Черных И. В.

Моделирование электротехнических устройств в MATLAB

SimPowerSystems и Simulink

ДМК ПРЕСС издательство

ПИТЕР®

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 $^{1}/_{16}$.
Гарнитура «Петербург». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 27. Тираж 2000 экз.
№
Издательство ДМК Пресс
Web-сайт издательства: www.dmk-press.ru
Internet-магазин: www.abook.ru

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

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

Краткое содержание

Введение 10

Глава 1
ОПЕРАЦИОННАЯ СРЕДА SIMULINK 11

Глава 2
ОБЗОР ОСНОВНОЙ БИБЛИОТЕКИ SIMULINK 27

Глава 3
БИБЛИОТЕКА БЛОКОВ SIMPOWERSYSTEMS 35

Глава 4
ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ POWERGUI 215

Глава 5
СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ БЛОКОВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ 238

Глава 6
БИБЛИОТЕКА НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ 248

Глава 7
ОСНОВНЫЕ КОМАНДЫ MATLAB ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ SPS-МОДЕЛЬЮ 252

Глава 8
КАК SIMPOWERSYSTEMS РАБОТАЕТ 260

Глава 9
СОВЕТЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМ SIMPOWERSYSTEMS 266

Приложение 1
СИСТЕМА МЕНЮ ОБОЗРЕВАТЕЛЯ БИБЛИОТЕК ПРОГРАММЫ SIMULINK 280

Приложение 2
СИСТЕМА МЕНЮ ОКНА МОДЕЛИ 281

Литература 286

Предметный указатель 287

Содержание

Введение 10

Глава 1. Операционная среда Simulink 11
1.1. Запуск системы 12
1.2. Обозреватель библиотеки блоков Simulink 12
1.3. Создание модели 15
1.4. Основные элементы окна модели 17
1.5. Основные приемы подготовки и редактирования 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 и его выполнение 24
Установка параметров расчета модели 25
Выполнение расчета 26
Завершение работы 26

Глава 2. Обзор основной библиотеки Simulink 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

Глава 3. Библиотека блоков SimPowerSystems ... 35

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 Series RLC Branch 82
3.4.6. Трехфазная параллельная RLC-цепь 3-Phase Parallel RLC Branch 84
3.4.7. Трехфазная последовательная RLC-нагрузка 3-Phase Series RLC Load 86
3.4.8. Трехфазная параллельная RLC-нагрузка 3-Phase Parallel RLC Load 88
3.4.9. Трехфазная динамическая нагрузка 3-Phase 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 Inductance Z1-Z0 98
3.4.13. Выключатель переменного тока Breaker 99
3.4.14. Трехфазный выключатель переменного тока 3-Phase Breaker 102
3.4.15. Трехфазный короткозамыкатель 3-Phase Fault 104
3.4.16. Линия электропередачи с сосредоточенными параметрами PI Section Line 107
3.4.17. Трехфазная линия электропередачи с сосредоточенными параметрами 3-Phase PI Section Line 110
3.4.18. Линия электропередачи с распределенными параметрами Distributed Parameters Line 111
3.4.19. Силовой трансформатор без учета насыщения стали сердечника Linear Transformer 113
3.4.20. Силовой трансформатор с учетом насыщения стали сердечника Saturable Transformer 116
3.4.21. Трехфазный двухобмоточный трансформатор Three-phase Transformer (Two Windings) 120
3.4.22. Трехфазный трехобмоточный трансформатор 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 Multiband Power System Stabilizer 198
3.6.12. Однофазная асинхронная машина Single Phase Asynchronous Machine 202
3.6.13. Вентильный реактивный двигатель Switched Reluctance Motor 206
3.7. Модели для расчета векторным методом Phasor Elements . 209
3.7.1. Статический компенсатор реактивной мощности Static Var Compensator 209

Глава 4. Графический интерфейс пользователя Powergui 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 электрические машины 223
4.5. Использование Simulink LTI-Viewer для 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 намагничивания .. 232
4.10. Расчет параметров линии электропередачи 234

Глава 5. Создание электротехнических блоков пользователя 238
5.1. Принцип создания электротехнических блоков пользователя 239
5.2. Модель нелинейного резистора 240
5.3. Модель насыщающегося реактора 241
5.4. Модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением 243
5.4.1. Математическое описание ДПТ НВ и его Simulink-модель 243
5.4.2. Модель двигателя на базе источника тока 244
5.4.3. Модель двигателя на базе источника напряжения 245

Глава 6. Библиотека нелинейных моделей 248

Глава 7. Основные команды MATLAB для управления SPS-моделью 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

Глава 8. Как SimPowerSystems работает 260

8.1. Алгоритм расчета SimPowerSystems-модели 261

8.2. Выбор метода интегрирования 263

8.3. Особенности моделирования схем силовой электроники 264

Глава 9. Советы пользователям SimPowerSystems 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

Приложение 1. Система меню обозревателя библиотек программы Simulink 280

Приложение 2. Система меню окна модели 281

Литература 286

Предметный указатель 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 не ограниченные 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.