blocks                         | Справка по выделенному блоку или библиотеке блоков                                                                                                                                                                                              |
| Blocksets                      | Справка по установленным библиотекам блоков                                                                                                                                                                                                     |
| Blocks Support Table           | Таблица блоков, поддерживающих различные типы данных                                                                                                                                                                                            |
| Shortcuts                      | Справка по управлению программой Simulink с помощью нажатия комбинаций клавиш                                                                                                                                                                   |
| S-functions                    | Справка по созданию S-функций                                                                                                                                                                                                                   |
| Demos                          | Запуск системы демонстрационных примеров                                                                                                                                                                                                        |
| Terms of Use...                | Сроки использования                                                                                                                                                                                                                             |
| Patents...                     | Патенты                                                                                                                                                                                                                                         |
| About Simulink                 | Вывод окна с номером версии Simulink                                                                                                                                                                                                            |

# Литература

1. Черных И. В. SIMULINK: Среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. В. Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
2. Герман-Галкина С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины. Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с.
3. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
4. Герман-Галкин С. Г. Линейные электрические цепи. Лабораторные работы. – СПб.: Учитель и ученик, КОРОНА принт, 2002. – 320 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника. Лабораторные работы. – СПб.: Учитель и ученик, КОРОНА принт, 2002. – 304 с.
6. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя. – М.: Солон-Пресс. – 2002. – 768 с.
7. Дьяконов В. П. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
8. Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – М.: Солон-Р, 2001. – 520 с.
9. Dommel H. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiple Networks, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, No. 4, April, 1969.
10. Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, *IEEE Standard 421.5-1992*, August, 1992.
11. IEEE Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Dynamic Studies, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, February, 1992, pp. 167–179.
12. IEEE committee report, Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-92, No. 6, 1973, pp. 1904–1915.
13. SimPowerSystems 4. Reference. The MathWorks, Inc. 2006. – 931 p.

# Предметный указатель

## СИМВОЛЫ

3-Phase Breaker, 102  
3-Phase Dynamic Load, 90  
3-Phase Fault, 104  
3-Phase Mutual Inductance Z1-Z0, 98  
3-Phase Parallel RLC Load, 88  
3-Phase PI Section Line, 110  
3-Phase Programmable Voltage Source, 58  
3-Phase Series RLC Branch, 82  
3-Phase Series RLC Load, 87  
3-Phase Source, 56

## A–B

Absolute tolerance, 26  
AC Current Source, 50  
AC Voltage Source, 49  
Asynchronous Machine, 167  
Breaker, 99

## C

Compute RLC Line Parameters, 234  
Configuration Parameters, 24  
Connection Port, 138  
Controlled Current Source, 54  
Controlled Voltage Source, 52  
Create report, 230  
Current Measurement, 61

## D

DC Machine, 162  
DC Voltage Source, 47  
Detailed Thyristor, 142  
Diode, 139  
Discretize electrical model, 220  
Distributed Parameters Line, 111

## E

Electrical Sources, 36  
Elements, 36  
Excitation System, 185  
Extra Library, 36

## F

FFT Analysis, 228  
Fixed step size, 26

## G

Generic Power System Stabilizer, 196  
Ground, 135  
GTO Thyristor, 145

## H

Hydraulic Turbine and Governor, 188  
Hysteresis Design Tool, 232

## I

Ideal Switch, 153  
IGBT, 148  
Impedance Measurement, 71  
Impedance vs Frequency Measurements, 226  
Initial step size, 26

## L

Libraries Application, 36  
Linear Transformer, 114  
Load Flow and Machine Initialization, 223

## M

Machines, 36  
Machines Measurement Demux, 182

Max step size, 26  
Measurements, 36  
Min step size, 26  
Mosfet, 151  
Multi-Winding Transformer, 130  
Multiband Power System Stabilizer, 198  
Multimeter, 65  
Mutual Inductance, 96

## **N**

Neutral, 137

## **O**

ode15s, 37  
ode23t, 37

## **P–R**

Parallel RLC Branch, 75  
Parallel RLC Load, 80  
Permanent Magnet Synchronous Machine, 180  
Phasor Elements, 36  
Phasor simulation, 218  
PI Section Line, 107  
Power Electronics, 36  
power\_analyze, 258  
power\_lineparam, 259  
power\_statespace, 256  
Powergui, 216  
powerinit, 254  
powerlib\_models, 249  
Relative tolerance, 26

## **S**

Saturable Transformer, 116  
Series RLC Branch, 73  
Series RLC Load, 77

Simplified Synchronous Machine pu Units, 173  
Simplified Synchronous SI Units, 172  
Simulation time, 25  
Simulink Library Browser, 12  
Simulink LTI-Viewer, 226  
Single Phase Asynchronous Machine, 202  
Solver options, 25  
Static Var Compensator, 209  
Steady-State, 221  
Steam Turbine and Governor, 190  
Surge Arrester, 93  
Switched Reluctance Motor, 206  
Synchronous Machine pu Fundamental, 176  
Synchronous Machine SI Fundamental, 175

## **T**

Three-Level Bridge, 159  
Three-Phase Harmonic Filter, 134  
Three-phase Linear Transformer (12-terminals), 126  
Three-phase Transformer (Three Windings), 124  
Three-phase Transformer (Two Windings), 120  
Three-Phase V-I Measurement, 68  
Thyristor, 142

## **U–V–Z**

Universal Bridge, 156  
Voltage Measurement, 63  
Zero crossing control, 26  
Zigzag Phase-Shifting Transformer, 127