

Л.А. Потапов, А.Н. Школин  
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)  
L.A. Potapov, A.N. Shkolin (Bryansk, Bryansk State Technical University)

## **АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ**

**ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING AND APPLYING HEAT  
PARAMETERS OF HIGH FREQUENCY PULSE VOLTAGE CONVERTERS**

*Показано, что тепловое сопротивление переход-корпус определяется через частичный тепловой поток и является некоторой характеристикой крепления кристалла в корпусе высокочастотных импульсных преобразователей напряжения (ВИПН). Измерить это сопротивление при серийном производстве практически невозможно из-за высокой трудоемкости и низкой точности, хотя в справочных данных (data sheet) для каждой ИМС это сопротивление указывается. Для исключения возможности появления скрытых дефектов, не обнаруживаемых при контроле электрических параметров, предлагается использовать стопроцентный контроль тепловых параметров способом сравнения с эталоном.*

*Переходную тепловую характеристику (ПТХ) можно определить экспериментально для конкретной ИМС и конкретных условий охлаждения. После аппроксимации ее экспонентами можно построить теплоэлектрическую модель и с ее помощью исследовать изменение температуры кристалла ИМС при изменении различных параметров (напряжения питания, мощности нагрузки и др.).*

*It is shown that the thermal resistance of the junction-case is determined through a partial heat flux and is some characteristic of the crystal fastening in the case of high-frequency pulse voltage converters. It is practically impossible to measure this resistance in mass production because of the high complexity and low accuracy, although this resistance is indicated in the reference data sheet for each IC. To exclude the possibility of hidden defects that are not detected during the control of electrical parameters, it is proposed to use one hundred percent control of thermal parameters by way of comparison with a standard.*

*The transient thermal characteristic can be determined experimentally for a specific IC and specific cooling conditions. After approximation by its exponents, it is possible to construct a thermoelectric model and use it to study the change in the temperature of the IC chip with changing various parameters (supply voltage, load power, etc.).*

*Ключевые слова: тепловое сопротивление, импульсные преобразователи напряжения, микросхемы, схемы Фостера.*

*Keywords: thermal resistance, pulse voltage converters, microcircuits, Foster circuits.*

### **Введение**

Одной из причин выхода из строя высокочастотных импульсных преобразователей напряжения (ВИПН) является нарушение их теплового режима. Контроль электрических параметров на различных стадиях технологического процесса не выявляет возможные скрытые дефекты ВИПН, приводящие к нарушению тепловых режимов, деградации кристалла и выходу ВИПН из строя. Такая ситуация недопустима для многих типов ВИПН, являющихся частью различных блоков в авиации, космической и военной техники. Являясь достаточно нагруженным в тепловом отношении, ВИПН может существенно снизить надежность этих блоков и в целом более сложных устройств. Поэтому необходимо контролировать тепловые режимы каждого ВИПН.

Основными тепловыми параметрами ВИПН, которые приводятся в справочных данных (data sheet), являются статические тепловые сопротивления «переход-окружающая среда»  $R_{thJa}$  и «переход-корпус»  $R_{thJC}$ .

На величину теплового сопротивления  $R_{thJa}$  влияет много параметров: конструкция печатной платы (больше или меньше меди под ВИПН), геометрическая конфигурация блока, температура корпуса и окружающей среды, высота над уровнем моря и др.

В паспортных данных ВИПН приводят иногда два значения  $R_{thJa}$  для разных тестовых плат (1s и 2s2p) в зависимости от объема меди.

Если тепловое сопротивление определено для условий близких к тем, при которых будет работать ВИПН, то температуру р-п-перехода можно будет определять по уравнению

$$T_J = T_a + PR_{thJa}.$$

Более стабильной величиной является тепловое сопротивление «переход-корпус»  $R_{thJC}$ . На него не влияет: конструкция печатной платы (больше или меньше меди под ВИПН), геометрическая конфигурация блока, температура корпуса и окружающей среды, высота над уровнем моря и др. Однако на него влияет некачественное крепление кристалла в кристаллодержателе, наличие воздушных зазоров, непропай и др.

Еще одна динамическая характеристика – переходная тепловая характеристика (ПТХ) – определяет зависимость температуры р-п-перехода от времени  $T_J(t)$  за время нагрева ИМС до установившегося режима. Эта характеристика учитывает полный тепловой поток, распространяющийся по всем направлениям. Ее можно использовать для построения теплоэлектрической модели в виде электрической цепи из RC элементов, переходный процесс в которой  $U(t)$  численно совпадает с переходным тепловым процессом  $T(t)$  или аналогичен ему при изменении масштаба времени.

## Определение тепловых сопротивлений

**Тепловое сопротивление «переход-корпус»  $R_{thJC}$**  почти не зависит от внешних условий, но оно существенно увеличивается при нарушении технологического процесса (перекося кристалла, непропай и др.). Поэтому разработано много способов его определения [1-3]. Большинство способов достаточно трудоемки и поэтому не применяются в промышленном производстве. Кроме того у ВИПН с малым числом выводов обычно управляющие электроды силовых транзисторов не выведены наружу. Поэтому приходится использовать другие р-п-переходы, расположенные на кристалле, например, между выводами «On/Off» и «Gnd». При этом измеряется уже температура кристалла, а не р-п-перехода ВИПН. Для измерения этой температуры используют термочувствительный параметр (ТПЧ) – прямое напряжение на переходе при малом измерительном токе.

По аналогии с диодами [1], тепловое сопротивление «переход-корпус» у ВИПН можно определить по уравнению

$$R_{thJC} = \frac{T_J - T_C}{P},$$

где  $T_J$  и  $T_C$  – температуры р-п-перехода и самой горячей точки корпуса в установившемся режиме (через 20...30 минут после включения в номинальный режим),  $P$  – греющая мощность (мощность потерь в ВИПН).

Это сопротивление учитывает частичный тепловой поток между переходом и корпусом в самой горячей точке.

Между тем тепловой поток в ИМС ВИПН идет несколькими параллельными путями и уходит в окружающую среду с различных участков корпуса ИМС (через верх, низ, выводы ИМС и печатную плату, к которой присоединена ИМС). Температура этих участков оказывается различной. Тем не менее, для ИМС ВИПН в справочных данных приводят именно тепловое сопротивление «переход – корпус  $R_{thJC}$ ». Хотя в американских стандартах [3-7] определены также тепловые метрики  $\Psi_{JT}$  и  $\Psi_{JB}$  и тепловые сопротивления “переход – верх корпуса”  $R_{thtop}$ , “переход – низ корпуса”  $R_{thcbot}$ , “переход – печатная плата”  $R_{th(jb)}$ , определяемые аналогично определению теплового сопротивления “переход-корпус”  $R_{thJC}$ .

Следует иметь ввиду, что из-за малой греющей мощности ВИПН (1...2 Вт), близких температурах перехода и корпуса, определить тепловое сопротивление  $R_{thJC}$ , пользуясь термометром с термопарой, (имеющим погрешность 2...4%) невозможно даже при допуске 25%. Так, если реально температура корпуса 100°C, температура перехода 102°C, а греющая мощность 1 Вт, то тепловое сопротивление  $R_{thJC}$  равно  $R_{thJC} = (102 - 100)/1 = 2^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . Однако, измеряя температуру корпуса с погрешностью 2% получим показания  $T_C = 98^\circ\text{C}$ , температуру перехода с погрешностью 1% получим  $T_J = 103^\circ\text{C}$ , греющую мощность с погрешностью 1%, получим тепловое сопротивление  $R_{thJC} = (103 - 98)/0,99 = 5,05^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . Погрешность определения теплового сопротивления  $(5,05 - 2)/2 \cdot 100 = 152,5\%$ .

**Тепловое сопротивление «переход – окружающая среда»  $R_{\theta Ja}$**  определяется тоже для установившегося режима. Оно учитывает все тепловые потоки и определяет температуру нагрева р-п-перехода ИМС по отношению к температуре окружающей среды для заданной (чаще номинальной) мощности. Тепловое сопротивление «переход-окружающая среда» у ВИПН определяют для типовой тестовой платы по уравнению

$$R_{\theta Ja} = \frac{T_J - T_a}{P},$$

где  $T_J$  и  $T_a$  – температуры р-п-перехода и, соответственно, окружающей среды,  $P$  – греющая мощность (мощность потерь в ВИПН). Это сопротивление можно определить с приемлемой точностью, поскольку имеется большая разность температур и не требуется термометр с терморай.

При серийном производстве ВИПН контроль тепловых сопротивлений каждой ИМС не выполняют из-за высокой трудоемкости и длительности измерений (стоцентный контроль отсутствует). Однако, если применить способ контроля тепловых параметров путем сравнения с образцом, можно исключить возможное попадание ИМС с повышенными тепловыми сопротивлениями (скрытые дефекты, которые в процессе эксплуатации могут привести к разрушению ВИПН).

Этот способ заключается в следующем. Из партии ИМС, изготовленной по единой технологии, выбирают одну ИМС, которая послужит эталоном. Для нее в лаборатории определяют тепловые сопротивления. Затем ее устанавливают на тестер, включают на 10 секунд в номинальный режим, измеряют ТЧП до и после включения и сохраняют в памяти тестера 4 величины: длительность нагрева, малый измерительный ток и два прямых напряжения  $U_F$  на р-п-переходе до и после нагрева. Затем остальные ИМС партии испытывают на этом тестере, сравнивая 4 названные величины.

Важнейшая динамическая характеристика – переходная тепловая характеристика (ПТХ) – определяет зависимость температуры р-п-перехода от времени  $T_J(t)$  за время нагрева ИМС до установившегося режима. Эта характеристика учитывает полный тепловой поток, распространяющийся по всем направлениям. Ее можно использовать для построения теплоэлектрической модели в виде электрической цепи из RC элементов, переходный процесс в которой  $U(t)$  численно совпадает с переходным тепловым процессом  $T(t)$  или аналогичен ему при изменении масштаба времени.

Для экспериментального определения ПТХ предлагается способ, не требующий подключать и отключать испытуемый ВИПН с частотой менее 66,7 Гц [10]. Нагрев кристалла осуществляется постоянным током, проходящим через силовой диод, расположенный на кристалле и включенный параллельно силовому транзистору. Измерение температуры кристалла выполняется путем измерения прямого напряжения  $U_F$  на другом

p-n-переходе при малом измерительном токе и последующем преобразовании напряжения  $U_F$  в температуру  $T_J$ , используя зависимость  $T_J(U_F)$ . Полученная зависимость  $T(t)$  может быть аппроксимирована несколькими экспонентами.

Для нахождения аппроксимирующей зависимости ПТХ в Matlab применяется метод наименьших квадратов с использованием алгоритма оптимизации Левенберга-Марквардта. Чем больше экспонент выбирают, тем точнее аппроксимация. Однако во многих случаях можно ограничиться двумя или тремя экспонентами. Так, если температура окружающей среды  $T_a = 20^\circ\text{C}$  греющая мощность  $P = 2$  Вт и ПТХ аппроксимирована двумя экспонентами  $T(t) = 111 - 4e^{-0,05t} - 86e^{-0,004t}$ , то сопротивления в схеме Фостера (рис.1)  $R_1 = 4/2 = 2$  Ом,  $R_2 = 86/2 = 43$  Ом, а емкости определяются через постоянные времени  $\tau_1 = R_1 C_1 = 1/0,05$  откуда  $C_1 = 10$  Ф, соответственно  $\tau_2 = R_2 C_2 = 1/0,004$ , откуда  $C_2 = 5,8$  Ф. Для модели целесообразно изменить масштаб времени в 1000 раз, тогда емкости будут тоже в 1000 раз меньше (в мФ). Греющая мощность представлена в виде источника тока  $J = 2$  А, а температура окружающей среды источником ЭДС  $E = 20$  В.

Не смотря на наглядность теплоэлектрической модели, не следует искать соответствия между сопротивлениями  $R_1$  и  $R_{thJC}$ , так как тепловое сопротивление учитывает частичный тепловой поток между переходом и самой горячей точкой на корпусе, а сопротивление  $R_1$  характеризует одну из экспонент, которая определяется для полного теплового потока.

С помощью полученной модели можно провести исследования различных тепловых режимов. На рис.1 исследовался режим, когда греющая мощность (мощность потерь) возросла в 2 раза и это состояние длилось 5 мин или 300 с. В измененном масштабе времени 5 мин соответствует 0,3 с. На осциллограмме в 3 окнах приведена информация в цифрах – потенциал левого узла на модели в вольтах численно определяет температуру p-n-перехода испытуемого ВИПН в градусах Цельсия ( $^\circ\text{C}$ ), длительность процессов на модели в миллисекундах соответствует длительности тепловых процессов в секундах. В левом окне начальное время включения двойной нагрузки 100 мс на модели соответствует 100 с для ВИПН. Аналогично определены все остальные цифры. Исходная температура p-n-перехода  $111,84^\circ\text{C}$  (визир установлен с небольшим смещением). В среднем окне время окончания двойной нагрузки 400 с, температура p-n-перехода  $172,2^\circ\text{C}$ . В правом окне – длительность двойной нагрузки (разность времени выключения и включения) 300 мс для модели или 5 мин для ВИПН, температура перегрева p-n-перехода  $60,36^\circ\text{C}$ . По осциллограмме можно установить, что под температурой более  $150^\circ\text{C}$  ВИПН находился 280 с, а выходил на исходную температуру (остывал) 1000 с, т.е. время нагрева и остывания неодинаково – нагрев 300 с, остывание – 1000 с. Для наглядности ось абсцисс смещена на 2 клетки вниз (к напряжению над средней линией необходимо добавлять  $100^\circ\text{C}$ ).

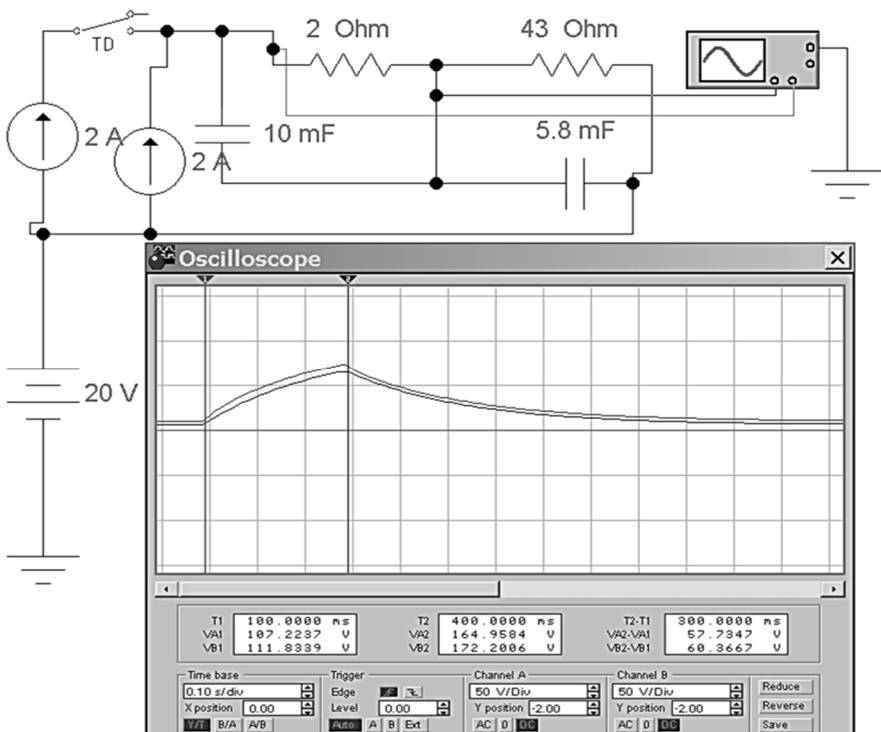


Рис. 1. Прохождение импульса двойной нагрузки ПТХ

### Заключение

Проведенный анализ показал, что тепловое сопротивление «переход-корпус» определяется через частичный тепловой поток и является некоторой характеристикой крепления кристалла в корпусе ВИПН. Измерить это сопротивление при серийном производстве практически невозможно из-за высокой трудоемкости и низкой точности, хотя в справочных данных (data sheet) для каждой ИМС это сопротивление указывается. Для исключения возможности появления скрытых дефектов, не обнаруживаемых при контроле электрических параметров, предлагается использовать стопроцентный контроль тепловых параметров способом сравнения с эталоном.

Переходную тепловую характеристику (ПТХ) можно определить экспериментально для конкретной ИМС и конкретных условий охлаждения. После аппроксимации ее экспонентами можно построить теплоэлектрическую модель и с ее помощью исследовать изменение температуры кристалла ИМС при изменении различных параметров (напряжения питания, мощности нагрузки и др.).

Статья подготовлена благодаря заданию Минобрнауки  
№ 8.1729.2017/ПЧ.

### Список литературы

1. *ГОСТ 24461-80*. Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 64 с.
2. *ГОСТ 27264-87*. Транзисторы силовые биполярные. Методы измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 18 с.
3. *JESD51*, Methodology for the Thermal Measurement of Component Packages (Single Semiconductor Device). <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-51>.
4. *Mil Std 883C Method 1012.1* Thermal Characteristics of Microelectronic Devices. – 1980. – p.13.
5. 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>.
6. *JEDEC JESD51-14 standard*. Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path. [https://www.jedec.org/document\\_search?search\\_api\\_views\\_fulltext=JESD51-14](https://www.jedec.org/document_search?search_api_views_fulltext=JESD51-14).
7. *JESD51-2A*, Integrated Circuits Thermal Test Method Environmental Conditions – Natural Convection (Still Air). <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-51-2A>.

*Материал поступил в редколлегию 01.10.19.*

DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e028210cf34d5.83756458  
УДК 654.16

Д.Е. Тихонов, Л.Г. Стаценко

(г. Владивосток, Дальневосточный федеральный университет)

D.E. Tikhonov, L.G. Statsenko (Vladivostok, Far Eastern Federal University)

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SDRSHARP

### RADIO FREQUENCY SPECTRUM EXPLORATION USING THE SOFTWARE PACKAGE SDRSHARP

*В работе представлено исследование основных частотных диапазонов, которые способен принимать и воспроизводить SDR приёмник. Качество освоения всего радиочастотного диапазона зависит от антенны, непосредственно подключаемой к RTL-SDR. Работа иллюстрирована изображениями сигналов в программе SDRSharp, в презентации представлены записи различных радиостанций FM-диапазона, любительских радиостанций и запись сигнала со спутника NOAA.*

*The article presents a research of the main frequency bands that can receive and reproduce the SDR receiver. The quality of the entire radio frequency range exploration depends on the antenna directly connected to the RTL-SDR. The article*