

# Определение теплового импеданса ( $Z_{th}$ ) силовых модулей с помощью измерения и моделирования

Кшиштоф МАЙНКЕ (Krzysztof MAINKA)  
Маркус ТОБЕН (Markus THOBEN)

Тепловой импеданс ( $Z_{th}$ ) силового модуля — это ключевой параметр, который нужен для определения максимального выходного тока при импульсных нагрузках. Его также можно использовать для расчета перепада температуры силового модуля в рамках нагрузочного цикла и, следовательно, для прогнозирования его срока службы. Эта величина требуется и конструкторам при определении параметров и расчета срока службы преобразователя. И наконец, величина  $Z_{th}$  служит одним из важнейших критериев при выборе того или иного силового модуля для разрабатываемой силовой электронной системы, поскольку тепловая емкость может существенно уменьшить температурный выброс в течение короткого времени. Очевидно, что для точного расчета величины температурного выброса требуется достаточно точное измерение значения теплового импеданса.

Для расчета температурных выбросов в IGBT-модулях в режимах импульсных мощных нагрузок используется параметр  $Z_{th}$ , получаемый путем моделирования или измерения  $V_{CE}(T)$ . При моделировании температурных процессов с использованием  $Z_{th}$ , полученных различными методами, было выявлено существенное несовпадение температурных кривых. Однако результаты смоделированного  $Z_{th}$  хорошо коррелируют с результатами эксперимента в режиме импульсных нагрузок. При этом большое влияние на величину теплового сопротивления оказывает задержка между выключением тока в нагрузке и началом измерения температуры в силовом модуле. В зависимости от частоты выходного напряжения исследуемого инвертора меняет-

ся и величина кратковременного теплового сопротивления, что, в свою очередь, влияет на температурный режим и срок службы модуля. Только использование моделирования по методу конечных элементов (Finite Elements) для определения теплового импеданса  $Z_{th}$  обеспечивает корректный расчет тепловых характеристик и срока службы модуля в режимах кратковременных импульсов.

## Определение теплового импеданса $Z_{th}$

Согласно требованиям стандарта JEDEC (JESD24-12) для определения температуры кристалла IGBT измеряется прямое падение напряжения (зависящее от температуры) на транзисторе при пропускании небольшо-

го тока после нагрева кристалла большим нагрузочным током. Для расчета теплового импеданса измеряют температуру кристалла в фазе охлаждения. Полученные данные позволяют судить о распределении тепла в кристалле в течение времени.

Вторым способом является расчет  $Z_{th}$  методом конечных элементов, при этом используются данные о трехмерной конструкции модуля в сочетании со свойствами использованных материалов, что позволяет смоделировать распределение температур с течением времени и рассчитать среднюю температуру кристалла.

## Расхождения между измеренным и смоделированным значением $Z_{th}$

Было произведено моделирование тепловых процессов в соответствии с моделью Фостера для  $Z_{th}$  в режимах коротких импульсов, при этом использовались значения  $Z_{th}$ , полученные при применении измерительного метода и моделирования. Результаты расчетов сравнивались с экстраполированными экспериментальными результатами после подачи коротких мощных импульсов. Хорошее совпадение измеренных и смоделированных результатов было получено только для модели Фостера, базирующейся на моделировании. На рис. 1 показано, что лучшие результаты могут быть получены только при моделировании по методу конечных элементов.

Моделирование процесса измерения  $Z_{th}$  объясняет причину возникновения расхож-

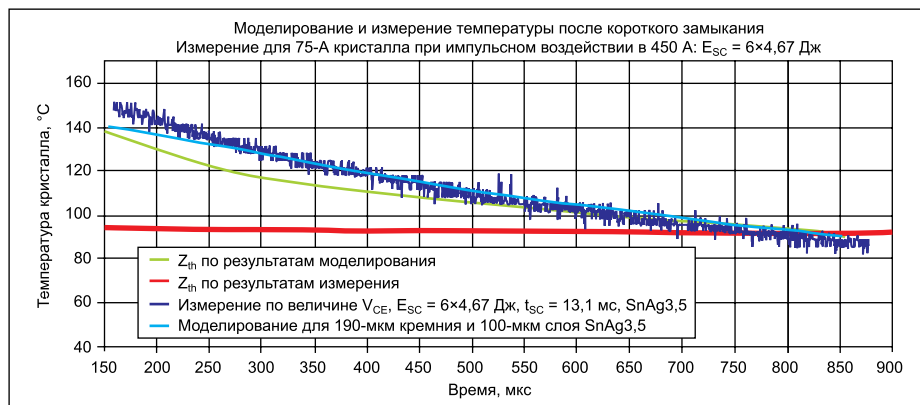


Рис. 1. Сравнение температуры по результатам моделирования методом конечных элементов и измерительного метода

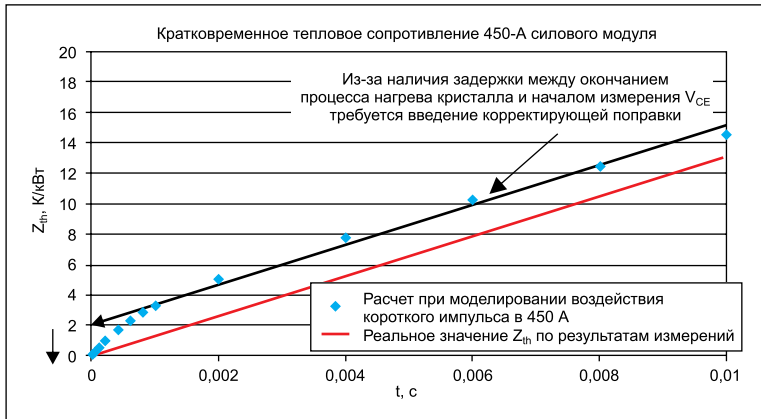


Рис. 2. Сравнение моделирования с экспериментальными данными для кратковременного теплового сопротивления: использование экстраполяции для компенсации задержки начала измерения приводит к введению отрицательного смещения

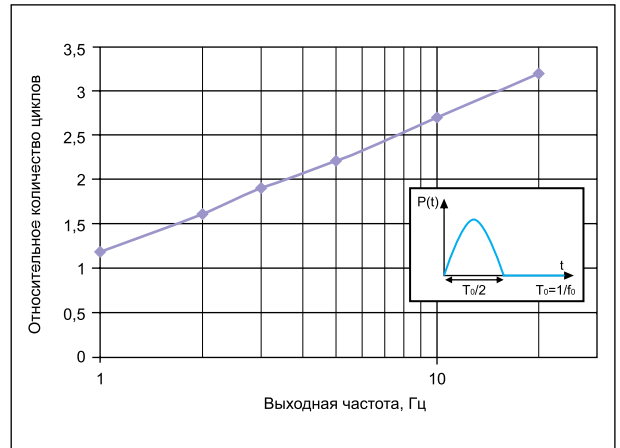


Рис. 4. Относительное количество рабочих циклов для расчетного и измеренного значения  $Z_{th}$  в зависимости от частоты

дений. Как показано на рис. 2, в процессе измерения осуществляется линейная экстраполяция для коротких периодов времени.

Результаты моделирования показывают сильное изменение температурных градиентов (в масштабе времени вплоть до единиц мс), возникающее из-за различия тепловых характеристик внутри многослойной структуры, состоящей из кремния, припоя и меди в верхней части «сэндвича». В результате для кратковременных импульсов наблюдается уменьшение величины  $Z_{th}$ . Для проверки отсутствия влияния других факторов на появление различий между измеренными и расчетными кривыми  $Z_{th,jc}$  было проведено исследование влияния выявленного расхождения. На рис. 3 приведены значения  $Z_{th,jc}$  скорректированные на величину смещения, которое было определено по графикам, показанным на рис. 2.

Такая корректировка показала хорошее совпадение расчетных результатов с экспериментальными. Следовательно, никакие другие факторы не оказывают заметного влияния на величину теплового импеданса.

### Влияние на перепады температуры и срок службы

Влияние расхождения между расчетным и измеренным значением  $Z_{th}$  на перепады

температуры при работе инвертора исследовалось для двух режимов. В первом случае рассматривалась типовая конфигурация трехфазного инвертора с синусоидальным выходным током и индуктивной нагрузкой. При этом температура кристалла циклически изменялась с частотой выходного сигнала.

Хотя для выбранного режима работы средняя рассеиваемая мощность может оставаться неизменной, ее скачки и, следовательно, максимальная температура кристалла растут по мере уменьшения частоты и снижаются при ее повышении.

На основе кривых быстрого термоциклирования для IGBT4 было рассчитано возможное количество рабочих циклов для различных циклов изменения температуры, при этом изменения температуры менее 10 К для частот свыше 20 Гц отбрасывались. Результаты вычислений в виде отношения, рассчитанного на основе моделирования  $Z_{th}$ , числа рабочих циклов к числу рабочих циклов, рассчитанному на основе измеренного  $Z_{th}$ , показаны на рис. 4. Здесь видно, что для частот, превышающих 1 Гц, расчетный срок службы выглядит более оптимистично. Стоит учесть, что это соответствует режимам, в которых измерения не точны.

Так как при частотах свыше 20 Гц изменения температуры пренебрежимо малы, во вто-

ром случае мы проводили исследование при использовании прямоугольных импульсов тока в нагрузке. Была рассчитана зависимость перепадов температуры и возможное количество рабочих циклов от длительности импульса ( $t_{on}$ ) на основе измеренного и расчетного значения  $Z_{th}$ . Относительное изменение количества рабочих циклов показано на рис. 5.

Как видно, в обоих случаях расчетный срок службы, основанный на измеренном значении  $Z_{th}$  при длительности импульса менее 1 с (или частоте импульсов свыше 1 Гц), выглядит более оптимистично, чем при расчете для стандартно измеренного  $Z_{th}$ . Необходимо учитывать, что расчетный срок службы на базе определения  $Z_{th}$  путем экстраполяции измеренных значений может оказаться слишком оптимистичным, если режим работы предусматривает наличие большого числа коротких импульсов очень большой амплитуды. Однако для большинства распространенных применений характерны периоды изменения величины нагрузки, значительно превышающие 1 с, что не вызывает появления ошибок в описанном расчете срока службы.

Для расчета скачков температуры в соответствии с режимом работы требуется знание точного значения теплового импеданса  $Z_{th}$ , особенно при низкой выходной частоте инвертора. Задержка между окончанием нагре-

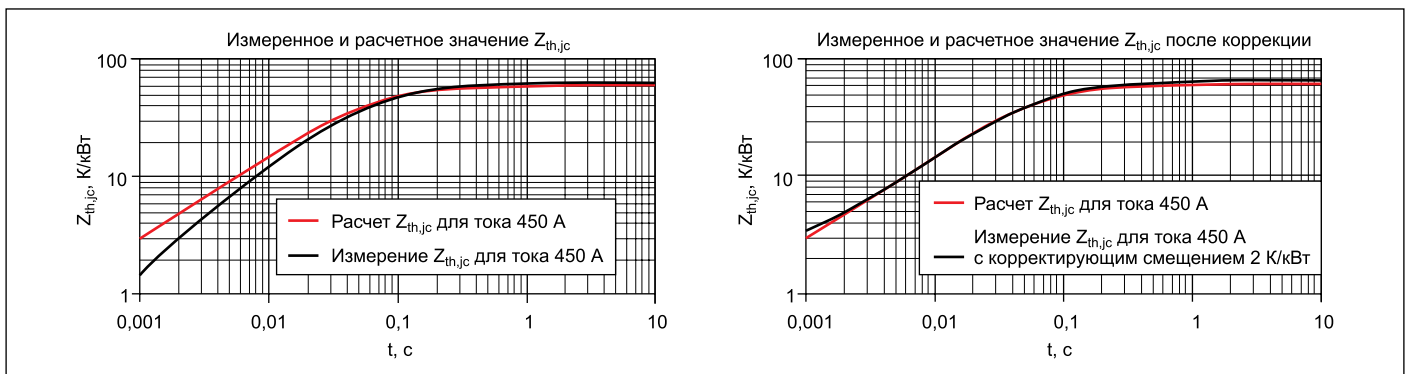
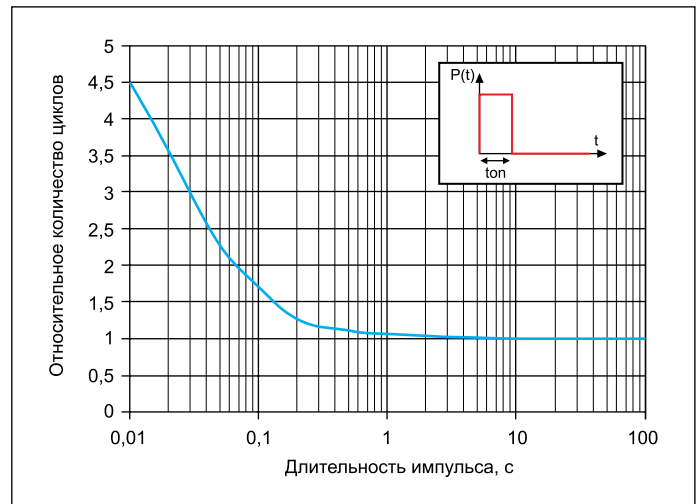


Рис. 3. Сравнение расчетного и экспериментального значений  $Z_{th,jc}$  без поправки и при ее введении



**Рис. 5.** Относительное количество рабочих циклов для расчетного и измеренного значения  $Z_{th}$  в зависимости от длительности импульса

ва и началом измерения напряжения коллектор — эмиттер, а также шумы в измерительном сигнале снижают точность измерений, вынуждая использовать экстраполяцию. Это приводит к необходимости введения отрицательного смещения величины  $Z_{th}$  при использовании метода контроля температуры по величине напряжения коллектор — эмиттер и линейной экстраполяции. Использование моделирования по методу конечных элементов для определения величины теплового импеданса  $Z_{th}$  обеспечивает корректный расчет тепловых характеристик для теплового воздействия малой длительности, позволяющий спрогнозировать срок службы силовых модулей. ■