

Разум и мускулы:

ПЛИС управляет силовой электроникой

При разработке инвертора необходимо обеспечить четкое взаимодействие схемы управления и силового каскада. Путь к достижению наилучших характеристик — сочетание высокоразвитой программной логики с новейшими полупроводниковыми приборами, передовыми методами регулирования тепловых режимов и продуманной механической частью конструкции.

Томас Феттер
(Thomas Vetter)

Мартин Шульц
(Martin Schulz)

Залог успеха спортсмена — эффективная совместная работа мозга и мышц. При проектировании инверторов для транспорта также встает задача сбалансированного использования «интеллектуальных» (программных) и «физических» (аппаратных) ресурсов.



Рис. 1. Блок VECTOPOWER

Особенно это актуально в случае, если предполагаются какие-либо дополнительные функции, помимо питания электродвигателей и генераторов. Блок VECTOPOWER (рис. 1) предназначен для применения на транспорте и с децентрализованными электроприводами. Он спроектирован с учетом целого ряда требований:

- подключение к сети переменного тока;
- работа в качестве AC/DC-преобразователя, в том числе двунаправленного;
- питание нагрузки от аккумуляторов и/или конденсаторов и их подзарядка;
- возможность реализации бортового питания и изолированных сетей.

На рис. 2 показаны различные варианты применения блока VECTOPOWER. Необходимость в прогрессивной концепции преобразователя продиктована соображениями экономики и логистики, особенно глобальных поставок запасных частей. Суть в том, чтобы иметь общую аппаратную базу для решения всевозможных задач, а конкретные функции реализовывать программно или путем установки тех или иных параметров. Этот подход можно воплотить без

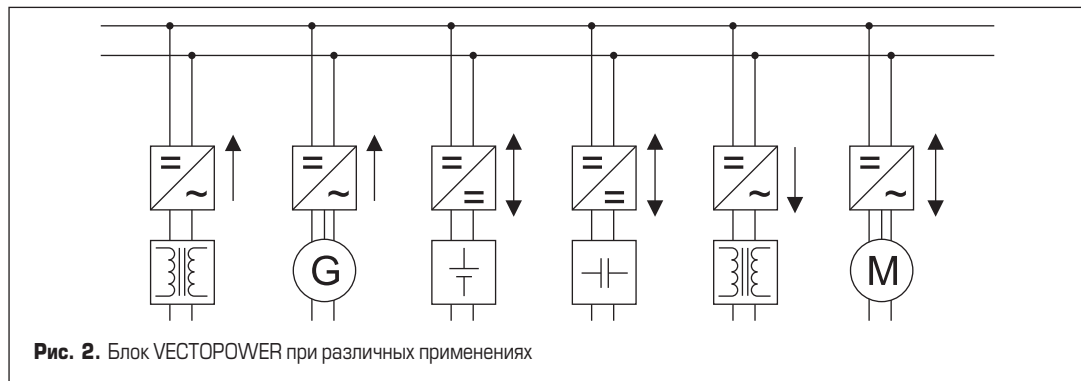


Рис. 2. Блок VECTOPOWER при различных применениях

каких-либо компромиссов, если уделить пристальное внимание нескольким основным аспектам.

ПЛИС как центр управления

Управлять единой схемой на шести IGBT-ключках, рассчитанной на множество применений (от управления электродвигателями до преобразования постоянного тока), целесообразно с помощью ПЛИС типа FPGA. При этом очень удобно, если ПЛИС генерирует импульсные последовательности для силовых транзисторов и руководит работой быстродействующих контуров регулирования, особенно токовых.

В рассматриваемом случае ПЛИС отслеживает значения трех напряжений и трех токов, выполняет управляющие алгоритмы и вырабатывает сигналы управления затворами силовых транзисторов. Длительность рабочего цикла сокращается до 2 мкс. Гибкая прошивка ПЛИС обеспечивает поддержку всех вариантов применения, изображенных на рис. 2.

Широкие функциональные возможности в сочетании с быстродействующей и чувствительной схемой управления — это только один аспект. Не менее важным аспектом, особенно в транспортных применениях, являются высокие требования к защите. Необходимо также учесть широкий диапазон температур, мощные механические воздействия, интенсивные температурные циклы и переменные электрические нагрузки, не говоря уже о требовании сохранения работоспособности при колебаниях напряжения в системе.

Максимальное использование возможностей полупроводникового прибора

Время реакции системы на короткое замыкание или другую сильную перегрузку должно составлять считанные микросекунды. Коррекция для учета тепловых процессов в полупроводнике при изменении нагрузки должна производиться, как правило, за время порядка миллисекунд. Это требует глубокого знания особенностей используемого полупроводникового прибора. Соответствующие сложные алгоритмы и расчеты на базе математических моделей выполняются внутри ПЛИС в жестком реальном времени. Тем самым в зависимости от способа применения и рабочей точки обеспечивается прирост выходной мощности до 20% для того же полупроводникового прибора. Это благотворно сказывается на экономических и массо-габаритных характеристиках изделия, особенно если параллельно усиливается защита от экстремальных условий эксплуатации. Чтобы выполнить все перечисленные требования, необходим контур регулирования тока с детерминированным поведением и достаточным быстродействием для предотвращения бросков тока в неустановившемся режиме

даже при крайне резких изменениях нагрузки. Процессоры общего назначения этому критерию не удовлетворяют, поэтому в данном случае схема управления реализована на ПЛИС, обеспечивающей параллельное выполнение нескольких процессов с использованием высокоустойчивых конечных автоматов.

Временные ограничения как средство повышения пиковой мощности

Для работы тягового привода требуется удерживать высокую пиковую мощность на протяжении нескольких секунд. Смена частоты переключения на ходу даже в фазе активного управления крутящим моментом позволяет повысить пиковую мощность. Как следствие, появляется возможность использовать IGBT меньшего размера и за счет этого снизить затраты. Частоту переключения целесообразно оптимизировать с учетом различных параметров. С ростом частоты снижаются потери в электродвигателе за счет ослабления пульсаций тока, зато растут потери на переключение в силовых полупроводниковых приборах. Сравнив результаты теплового расчета, можно вычислить, что снижение частоты переключения с 9 до 4,5 кГц приводит к повышению выходной мощности на 40–45%.

Схема управления на базе ПЛИС позволяет менять частоту переключения на ходу, не создавая помех управлению крутящим моментом. В ходе нормальной работы частота переключения остается равной 9 кГц, но в некоторых режимах она может снижаться до 4,5 кГц.

Тепловые постоянные времени силовых полупроводниковых приборов обычно находятся в диапазоне ниже 100 мс, а у электродвигателей они могут превышать 100 с.

В условиях высокого ускорения или затрудненного страгивания можно воспользоваться этим соотношением и снизить частоту переключения на несколько секунд.

Экономия магнитного материала в электрических машинах с постоянными магнитами

Помимо повышения экономической эффективности проектируемых изделий силовой электроники, схемы управления на базе ПЛИС позволяют оптимизировать конструкцию электродвигателей с постоянными магнитами. Применяемые в этих электродвигателях магниты очень чувствительны к магнитным перегрузкам. Достаточно перегрузки длительностью всего в несколько микросекунд, чтобы вызвать необратимое частичное размагничивание. Поэтому конструкторы электродвигателей предусматривают в них запас по количеству магнитного материала. Если обеспечить (например, с помощью ПЛИС) точное регулирование тока в интервалах времени порядка микросекунд, то можно сконструировать

электродвигатель того же размера с такими же значениями крутящего момента, мощности и КПД, сэкономяв 30% магнитного материала.

Учитывая стратегическую зависимость от поставок сырья и высокие цены на магниты, ясно, что экономия на этой статье расходов — вопрос первостепенной важности.

Главный компонент — полупроводниковый прибор

Силовой полупроводниковый прибор — ключевой элемент, управляющий потоком энергии. Чтобы он работал в соответствии с предъявляемыми требованиями, необходимо учесть электрические, механические и тепловые аспекты. Разрабатывая инвертор, следует рассматривать полупроводниковый прибор в неразрывном комплексе с радиатором и типовым профилем нагрузки. Глубокое знание особенностей этой системы необходимо для максимально точной оценки температуры полупроводникового кристалла и амплитуды ее колебаний. Обычно производители полупроводниковых приборов предоставляют информацию, по которой проектировщики силовых систем могут предсказать ресурс прибора в нагрузочных циклах исходя из амплитуды колебаний температуры в готовом изделии. Зная профили нагрузки и ожидаемое количество нагрузочных циклов за единицу времени, можно оценить срок службы изделия.

Для рейсового автобуса на полностью электрической тяге плановый ресурс составляет 60 000 ч при сроке службы 15 лет, что соответствует 1 млн км пробега. На основе этого требования были выбраны силовые модули EconoDUAL3. Эти модули претерпели всесторонние усовершенствования по таким параметрам, как механическая прочность, электрические характеристики и тепловой контакт. Суть внесенных усовершенствований детально проиллюстрирована на рис. 3.

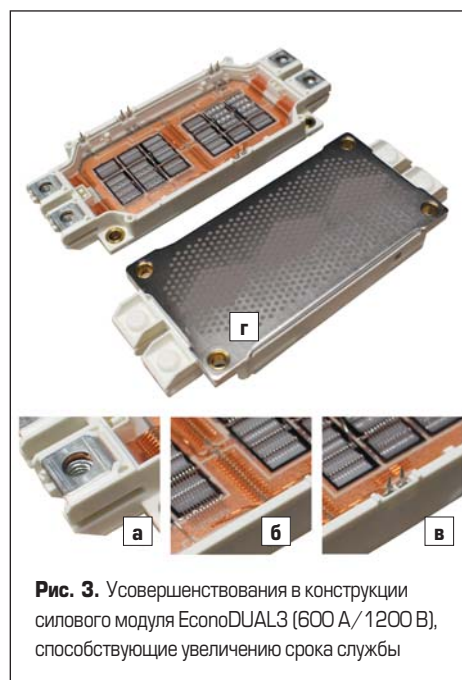


Рис. 3. Усовершенствования в конструкции силового модуля EconoDUAL3 (600 А / 1200 В), способствующие увеличению срока службы

Технологии электрических соединений

Прежде силовые выводы вставлялись в пластмассовый корпус. Микроперемещения выводов в некоторых случаях создавали дополнительные механические напряжения на проводниках, соединяющих внешние выводы с DCB-платой. В новой конструкции внешние выводы (рис. 3а) выполнены методом литья под давлением, что повысило стойкость модуля к вибрации.

Улучшить тепловые и электрические характеристики модулей удалось благодаря новому способу выполнения внутренних электрических соединений, под которыми понимаются все проводники, соединяющие подложки элементов модуля между собой или DCB-плату с внешними выводами. На рис. 3б показана крупным планом часть нового модуля с внутренними электрическими соединениями. Теперь эти соединения делаются не из алюминиевых проводников, а из медных. Более высокая удельная электропроводность меди позволяет повысить токовые нагрузки без увеличения числа проводников и занимаемой площади. Благодаря более низкому сопротивлению проводники не так сильно нагреваются. Таким образом, рациональный выбор материала позволяет даже при больших токах удерживать температуру модуля в пределах, заданных для его конструкции.

Еще одно усовершенствование — замена паяных соединений технологией PressFIT при выполнении внешних электрических соединений. В изделиях, подверженных жестким условиям эксплуатации, характеристики паяных соединений со временем ухудшаются из-за колебаний температуры и механического износа под действием вибрации. Постепенная деградация приводит, в конечном счете, к возникновению так называемого эффекта «холодной пайки». В тех местах, где проявляется этот эффект, возможно периодическое или устойчивое нарушение электрического контакта.

Появившаяся недавно технология PressFIT, показанная на рис. 3в, обеспечивает соединение с печатной платой по типу «холодной сварки». Это газонепроницаемое и механически очень прочное соединение с низким электрическим сопротивлением. По сравнению с обычными паяными соединениями и пружинными зажимами соединения PressFIT имеют на два порядка большую надежность.

Тепловой контакт

Улучшить тепловой контакт удалось путем нанесения на силовые модули специального теплопроводящего материала. Слой этого материала (рис. 3г) образует тепловой интерфейс между силовым модулем и радиатором. Новый материал состоит из несущей матрицы с изменяемым фазовым состоянием и термоактивных наполнителей. Нанесение теплопроводящего материала — полностью автоматизированная технологическая опера-

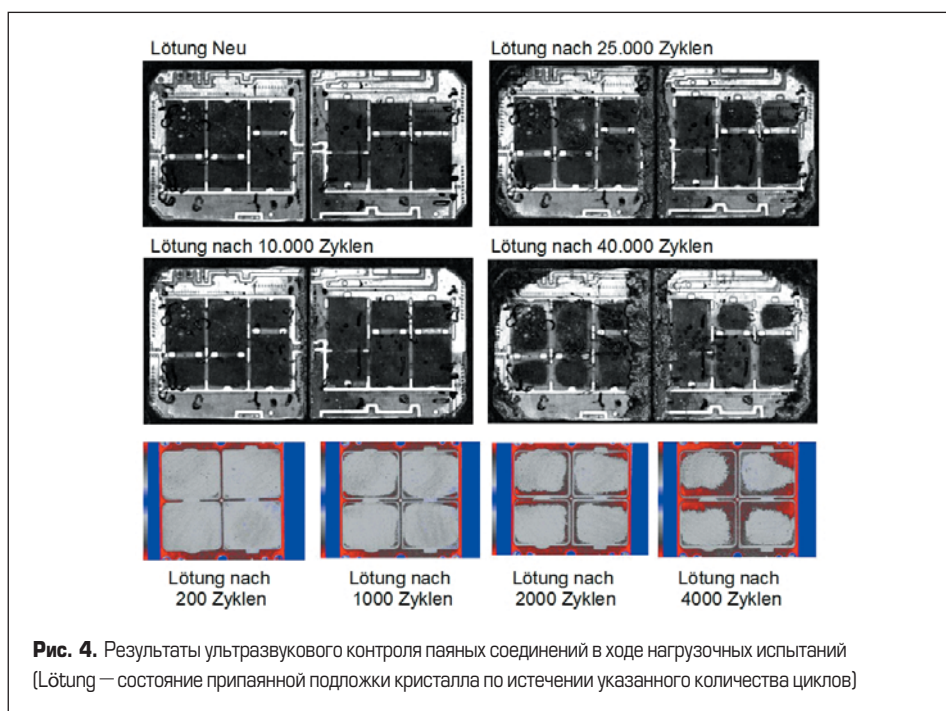


Рис. 4. Результаты ультразвукового контроля паяных соединений в ходе нагрузочных испытаний (Lötung — состояние припаянной подложки кристалла по истечении указанного количества циклов)

ция, выполняемая под наблюдением сложной системы оптического контроля. Эта недешевая процедура гарантирует нанесение строго заданного количества материала в правильном месте. Изображенная на рисунке сотовая структура соответствует макроскопической геометрии пластины основания. При изменении размеров структуры меняется количество наносимого локально теплопроводящего материала. Увеличенная зона, не покрытая теплопроводящим материалом, обеспечивает непосредственный контакт двух металлов, что дополнительно улучшает тепловые характеристики.

Результаты тщательных испытаний и многолетний опыт реальной эксплуатации подтверждают хорошие тепловые свойства и высокую долговременную стабильность нового материала. Благодаря ему устранен критический механизм отказа, связанный с постепенным выдавливанием теплопроводящей пасты из зазора между поверхностями.

Надежная разварка

Одним из крупных нововведений в этих силовых модулях, позволившим применять их на коммерческом транспорте и в сельскохозяйственной технике, стал высоконадежный процесс разварки. Разварка используется для соединения несущей подложки (DCB-платы) с пластиной основания модуля. Небольшие рассогласования коэффициентов теплового расширения ведут к образованию термомеханических напряжений в этом соединении. Результатом становится отслаивание подложки, из-за которого сокращается общая площадь теплоотводящей поверхности и, следовательно, нарушается теплопередача. Возникает положительная обратная связь, так как с уменьшением площади растет температура полупроводникового кристалла,

из-за чего, в свою очередь, увеличиваются амплитуда колебаний температуры и механические напряжения.

На рис. 4 приведены результаты ультразвукового контроля паяных соединений модуля. Эти изображения получены в ходе мониторинга термоциклических испытаний. Для сравнения на рисунке приведены результаты контроля выполненных традиционным способом паяных соединений в устройстве промышленного назначения.

Плановый ресурс мощных промышленных силовых модулей на IGBT-транзисторах составляет 3000 циклов. Благодаря новому процессу разварки модули EconoDUAL3 продемонстрировали при тех же условиях эксплуатации на порядок больший ресурс — более 35 000 циклов.

Заключение

В ходе разработки инвертора необходимо пользоваться теоретическими сведениями и практическими наработками из множества предметных областей. Только комплексный подход к выбору методов измерения и управления, программированию, учету механических воздействий, подбору комплектующих и регулированию тепловых режимов позволяет создавать устройства с выдающимися техническими характеристиками. На транспорте предъявляются крайне высокие требования к качеству и надежности, особенно в части вибрационной стойкости. Блок ARADEX VECTOPOWER, оборудованный модулями полумостовых преобразователей Infineon, выдержал испытания на устойчивость к динамическим нагрузкам по стандарту IEC EN 60068-2-27 с ускорениями до 40g. Таким образом, этот блок продемонстрировал достаточную надежность и долговечность для применения в коммерческих транспортных средствах и сельскохозяйственной технике.