

Р. А. Мунасыпов, Г. И. Таназлы, А. И. Таназлы

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СХЕМ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Статья посвящена вопросам моделирования схем и систем силовой электроники. Особое внимание уделено разработке методики, позволяющей облегчить моделирование. *Моделирование; схемы силовой электроники; виды анализа*

В настоящее время в связи с ростом энерговооруженности производственных процессов и развитием систем электроэнергетики класс систем и схем силовой электроники претерпевает бурное развитие. Этому также способствует интенсивно проводимая во всем мире разработка новых элементов силовой электроники с расширенными и улучшенными функциональными характеристиками и параметрами: трансформаторов, дросселей, силовых ключей, конденсаторов и т. д. Постоянно растет сложность схем и систем силовой электроники и требования к определению безаварийных рациональных и оптимальных режимов их работы. Это определяет непрерывно растущие требования к функциональным возможностям точности и эффективности систем моделирования электромагнитных процессов в схемах силовой электроники, поскольку даже небольшие погрешности моделирования при определении режимов работы могут вызвать огромные значения абсолютных потерь или привести к аварийным режимам, поскольку коэффициенты запаса при определении загрузки схем силовой электроники очень незначительны.

В данной работе под системами силовой электроники будут пониматься электронные схемы, рассчитанные на протекание больших (более 10 ампер) токов, высоких (более 100 вольт) напряжений и обеспечивающих передачу и циркуляцию мощностей более 1 кВт. Элементная база таких схем чрезвычайно широка и состоит из силовых ключей: тиристоры различных типов, транзисторы (биполярные, полевые, IGBT, Дарлингтона), диоды различных типов; конденсаторов, дросселей различных типов, трансформаторов, активных сопротивлений.

1. ТРАДИЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СХЕМ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Традиционно сложился следующий подход к моделированию схем силовой электроники (рис. 1). Данный подход характерен следующими особенностями:

- необходимость существенного упрощения модели, вызванное практической нереализуемостью модели полного объема при ручном формировании и преобразовании к виду, требуемому 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).

Приведем пример, иллюстрирующий реализацию традиционного подхода к моделированию схем силовой электроники методом переменной структуры на базе схемы мостового тиристорного инвертора с обратными диодами и нагрузкой в цепи фильтровой емкости (рис. 2).

В основе метода переменной структуры лежит допущение о нулевом сопротивлении открытого силового вентиля и бесконечном сопротивлении закрытого. В ряде случаев это приводит к существенному упрощению расчетной схемы.

Достоинством метода является невысокий порядок уравнений в системе, из-за чего их решение не требует больших вычислительных затрат. Недостатком следует признать то, что при каждой коммутации следует формировать новую схему замещения, либо на первоначальном этапе формирования схемы рассмотреть все возможные 2^n состояний схемы.

Контактная информация: 8(347)272-74-65

Приведенные результаты получены в рамках проведения исследований по гранту РФФИ 10-09-00359-а.



Рис. 1. Традиционный подход к моделированию схем силовой электроники

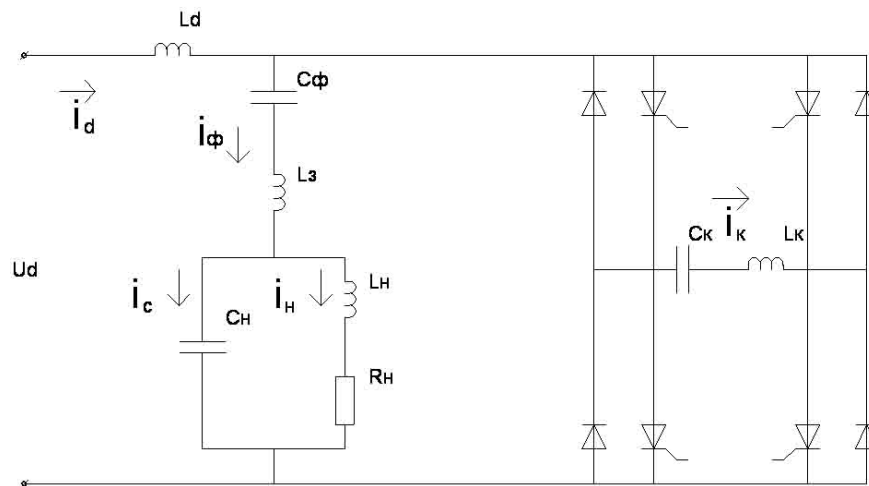


Рис. 2. Схема мостового тиристорного инвертора с обратными диодами и нагрузкой в цепи фильтровой емкости

Обобщенная система уравнений, построенных на основании законов Кирхгофа для схемы, приведенной на рис. 2 имеет следующий вид:

$$K_2 i_d^* - K_2 i_\phi^* - K_2 K_1 i_k^* = 0;$$

$$i_\phi^* - i_c^* - i_n^* = 0;$$

$$K_2 \frac{mk_L}{2\pi k_y} \frac{di_d^*}{dt^*} + u_{c\phi 0}^* + (1 - k_c) 2\pi k_y \int_0^{i^*} i_\phi^* dt^* + \frac{1 - k_L}{2\pi k_y} \frac{di_\phi^*}{dt^*} + u_{c_n 0}^* + \frac{2\pi}{k_\omega} \frac{d_{nn} d_0}{\sqrt{1 - d_{nn}^2}} \int_0^{i^*} i_c^* dt^* = K_2;$$

$$K_1 K_2 \frac{mk_L}{2\pi k_y} \frac{di_d^*}{dt^*} + K_1 \frac{k_L}{2\pi k_y} \frac{di_k^*}{dt^*} + K_1 u_{c_n 0}^* + K_1 2\pi k_y k_c \int_0^{i^*} i_k^* dt^* = K_1 * K_2;$$

$$u_{c\phi 0}^* + \frac{2\pi}{k\omega} \frac{d_{nn} d_0}{\sqrt{1 - d_{nn}^2}} \int_0^{i^*} i_c dt^* - \frac{k_{L_H}}{2\pi} \times \\ \times d_{nn} d_0 k_\omega \sqrt{1 - d_{nn}^2} \frac{di_n^*}{dt^*} - k_{R_H} d_0 d_{nn} i_n^* = 0;$$

$$k_3 \frac{mk_L}{2\pi k_y} \frac{di_d^*}{dt^*} = K_3.$$

Обозначения токов, напряжений и параметров схемы приведены на рис. 2.

Кроме того, введены следующие обозначения:

$$L_0 = L_k + L_3; C_0 = \frac{C_k * C_\phi}{C_k + C_\phi}; \rho = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}};$$

$$m = \frac{L_d}{L_0}; k_L = \frac{L_k}{L_0}; k_C = \frac{C_0}{C_k};$$

$$\rho_n = \sqrt{\frac{L_n}{C_n}}; d_n = \frac{r_n}{\rho_n}; k_0 = \frac{\omega_y}{\omega_0}; k_\omega = \frac{\omega_y}{\omega_{OH}}.$$

Таблица 1

Название режима	Условия возникновения	Условия окончания	Значения коэфф.		
			K_1	K_2	K_3
Рабочий	$t = 0; i_k = 0$	$i_k = 0; di_k/dt = 0$	1	1	0
Пауза	$i_k(t) = 0; di_k/dt > 0$	$t = T$	0	1	0
Повторное включение диодов	$u_B = 0; du_B/dt < 0$	$i_D = 0$	1	0	1
Отсечка тока диодов	$t = T; i_k < 0$	$i_D = 0$	1	0	1

K_1, K_2, K_3 – переключающие коэффициенты, обеспечивающие переход от одного режима работы схемы (одной системы дифференциальных уравнений) к другому. Значения переключающих коэффициентов приведены в табл. 1.

Эти коэффициенты позволяют свести различные системы дифференциальных уравнений к одному дифференциальному уравнению 6-го порядка относительно любого из интересующих нас токов либо к системе из шести линейных дифференциальных уравнений первого порядка.

С этой целью продифференцируем исходную систему и введем следующие обозначения:

$$i_d^* = x_1; i_k^* = x_2; i_\phi^* = x_3; i_n^* = x_4; i_c^* = x_5;$$

$$\frac{di_d^*}{dt} = y_1; \frac{di_k^*}{dt} = y_2; \frac{di_\phi^*}{dt} = y_3; \frac{di_n^*}{dt} = y_4; \frac{di_c^*}{dt} = y_5.$$

В результате получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{mk_L k_0}{2\pi} y_1' + (1 - k_c) \frac{2\pi}{k_0} x_3 + \frac{1 - k_L}{2\pi} k_0 y_3' + \frac{2\pi}{k_\omega} x_5 = 0; \\ \frac{mk_L k_0}{2\pi} y_1' + \frac{k_L k_0}{2\pi} y_2' + \frac{2\pi k_c}{C_0} x_2 = 0; \\ \frac{k\omega}{2\pi} * \frac{\rho_H}{\rho} y_4' + y_4 d_n \frac{\rho_H}{\rho} - \frac{2\pi}{k_\omega} x_5 = 0; \\ x_1 - x_2 - x_3 = 0; \\ x_3 - x_4 - x_5 = 0; \\ y_1 = x_1'; y_2 = x_2'; y_3 = x_3'; y_4 = x_4'; y_5 = x_5'. \end{array} \right.$$

Следует отметить, что данная система уравнений построена с использованием простейших моделей силовых тиристоров и диодов. В случае использования моделей следующего уровня, которые, в свою очередь, представляют собой сложную нелинейную схему, реализация моделей всего устройства в целом будет еще более сложной, а вероятность ошибок при формировании модели и реализации программы существенно возрастет.

Однако трудности реализации этой модели этим не ограничиваются. Применяемые для решения систем дифференциальных уравнений методы численного интегрирования в ряде слу-

чаев осложняют получение результатов моделирования, что вызывается вопросами численной устойчивости, быстродействия и точности получаемых результатов.

2. ОСОБЕННОСТИ СХЕМ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СПЕЦИФИКУ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ниже рассмотрены особенности схем силовой электроники, определяющие специфику их моделирования (и, в ряде случаев, отличающие схемы силовой электроники от маломощных электронных схем, высокочастотных схем и т. д.).

1. Нелинейности большинства элементов имеют ключевой характер, поскольку силовые ключи типа «транзистор» используются в ключевом режиме, тиристоры по определению являются ключами. Возможны также нелинейные элементы с достаточно плавно меняющимися характеристиками (например, магнитный сердечник).

2. Длительность переходных процессов может быть достаточно большой (сотни – тысячи периодов выходной частоты).

3. Возможно возникновение различного типа биений, которые могут быть достаточно низкочастотными, что требует увеличения времени анализа переходного процесса.

4. При рассмотрении реальных процессов выключения силовых вентилях 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).

5. Поведение схемы во время переходного процесса может существенным образом отличаться от такового в установившихся режимах и требует детального рассмотрения для избежания аварийных ситуаций (перенапряжения, экстраполяции, сокращения времени восстановления запирающих свойств для тиристоров и т. д.).

6. Токи и напряжения на элементах схемы могут изменяться достаточно быстро (микросекунды – 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 и силовых высоковольтных высокочастотных вентилялей.

10. В схемах силовой электроники может применяться параллельное и/или последовательное соединение вентилялей.

11. Разработка схем силовой электроники может потребовать анализа аварийных режимов.

12. Достаточно часто в схемах силовой электроники используются их резонансные свойства. При этом в случае, если резонанс является острым, вопросы настройки таких схем и их анализа осложняются.

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.).

14. Даже при высоком КПД схем силовой электроники, выделяемая в них мощность потерь 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. Существенные ограничения, которые могут накладываться при моделировании на

схемы силовой электроники и, в ряде случаев, делать моделирование вообще невозможным, связаны с задачей неустойчивости численных методов, применяемых в конкретном программном продукте или с проблемой трудности настройки этих численных методов.

3. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Перечисленные особенности схем силовой электроники требуют от системы моделирования реализации 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 от источника переменного тока или источника переменного напряжения. При анализе должно задаваться минимальное значение частоты, максимальное значение частоты и характер изменения частоты.

3. Возможность проведения анализа шумов [1, 2], который позволяет рассчитывать входную и выходную спектральные плотности шумов. Анализ должен производиться от источника переменного тока или напряжения. Анализ шумов является составной частью анализа по переменному току. Результатом анализа являются кривые спектральных плотностей по входу и выходу.

4. 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 на-

блюдения 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 очень 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 недопустимому, времени моделирования. Поэтому, комплекс численных методов, применяемых при анализе переходных процессов, должен обладать достаточным быстродействием.

5. Возможность проведения Фурье-анализа, который позволяет осуществить разложение функций, полученных 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. Желательна выдача результатов Фурье-анализа в графическом и текстовом виде.

6. Возможность проведения параметрического анализа, который позволяет осуществить ряд итераций, при которых производится расчет 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, при этом количество кривых должно быть равно числу изменений величины заданного параметра.

7. Возможность проведения температурного анализа, который позволяет осуществить расчет схемы при разных заданных температурах окружающей среды. В результате должны

выдаваться соответствующие функции анализируемой схемы (токи, напряжения и т. д.) при заданных температурах.

8. 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.

9. Возможность проведения анализ 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, и определяться величина наихудшего значения рассматриваемой схемной функции. Результатом анализа чувствительности методом наихудшего случая должно являться нахождение наибольшего или наименьшего отклонения рассматриваемой схемной функции от номинального значения.

10. Возможность проведения анализа начального приближения, который должен рассматривать следующую информацию:

- список всех напряжений аналоговых узлов;
- список всех состояний цифровых узлов;
- для каждого источника напряжения задавать его ток и мощность;
- список малосигнальных параметров для всех устройств.

Анализ начальных приближений должен обеспечивать достоверные результаты, поскольку они являются исходными для анализа переходных процессов.

Данные виды анализа, удовлетворяют подавляющему большинству потребностей, возникающих при моделировании систем силовой электроники.

Кроме перечисленных видов анализа, система моделирования должна обладать развитыми сервисными функциями, которые делают функционирование всей системы моделирования дружелюбной 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 аварийными системами.

2. Возможность построения иерархических структур моделируемых схем для исключения дублирования многократно повторяемых комбинаций элементов схемы, для облегчения начертания сложных схем.

3. Развитую систему диагностики ошибок, которые могут возникнуть при построении схем моделей, при реализации численных методов, применяемых при моделировании, 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, реализующих численные методы для получения устойчивой работы всей системы моделирования при обеспечении требуемой точности.

7. Обеспечение возможности создания и корректировки геометрических образов реализуемых моделей элементов.

8. Обеспечение гибкой системы отображения информации о модели в виде ее структуры, типов применяемых элементов, их параметров, типа проводимого анализа и его параметров, токах, напряжениях, мощностях, узловых потенциалах, функционалах, построенных с их использованием и измерениях временных интервалов. В случае большого объема выходной информации может оказаться целесообразной возможность 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 библиотечках по его параметрам или их совокупности).

лиотеках по его параметрам или их совокупности).

11. Возможность использования на различных этапах моделирования функциональных блоков, реализующих различные функции электронных элементов и узлов, но не имеющих 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.

12. Возможность оформления моделей и результатов моделирования на стандартных бланках, тип и структура которых определяется соответствующей нормативной документацией (ГОСТы, стандартные форматы и т. д.).

13. Желательна 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.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА СХЕМ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Повышение эффективности моделирования схем силовой электроники требует разработки методики, реализующей подход, иллюстрируемый на рис. 3.

В данной статье под методикой моделирования схем силовой электроники будет пониматься совокупность моделей, алгоритмов, методов, приемов работы, обеспечивающая эффективное моделирование.

Ниже приведены элементы, составляющие методику моделирования.

1. Разработка моделей. Перед началом моделирования необходимо убедиться в наличии в библиотеках моделей элементов, применяемых в проекте. В случае, если необходимых моделей элементов в библиотеке нет, требуется найти их из внешних источников информации или разработать.

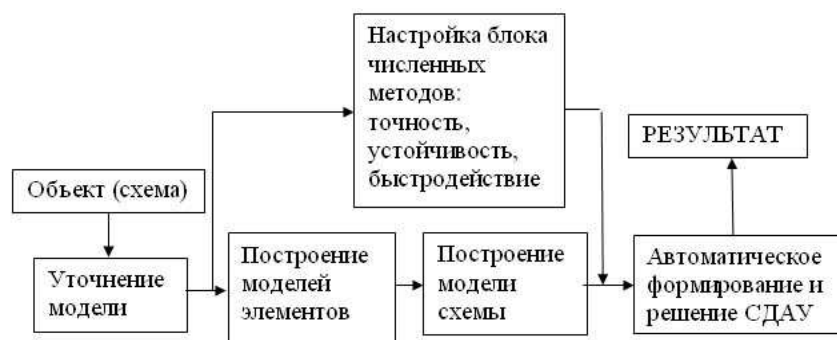


Рис. 3. Подход к методике моделирования схем силовой электроники

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. В случае, если проект состоит из блоков, составленных из моделей элементов, все вышесказанное относится и к блокам.

2. Способы устранения топологических ограничений.

Методы анализа электрических цепей, применяемые в используемых САПР ограничивают класс анализируемых схем.

3. Идентификация и коррекция модели при аварийных режимах работы элементов.

Ряд моделей силовых элементов, применяемых в системах моделирования, неадекватно описывают поведение элемента в аварийных ситуациях. (Здесь под аварийной ситуацией будет пониматься режим работы элемента, при котором значения некоторых его параметров, например, ток, напряжение, крутизна нарастания тока, крутизна нарастания напряжения, время, предоставляемое для восстановления запирающих свойств и т. д. превосходят паспортные значения). Неадекватность описания сводится к тому, что реальный клапан в случае аварийной ситуации выходит из строя необратимо – «сгорает», а модель клапана 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 клапана происходит только в переходном процессе, заметить это при моделировании достаточно трудно.

4. 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 (схема Ларионова) выпрямителя 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.

5. Использование алгоритмов моделирования схем силовой электроники на основе настройки численных методов интегрирования.

6. Определение токовой загрузки клапанов.

Ключевым вопросом при проектировании схем силовой электроники является вопрос определения допустимых значений токов через клапаны, то есть токовой загрузки. В справочных материалах на клапаны, 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 клапан 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 клапана тока.

Применяемые САПР позволяют существенным образом облегчить решение задачи о токо-

вой 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 САПР 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 максимально допустимой мощностью, рассеиваемой корпусом вентиля, дает полную информацию о токовой нагрузке вентиля при произвольной форме протекающего через него тока и частоте его работы.

7. Вычисление средних и действующих значений.

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

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

действующее значение:

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

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 САПР 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 результат, отличный от полученного по формулам (3) и (4) соответственно. Покажем, что погрешность при этом для достаточно больших значе-

ниях времени Time может быть допустимо малой.

Вычисление определенного интеграла предполагает нахождение предела

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

где $\sum S = nS + \Delta S$ – 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; $\sum t = nT + \Delta t$ – суммарное время интегрирования, 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 более приближается к некоторой постоянной величине:

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

Это есть ни 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.

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

В случае потребности 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 САПР 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, частного от деления одной переменной на другую и т. д. Такой прием удобен, так как позволяет избежать промежуточной фиксации информации.

ВЫВОДЫ

Разработана методика моделирования схем силовой электроники, обеспечивающая эффективный анализ исследуемых схем за счет учета особенностей, характерных для функционирования схем силовой электроники и накладываемых топологических ограничений на соединение элементов схемы. Методика позволяет анализировать как штатные, так и аварийные режимы работы схем, а также проводить сравнительный анализ режимов работы нескольких схем в одном временном диапазоне. Методика была апробирована на ряде схем силовой электроники. По результатам апробации были выданы рекомендации по созданию физических моделей и опытных образцов. Образцы были изготовлены и показали хорошее соответствие выходных параметров с характеристиками, полученными при моделировании.

Эффективность применения данной методики подтверждена сопоставлением результатов моделирования с результатами, полученными на физической модели источников питания на базе двухтактного преобразователя напряжения. Получен коэффициент раскочки по напряжению $3,23 \cdot 10^3$, что соответствует полученному при расчете диапазону $10^3 \dots 10^4$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Таназлы Г. И.** Повышение эффективности моделирования схем силовой электроники: Саарбрюкен, Германия, LAP 2011. 216 с.
2. **Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И.** OrCAD 9.x. OrCAD 10.x. Практика моделирования. М.: СОЛОН-Пресс, 2008. 208 с.

ОБ АВТОРАХ

Мунасыпов Рустем Анварович, проф. каф. техн. кибернетики. Дипл. инженер по электронике (УАИ). Д-р техн. наук по системному анализу и управлению (УГАТУ). Иссл. в обл. робототехники.

Таназлы Георгий Иванович, доц. каф. автоматизации проектирования инф. систем. Дипл. магистр по информатике и вычислительн. технике (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук по математическ. моделированию, численным методам и комплексам программ (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. математическ. моделирования.

Таназлы Андрей Иванович, асп. каф. техн. кибернетики. Дипл. специалист по защите информации (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. математическ. моделирования.