

Моделирование тепловых режимов работы IGBT-модулей в преобразовательной технике

В статье представлена разработанная АО «Протон-Электротекс» программа-симулятор, предназначенная для моделирования тепловых режимов работы IGBT-модулей.

Тимофей Федоров, к. т. н.
t.fedorov@proton-electrotex.com

За последние годы среди разработчиков устройств силовой электроники стали очень популярными интегрированные системные решения (силовые сборки) от производителей силовых полупроводниковых приборов (СПП). Такие функционально законченные блоки, оптимизированные для решения конкретных задач, в отдельных отраслях зачастую более востребованы, чем дискретные силовые модули.

Очевидно, что путь от получения технических требований до изготовления опытного образца силовой сборки непрост. Сложности связаны с необходимостью выбора связки «полупроводниковый прибор-охладитель» с целью максимального использования характеристик СПП, и в конечном итоге разработчики упираются в «ценовой потолок» аналогичных решений, предлагаемых на рынке.

Для оценки эффективности того или иного решения используют значение температуры кристалла транзистора при наиболее нагруженном режиме работы.

Методика расчета потерь приводится во многих инструкциях по применению СПП и сводится к нахождению суммы потерь, связанных с конечным временем включения/выключения полупроводниковых компонентов (динамические потери), и потерь, связанных с неидеальной проводимостью полупроводниковых компонентов модуля во включенном состоянии и токами утечки в выключенном состоянии (статические потери). В зависимости от частоты переключения, коэффициента модуляции и реализуемой схемы на первый план выступает тот или иной вид потерь.

Процесс разработки является итерационным. Количество итераций связано с опытом и имеющимся в наличии у разработчика инструментарием. Для правильного выбора IGBT-модуля предлагается следующий алгоритм:

1. Выбирается модуль необходимого класса, с величиной номинального тока не менее максимального выходного тока преобразователя.
2. Определяются токи и напряжения на отдельных его элементах.
3. Производится расчет статических и динамических потерь на каждом полупроводниковом элементе модуля для максимальных режимов работы преобразователя. Расчет следует проводить для значений температуры кристаллов модуля, близкой к максимально допустимой.
4. Используя величины теплового сопротивления для каждого компонента модуля относительно основания модуля и величину теплового сопротивления между основанием модуля и охладителем, вычисляют максимально допустимую температуру охладителя в зоне установки модуля.
5. Производится расчет суммарных потерь на модуль. Исходя из предполагаемой конструкции охладителя и максимально допустимой температуры охлаждающей среды производится вычисление температуры охладителя в зоне установки модулей.
6. Если полученная температура не превышает расчетного значения, полученного в п. 4, с достаточным запасом, считаем выбор модуля законченным.
7. Если запас по температуре охладителя в зоне установки модулей слишком большой, решаем вопрос о возможности замены модуля на другой, с уменьшенной величиной номинального тока.

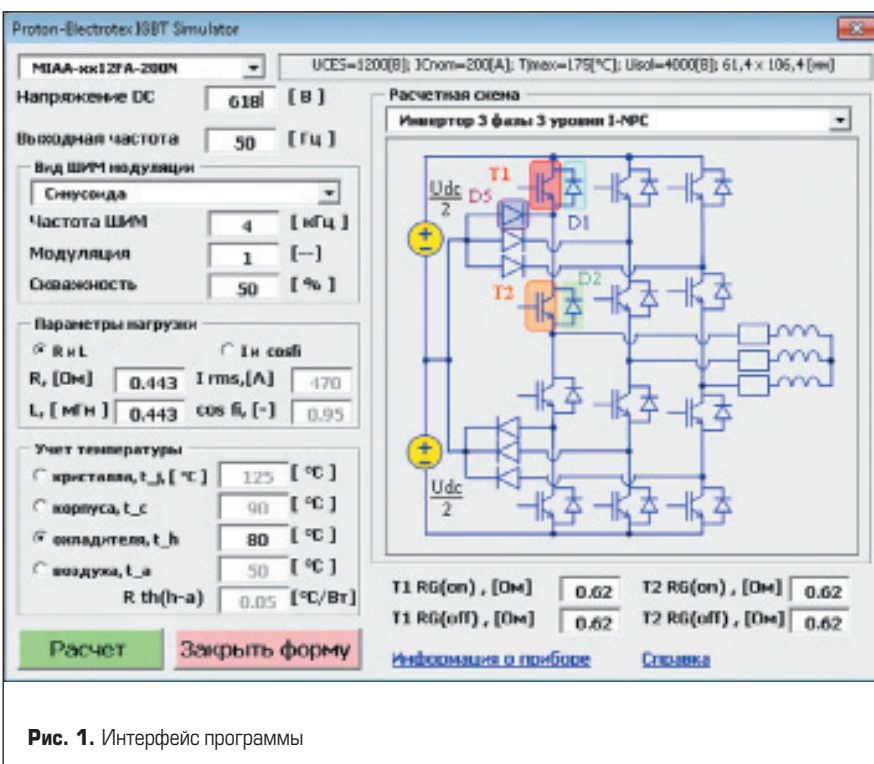


Рис. 1. Интерфейс программы

В случае замены модуля повторно производим тепловой расчет.

8. Если запас по температуре охладителя недостаточен, решаем вопрос о возможности замены модуля на больший по величине номинального тока или меняем систему охлаждения модуля. В случае замены модуля повторно производим тепловой расчет.

Для облегчения поиска правильного решения ведущие фирмы — производители СПП предлагают программы теплового анализа режимов работы СПП в типовых схемах. В первую очередь эти программы предназначены для расчета тепловых потерь на кристаллах и температуры кристаллов при заданных режимах работы. Основные функции у программ схожие. Однако каждая из программ проводит тепловой анализ работы только модулей конкретной выпускающей ее фирмы, что является общим (неизбежным) для них недостатком.

«Протон-Электротекс» тоже начала разработку собственной программы в области моделирования тепловых режимов работы IGBT-модулей в преобразовательной технике. Имеющаяся в компании испытательная база позволяет получать все необходимые для разработки ПО зависимости.

Однако разработка собственного ПО, помимо имеющихся знаний по СПП, требует навыков

моделирования и программирования. Поэтому на первом этапе отработка алгоритмов и математических моделей осуществлялась с использованием универсальных программ, позволяющих решать системы дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши.

Для реализации выбранного подхода необходимо составить математическую модель инвертора. Несомненным плюсом программы являются возможности моделирования всей схемы, получения значений токов и напряжений на всех элементах, использования реальных моделей компонентов, а также доступность таких специфических инструментов, как разложение в спектр, определение коэффициента мощности и коэффициента гармонических искажений.

Программа реализуется несколькими блоками: первый реализует вычисление функций переключения IGBT, вычисление мгновенных значений ЭДС ветвей и мгновенных значений напряжения на нагрузке RL; второй реализует вычисление мгновенных значений токов в нагрузке, в транзисторах и диодах; третий обеспечивает вычисление мгновенных значений энергии и мощности при проводимости и переключениях транзисторов и диодов; в четвертом вычисляются значения температур.

Интерфейс программы показан на рис. 1.

Программа предоставляет возможность пользователю выбрать один из модулей, выпускаемых компанией; указать схему, для которой задать входные данные по напряжению шины DC, выходной частоте, нагрузке на фазах; настроить ШИМ и учет температуры кристалла или основания.

Результаты моделирования для схемы 3-L I-NPC инвертора показаны на рис. 2.

Разработка собственного ПО для моделирования позволит внедрить в компании более совершенные инструменты, передавать клиентам при необходимости созданные шаблоны для типовых процессов и входных воздействий, оптимизировать соотношения параметров разрабатываемого устройства, а также исследовать характеристики типовых схем преобразователей с учетом нелинейностей, создавать электронную инструкцию по проектированию с учетом базы данных ранее наработанных проектов. Расчеты в программе на данном этапе могут выполняться только по запросу клиента. В скором времени программа будет открыта для свободного доступа либо как макрос для MS Excel, либо как веб-приложение на сервере компании.

В будущем планируется добавление блока моделирования распределения температур по поверхности охладителя.

