

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСХЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

THERMAL AND ELECTRICAL PARAMETERS TESTING OF SWITCHING DC-DC CONVERTERS ICs

A. Shkolin
A. Drakin
L. Potapov
V. Zotin

Summary. The objective of this work was the development of an automated information-measuring complex for the electrical and thermal parameters testing of switching DC-DC converters ICs. The analysis of the capabilities of modern test equipment and the analysis of measuring circuits necessary for the parameters testing of the switching DC-DC converters ICs were determined, the requirements for the design of the corresponding tester were determined, limitations were identified when using existing industrially produced testers. A technical solution was obtained in which high metrological characteristics were achieved, which allowed, along with reliable determination of the electrical parameters of the microcircuits, to determine also the transient thermal response of the microcircuits, thermal resistance and crystal temperature. To control ICs "junction-to-case" thermal resistance, a method was suggested that compares initial sections of transient thermal response of the IC under test and reference integrated circuit.

Keywords: automated test equipment, integrated circuits (ICs), high frequency switching DC-DC converters, thermal resistance.

Школин Алексей Николаевич

*Н.с., Брянский государственный технический университет
ixe@yandex.ru*

Дракин Александр Юрьевич

*К.т.н., с.н.с., Брянский государственный технический университет
ada108@yandex.ru*

Потапов Леонид Алексеевич

*Д.т.н., профессор, Брянский государственный технический университет
l.a.pota39@yandex.ua*

Зотин Виталий Федорович

*К.т.н., доцент, с.н.с., Брянский государственный технический университет
v.f.zotin@gmail.com*

Аннотация. Статья посвящена разработке автоматизированного информационно-измерительного комплекса для контроля электрических и тепловых параметров микросхем импульсных преобразователей напряжения (ИПН). Проведен анализ возможностей современного тестового оборудования и анализ измерительных схем, необходимых для контроля параметров микросхем ИПН, определены требования к конструкции соответствующего тестера, выявлены ограничения при использовании существующих промышленно производимых тестеров. Получено техническое решение, в котором достигнуты высокие метрологические характеристики, которые и позволили наряду с достоверным определением электрических параметров микросхем определить также и переходную тепловую характеристику микросхем ИПН, тепловое сопротивление и температуру кристалла. Для контроля теплового сопротивления "кристалл-корпус" микросхем ИПН предложен способ, использующий сравнение начальных участков переходной тепловой характеристики контролируемой и эталонной микросхем.

Ключевые слова: автоматизированное тестовое оборудование, контроль параметров, высокочастотный импульсный преобразователь напряжения, тепловое сопротивление.

Введение

В современных технических устройствах широко используются интегральные микросхемы (ИМС) для управления импульсными источниками электропитания — импульсными преобразователями напряжения (ИПН). В состав этих ИМС входят ШИМ-контроллеры, драйверы силовых ключей и силовые ключи. Такая комбинация устройств приводит к тому, что при контроле параметров ИПН приходится измерять токи и напряжения, отличающиеся на несколько порядков, фиксировать временные интервалы, измеряемые в наносекундах, частоты генератора от десятков килогерц до мегагерц и т.п.

Существенной особенностью ИМС ИПН является большое число контролируемых параметров. Так для ИМС группы 1290ЕУх необходимо контролировать более 40 различных параметров, для чего необходимо реализовать 35 схем измерений.

Другая особенность ИПН обусловлена значительными величинами коммутируемых токов, что приводит к существенному нагреву ИМС. Поэтому необходимо также контролировать и тепловое сопротивление. В технических данных ИМС ИПН приводятся такие тепловые параметры как тепловое сопротивление "p-n переход-корпус" R_{thjc} и тепловое сопротивление "p-n переход-окружающая среда" R_{thja} .

Большое разнообразие модификаций ИМС ИПН и широкое их применение в различных технических устройствах и специальной технике обуславливает необходимость разработки высокопроизводительных тестеров для контроля электрических, временных и тепловых параметров.

Возможности существующих технических средств для контроля параметров ИМС ИПН

Для функционального и параметрического контроля цифровых, аналоговых и цифро-аналоговых микросхем малой и средней степени интеграции, а также микросхем памяти на некоторых российских предприятиях применяется тестер FORMULA® 2K [1], разработанный и поставляемый компанией ФОРМ.

Тестер выполнен в виде двух блоков. В измерительном блоке расположены специализированные источники питания, генератор тестовых воздействий и блоки измерения статических параметров. Масса измерительного блока 25 кг. Вычислительный блок располагается отдельно от измерительного блока и управляет работой тестера с применением специализированного программного обеспечения (ПО) — пакета “Sinop”, разработанного компанией ФОРМ.

Часть тестов, необходимых для контроля параметров ИПН, связанных с заданием и измерением токов и напряжений, можно реализовать на тестере FORMULA® 2K. Однако ряд тестов требует доработки тестера путем устранения лишних блоков контроля цифровых ИМС, введения новых измерительных блоков. Но внесение изменений в конструкцию путем добавления модулей для расширения функционала не представляется возможным, так как компания Форм является разработчиком и поставщиком серийной продукции — тестеров с соответствующими названиями, которые внесены в Государственный реестр средств измерений РФ и конфигурируются модулями строго в соответствии с описанием типа средств измерений.

Аналогичная ситуация с тестерами FT-17HF и FT-17DT [2], разработанными компанией ООО “Совтест АТЕ” совместно с дочерней компанией “Совтест Микро” и тестерами аналоговых интегральных микросхем “Вектор-М” [3], разработанных в ЦНИИИА.

Холдингом “Информтест” выпускаются моноблоки семейства “Аист”, 6-ти слотовый моноблок AXIe в виде крейта с интегрированным персональным компьютером и сенсорным дисплеем и более 50 модульных приборов в мезонинном исполнении. Особенно перспективной представляется многофункциональная платформа

на базе моноблока в стандарте AXIe со встроенным компьютером и встроенным программным обеспечением (ПО) “Виртуальная лаборатория” разработки Информтест. Однако наполнить ее необходимыми для контроля параметров ИПН измерительными модулями пока не удается.

Тестовое оборудование для контроля теплового сопротивления ИМС практически отсутствует на российском рынке. Имеется значительное количество патентов [4...9 и др.] и публикаций [10, 11, 12, 18, 19 и др.]. За рубежом для контроля теплового сопротивления используют измерительный комплекс T3Ster [13], который выполнен на основе американского стандарта JESD51-1 [14]. В России имеется стандарт — ГОСТ 24461-80 [15], который определяет метод контроля теплового сопротивления “переход-корпус” R_{thjc} силовых диодов. Однако из-за высокой трудоемкости метод, определяемый этим стандартом, используется только в лабораторных условиях. Поиск других методов контроля теплового сопротивления “переход-корпус” R_{thjc} силовых диодов предпринимается рядом авторов [16,17 и др.]. Работ, посвященных методам контроля теплового сопротивления “переход-корпус” R_{thjc} для ИМС, практически нет.

Следует иметь в виду, что тепловое сопротивление “переход-корпус” R_{thjc} определяет надежность и срок службы ИМС ИПН. Повышенное значение теплового сопротивления R_{thjc} является существенным скрытым дефектом, который не обнаруживается при контроле электрических параметров, но может проявиться в процессе эксплуатации в виде досрочного выхода изделия из строя.

Техническая реализация тестера АТОМ-93

Для контроля различных параметров ИМС ИПН реализуются соответствующие схемы измерений. Например, времени нарастания, времени спада, схема измерения времени задержки распространения сигнала от управляющего входа до силового выхода ИМС, времени задержки распространения сигнала от одного до второго силового выхода ИМС (если их несколько) и др. Анализируя схемы измерения других параметров, можно сформулировать требования к источникам и измерителям, необходимым в составе такого тестера.

Для решения поставленной задачи необходимо иметь несколько программируемых маломощных источников напряжений и два — три программируемых сравнительно мощных источника напряжений и токов со встроенными измерителями. При этом мощные источники целесообразно выполнить как четырехквadrантные устройства, для того, чтобы можно было за-

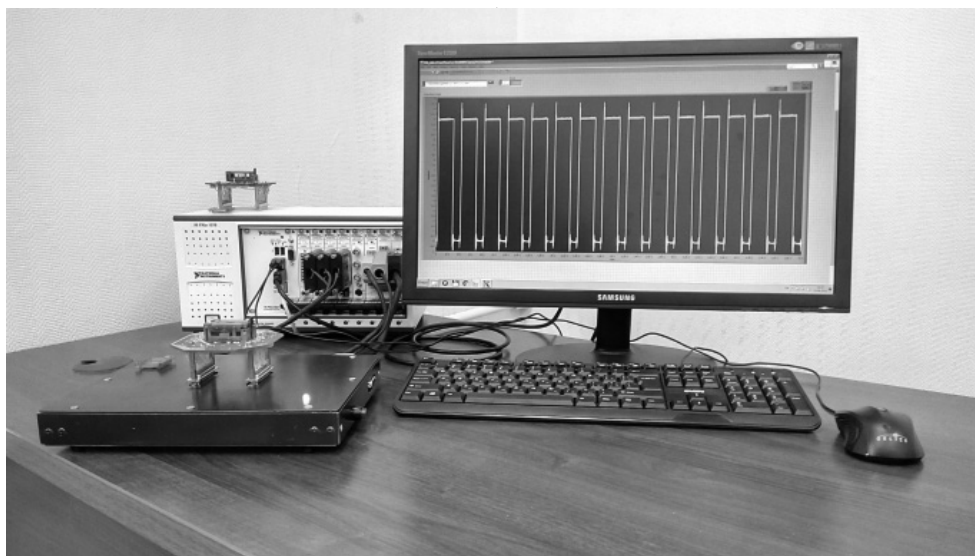


Рис.1. АТОМ-93 — тестер для контроля параметров микросхем высокочастотных импульсных преобразователей напряжения

давать не только напряжения и токи различной полярности, но и реализовать функции электронной нагрузки при стабилизации тока, напряжения или сопротивления. Необходимо иметь встроенный осциллограф и современный контроллер для программирования источников и составления тестовых программ, а также обработки результатов измерений. Конструкцию тестера целесообразно выполнить модульной, с изменяемой структурой для испытаний новых изделий.

Одним из мировых лидеров в разработке и изготовлении аппаратного и программного обеспечения для систем автоматизированного тестирования является компания National Instruments. Основной аппаратной платформой, выпускаемой National Instruments, является магистрально-модульная платформа PXIe, для которой разработаны и изготавливаются необходимые модули — шасси, контроллеры, функциональные модули, интерфейсы и другое. Из большого числа источников напряжения и тока можно выделить модули PXIe-4139, PXIe-4137, PXIe-4142, которые могут обеспечить контроль электрических параметров ИПН.

Указанные источники/измерители имеют очень высокие метрологические параметры и обеспечивают весь необходимый диапазон задаваемых и измеряемых напряжений и токов при контроле параметров ИМС ИПН.

Для измерения временных величин и управления внешними устройствами возможно использовать таймер/генератор на базе модуля PXIe-6230, 64-канальный модуль управления реле PXI-2567 и модуль осциллографа PXIe-5114.

Такой тестер изготовлен (рис. 1) и прошел необходимые испытания. На рис. 1 видны компактные размеры тестера по сравнению с серийным монитором 23" и виден адаптер со снятой крышкой и расположенный на нем фронт-адаптер. Тестер универсален — он позволяет контролировать параметры большинства аналоговых микросхем и других электронных компонентов.

Тестеры как элементы автоматизированных информационно-измерительных систем контроля (АИИСК) являются многофункциональными устройствами. Состав конкретного оборудования внутри АИИСК зависит от её назначения и степени универсальности. Основными функциональными узлами тестера являются программируемые источники постоянного напряжения и тока; измерители напряжений и токов, имеющие в своем составе нормирующие устройства и АЦП; генераторы тестовых сигналов; измерители временных интервалов; коммутатор, обеспечивающий подключение выводов ИМС к источникам, измерителям, дополнительной нагрузке и т.п.

К программируемым источникам напряжения предъявляются основные требования: четырёхпроводное подключение нагрузки; ограничение максимального тока (часто программируемое); исключение значительных выбросов при установлении и сбросе; устойчивость к внешним перенапряжениям на выходе.

Типовая структурная схема источника напряжения приведена на рис. 2 [20]. В нее входят дифференциальный усилитель (ДУ), на вход которого подается сигнал задания напряжения $U_{зн}$; регулятор напряжения (РН),

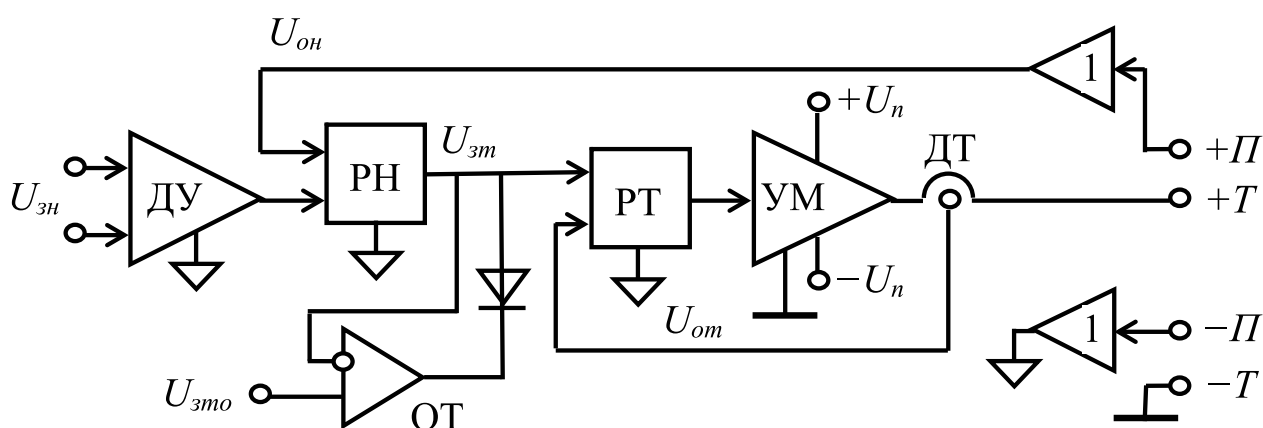


Рис. 2. Структурная схема программируемого источника напряжения

отрабатывающий сигнал обратной связи по напряжению $U_{он}$; ограничитель тока (ОТ), управляемый сигналом задания тока ограничения $U_{зто}$; регулятор тока (РТ), воспринимающий сигналы задания тока $U_{зм}$ и обратной связи по току $U_{ом}$; усилитель мощности (УМ); датчик тока (ДТ) и два повторителя напряжения. Такой источник напряжения построен по схеме двухконтурной системы регулирования напряжения с подчинённым контуром регулирования тока.

Сложности конкретной реализации регулятора тока и регулятора напряжения обусловлены переменным характером и величиной полного сопротивления нагрузки. Дополнительно к этому на практике часто сказывается влияние соединительных проводов в цепи обратной связи. Обычно удовлетворительный результат даёт применение регулятора тока интегрирующего типа, а регулятора напряжения — пропорционально-интегрирующего типа.

Используя прецизионные элементы в цепи обратной связи по току и формируя программно сигнал $U_{зто}$, получается программируемый «активный» источник тока с ограничением напряжения.

Определение параметров аналоговых ИМС тесно связано с такими видами измерений: измерение постоянных напряжений и токов, измерение амплитуды импульсов напряжения и тока, измерение эффективных (средних квадратичных) значений периодических сигналов напряжения и тока. При этом измерительный канал АИИСК зачастую базируется на использовании АЦП. В частности, измерение постоянных напряжений реализуется с помощью АЦП интегрирующего типа (в том числе сигма-дельта АЦП), обладающих высокой точностью и нечувствительностью к высокочастотным помехам. Однако они характеризуются значительным временем

преобразования, составляющим десятки и сотни миллисекунд.

Измерение амплитуды импульса при неизвестной заранее точке во времени (в которой производится замер), возможны два варианта реализации этого процесса: либо посредством применения «осциллографирования» импульса с последующей математической обработкой осциллограммы, либо с помощью пикового детектора. В первом случае необходимо применение специализированных и достаточно дорогостоящих АЦП, которые к тому же имеют, как правило, низкую разрядность (8–10 бит). Во втором случае требуется разработка устройства выборки-хранения (УВХ), отличного от стандартного УВХ.

Эффективное (среднее квадратичное) значение изменяющегося напряжения $u(t)$ с периодом повторения T определяется выражением

$$U_{эфф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}.$$

Результат измерения формируется двумя основными способами [20]. В первом случае применяются устройства обработки аналоговых сигналов (перемножители для операций возведения в квадрат и извлечения квадратного корня, а также фильтр низких частот в качестве интегратора). Во втором случае напряжение $u(t)$ «оцифровывается» с помощью быстродействующего АЦП на интервале, равном периоду T , при постоянном шаге дискретизации с последующим определением эффективного значения

$$U_{эфф} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (u_i)^2},$$

где N — количество выборок на периоде. Достоинством этого способа является возможность дополнительной обработки: цифровой фильтрации, интерполяции и др.

Для приведения уровней измеряемых сигналов к шкале АЦП (обычно шкала АЦП находится в пределах $\pm (1 \dots 10)$ В) применяются нормирующие устройства, в качестве которых могут выступать многодиапазонные измерители напряжения и тока [20].

Формирователи тестовых (входных) сигналов, входящие в состав АИИСК, характеризуются небольшой выходной мощностью при разнообразии формы сигнала, а часто и многоканальностью. Среди них выделяются формирователи логических (цифровых) сигналов и формирователи аналоговых сигналов различной формы. Для первого класса часто требуется программирование нулевого и единичного уровней, для второго — параметров гармонических сигналов, сигналов типа «ступенька» и импульсных сигналов. Устройство и функциональный состав формирователей тестовых сигналов, а также рекомендации по их разработке, приведены в [20].

Коммутатор, как отдельный блок АИИСК, обеспечивает сборку элементов схемы тестов, подключая выводы испытуемого изделия к источникам, измерителям, нагрузке и другим пассивным компонентам. В автоматизированных системах контроля коммутатор — набор коммутационных элементов, которые управляются дистанционно. В качестве таких элементов применяются электромеханические реле, герконовые реле, электронные и оптоэлектронные ключи.

Структура коммутатора может быть универсальной, построенной на матрице однотипных коммутационных элементов, что позволяет легко изменять схему теста и реализовать адаптацию к различным изделиям, однако она сопровождается такими недостатками, как большое количество ключей с одинаковыми характеристиками, увеличенный объём регистрового запоминающего устройства для хранения информации о состоянии ключей и соответственно более трудоёмкое программирование тестов.

Другим альтернативным решением является структура коммутатора, разработанная с учетом совместного применения коммутатора со специальным адаптером. Данный адаптер с контактирующим устройством разрабатывается для серий микросхем, близких по назначению и функционированию, включает группу коммутационных и других элементов, дополняющих коммутатор и позволяющих реализовать все схемы тестов [21].

При небольшом количестве необходимых коммутационных элементов коммутатор в составе тестера может

отсутствовать, и все схемы тестов реализуются за счёт элементов адаптера.

Для исключения отказов коммутатора и снижения погрешности измерения малых токов и напряжений, необходим тщательный выбор коммутационных элементов. Рекомендации по их выбору приведены в [20].

Немаловажным при разработке АИИСК являются вопросы разработки программного обеспечения (ПО). Среди обширного спектра существующих программных сред и продуктов разработчику необходимо оценить их по таким качествам: скорость разработки программного кода и возможности отладки; поддержка стандартных аппаратных интерфейсов; широкий математический аппарат, включающий в себя методы статистической обработки и решения дифференциальных уравнений; возможность построения АИИСК с разработанной аппаратурой; возможность реализации пользовательского графического интерфейса необходимого функционала. С учетом этого авторами были проанализированы следующие актуальные на сегодня программные продукты: LabVIEW и TestStand фирмы National Instruments, MatLab/Simulink фирмы MathWorks, Test Executive And Development Studio — ATEasy фирмы Marvin Test Solutions, XperTest отечественной компании «Совтест Микро» и др. В результате для решения поставленной задачи разработки АИИСК ИМС ИПН авторами была выбрана программная среда LabView.

Контроль тепловых сопротивлений ИМС ИПН с учетом моделирования тепловых процессов

Для определения температуры кристалла ИМС ИПН можно использовать прямое напряжение на $p-n$ переходе при малом измерительном токе. В ИМС ИПН такой $p-n$ переход часто доступен. например, для ИМС LM2676 он расположен между выводами 4 и 7, 4 и 6 и т.д.

Изготовленный тестер позволяет определить переходную тепловую характеристику (ПТХ) испытуемого ИПН — зависимость температуры $p-n$ перехода i , соответственно, температуры кристалла от времени нагрева. Для этого, как рекомендовано стандартом EIA/JEDEC JESD51 и реализовано в тестере T3Ster, подключают ИМС в номинальный режим короткими импульсами и измеряют в интервалах времени между импульсами напряжение на $p-n$ переходе при малом измерительном токе. Пользуясь установленной предварительно зависимостью $T(U_F)$ между температурой t и напряжением U_F на $p-n$ переходе, получают искомую зависимость $T_j(t)$.

Тепловое сопротивление “переход-окружающая среда” R_{thja} определяют как разность температур $p-n$

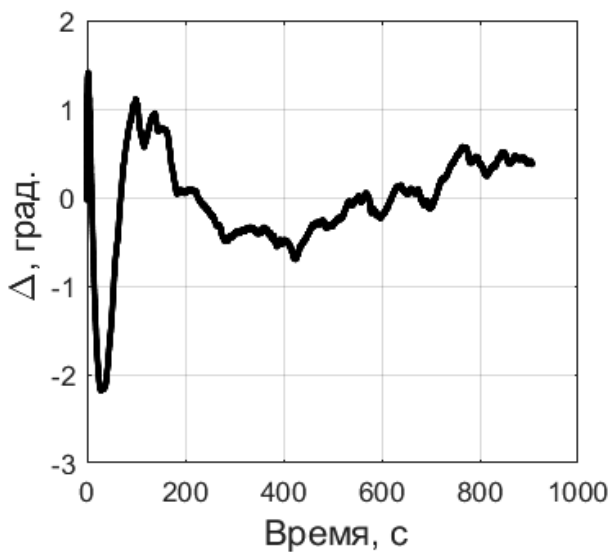


Рис. 5. Экспериментальная переходная тепловая характеристика

перехода в установившемся тепловом режиме и температуры окружающей среды T_{ar} отнесенную к мощности нагрева P

$$R_{thja} = (T_j - T_a) / P.$$

Тепловое сопротивление “переход-окружающая среда” зависит от многих факторов (условий крепления, условий охлаждения и др.) и поэтому требует их детального описания. Если условия эксплуатации ИМС соответствуют условиям определения R_{thja} , то по этому параметру можно определить температуру $p-n$ перехода и, соответственно, кристалла ИМС.

Более определяющим качество и надежность ИПН является тепловое сопротивление “переход-корпус” R_{thjc} . Завышенное тепловое сопротивление “переход-корпус” R_{thjc} , получившееся в результате нарушений технологического процесса, не изменить обдувом или другими способами охлаждения. Этот дефект, если его не выявили при контроле параметров, проявится в процессе эксплуатации и приведет к досрочному выходу ИПН из строя.

Тепловое сопротивление “переход-корпус” R_{thjc} определяют как разность температур $p-n$ перехода T_j в установившемся тепловом режиме и температуры корпуса T_c , отнесенную к мощности нагрева

$$R_{thjc} = (T_j - T_c) / P.$$

Однако измерять R_{thjc} непосредственно на тестере нерационально из-за большого времени достижения

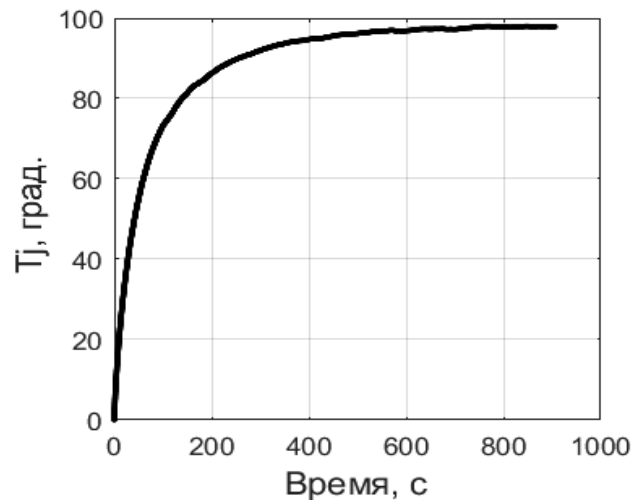


Рис. 6. Погрешность аппроксимации

установившегося режима (20...30 мин для микросхем в корпусе типа TO-220) и значительных погрешностях измерения температуры корпуса.

Контролировать тепловое сопротивление “переход-корпус” сравнительно быстро можно способом, предложенным авторами и заключающемся в сравнении начальных участков ПТХ испытуемого и эталонного ИПН, или его поведенческой модели.

Анализируя полученные экспериментально переходные тепловые характеристики (ПТХ) — зависимости $T(t)$ (пример ПТХ для температуры перегрева кристалла относительно температуры окружающей среды приведен на рис. 5), установлено, что эти зависимости для условий решаемой задачи успешно аппроксимируются двумя экспонентами. В частности, для нахождения аппроксимирующей зависимости применялся метод наименьших квадратов с использованием алгоритма оптимизации Левенберга-Марквардта.

При разогреве ИМС LM2676 в корпусе TO-220-7 ее ПТХ аппроксимируется уравнением $T_j(t) = 97,53 - 42 \exp(-0,048t) - 55,53 \exp(-0,0079t)$. Отклонения от экспоненты заметны только в начале ПТХ (рис. 6).

Полученная зависимость также позволяет сформировать и использовать модель с сосредоточенными параметрами, реализованную по схеме Фостера или схеме Кауэра [11, 23].

Меньшая тепловая постоянная времени $\tau_1=20$ с характеризует начальный участок ПТХ, а большая $\tau_2=130$

с характеризует время установившегося процесса $4 \cdot \tau_2 = 520$ с. За время, сопоставимое с постоянной времени τ_1 , тепловые потоки от кристалла до корпуса стабилизируются, возможное увеличение теплового сопротивления проявится и это время можно использовать для сравнения ПТХ эталонной и испытываемой ИМС.

В установившемся режиме ИМС LM2676 температура корпуса T_c будет ниже температуры кристалла T_j на $R_{thjc} \times P \approx 3$ °C, а при увеличенном в 2 раза тепловом сопротивлении $2R_{thjc}$ температура кристалла T_j станет на 6 °C выше температуры корпуса T_c . За время, равное τ_1 , эти цифры уменьшатся и будут измеряться 1,5...3,0 °C, что соответствует изменению прямого напряжения UF на $p-n$ переходе при малом измерительном токе 3...6 мВ. Выявить такое изменение напряжения вполне возможно средствами модуля PXIe-4139, который обладает необходимыми метрологическими характеристиками.

Предлагаемый способ контроля теплового сопротивления ИПН реализуется следующим образом. Сначала из партии ИМС, намечаемой для автоматизированного контроля, выбирают одну ИМС в качестве эталонной и определяют для нее любым способом (например, по [15]) тепловое сопротивление "переход-корпус" R_{thjc} и переходную тепловую характеристику. Далее калибруют тестер — измеряют напряжение на переходе UF_1 при малом измерительном токе, затем подключают эталонную ИМС в номинальном режиме на заданное время, отключают нагрев и измеряют напряжение на диоде UF_2 при малом измерительном токе после нагрева. Сохраняют в памяти тестера 4 величины: длительность нагрева, величину измерительного тока и 2 напряжения на переходе: UF_1 и UF_2 , до и после нагрева. Длительность нагрева устанавливают сравнимой с тепловой постоянной времени τ_1 на начальном участке ПТХ. В дальнейшем вся партия испытываемых ИМС проходит через этот же тестер при тех же условиях. Если у них разность $UF_1 - UF_2$ оказывается такой же, как у эталонной ИМС, и напряжение UF_1 отличается незначительно, то испытываемой ИМС присваивается значение теплового сопротивления R_{thjc} такое же, как у эталонной ИМС [22].

Следует иметь в виду, что применяемый иногда так называемый "контроль качества посадки кристалла", заключающийся в кратковременном нагреве кристалла за несколько миллисекунд или даже нескольких секунд, не позволяет определить даже пятикратное превышение теплового сопротивления.

Заключение

На основе проведенного анализа измерительных схем, необходимых для контроля параметров микросхем определена невозможность использования серийных тестеров и предложен подход, ориентированный на создание универсальной измерительной платформы, позволяющей реализовать измерение параметров практически любых электронных компонентов.

Для создания нового тестера принята магистрально-модульная платформа PXIe, продвигаемая компанией National Instruments для систем автоматизированного тестирования. Сформирован минимальный набор модулей, обеспечивающий формирование конструкции тестера и контроль всех необходимых параметров ИМС ИПН. Изготовлены промышленные образцы тестеров, которые успешно прошли испытания в производственных условиях.

Высокие метрологические характеристики модулей тестера позволили определять ПТХ ИПН, тепловое сопротивление "переход-окружающая среда" R_{thja} и температуру $p-n$ перехода T_j и, соответственно, кристалла. Для контроля теплового сопротивления "переход-корпус" R_{thjc} ИПН предложен способ, использующий сравнение ПТХ контролируемой ИМС с эталонной на начальном участке ПТХ.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 8.1729.2017/4.6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Тестер FORMULA® 2K. URL: form.ru/products/chip/F2K.
2. Тестер микросхем FT-17. URL: http://sovtest-ate.com/equipment/ft_17/.
3. Тестер «Вектор-М». URL: <https://225535-ru.all.biz/tester-analogovyh-integralnyh-shem-vektor-m-g1473823>.
4. Пат. 2392631 РФ, МПК G01R31/26. Устройство для измерения теплового сопротивления переход-корпус полупроводникового прибора / И. А. Мальцев, А. А. Мальцев; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17.
5. Патент РФ 2300115, МПК G 01 R31/26. Способ определения теплового сопротивления переход-корпус силовых полупроводниковых приборов в корпусном исполнении / Н. Н. Беспалов (RU), М. В. Ильин (RU); опубл. 27.05.2007. Бюл. № 15.
6. Патент РФ № 2402783, МПК G01 R31/26. Способ измерения теплового импеданса полупроводниковых диодов / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, В. В. Юдин и др.; опубл. 2010. Бюл. № 30.
7. Мальцев И.А., Мальцев А. А. Тепловое сопротивление как показатель надежности мощных выпрямительных мостов // Силовая электроника. 2010. № 5. С. 54–55.

8. Патент 2529761 Российская Федерация, МПК G01R31/00. Способ измерения теплового сопротивления переход-корпус полупроводниковых приборов и устройство для его реализации / И. А. Мальцев, А. А. Мальцев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ» (RU). — № 2013118507/28; заявл. 22.04.2013; опубл. 27.09.2014. Бюл. № 27.
9. Патент № 2516609 — РФ, МПК G 01 R31/26. Способ определения теплового сопротивления переход-корпус транзисторов с полевым управлением/ Беспалов Н. Н., Лысенков А.Е.; опубл. 20.05.2014. Бюл. № 14.
10. Сергеев В.А., Юдин В. В. Измерение тепловых параметров полупроводниковых изделий с применением амплитудно-импульсной модуляции греющей мощности // Метрология. 2010. № 4. С. 37–47.
11. Вяхирев В. Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности. 2013. № 3.
12. Сергеев В. А. Методы и средства измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем // Электронная промышленность. 2004. № 1. С. 45–48.
13. T3Ster — Thermal Transient Tester. URL: www.mentor.com/micred.
14. IC Thermal Measurement Method — Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51–1 standard. URL: <http://www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf>.
15. ГОСТ 24461–80 Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1990. 64 с.
16. Испытательно-измерительный комплекс аппаратуры для определения тепловых и электрических характеристик и параметров силовых полупроводниковых приборов. URL: lab-centre.ru/mess111.htm.
17. Измеритель теплового сопротивления светодиодов и светодиодных модулей. URL: <http://www.yselectro.ru/rus/catalog/category38/category42/izmeritel.shtml>.
18. Беспалов Н.Н., Голембиовский Ю. М., Ильин М. В. Метод определения тепловых характеристик силовых полупроводниковых приборов // Вестник СГТУ. 2007. № 2 (24) Вып. 1. С. 88–94.
19. P. Szabo et al. Transient junction-to-case thermal resistance measurement methodology of high accuracy and high repeatability // Therminic. Sophia Antipolis, Cote d'Azur, France. 29 Sept.-1 Oct. France. 2004. P. 134141.
20. Дракин А.Ю., Зотин В. Ф., Потапов Л. А. Контроль параметров аналоговых микросхем, силовых диодов и транзисторов // СПб.: Изд-во Лань, 2018. 284 с.
21. Патент РФ 185535, МПК G01R31/28. Тестер микросхем высокочастотных импульсных преобразователей напряжения / А. Ю. Дракин (RU), В. Ф. Зотин (RU), Л. А. Потапов (RU), А. Н. Школин (RU), И. Ю. Бутарев (RU); опубл. 07.12.2018. Бюл. № 34.
22. Патент РФ 2653962. Способ автоматизированного определения теплового сопротивления кристалл-корпус силовых полупроводниковых приборов в корпусе исполнения / Л. А. Потапов (RU); опубл. 15.05.2018. Бюл. № 14.
23. Zhou Z., Holland P. M., Iqic P. Compact thermal model of a three-phase IGBT inverter power module // 2008 26th International Conference on Microelectronics. Nis, Serbia and Montenegro: IEEE, 2008. P. 167–170.

© Школин Алексей Николаевич (ixe@yandex.ru), Дракин Александр Юрьевич (ada108@yandex.ru),
 Потапов Леонид Алексеевич (I.a.pota39@yandex.ua), Зотин Виталий Федорович (v.f.zotin@gmail.com).
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»