

Оптимизация конструкции вибростойкого корпуса силового модуля

Фрэнк Соерлэнд
(Frank Sauerland)

Силовые IGBT-модули, предназначенные для типовых общепромышленных применений, не могут без соответствующих изменений использоваться в сельскохозяйственной и строительной (CAV) технике, к которой предъявляют более высокие требования, в том числе по стойкости к вибрациям [1–3]. В статье описывается процесс моделирования, позволяющий разработать вибростойкую конструкцию силового модуля для CAV-применений. Моделирование вибрационных воздействий (анализ методом нормальных волн, а также гармонический

анализ) является гораздо более быстрым и эффективным способом оптимизации дизайна, чем метод проб и ошибок. Оптимизация конструктива начинается с оценки его механического поведения в рамках набора вибрационных нагрузочных характеристик, специфических для определенного применения. Конструкция, соответствующая заданным вибрационным критериям, дополнительно анализируется с точки зрения ее тепловых характеристик. Подобная последовательность процесса проектирования позволяет создавать компоненты, оптимизированные по тепловым и механическим параметрам для CAV-применений.

Измерение и моделирование вибростойкости

Результаты вибрационных тестов

Вибрационные испытания показывают, что силовой модуль, разработанный для общепромышленных систем, удовлетворяет типовым требованиям по устойчивости к вибрации, но он неспособен надежно работать в условиях повышенных требований, предъявляемых к CAV-устройствам (рис. 1). Чтобы проверить вибрационную прочность силового модуля для общепромышленного применения, он подвергался воздействию вибрации с ускорением 5g в диапазоне частот 5–150 Гц. Модуль успешно прошел тест, никаких повреждений конструкции не было обнаружено. Силовой модуль, предназначенный для CAV-применений, подвергается усиленной нагрузке с ускорением 15g на частотах 5–2000 Гц [4].

Оптимизация характеристик вибростойкости

Для лучшего понимания характеристик вибростойкости и механизма отказа силовых шин конструкция модуля может быть упрощена следующим образом (рис. 2а). Силовой модуль (рис. 2б) содержит три шины, их можно представить в виде трех пружин, находящихся в пластмассовом корпусе, который также для упрощения заменяется пружиной. Пружины на одном конце связаны с базовой платой, а на другом — с неподвижной опорой. Оптимизация устойчивости к вибрации включает в себя увеличение силы упругости корпуса и снижение силы упругости силовых шин. Упругая сила шин может быть уменьшена за счет удлинения выводов. Упругая сила корпуса может быть увеличена путем добавления элементов, увеличивающих его прочность.

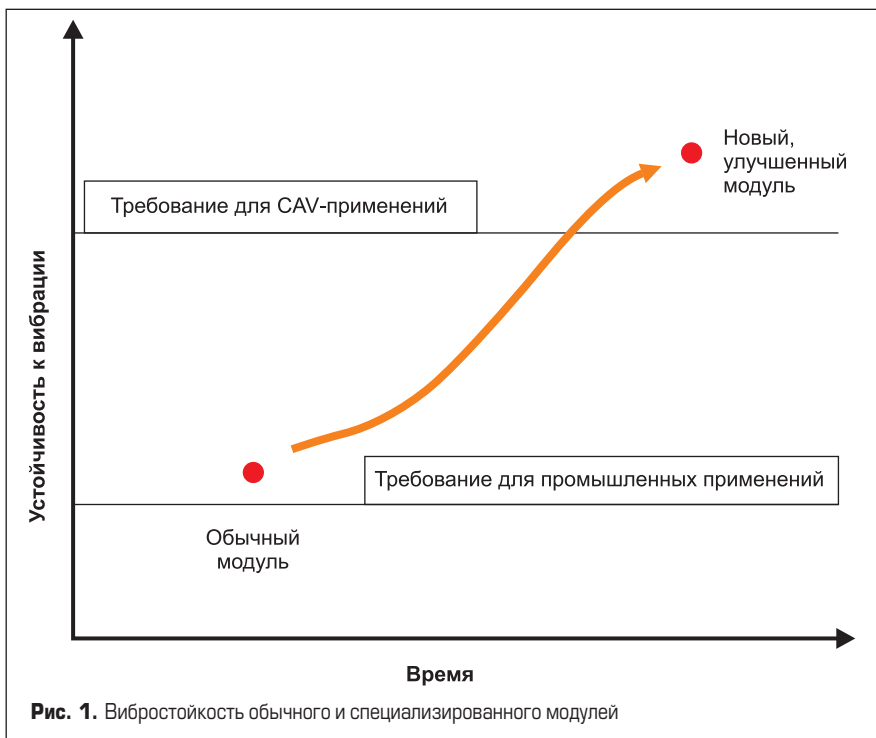


Рис. 1. Вибростойкость обычного и специализированного модулей

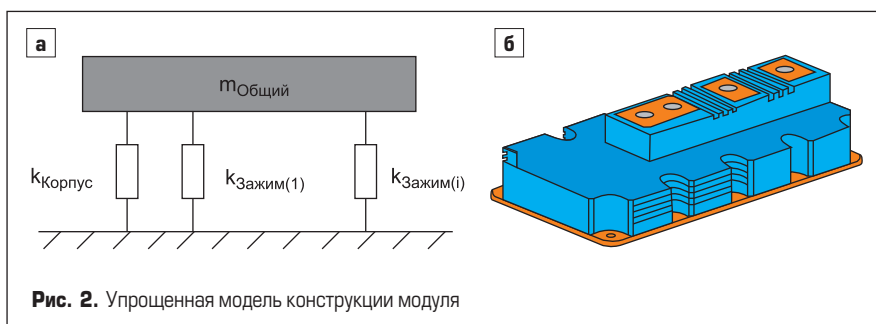


Рис. 2. Упрощенная модель конструкции модуля

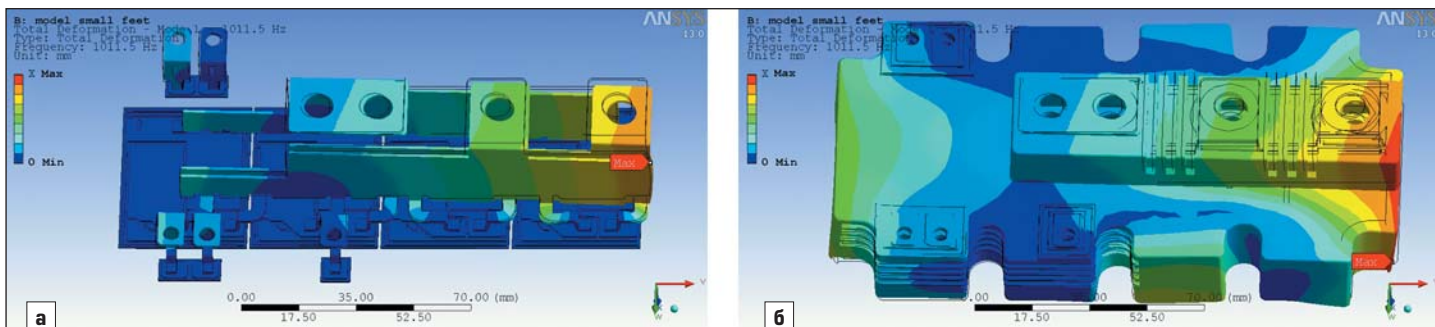


Рис. 3. Результаты анализа методом нормальных волн на частоте первого резонанса

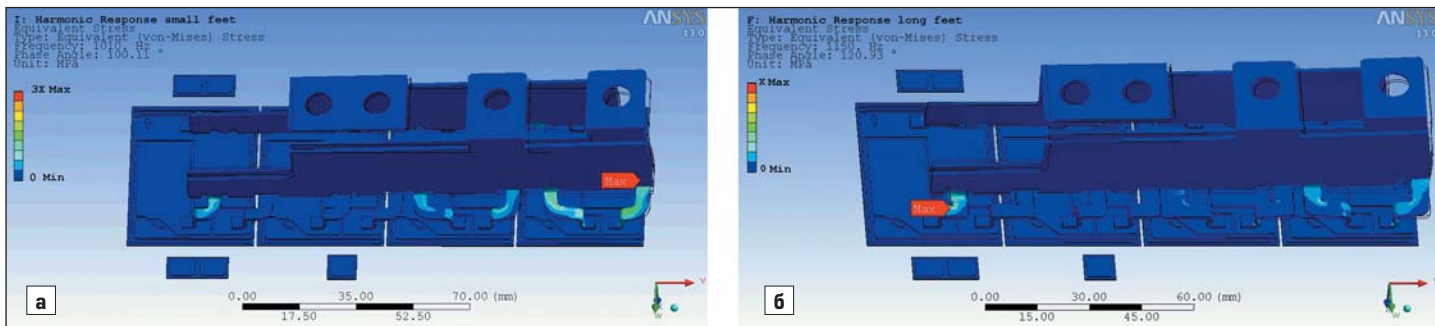


Рис. 4. Результат частотного анализа модуля: а) шина с короткими выводами; б) шина с длинными выводами

Моделирование

Частотный анализ, или анализ методом нормальных волн

Моделирование методом нормальных волн является хорошим средством поиска резонансных частот и определения слабых мест конструкции модуля. На рис. 3 показаны результаты такого анализа и представлено первое гармоническое колебание. На рисунке слева видна деформация шин силового модуля, справа показана деформация корпуса на первой резонансной частоте. Результаты моделирования (рис. 3) позволяют выявить критические точки в конструкции корпуса и у основания шин.

Моделирование подтверждает результаты вибрационных тестов. Для дальнейшего совершенствования модели с более длинными выводами и усиленным корпусом необходимо выполнить частотный анализ.

Сравнение на одной гармонической частоте конструкции новых шин с их обычной версией показывает, что модернизированные шины испытывают меньший механический стресс. На рис. 4 слева представлен результат частотного анализа модуля с короткими выводами, справа — с удлиненными. Максимальное напряжение, создаваемое в выводах стандартного компонента, оказывается в три раза больше, чем в новой конструкции. Максимальное напряжение в новом и в старом модуле обнаруживается в одном и том же месте.

Моделирование позволяет ускорить процесс разработки и производства оптимальной конструкции, оно не менее эффективно в поиске решения, чем метод проб и ошибок.

Электротепловой анализ

Граничные условия

Теперь необходимо проверить электротепловые свойства усовершенствованных шин. Для силового модуля очень важно, чтобы в процессе работы температура не превышала максимально допустимого значения. Улучшение механических свойств шины не должно сопровождаться ухудшением термоэлектрических характеристик.

Для подтверждения этого были проведены исследования токовых характеристик нового конструктива. Процедура оптимизации подразумевает одновременный анализ термоэлектрических и вибрационных параметров.

На рис. 5 показана схема полумостового каскада с тремя силовыми шинами (AC, DC+, DC-). Плюсовой и минусовой выводы могут быть нагружены максимальным током, определяемым как $(I_{\text{Сном}}/4) \times 2^{0,5}$ (на каждый тер-

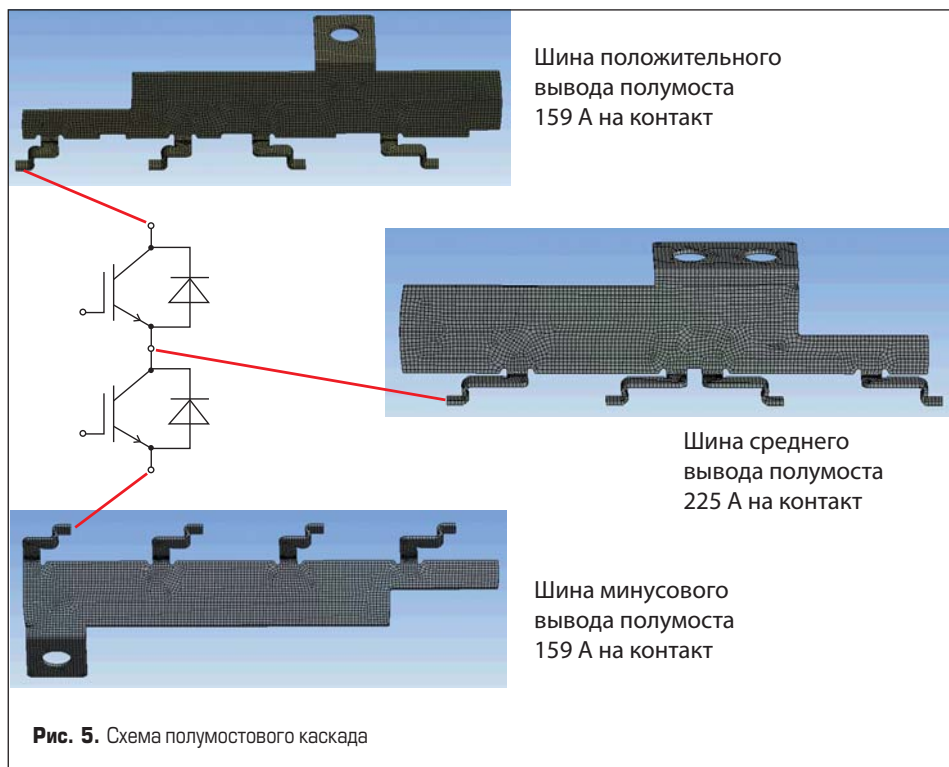


Рис. 5. Схема полумостового каскада

минал). Предельно допустимый ток в нашем случае — это $I_{\text{Сном}}$, его эффективное значение составляет $I_{\text{Сном}}/2^{0.5}$. Шина АС нагружена полным током, который течет через каждый из выводов: $I_{\text{Сном}}/4$.

Для электротеплового моделирования были определены соответствующие граничные условия. Зафиксирована температура в зоне соединения основания шины и медного слоя DCB-подложки, постоянную температуру также имеют контактные области.

Результаты электротеплового моделирования

После определения общих условий можно начинать процесс моделирования. Распределение температуры в трех шинах силового модуля показано на рис. 6. Рисунок подтверждает, что максимальная температура ниже предельно допустимых значений, следовательно, предлагаемая конструкция выполняет заданные требования по тепловым параметрам.

Результаты моделирования показывают окончательное соответствие модернизированной конструкции заданным требованиям, что подтверждается термоэлектрическим и частотным анализом. В процессе проектирования каждое изменение в дизайне шины требует проведения очередного цикла моделирования, которое должно выполняться до тех пор, пока результаты не станут приемлемыми. Даже с учетом массы необходимых итераций моделирование позволяет проводить оптимизацию конструкции быстрее и с меньшими затратами, чем при изготовлении прототипов и оценке всех возможных вариантов.

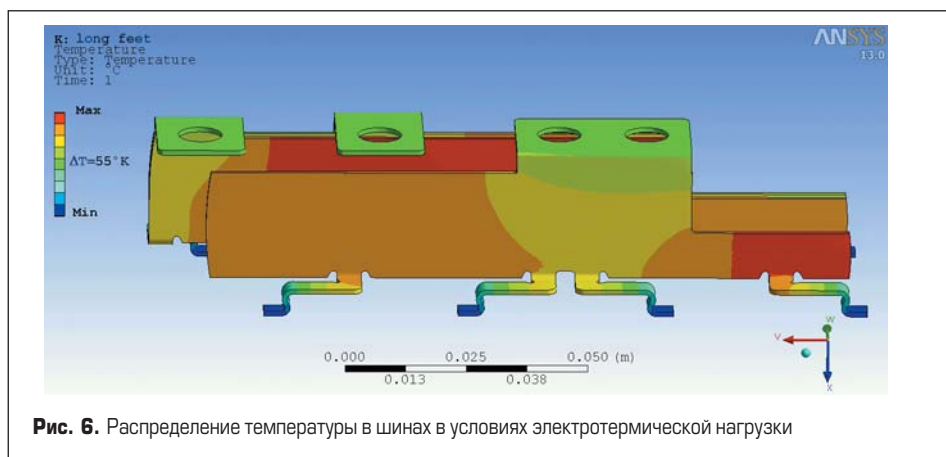


Рис. 6. Распределение температуры в шинах в условиях электротермической нагрузки

Заключение

В данной статье разъясняется, что виртуальный анализ вариантов конструкции силовых шин с использованием моделирования оказывается быстрее других способов проектирования, включая метод проб и ошибок. Очевидно, что модальный анализ или моделирование методом нормальных волн является очень хорошим инструментом, позволяющим выявить критические точки конструкции. Гармонический анализ позволяет сравнить уровень механического стресса, испытываемого различными конструкциями. После оптимизации механических характеристик необходимо провести теплоэлектрическое моделирование улучшенного варианта, чтобы оценить его поведение при максимальном токе.

Литература

1. Luniewski P., Slevin M., Mainka K., Levett D. The Technical Benefits of PrimePACK™ Modules in CAV Applications // Bodo's Power Systems. May, 2009.
2. Thoben M. Abschlussbericht Elektrokomponenten für Aktivgetriebe: Hochtemperaturtaugliche Verbindungstechnik, Stromsensorik, Treiber-IC zur Getriebeintegration der Leistungselektronik und Ankopplung an den Kühlkreislauf des Verbrennungsmotor. FKZ 19U6006C. 2011.
3. Teil 2-6: Prüfverfahren — Prüfung Fc: Schwingen (sinusförmig) IEC 60068-2-6.
4. Strotmann G., Borghoff G., Pannemann C., Vetter A. Ultraschallschweißen: Zuverlässige Hochstromverbindungen für hohe Temperaturen // Kolloquium Halbleiter-Leistungsbaulemente und ihre systemtechnische Anwendung, Nürnberg.