

Некоторые аспекты моделирования

СИСТЕМ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

После публикации в нашем журнале серии статей, посвященных вопросам моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD, авторы получили ряд вопросительных откликов на эти статьи. Вопросы, которые задают авторы писем, являются, на наш взгляд, методологическими и заслуживают обсуждения на страницах журнала. Ответы на некоторые из них не могут быть однозначными, поэтому настоящая статья носит дискуссионный характер.

**Юрий Болотовский,
к. т. н.**

eltech@ufacom.ru

**Георгий Таназлы,
к. т. н.**

g_thanazly@mail.ru

А стоит ли вообще моделировать?

Ответ на этот вопрос содержится в старинном правиле специалистов по моделированию: «Если результат, который вы хотите получить по окончании моделирования, может быть получен каким-либо другим способом, необходимо тщательно проанализировать альтернативные способы, прежде чем приступать к моделированию».

Следует также помнить, что при моделировании выделяются два подхода. Первый подразумевает моделирование до получения «числа», то есть некоторой количественной характеристики рассматриваемого процесса. Данный подход достаточно сложен. Необходимым его элементом является подтверждение достоверности полученного при моделировании «числа».

Второй подход вытекает из первого и заключается в следующем. Часто при разработке и построении модели понимание процессов, протекающих в моделируемом устройстве, переходит на качественно новый уровень, и тогда разработчику уже не нужно производить моделирование до получения «числа».

Перед построением модели необходимо четко и однозначно поставить задачу моделирования и сформулировать цель. Необходимо тщательно следить за тем, чтобы уровень модели строго соответствовал поставленным при моделировании задачам. Крайне нежелательно любое, не обусловленное поставленными задачами, переусложнение модели. После этого необходимо вычертить электрическую принципиальную схему модели, которая, вообще говоря, может отличаться от электрической принципиальной схемы моделируемого устройства. Возможно, удастся сделать некоторые упрощения, иногда очень существенные, что поможет заметно сократить время на отладку модели и собственно моделирование.

Необходимо убедиться в доступности моделей всех элементов, применяемых в принципиальной электрической схеме модели. Под доступностью понимается наличие модели в стандартных библиотеках или в фирменных материалах производителей электронных компонентов, либо наличие модели аналога необходимого элемента, либо возможность разработки собственной модели. В некоторых случаях можно получить приемлемую модель элемента, заменив в существующей модели аналогичного элемента некоторые параметры.

Необходимо также решить вопрос о целесообразности выбора планарного или иерархического проекта. Обычно иерархический проект выбирается в случае большой размерности схемы, когда ее трудно просмотреть на экране дисплея или листе бумаги разумных размеров. Кроме того, иерархический проект целесообразно создавать, если в схеме имеется большое количество однотипных блоков.

Почему в качестве средства моделирования выбрана среда OrCAD?

Выбираемая для моделирования среда, так же как и сама модель, должна строго соответствовать поставленной задаче. Поэтому вопрос «Что лучше?» является некорректным и на наш взгляд имеет смысл только в постановке «Что лучше для решения данной задачи?»

Ниже приведена попытка сопоставительного анализа сред моделирования электронных схем. Выбор осуществлялся среди следующих общедоступных программных продуктов:

1) OrCAD (версии 9.2, 10.0) [1, 2] — интегрированный пакет корпорации Cadence, базирующийся на известной программе моделирования PSpice (стандарт моделирования аналоговых систем). Этот па-

Таблица 1. Наличие элементов разных классов в средах

Среда	Аналоговые элементы	Полупроводники идеальные	Полупроводники реальные	Приборы	Вспомогательные устройства
OrCAD (MicroCAP)	+	-	+	-	+
WEWB	+	+	-	+	-
MatLab	+	-	+	+	+

Примечания:

- Здесь и далее при сравнении по элементной базе среды OrCAD и MicroCAP объединены, так как базируются на одинаковых моделях.
- Под аналоговыми элементами здесь подразумеваются индуктивности, емкости, резисторы, магнитные сердечники, силовые переключатели.
- Под приборами подразумевается наличие в среде амперметров, вольтметров, ваттметров как элементов, включаемых непосредственно в цепь. В OrCAD и MicroCAP эта возможность заменена внесением в схему шупа, фиксирующего необходимую характеристику (ток, напряжение, мощность) на элементах схемы и передающего ее в программу Probe внутри пакета (OrCAD) или в другое окно (MicroCAP).
- Под вспомогательными устройствами подразумеваются элементы, которые, не являясь элементами электрической цепи, тем не менее, входят в систему: принтер, пользователь и т. п.

Таблица 2. Наличие аналоговых элементов в средах

Среда	Резистор	Емкость	Индуктивность	Взаимная индуктивность	Магнитный сердечник
OrCAD (MicroCAP)	+	+	+	+	+
WEWB	+	+	+	-	-
MatLab	+	+	+	+	-

кет позволяет проводить сквозное проектирование радиоэлектронных устройств: от ввода принципиальной схемы и ее моделирования до создания управляющих файлов для программаторов, разработки печатных плат и управляющих программ для сверлильных станков и вывода данных на периферию.

- World Electronic Workbench (WEWB, версия 5.12) [3] — разработка фирмы Interactive Image Technologies. Особенностью программы является наличие контрольно-измерительных приборов, по внешнему виду и характеристикам приближенных к их промышленным аналогам.
- MicroCAP (версия 5) [4] — разработка фирмы Spectrum Software. Поддерживает PSpice-модели элементов. Программа позволяет создавать принципиальную электрическую схему устройства и редактировать ее, проводить

Таблица 3. Наличие моделей силовых переключателей в средах

Среда	Идеальный	Реальный
OrCAD (MicroCAP)	+	+
WEWB	+	-
MatLab	+	-

Примечания:

- Под идеальным здесь подразумевается переключатель, управляемый по времени, току или напряжению и имеющий конечные параметры напряжения замыкания и размыкания переключателя, сопротивления замкнутого и разомкнутого переключателя.
- Под реальным здесь подразумевается переключатель с задаваемыми пользователем вышеперечисленными параметрами.
- В OrCAD и MicroCAP существует принципиальная возможность создания реального силового переключателя, но это не рекомендуется, так как резко усложняет вычисления и может приводить к резкому увеличению времени анализа схемы [2].

расчет статического режима по постоянному току, рассчитывать частотные характеристики и переходные процессы, оценивать уровень внутреннего шума и предельной чувствительности, проводить многовариантный анализ, включая статистический анализ по методу Монте-Карло, наращивать библиотеку компонентов, представлять данные в форме, удобной для интерпретации и дальнейшего анализа, а также реализовывать иные сервисные функции.

- MatLab (версия 7.0) — пакет имеет программу, позволяющую осуществлять анализ электронных схем.

При обзоре сред наряду с малопопулярными и аппаратно устаревшими средами моделирования (Aplac 7.0, SystemView 1.9, CircuitMaker 6.0) не рассматривался достаточно известный и популярный пакет DesignLab 8.0 [5], поскольку при полной совместимости расчетных частей и библиотек элементов с OrCAD 9.2, DesignLab 8.0 уступает ему

Таблица 4. Функциональные возможности

Среда	Принципиальная схема	Расчет по постоянному току	Расчет переходных процессов	Оценка шумов	Расчет частотных характеристик	Моделирование смешанных устройств	Параметрическая оптимизация	Разводка печатных плат	Многовариантный анализ	Расчет по Монте-Карло
MicroCAP	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+
OrCAD	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
WEWB	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-
MatLab	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+

Примечания:

- Расшифровка терминов:
 - Принципиальная схема — создание и редактирование принципиальной схемы.
 - Частотные характеристики — построение АЧХ и преобразований Фурье.
 - Смешанные устройства — аналого-цифровые схемы.
- Параметрическая оптимизация в OrCAD возможна только при анализе по постоянному току

по графическому интерфейсу (OrCAD 9.2 написан под Windows 95, a DesignLab 8.0 — под Windows 3.11).

Одним из основных параметров, по которым целесообразно сравнить среды, является элементная база. Результаты сравнения приведены в таблицах 1–3.

Еще одним немаловажным параметром, по которому целесообразно сравнить среды, являются функциональные возможности (табл. 4).

Ниже будут приведены некоторые особенности систем силовой электроники, которые целесообразно учитывать при выборе среды моделирования [6–8]. Вместе с приведенным выше сопоставительным анализом сред моделирования это может облегчить пользователю подбор средств моделирования.

- Нелинейности большинства элементов имеют ключевой характер только в первом приближении. Более детально необходимо рассматривать переходные процессы их включения и выключения.
- Длительность переходных процессов может быть достаточно большой (сотни и тысячи периодов выходной частоты).
- Возможно возникновение различного типа биений, которые могут быть достаточно низкочастотными, что может потребовать увеличения времени анализа переходного процесса.
- При анализе реальных процессов выключения силовых вентилялей необходимо рассматривать переходный процесс их выключения, когда токи могут быть достаточно малыми (до единиц ампер), а скорости изменения этих токов — очень большими (порядка тысячи ампер в микросекунду).
- Поведение схемы во время переходного процесса может существенным образом отличаться от такового в установившихся режимах и требует детального рассмотрения во избежание аварийных ситуаций (перенапряжения, экстратоки, сокращения времени восстановления запирающих свойств у тиристоров и т. д.).
- Токи и напряжения на элементах схемы могут изменяться достаточно быстро (микросекунды и десятые доли микросекунд).

- 7) Токи и напряжения в схемах могут достигать больших значений (десятки тысяч вольт и ампер).
- 8) Переход сердечника из ненасыщенного состояния в насыщенное может приводить к изменению токов с крутизной порядка 10^{10} А/с.
- 9) Схемы силовой электроники в большинстве случаев требуют для своего функционирования совместной работы с системой управления, автоматики, защиты — то есть с системой слаботочной электроники. В зависимости от степени детализации при моделировании может возникнуть необходимость рассмотрения в рамках одной модели цифровых и аналоговых микросхем, а также силовых высоковольтных высокочастотных вентилях.
- 10) В схемах силовой электроники может применяться параллельное и последовательное соединение вентилях.
- 11) Разработка схем силовой электроники может потребовать анализа аварийных режимов.
- 12) Достаточно часто в схемах силовой электроники используются их резонансные свойства. При этом, если резонанс является острым, вопросы настройки таких схем и их анализа усложняются.
- 13) В случае питания схем силовой электроники от стандартных электрических сетей необходимо учитывать возможность их влияния на сеть (высокочастотные помехи, коэффициент мощности, перекос фаз и т. д.) и возможность влияния сети на них (в настоящее время сильное «загрязнение» сети — не редкость).
- 14) Даже при высоком КПД схем силовой электроники мощность потерь в них достигает достаточно больших величин, что требует по возможности точного учета тепловых потерь и их минимизации.
- 15) Схемы силовой электроники часто обеспечивают повышенный уровень помех, минимизацию которых необходимо учитывать при проектировании в целях повышения устойчивости работы систем управления, автоматики, аварийной защиты и т. д.
- 16) Элементы схем силовой электроники могут иметь существенный разброс параметров и их температурный уход, что должно учитываться при проектировании.
- 17) Проблемы численной устойчивости при моделировании силовых схем по сравнению с моделированием цифровых схем и функциональным моделированием имеют определенные особенности.

Перечисленные особенности схем силовой электроники часто требуют от среды моделирования следующих функциональных возможностей:

 - 1) Возможность проведения анализа по постоянному току, который позволяет получать характеристики схемы (токи, напряжения, мощности) при изменении параметров источников напряжения, источников тока, глобальных параметров схемы, параметров модели и температуры элемента. При анализе должны задаваться интервалы изменения

- перечисленных параметров, характер их изменения (линейный, логарифмический с основанием 10 и с основанием 8) и шаг изменения.
- 2) Возможность проведения анализа по переменному току, который позволяет производить построение амплитудно-частотных характеристик схемы (токи, напряжения, мощности и т. д.). Анализ должен производиться как при питании от источника переменного тока, так и от источника переменного напряжения. При анализе должно задаваться минимальное значение частоты, максимальное значение частоты и характер изменения частоты.
- 3) Возможность проведения анализа переходных процессов, который позволяет получать значения характеристик схемы (токов, напряжений, мощностей и т. д.) при переходном процессе. Анализ переходных процессов должен проводиться на временном промежутке от нуля до времени, задаваемого пользователем. Поскольку в ряде случаев время окончания переходного процесса заранее неизвестно, для предотвращения повторного анализа переходного процесса необходим режим, позволяющий по мере наблюдения осциллограмм переходного процесса в случае необходимости реализовать режим «СТОП», назначить новое время окончания процесса и продолжить счет. Желательно иметь возможность изменения параметров схемы в процессе анализа с использованием режима «СТОП». Важным условием успешного анализа электромагнитных процессов в схемах силовой электроники является возможность проведения анализа переходного процесса при произвольных значениях начальных условий (токи через индуктивности, напряжения на емкостях). Характерной особенностью схем силовой электроники является то, что в них могут протекать одновременно высокочастотные и низкочастотные процессы. При этом величина шага численного интегрирования определяется высокочастотным процессом, а время анализа переходного процесса — низкочастотным процессом. Это может привести к большому, а иногда и недопустимо большому времени моделирования. Поэтому комплекс численных методов, применяемых при анализе переходных процессов, должен обладать достаточным быстродействием.
- 4) Возможность проведения Фурье-анализа, который позволяет разложить функции, полученные в результате анализа переходного процесса, в ряд Фурье. В результате анализа должны получиться зависимости амплитуд гармоник спектральных характеристик соответствующих функций от частоты в заданном диапазоне. Желательно выдавать результаты Фурье-анализа в графическом и текстовом виде.
- 5) Возможность проведения параметрического анализа, позволяющего произвести ряд итераций, необходимых для расчета некоторой функции цепи (тока, напряжения и т. д.) во время переходного процесса или анализа по постоянному или переменному току при скачкообразном изменении задаваемого

- пользователем параметра, параметра модели, величины компонента или рабочей температуры. При этом за один цикл достигается эффект, эквивалентный просчету переходного процесса схемы столько раз, сколько раз изменяется заданный параметр. В результате должно выдаваться семейство кривых переходного процесса анализируемой функции, причем количество кривых должно быть равно числу изменений величины заданного параметра.
- 6) Возможность проведения температурного анализа, который позволяет произвести расчет схемы при разных заданных температурах окружающей среды. В результате должны выдаваться соответствующие функции анализируемой схемы (токи, напряжения и т. д.) при заданных температурах.
- 7) Возможность проведения анализа разброса параметров методом Монте-Карло, который позволяет получить некоторые характеристики схемы (токи, напряжения и т. д.) при изменении параметра некоторого элемента схемы по задаваемому закону с использованием различных типов генераторов случайных чисел. Результатом анализа по методу Монте-Карло являются гистограммы изменения соответствующих схемных функций по отношению к номинальному значению.
- 8) Возможность проведения анализа чувствительности методом наихудшего случая, который предназначен для определения возможного наихудшего значения некоторой характеристики схемы, если заданы диапазоны разброса параметров схемы. При этом должны рассматриваться все возможные комбинации изменения параметров в пределах разброса. Кроме того, должна определяться величина наихудшего значения рассматриваемой схемной функции. Результат анализа чувствительности методом наихудшего случая — наибольшее или наименьшее отклонение рассматриваемой схемной функции от номинального значения.

Кроме перечисленных видов анализа система моделирования должна обладать развитыми сервисными функциями, которые делают ее функционирование «дружественным» по отношению к пользователю. К этим сервисным функциям обычно относят следующие:

 - 1) Возможность моделирования гибридных аналого-цифровых систем, что позволит моделировать схему силовой электроники совместно с системами управления, автоматики и аварийным блоком.
 - 2) Возможность построения иерархических структур моделируемых схем для исключения дублирования многократно повторяемых комбинаций элементов схемы, то есть для облегчения начертания сложных схем.
 - 3) Развитую систему диагностики ошибок, которые могут возникать при построении схем моделей, при реализации численных методов для моделирования, а также вызываться топологическими ограничениями, накладываемыми системой на класс анализируемых схем.
 - 4) Возможность корректировки существующих моделей элементов для уточнения их параметров.

- 5) Возможность создания новых моделей элементов.
- 6) Осуществление настройки параметров, определяющих режимы работы различных процедур, которые реализуют численные методы для получения устойчивой работы всей системы моделирования при обеспечении требуемой точности.
- 7) Создание и корректирование геометрических образов реализуемых моделей элементов.
- 8) Обеспечение гибкой системы отображения информации о модели в виде ее структуры, типов применяемых элементов, их параметров, о типе проводимого анализа и о его параметрах, о токах, напряжениях, мощностях, узловых потенциалах, функционалах, построенных с их использованием, и об измерениях временных интервалов. В случае большого объема выходной информации может появиться необходимость ограничения этой информации по желанию пользователя.
- 9) Обеспечение развитой системы выдачи и хранения полученной в результате моделирования информации в виде графических и текстовых файлов.
- 10) Обеспечение эффективной информационной системы, поддерживающей проведение моделирования (библиотеки моделей элементов, возможность получения новых библиотек через Интернет, поиск модели элемента в библиотеках по его имени, поиск модели элемента в библиотеках по его параметрам или их совокупности).
- 11) Возможность использования на различных этапах моделирования функциональных блоков, которые реализуют различные функции электронных элементов и узлов, но не имеют при этом физической реализации. Наличие таких блоков облегчает моделирование систем на функциональном уровне. В случае удачного моделирования возможна замена функциональных блоков на модели физически существующих элементов или их комбинаций. Опыт авторов по созданию достаточно сложных комбинированных функционально-аналоговых моделей следует признать неудовлетворительным из-за проблем численной устойчивости.
- 12) Возможность одновременного анализа одинаковых схем или разных схем для выяснения их сопоставительных характеристик.

Все перечисленное показывает, что задачи моделирования электромагнитных процессов в схемах силовой электроники накладывают достаточно жесткие условия на работу системы моделирования. В ряде случаев для анализа специальных типов схем силовой электроники могут потребоваться: разработка специальных моделей элементов, специфических режимов работы системы моделирования и, в целом, разработка методики моделирования специальных типов схем силовой электроники.

Перечисленные виды анализа и сервисные функции присутствуют только в среде OrCAD [2], что позволяет рекомендовать ее при построении достаточно сложных и полных моделей систем силовой электроники. Упрощен-

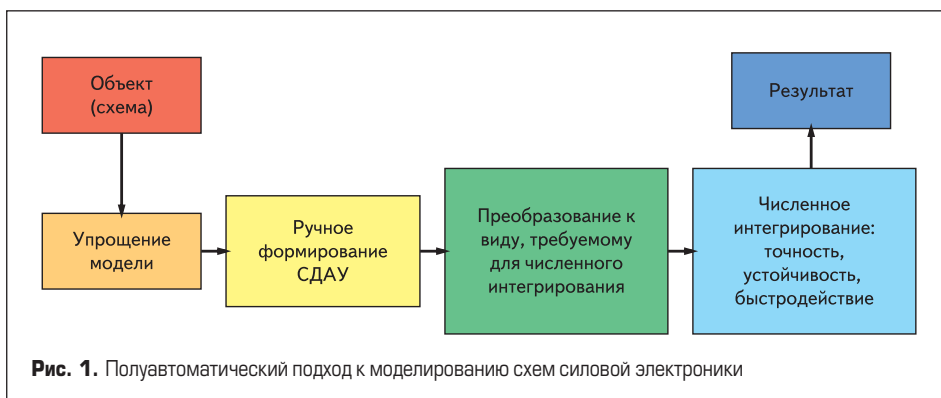


Рис. 1. Полуавтоматический подход к моделированию схем силовой электроники

ные модели могут быть реализованы в рамках средств с меньшими функциональными возможностями (рассмотрено выше).

Чем различаются подходы к моделированию систем силовой электроники?

Попытки моделирования систем силовой электроники стали давать положительные результаты в связи с достаточно широким распространением электронных вычислительных машин, они прошли несколько этапов, характеризующихся подходами к моделированию, некоторые из которых перечислены ниже.

Один из достаточно распространенных на ранних этапах полуавтоматических подходов проиллюстрирован на рис. 1.

Данный подход имеет следующие особенности:

- необходимость существенного упрощения модели, вызванная практической нерешаемостью модели полного объема при ручном формировании и преобразовании к виду, подходящему для численного интегрирования системы дифференциально-алгебраических уравнений (СДАУ);
- высокая вероятность ошибок при ручном формировании СДАУ;
- неоправданно высокие затраты времени на формирование СДАУ и программирование;
- плохая адаптация полученной модели к изменениям базовой исходной схемы (потребности таких изменений очень часто возникают у разработчика в процессе работы над схемой).

Математическая модель строится на основании уравнений Кирхгофа и уравнений, определяющих каждый элемент схемы. Результа-

том построения является система нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений, как правило, больших размеров (для схемы средней сложности количество дифференциальных уравнений может быть порядка 100). При использовании примитивных моделей силовых вентилей, что существенно снижает точность и достоверность моделирования, количество дифференциальных уравнений равно суммарному количеству реактивных элементов схемы. Возможно «ручное» составление требуемой системы дифференциально-алгебраических уравнений. Получение аналитических решений даже в случае примитивных моделей исключено. Для моделирования схемы на базе такой системы уравнений необходимо применение ЭВМ, что требует для каждой рассматриваемой схемы написания громоздкой и сложной программы, реализующей численное интегрирование и решение соответствующих линейных систем на каждом шаге интегрирования.

Для рассматриваемого класса схем при «ручном» подходе требуется около шести месяцев напряженной работы квалифицированного специалиста, владеющего методами анализа электрических цепей, численными методами и программированием. Вышеописанный «ручной» подход имел широкое распространение в 70–80-е годы прошлого века и не давал практических результатов, поскольку суммарное время моделирования и переход от одного варианта схемы к другому были недопустимо велики.

На практике данный подход в настоящее время используется редко. Однако он обладает повышенной «научностью» и «диссертательностью». Сложное нагромождение формул производит неизгладимое впечатление на уче-

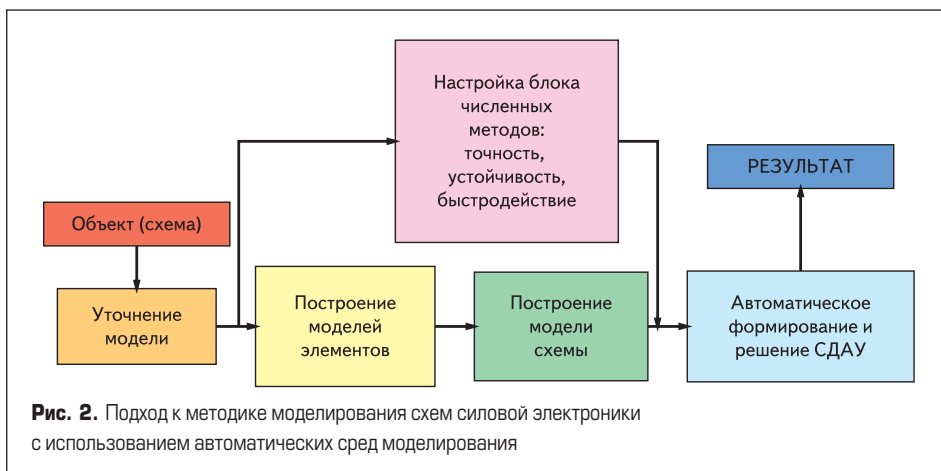


Рис. 2. Подход к методике моделирования схем силовой электроники с использованием автоматических сред моделирования

Таблица 5. Топологические ограничения и способы их устранения

Топологическое ограничение	Способ устранения
Схема с отсутствующим заземлением	Заземление любой точки схемы
Схема, включающая подсхему (или узел), которая отделена только емкостными ветвями и/или ветвями с источниками тока	Введение элемента, не являющегося емкостью и/или источником тока и соединяющего подсхему (или узел) со схемой
Схема, включающая чисто индуктивный контур или контур, состоящий из индуктивностей и/или источников напряжения	Введение последовательно в контур элемента, не являющегося индуктивностью и/или источником напряжения
Схема, содержащая элемент с не подсоединенными выводами	Подсоединение всех выводов элемента или подключение к выводу символа отсутствия соединений
Схема, состоящая из двух потенциально не связанных подсхем	Потенциальная связь подсхем (если возможно – с помощью заземления)

ный совет, члены которого недостаточно компетентны в узкоспециальных вопросах. Обычно в отзывах присутствует фраза: «...в работе продемонстрирован высокий уровень владения современными методами анализа цепей...».

В настоящее же время процесс формирования уравнений, описывающих электромагнитные процессы в схемах силовой электроники, формализован, и соответствующие алгоритмы в совокупности с численными методами интегрирования и сервисными функциями (математические модели) реализованы в виде стандартных сред моделирования. При этом черновая рутинная работа по «ручному» составлению систем уравнений и написанию программ их численного решения полностью исключается. При использовании современных сред задачи моделирования перемещаются в область построения адекватных моделей анализируемых схем и входящих в них элементов. Это построение должно реализовываться на базе стандартных моделей, предлагаемых разработчиками соответствующих пакетов и изготовителями электронных элементов. Построение новых адекватных моделей является нетривиальной задачей. Повышение эффективности моделирования, на наш взгляд, требует разработки методики, реализующей подход, который проиллюстрирован на рис. 2.

Под методикой моделирования схем силовой электроники понимается совокупность моделей, алгоритмов, методов, приемов работы, обеспечивающая эффективное моделирование.

Ниже приведены элементы, составляющие методику моделирования в среде OrCAD.

Разработка моделей

Перед началом моделирования необходимо убедиться в наличии в библиотеках моделей элементов, применяемых в проекте. Если необходимых моделей элементов в библиотеке нет, требуется найти их во внешних источниках информации или разработать. Необходимо обратить внимание на достоверность работы модели и интервалы изменения ее параметров, в которых разработчик моделей гарантирует функционирование. Во многих случаях целесообразно предварительное тестирование модели. Если проект состоит из блоков, составленных из моделей элементов, все вышесказанное относится и к блокам.

Способы устранения топологических ограничений

Методы анализа электрических цепей, применяемые в OrCAD, ограничивают класс анализируемых схем. В табл. 5 (уточненный вариант таблицы, приведенной ранее [9]) указаны некоторые топологические ограничения и способы их устранения.

Следует заметить, что тип и номинал вводимого в схему дополнительного элемента должны быть такими, чтобы погрешность, вносимая при этом в работу схемы, была допустимой.

Диагностические сообщения об ошибках, вызванных топологическими ограничениями, часто содержат рекомендации по их устранению.

Идентификация и коррекция модели при аварийных режимах работы элементов

Ряд моделей силовых элементов, применяемых в системах моделирования, неадекватно описывает поведение элемента в аварийных ситуациях. (Здесь под аварийной ситуацией будет пониматься режим работы элемента, при котором значения некоторых его параметров, например, тока, напряжения, крутизны нарастания тока, крутизны нарастания напряжения, времени, предоставляемого для восстановления запирающих свойств, и т. д., превосходят паспортные значения). Неадекватность описания сводится к тому, что реальный вентиль в случае аварийной ситуации выходит из строя необратимо — «сгорает», а модель вентиля может, в случае если параметр возвращается в пределы, допустимые по паспорту, вернуться к нормальному функционированию. Иногда это приводит к тому, что моделируемая схема продолжает функционировать в периодическом режиме, существенно отличающемся от штатного, в то время как реальная установка «сгорает». Часто, если выход за паспортные параметры вентиля происходит только в переходном процессе, заметить это при моделировании трудно.

Поскольку количество видов моделей достаточно велико и поведение их в аварийных режимах различно, рекомендуется при работе с новым типом модели на простейшей схеме определить ее поведение в аварийных режимах и в дальнейшем учитывать это при моделировании для исключения возможных ошибок.

Реализация упрощенных моделей блоков

В ряде случаев для упрощения модели и сокращения времени моделирования целесообразно, если это допустимо с точки зрения сохранения получаемой при моделировании точности, замена некоторых блоков моделей их упрощенными вариантами. В качестве примера приведем замену мостового двухфазного или трехфазного выпрямителя (схема Ларионова) на идеальный источник напряжения VDC с включенным последовательно в прямом направлении силовым диодом. Такая замена допустима, если при моделировании можно пренебречь пульсациями напряжения на выходе выпрямителя.

Использование алгоритма моделирования схем силовой электроники на основе настройки численных методов интегрирования

Настоящий алгоритм подробно рассмотрен ранее [10].

Определение токовой загрузки вентиля

Ключевым вопросом при проектировании схем силовой электроники является вопрос определения допустимых значений токов через вентили, то есть токовой загрузки. В справочных материалах на вентили, как правило, указываются такие параметры, как средний продолжительный ток, импульсное значение тока (часто без указания длительности импульса), иногда, и очень редко, даются зависимости снижения допустимого тока через вентиль от рабочей частоты для случая протекания тока специальной формы (прямоугольной, треугольной и т. д.).

В реальных схемах формы токов и рабочие частоты могут значительно отличаться от приведенных в паспортных данных, что вызывает у разработчика затруднения при определении величины допустимого для данного вентиля тока.

OrCAD позволяет существенным образом облегчить решение задачи о токовой нагрузке вентиля в случае, если разработчику известна максимально допустимая мощность, рассеиваемая корпусом рассматриваемого вентиля, и если модель элемента предусматривает вычисление рассеиваемой активной мощности. В число переменных, определяемых OrCAD для каждой вентиляльной схемы, входят значения мгновенных мощностей W (позиционное обозначение вентиля), выделяемых в каждом вентиле. Если принять во внимание среднее значение этой мощности, то сопоставление этого значения с максимальной допустимой мощностью, рассеиваемой корпусом вентиля, дает полную информацию о токовой нагрузке вентиля при произвольной форме протекающего через него тока и частоте его работы.

Вычисление средних и действующих значений

Очень часто при анализе схем разработчику необходимо знание средних или действующих значений напряжений, токов, мощностей и т. д. Рассмотрим вычисление средних и действующих значений в OrCAD. По определению среднее значение вычисляется по формуле:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt. \quad (1)$$

Действующее значение:

$$I_{\delta} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt}. \quad (2)$$

При анализе переходных процессов часто требуется вычисление «текущих» средних и действующих значений и реализуется счет по формулам, где вместо значений периода T подставляется текущее время (Time). В OrCAD применяются следующие формулы:

$$AVG(f(x))_i = \frac{\int_{x_0}^{x_i} f(x) dx}{x_i - x_0}, \quad (3)$$

$$RMS(f(x))_i = \sqrt{\frac{\int_{x_0}^{x_i} |f(x)|^2 dx}{x_i - x_0}}. \quad (4)$$

Вообще говоря, формулы (1) и (2) дают результаты, отличные от полученных по формулам (3) и (4). Покажем, что погрешность при этом для достаточно больших значений времени Time может быть допустимо малой.

Вычисление определенного интеграла предполагает нахождение предела

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Sigma S}{\Sigma t},$$

где $\Sigma S = nS + \Delta S$ — суммарная площадь геометрических фигур, образуемых графиком рассматриваемой функции и осью времени. S — площадь под кривой в размере одного периода установившегося процесса; n — число рассматриваемых периодов; ΔS — площадь под кривой в размере части полного цикла.

$\Sigma t = nT + \Delta t$ — суммарное время интегрирования, где T — полный период; n — число рассматриваемых периодов; Δt — дополнительный временной интервал, меньший полного периода T , входящий в суммарное время интегрирования (и соответствующий ΔS).

Очевидно, что по мере роста n вышеуказанный предел все больше приближается к некоторой постоянной величине:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Sigma S}{\Sigma t} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{nS + \Delta S}{nT + \Delta t} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S + \frac{\Delta S}{n}}{T + \frac{\Delta T}{n}} = \frac{S}{T}.$$

Это есть не что иное, как среднее значение функции за время T (в том числе и среднее значение корня из квадрата функции, что дает действующее значение).

Следует заметить, что в моменты времени, когда $\Delta t = 0$ и $\Delta S = 0$, искомый предел равен среднему значению при любом n для любой функции.

Сопоставление двух схем или одной и той же схемы, работающей в различных режимах

При необходимости сопоставления работы двух схем, имеющих одно и то же назначение (например, выходное напряжение импульсных генераторов), или сопоставления режимов одной и той же схемы возможно использование следующей особенности OrCAD. Две сопоставляемые схемы могут быть внесены в один проект. При этом единственное условие, которое на них накладывается — общая «земля». Подлежащие сопоставлению переменные могут быть выданы на одну осциллограмму, имеется возможность рассмотрения их разности, отношения и т. д. Такой прием удобен, так как позволяет избежать промежуточной фиксации информации.

Литература

1. Разевиг В. Д. Среда проектирования OrCAD 9.2. М.: Солон-Р. 2001.
2. PSpice User's Guide. Cadence Design System, Inc.
3. Карлашук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. М.: Солон-Р. 2000.
4. Разевиг В. Д. Система схмотехнического моделирования MicroCap V. М.: Солон. 1997.
5. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. М.: Солон. 1999.
6. Белкин А. К., Горбатков С. А., Гусев Ю. М. и др. Разработка и проектирование тиристорных источников питания. М.: Энергоатомиздат. 1994.
7. Белкин А. К., Костюкова Т. П., Рогинская Л. Э., Шуляк А. А. Тиристорные преобразователи частоты. М.: Энергоатомиздат. 2000.
8. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. Издание 2. Новосибирск: Издательство НГТУ. 2003.
9. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2 // Силовая Электроника. 2004. № 1.
10. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. Способ определения значений ряда опций, задающих параметры численных методов в OrCAD // Силовая Электроника. 2005. № 3.