

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Силовая электроника относится к числу наиболее быстро развивающихся научных и технических дисциплин. Полупроводниковые системы, основой которых являются устройства силовой электроники, находят широкое применение в области электромеханики, электроэнергетики, электропривода, электротехнологий и т. д.

Вузовские программы соответствующих специальностей при изучении таких систем предусматривают в обязательном порядке проведение практических и лабораторных занятий. Эти занятия позволяют закрепить теоретические знания и выработать у учащегося определенные практические навыки.

Необходимость в проведении таких практических работ давно доказана и не может подвергаться сомнению. Однако реальные лабораторные установки имеют ряд ограничений. Прежде всего, они недостаточно универсальны, количество их в лаборатории ограничено, работа на них небезопасна для учащегося и для самой установки. Кроме того, эти работы, как правило, осуществляются в подгруппе из нескольких человек, при этом невозможно дать индивидуальное задание каждому. В последние годы все большее распространение получают дистанционные формы обучения. При такой форме обучения возможности учащегося в использовании реальных лабораторных установок существенно ограничены.

Расширить возможности учащихся вузов при освоении теоретических и практических проблем различных полупроводниковых систем и помочь тем, кто учится самостоятельно, используя дистанционное или иные формы обучения, призвана данная книга.

Учебник предназначен в основном для студентов старших курсов технических специальностей, изучающих использование устройств силовой электроники в электроэнергетических, электромеханических, электротехнических системах. Он также может быть полезен молодым специалистам, обучающимся на курсах повышения квалификации или желающим самостоятельно повысить уровень своих знаний в вышеизложенной области.

Основой изучения устройств силовой электроники в данной книге является их модельное исследование.

## МОДЕЛИ И РЕАЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Моделью называется любой другой объект, отдельные свойства которого полностью или частично совпадают со свойствами исходного. Следует ясно понимать, что исчерпывающие полной модели быть не может. Она всегда ограничена и должна лишь соответствовать целям моделирования, отражая ровно столько свойств исходного объекта и в такой полноте, сколько необходимо для конкретного исследования.

Можно выделить несколько целей, ради которых создаются модели [4].

1. Модель, как средство осмыслиения, помогает выявить взаимозависимости переменных, характер их изменения во времени, найти существующие закономерности. При составлении модели становится более понятной структура исследуемого объекта, вскрываются важные причинно-следственные связи.

В процессе моделирования постепенно происходит разделение свойств исходного объекта на существенные и второстепенные с точки зрения сформулированных требований к системе. В определенном смысле вся научная деятельность сводится к построению и исследованию моделей.

2. Модель, как средство прогнозирования, позволяет предсказывать поведение объекта и управлять им, испытывая различные варианты управления.

3. Модель, как средство проектирования, включает этапы эскизного, технического и рабочего проектирования. Достижение этой цели стало возможным благодаря интенсивному развитию специализированных прикладных пакетов.

Экспериментировать с реальным объектом часто бывает неудобно, а иногда и просто опасно или вообще невозможно в силу ряда причин:

- большая продолжительность эксперимента;
- риск повредить или уничтожить объект;
- риск для здоровья и жизни исследователей;
- отсутствие реального объекта в случае, когда он еще только проектируется.

Все эти причины устраняются при использовании моделей.

Модель отражает те или иные свойства реального физического объекта.

Модели бывают физическими, аналоговыми и математическими.

*Математическая модель* является математическим описанием реального физического объекта. Это описание базируется на физических законах, определяющих поведение объекта, и служит для исследования его свойств, необходимых инженеру. При наличии математического описания (математической модели) исследование свойств объекта может быть реализовано аналитическими методами либо с использованием компьютерного моделирования.

Аналитические методы имеют существенные ограничения. Они позволяют в полной мере исследовать системы, которые описываются дифференциальными уравнениями первого и второго порядка. Системы, описываемые уравнениями третьего и четвертого порядка, поддаются аналитическому решению, но влияние параметров системы приходится исследовать уже численными методами. Системы более высоких порядков исследуются только численными методами.

Численные методы базируются на использовании компьютерного моделирования.

*Компьютерная модель* — это программная реализация математической модели, дополненная различными служебными программами (например, рисующими и изменяющими графические образы во времени).

На исторически ранних этапах компьютерного моделирования программы создавались на языке машинных слов (1100101...). Следующим шагом стал язык Ассемблера. В дальнейшем появились языки программирования «высокого уровня» (Алгол, Бейсик, Фортран, Паскаль, С++ и др.). Технологии программирования с использованием языков высокого уровня требуют для создания моделей достаточно много времени. Трудозатраты на создание простой, с современной точки зрения, компьютерной модели оцениваются в несколько человеко-месяцев.

Дело в том, что при разработке модели сложной системы значительная часть ресурсов расходуется на решение чисто математических вопросов. Это может быть выбор математического аппарата (алгебраические уравнения, дифференциальные уравнения по одной переменной, дифференциальные уравнения в частных производных и т. д.), вывод уравнений системы, линеаризация, выбор метода обработки данных и др. При этом непосредственный разработчик (например, конструктор) вместо того, чтобы сосредоточиться на решении основной задачи, вынужден неоднократно обращаться к специалистам-математикам. Процесс моделирования, а значит, и всей разработки затягивается, порождает конфликты и т. д. Все это устраниют современные компьютерные технологии моделирования. Они дают в руки разработчику инструменты, позволяющие работать с *виртуальной моделью* реального объекта, при этом математика (вся или существенная ее часть) уходит как бы на задний план (уравнения создаются самой инструментальной средой, они не «видны»).

Такие виртуальные модели существенно облегчают задачу исследования полупроводниковых систем.

Современный уровень развития инструментальных средств моделирования таков, что позволяет исключить запись уравнений поведения объекта, представляя исследователю исчерпывающий набор виртуальных средств.

Однако на этапе разработки модели приходится разрешать противоречия между точностью модели и ее простотой. При этом необходимо выполнить ряд требований. Важнейшее из них, предъявляемое к разрабатываемым моделям, — требование адекватности, т. е. соответствия реальному объекту относительно выбранных для исследования системы свойств.

Стремление сделать модель максимально приближенной к реальному объекту повышает ее сложность и, как следствие, затраты на разработку и программную реализацию. В некоторых случаях модель может стать настолько сложной, что отладка ее будет просто невозможна. Таким образом, модель должна быть достаточно простой (без потери адекватности!).

Собственно, искусство моделирования и состоит в том, чтобы построить модель, которая наиболее адекватна из всех простых и наиболее проста из всех адекватных.

В связи со сказанным само построение модели становится *задачей творческой*, требующей от исследователя значительных знаний, опыта, а порой и интуиции.

В монографии модели этих систем представлены в «готовом виде». От изучающего требуется на готовой модели провести рекомендуемые исследования. Это не исключает возможности изменить модель и провести дополнительные исследования.

Среди специализированных прикладных пакетов лидирующее положение для исследования полупроводниковых систем занимают пакеты среды Matlab — Simulink фирмы Math Work. Эта пакетная среда используется в книге.

#### ПАКЕТНАЯ СРЕДА MATLAB — SIMULINK

Первая версия пакета Matlab была разработана уже более 20 лет тому назад. Развитие и совершенствование этого пакета происходило одновременно с развитием средств вычислительной техники. Название пакета Matlab происходит от словосочетания Matrix Laboratory, он ориентирован в первую очередь на обработку массивов данных (матриц и векторов). Именно поэтому, несмотря на достаточно высокую скорость смены поколений вычислительной техники, Matlab успевал впитывать все наиболее ценное от каждого из них.

В результате к настоящему времени Matlab представляет собой богатейшую библиотеку функций, единственная проблема работы которых заключается в умении быстро отыскать те из них, которые нужны для решения поставленной задачи.

Matlab имеет собственный язык программирования более высокого уровня, чем перечисленные выше. Однако разработчики пакета пошли дальше. Был создан пакет Simulink для исследования и проектирования динамических систем, который, по сути, является очень удобным интерфейсом для пользователей — специалистов в области теории управления.

Пакет Simulink является приложением к пакету Matlab. При моделировании с использованием пакета Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотек стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере, и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает.

Пакет Simulink является достаточно самостоятельным инструментом пакета Matlab и при работе с ним совсем не требуется знать сам Matlab и остальные его приложения. С другой стороны, доступ к функциям Matlab и другим его инструментам остается открытым и их можно использовать в Simulink. Часть входящих в состав пакетов имеет инструменты, встраиваемые в Simulink (например, LTI-Viewer приложения Control System Toolbox — пакет для разработки систем управления). Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (например, SimPower System — моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset — набор блоков для разработки цифровых устройств и т. д.).

При работе с Simulink пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать собственные, а также составлять новые библиотеки блоков.

В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц.

### РОЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМ

При проектировании нового технического объекта важнейшим этапом является принятие решения о его производстве. Для этого реализуется комплекс организационно-технических мероприятий: постановка задачи, эскизное, техническое и рабочее проектирование, изготовление опытного образца, испытания и т. д., причем в условиях ограниченных ресурсов. Поиск оптимального решения осуществляется посредством выбора различных стратегий, каждая из которых приводит к определенному исходу. Сравнение стратегий и выбор наилучшей из них возможен только в том случае, если исход имеет количественную характеристику — показатель эффективности. Он должен быть «измерен», следовательно, стратегия должна быть реализована. Для проектирования технического объекта это значит, что должны быть исследованы все его возможные варианты. Если исключить из данного процесса моделирование, то задача практически нерешаема (затраты на реальное воплощение вариантов объекта пропорциональны их числу и, как следствие, огромны). Именно поэтому моделирование занимает одно из центральных мест в проектировании: модель обеспечивает адекватное отображение свойств объекта, устраниет проблемы, связанные с измерениями на реальных объектах, обеспечивает воспроизводимость результатов и т. д.

### СОДЕРЖАНИЕ КНИГИ

Книга содержит шесть глав. В первой главе рассматриваются общие вопросы моделирования элементов и устройств силовой электроники в среде Matlab — Simulink. Здесь подробно описываются библиотеки среды, которые в дальнейшем используются при построении виртуальных лабораторий, программные и инструментальные средства представления результатов моделирования и основные характеристики полупроводниковых систем. Материал первой главы сопровождается значительным количеством примеров, многие из которых взяты из демонстрационных моделей пакетов Simulink и SimPower System. Эту главу следует трактовать как справочный материал, к которому стоит постоянно обращаться при проведении исследований в виртуальных лабораториях в последующих главах.

Во второй главе исследуются импульсные источники питания постоянного тока. Здесь рассмотрены три базовые схемы полупроводниковых преобразователей, осуществляющих прямое (однокаскадное) преобразование постоянного напряжения в постоянное без использования какого-либо промежуточного преобразования, например постоянного напряжения в переменное с последующим преобразованием переменного напряжения в постоянное. Применительно к этим схемам рассмотрены основные алгоритмы управления, которые в дальнейшем используются во всех полупроводниковых системах в последующих главах книги.

Третья глава посвящена полупроводниковому электроприводу постоянного тока. Здесь осуществлено модельное исследование электроприводов с управляемыми выпрямителями (однофазным и трехфазным) и полупроводниковыми широтно-импульсными преобразователями (одноплечевым и мостовым).

В четвертой главе рассмотрены асинхронные полупроводниковые электроприводы с двигателем с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (машиной двойного питания).

В пятой главе исследованы полупроводниковые электроприводы с синхронными двигателями. Здесь, в отличие от материалов глав 3, 4, значительное место уделено рассмотрению современных конструкций самих электрических машин. Эти конструкции произвели в определенном смысле революцию во взглядах на процессы, происходящие в электрической машине. По мнению автора, такие конструкции машин являются наиболее перспективным направлением развития электропривода.

Шестая глава посвящена полупроводниковым преобразователям в сетях переменного тока. Здесь рассмотрены вторичные источники питания в полупроводниковых системах (корректор коэффициента мощности, активный однофазный выпрямитель, активный трехфазный преобразователь) и активные фильтры (однофазный и трехфазный). Все эти устройства позволяют существенно увеличить коэффициент мощности в различных полупроводниковых системах и тем самым решить основную проблему современных полупроводниковых систем — повышение их энергоэффективности.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМ

Источником ухудшения энергоэффективности являются реактивные, нелинейные и несимметричные нагрузки.

Особенно остро встают проблемы, связанные с повышением коэффициента мощности при использовании устройств силовой электроники, которые являются существенно нелинейными элементами электрической цепи. В настоящее время проблемы совместимости преобразователей с сетью во многом являются определяющими при проектировании и применении последних. Это приводит к существенному обновлению типов и номенклатуры силовых преобразователей, разработке и появлению на рынке новых типов преобразовательных устройств (корректоры коэффициента мощности, активные выпрямители, активные фильтры и др.).

Серьезнейшее внимание вопросам энергоэффективности уделяется при проектировании электроприводов с силовыми полупроводниковыми преобразователями.

Особенно остро проблемы энергоэффективности встают при проектировании мощных приводов для коммунального хозяйства городов, транспортных систем, систем автономного энергоснабжения и др. Проблема энергоэффективности полупроводникового электропривода имеет два аспекта. Условно их можно определить как внутренний и внешний. Внутренний аспект связан с отношением механической мощности на валу исполнительной электрической машины и неактивной мощности, циркулирующей внутри системы «полупроводнико-

вый преобразователь — электрическая машина». Это отношение зависит от внутренней структуры электропривода. Внешний аспект энергоэффективности электропривода связан с совместимостью его с питающей сетью переменного тока. Эта совместимость обусловлена, во-первых, возможностью двухстороннего обмена энергией между сетью переменного тока и механическим валом и, во-вторых, отсутствием потребления электроприводом неактивных составляющих мощности из сети.

Исследование энергоэффективности осуществляется в установившихся (квазиустановившихся) режимах работы полупроводниковой системы. Они включают расчет электромагнитных и спектральных характеристик полупроводникового преобразователя, расчет энергетических характеристик подсистемы «полупроводниковый преобразователь — нагрузка», расчет рабочих характеристик в электроприводе. Электромагнитные процессы, влияющие на энергетические свойства полупроводниковой системы, разнятся во времени на 6–7 порядков. Желание учесть все эти процессы в модели приводит к ее неработоспособности. Поэтому при построении виртуальных моделей статических (главы 2, 6) преобразователей и преобразователей для электроприводов (главы 3–5) исключаются инерционные переходные процессы в нагрузке. В статических полупроводниковых преобразователях это достигается путем введения начальных условий на конденсаторах фильтра в звене постоянного тока. В электроприводах исключение механического переходного процесса достигается путем задания установившейся скорости на механическом входе виртуальных электрических машин.

Исключение наиболее инерционных (медленных) процессов при исследовании энергетических свойств полупроводниковой системы является первым шагом создания адекватной модели.

Вторым существенным моментом является выбор модели силового преобразователя, которая определяет наиболее быстрые процессы в системе. Среда Matlab — Simulink предоставляет исследователю различные модели силовых преобразователей, начиная с моделей «по средним значениям», в которых не учитывается динамика работы полупроводникового прибора, и заканчивая SPICE-моделями. В SPICE-моделях задаются электрофизические и конструктивные параметры полупроводниковых приборов. Такие модели содержат несколько десятков параметров, которые разработчикам полупроводниковых систем, как правило, неизвестны. Кроме того, попытка построить модель полупроводниковой системы для исследования ее энергетических характеристик с использованием SPICE-моделей приводит к возрастанию времени симуляции на 3–4 порядка. Даже на современных многоядерных компьютерах эта задача неразрешима. В книге использованы модели полупроводниковых приборов, основанные на эквивалентных электрических схемах замещения.

Такой подход позволил выполнить основное требование к моделям, т. е. разработать модели, наиболее адекватные из всех простых и наиболее простые из всех адекватных.

### 1.1. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СРЕДЕ MATLAB — SIMULINK

Для исследования систем силовой электроники и электромеханики компьютерные технологии в среде Matlab — Simulink можно поделить на несколько уровней.

1. Уровень, использующий рабочее пространство Matlab и его расширений (Toolboxes).

2. Уровень, использующий структурные блоки пакета Simulink и его расширений (Blocksets).

3. Уровень, использующий виртуальные (маскированные) блоки пакета SimPower System.

4. Уровень, использующий имитационные лабораторные стенды, разработанные с использованием графического интерфейса пользователя (GUI).

Ниже на конкретных примерах рассматриваются перечисленные уровни создания виртуальных лабораторий в среде Matlab — Simulink.

#### 1.1.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПАКЕТА MATLAB И ЕГО РАСШИРЕНИЙ (TOOLBOXES)

*Пример 1.1.1. Расчет токов в разветвленной электрической цепи*

Основные характеристики изучаемого устройства (системы) могут быть найдены в результате решения системы уравнений, описывающих это устройство.

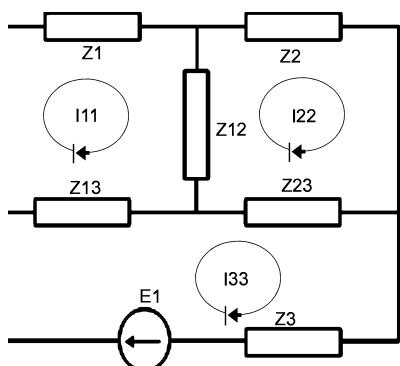


Таблица 1.1.1

Impedances Z
$Z = 1.0e + 002^*$
$1.0000 + 0.5000i$ $0 + 0.5000i$ $-0.5000$
$0 + 0.5000i$ $1.0000 - 0.7500i$ $0.5000 + 0.2500i$
$-0.5000$ $-0.5000 + 0.2500i$ $1.1000 - 0.2500i$
Currents I
$0.7101 - 1.0197i$
$1.0919 - 0.3530i$
$2.7928 - 0.2374i$

Рис. 1.1.1

Разветвленная электрическая цепь

Решение реализуется на языке пакета Matlab [32]. Рассмотрим применение этой методики для расчета разветвленной электрической цепи методом контурных токов (доказательство метода опущено).

Электрическая схема показана на рисунке 1.1.1.

Программа расчета приведена в листинге 1.1.1.

### Листинг 1.1.1

```
% Date
Z1 = 50 + 100j; Z2 = 50; Z3 = 10; Z12 = -50j; Z13 = 50; Z23 = 50-25j; E = 220;

% Design impedances
disp('Impedances Z');
Z = [Z1 + Z12 + Z13 - Z12 - Z13;...
      -Z12 Z2 + Z12 + Z23 - Z23;...
      -Z13 -Z23 Z3 + Z13 + Z23];
% Voltage sources
U = [0 0 E]';

disp('Currents'), I = Z\U
```

Результаты расчета матрицы полных сопротивлений и контурных токов показаны в таблице 1.1.1.

Использование такого подхода позволяет сосредоточить внимание на проблемах теории цепей, а не на технике расчета.

*Пример 1.1.2. Расчет и построение частотной характеристики*

Пакет расширения Control System Toolbox предназначен для моделирования, анализа и проектирования непрерывных и дискретных систем автоматического управления. Функции пакета реализуют методы исследования динамических систем, основанные на использовании передаточных функций и моделей для переменных состояния. Частотные и временные характеристики, нули и полюсы системы легко вычисляются и отображаются в виде графиков и диаграмм.

Исследование систем автоматического управления начинается с создания математической модели. В пакете расширения Control System Toolbox (CST) линейные модели могут быть представлены в четырех формах:

- передаточная функция (tf);
- нули, полюса и коэффициент усиления (zpk);
- пространство состояния (ss);
- системная функция (frd).

В пакете расширения Control System Toolbox все перечисленные математические описания связаны между собой и представляют так называемые, LTI-объекты. Поэтому получение любой характеристики может быть реализовано при любом математическом описании. В листинге 1.1.2 представлена программа их построения для случая описания системы передаточной функцией. Задать модель системы в форме tf — это задать вектор коэффициентов числителя и знаменателя передаточной функции.

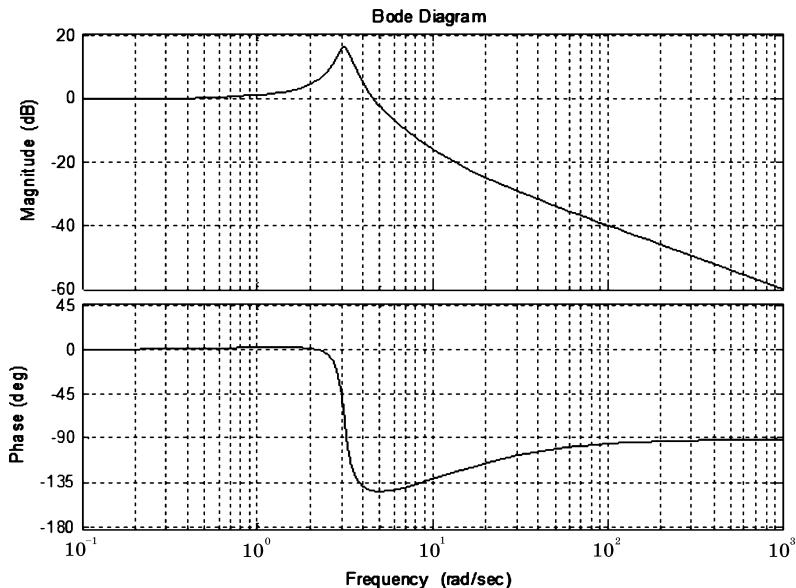


Рис. 1.1.2  
Логарифмические частотные характеристики

### Листинг 1.1.2

```

h1 = tf([1,10],[1,0.5 10]);      % Передаточная функция объекта.
figure(1)                         % Построение переходной
step(h1),grid on                   % характеристики объекта.
figure(2)                         % Построение импульсной
impulse(h1),grid on                % характеристики объекта.
figure(3)                         % Построение амплитудно-частотной и
bode(h1),grid on                   % фазо-частотной характеристик объекта.
figure(4)                         % Построение амплитудно-фазовой
nyquist(h1),grid on                % характеристики объекта.

```

В результате выполнения программы Matlab строит соответствующие характеристики.

На рисунке 1.1.2 в качестве примера показаны логарифмические частотные характеристики системы.

### 1.1.2. ПАКЕТ SIMULINK И ЕГО РАСШИРЕНИЯ BLOCKSETS

*Пример 1.1.3. Расчет и построение динамических характеристик блоком Transfer Fcn пакета Simulink*

На рисунке 1.1.3 представлено окно настройки параметров динамического звена в пакете Simulink, которому соответствует операторная передаточная функция вида:

$$W(s) = \frac{1}{0,025s^4 + 0,18s^3 + 0,54s^2 + 0,8s + 1}. \quad (1.1.1)$$

Рис. 1.1.3  
Окно настройки блока Transfer Fcn

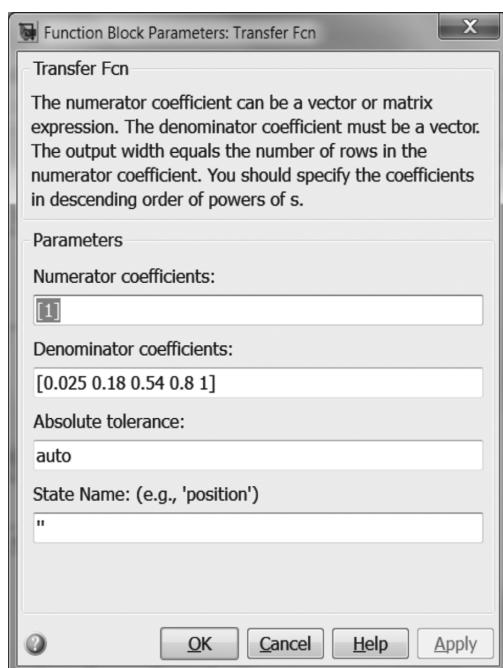
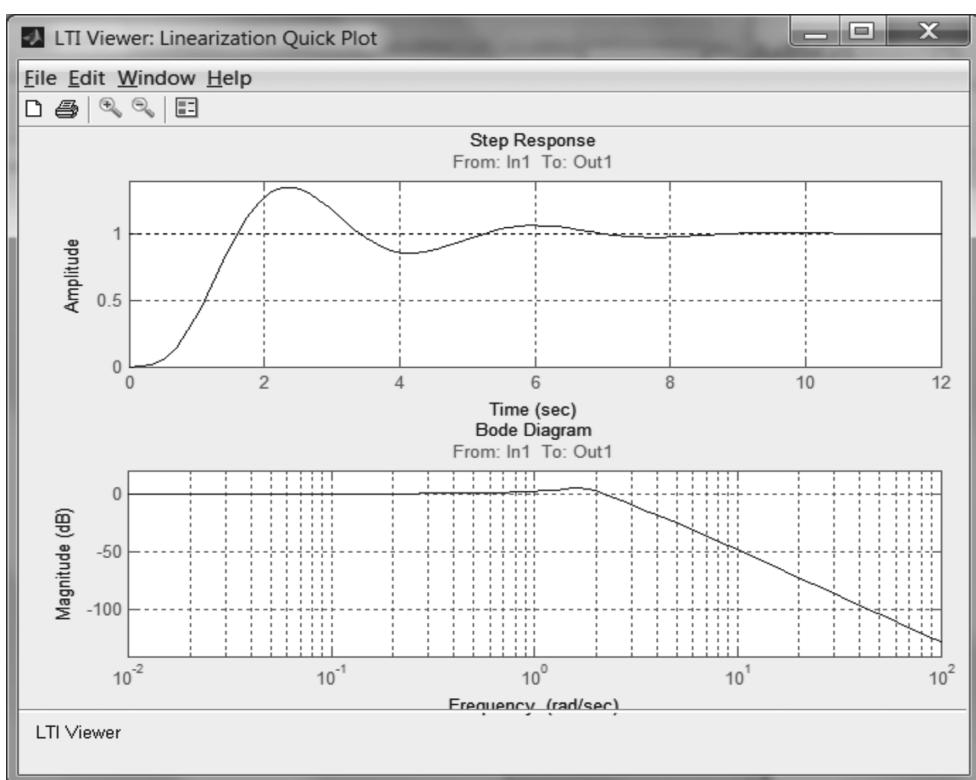


Рис. 1.1.4  
Переходная и амплитудно-частотная  
характеристики объекта



В качестве динамических характеристик для этой системы на рисунке 1.1.4 представлены переходная и амплитудно-частотная характеристики, построенные при использовании пакета расширения Control System Toolbox.

Специалисту в области теории управления гораздо удобнее иметь дело с передаточной функцией, при этом ему совершенно не требуется глубоко изучать язык Matlab. Блоки State Space и Transfer Fcn пакета Simulink связаны с основным ядром пакета Matlab, где написаны и встроены соответствующие программы.

Библиотеки Blocksets пакета Simulink в большинстве случаев представляют собой маскированные блоки этого пакета. Маскированные (виртуальные) блоки пакетов расширения, интегрируя в себе несколько блоков пакета Simulink, еще в большей степени упрощают работу специалиста.

### 1.1.3. МАСКИРОВАННЫЕ БЛОКИ ПАКЕТА РАСШИРЕНИЯ SIMPOWER SYSTEM

Маскированные (виртуальные) блоки особенно полезны для реализации виртуальных лабораторий при дистанционном обучении. Эти лаборатории создаются путем маскирования моделей пакета Simulink, из них легко формируются отдельные, специализированные библиотеки.

*Пример 1.1.4. Виртуальный двигатель постоянного тока*

Рассмотрим способ создания виртуального двигателя постоянного тока. Математическое описание двигателя постоянного тока, представленное ниже, является основой его модели в пакете SimPower System.

Модель двигателя состоит из двух частей: электромагнитной и механической, которые показаны на рисунках 1.1.5 и 1.1.6.

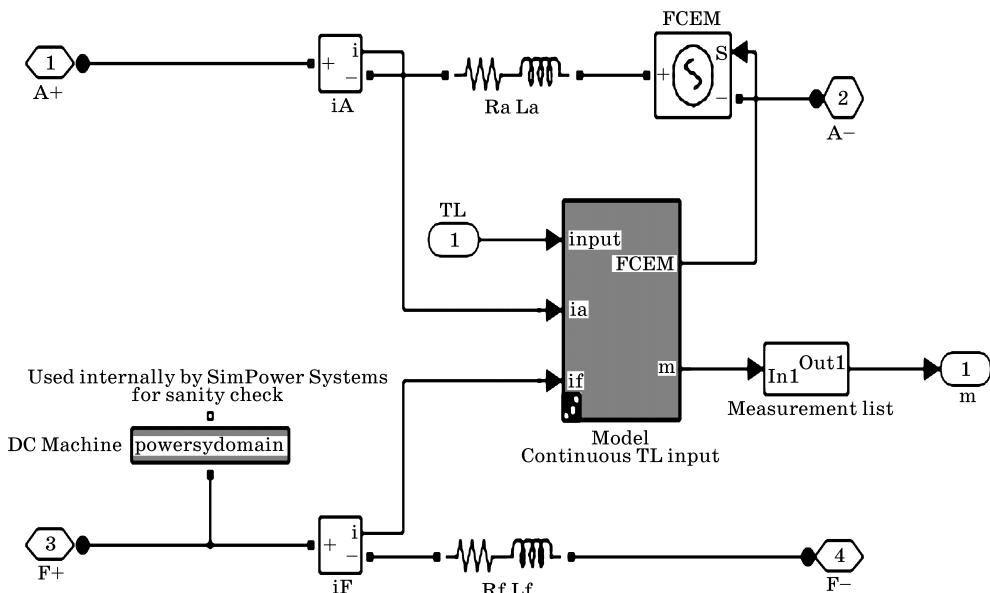


Рис. 1.1.5  
Электромагнитная часть модели двигателя

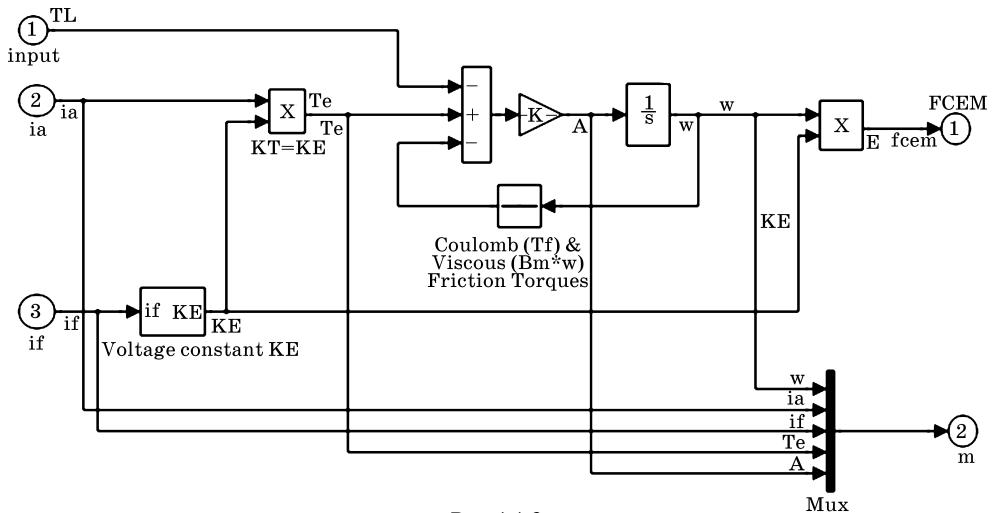


Рис. 1.1.6  
Механическая часть модели двигателя

Электромагнитная часть модели включает\*:

1. Якорную цепь (Armature circuit), которая присоединяется к внешней цепи при помощи портов  $+A$ ,  $-A$ , и содержит последовательно соединенные сопротивление, индуктивность ( $R_a$ ,  $L_a$ ), источник противо-ЭДС (FCEM) и измеритель тока якоря.
2. Цепь возбуждения (Field circuit), которая присоединяется к внешней цепи при помощи портов  $+F$ ,  $-F$ , содержит последовательно соединенные сопротивление, индуктивность ( $R_f$ ,  $L_f$ ) и измеритель тока возбуждения.

Электромагнитная модель двигателя описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 u_a &= L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_a; \\
 u_f &= L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f; \\
 e_a &= k_E \omega, \quad k_E = L_{af} i_f.
 \end{aligned} \tag{1.1.2}$$

В уравнениях (1.1.2)  $u_a$ ,  $i_a$ ,  $e_a$  — напряжение, ток и противо-ЭДС якоря;  $u_f$ ,  $i_f$  — напряжение и ток возбуждения;  $R_a$ ,  $L_a$ ,  $R_f$ ,  $L_f$ ,  $L_{af}$  — параметры двигателя, которые задаются в окне параметров блока.

Механическая часть модели двигателя (Model Continuous TL input) представлена на рисунке 1.1.6. На вход механической части подаются момент нагрузки ( $T_L$ ), ток якоря ( $i_a$ ), ток возбуждения ( $i_f$ ). С выхода механической части снимаются противо-ЭДС двигателя (этот сигнал подается на электромагнитную часть модели) и четыре величины (угловая скорость, ток якоря, ток возбуждения, электромагнитный момент), объединенные в вектор и поступающие на выходной измерительный порт « $m$ ».

\* При описании модели использованы обозначения параметров и переменных, принятые в пакете SimPower System.

Механическая модель двигателя описывается уравнением

$$J \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega + T_f + \text{sign}\omega \cdot T_L = k_T i_a. \quad (1.1.3)$$

В уравнении (1.1.3)  $\omega$ ,  $T_L$ ,  $i_a$  — угловая скорость, момент нагрузки, ток якоря. В качестве параметров механической части, которые должны быть заданы, приняты следующие:

- $J$  — момент инерции ротора с присоединенной нагрузкой;
- $B_m$  — коэффициенты вязкого трения;
- $T_f$  — момент сухого трения.

В модели коэффициенты момента и противо-ЭДС приняты равными  $k_T = k_E$ , что достаточно близко к истине, когда все переменные состояния и параметры представлены в системе СИ.

Маскирование модели осуществляется в определенной последовательности:

1. Заключаем всю модель в рамку, удерживая левую кнопку мыши.
2. В поле «Edit» основного меню выбираем опцию «Create Subsystem» при этом схема модели примет вид одного блока Subsystem.
3. Отметим этот блок и в поле «Edit» основного меню выбираем опцию «Mask Subsystem» при этом открывается редактор маски.

Редактор маски содержит четыре основные вкладки: «Icon», «Parameter», «Initialization», «Documentation», позволяющие задать все свойства маскированной системы. В нижней части окна редактора расположены четыре кнопки «Ok», «Cancel», «Help», «Apply», которые являются общепринятыми для всех блоков пакета Simulink, и кнопка «Unmask», позволяющая демаскировать модель.

Окно редактора при нажатой кнопке «Icon» показано на рисунке 1.1.7. В этом случае создается внешний вид маскируемой подсистемы. На панели «Icon option» имеются четыре выпадающих списка: «Frame», «Transparency», «Rotation», «Units», которые позволяют установить способ представления иконки маскируемого блока.

На панели «Drawing commands» вводятся команды графического представления текста, графика или рисунка, отображаемого на иконке. В примере на рисунке 1.1.7 введена команда на языке Matlab, которая рисует пиктограмму двигателя постоянного тока.

Вид окна редактора при нажатой вкладке «Parameters» показан на рисунке 1.1.8. В этом окне задаются параметры маскируемого блока. В левой части окна помещены кнопки, позволяющие добавить, убрать и перемещать параметр. На панели «Dialog parameters» имеются четыре поля: «Prompt», «Variable», «Type», «Evaluate», «Tunable». Поле «Prompt» (пояснение) служит для ввода названия параметра. В это поле введены названия основных параметров двигателя (уравнения (1.1.2), (1.1.3)). В поле «Variable» (переменная) задаются обозначения параметров, под которыми они записываются в рабочую область («Mask Workspace») маскированной системы.

В поле «Type» в выпадающем списке устанавливается способ задания для каждого параметра:

- «Edit» — с помощью строки редактирования;

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универ»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)