

УДК 681.518.3

## ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ

В. И. Смирнов<sup>1,2</sup>, В. А. Сергеев<sup>1,2</sup>, А. А. Гавриков<sup>1</sup>, А. М. Шорин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, 432071, Ульяновск, ул. Гончарова д.48/2

<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет  
432027, Ульяновск, ул. Северный венец, 32

Статья поступила в редакцию 12 июля 2019 г.

**Аннотация.** Представлены результаты измерения перекрестных тепловых сопротивлений (связей) силовых модулей на MOSFET-транзисторах. В основу измерений положен метод, использующий воздействие на объект измерения тепловой мощности, модулированной по гармоническому закону, и измерении температурного отклика объекта на такое воздействие. Измерения проводились с помощью измерителя теплового сопротивления, который позволяет нагревать индивидуально каждый транзистор силового модуля и измерять при этом температурный отклик остальных транзисторов. Определение компонент матрицы тепловых импедансов объекта осуществлялось на основе анализа зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности. Данный метод может быть использован не только для силовых модулей на MOSFET- или IGBT-транзисторах, но также и для гибридных микросхем или печатных плат.

**Ключевые слова:** тепловое сопротивление, матрица тепловых импедансов, силовые модули, модуляционный метод.

**Abstract.** The paper describes the results of measuring cross coupling characteristics of power MOSFET-modules. Measurements are based on the method using device under test heating by harmonically varying power and measuring the temperature response to such impact. Measurements were performed by Apparatus for Measurement of Thermal Impedance which allows to heat each transistor of power module and to measure the temperature response of other transistors. Measuring thermal impedance matrix components was done by analysis of the thermal

impedance on modulation frequency dependence. This method can be used not only for MOSFET- or IGBT-transistors but also for hybrid integrated circuits and PCBs.

**Keywords:** thermal resistance, thermal impedance matrix, power modules, modulation method.

## Введение

Силовые модули предназначены для коммутации больших токов, величина которых может достигать нескольких килоампер. Обычно они состоят из нескольких мощных MOSFET- или IGBT-транзисторов, смонтированных на одной подложке. Особенностью работы силовых модулей является то, что в каждый момент времени в открытом состоянии находится только часть транзисторов, другие транзисторы закрыты. Из-за возникающих при этом электрических дисбалансов каждый кристалл модуля имеет разную рассеиваемую мощность и собственную индивидуальную температуру. Это приводит к возникновению боковых (латеральных) тепловых потоков и, как следствие, к взаимному тепловому влиянию транзисторов друг на друга. Для полного описания тепловых свойств такой многокристальной системы необходимо знать не только тепловое сопротивление между каждым кристаллом и корпусом, но и их перекрестные тепловые сопротивления (связи). Это особенно важно учитывать для мощных модулей, в которых кристаллы с большим количеством выделяемого тепла располагаются близко друг к другу.

Существует обширная литература по определению характеристик перекрестных связей силовых модулей. Наиболее распространенным подходом является использование эквивалентной тепловой схемы замещения для моделирования тепловых характеристик устройства, что стало возможным благодаря аналогии между электрическими и тепловыми величинами [1]. Согласно этому принципу процессы распространения тепла в силовом модуле происходят аналогично электрическим процессам в схеме замещения, представляющей собой совокупность последовательно соединенных RC-цепочек. Каждому из элементов конструкции модуля соответствует своя RC-

цепочка. Электрическое сопротивление RC-цепочки является аналогом теплового сопротивления элемента конструкции, электрическая емкость – аналогом теплоемкости. Электрический ток, протекающий по звеньям схемы замещения, аналогичен потоку тепла по конструкции модуля, а электрический потенциал является аналогом температуры.

При построении тепловой модели полупроводниковых изделий используют эквивалентные схемы замещения Кауэра или Фостера [2]. Параметры схемы замещения могут быть рассчитаны с использованием двух методов. В первом методе значения компонент схемы замещения определяются на основе информации о свойствах материала и геометрии устройства. Так, например, в работе [3] объектом исследований являлся модуль из 6 пар IGBT-транзисторов и диодов, расположенных на медном основании, имеющим тепловой контакт с алюминиевым радиатором. Зная геометрические размеры элементов конструкции модуля, а также их теплопроводности, исследователям удалось рассчитать все компоненты тепловые сопротивления модуля, включая перекрестные тепловые сопротивления.

Во втором методе значения компонент схемы замещения определяются на основе анализа переходной тепловой характеристики, получаемой экспериментально. Суть метода заключается в том, что в полупроводниковом приборе рассеивают ступенчато изменяющуюся мощность и измеряют отклик на это воздействие – изменение температуры *p-n*-перехода в процессе разогрева прибора до достижения стационарного состояния. Для анализа переходной тепловой характеристики довольно широко используют аппарат структурных функций [4].

Интересный подход к определению перекрестных тепловых сопротивлений был предложен в работах [5, 6]. Для описания тепловых потоков в системе, состоящей из нескольких источников тепловой мощности, исследователи предложили использовать частотно-зависимую матрицу перекрестной связи  $Z_{Txy}(j\omega)$ , называемую также матрицей тепловых импедансов (thermal impedance matrix):

$$T_x(j\omega) = Z_{T_{xy}}(j\omega) \cdot P_y(j\omega), \quad (1)$$

$$\text{где } \mathbf{T}_x = \begin{pmatrix} T_1 \\ \dots \\ T_m \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_y = \begin{pmatrix} P_1 \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Z}_{T_{xy}} = \begin{pmatrix} Z_{T_{11}} & \dots & Z_{T_{1n}} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{T_{m1}} & \dots & Z_{T_{mn}} \end{pmatrix}.$$

В выражении (1)  $T_x(j\omega)$  и  $P_y(j\omega)$  представляют собой частотно-зависимые характеристики температуры в точке X и рассеиваемой мощности в точке Y, а  $Z_{T_{xy}}(j\omega)$  определяет тепловую связь между точками X и Y. Уравнение (1) позволяет определить компоненты матрицы  $Z_{T_{xy}}(j\omega)$ , используя для этого Фурье-преобразования рассеиваемой мощности и температурного отклика.

Для определения тепловой связи между каждой парой элементов, входящих в состав системы, используется метод псевдослучайной двоичной последовательности PRBS (PRBS – pseudorandom binary sequence). PRBS – это специальный сигнал, который имеет практически постоянный спектр в широком диапазоне частот. Применяя PRBS в качестве входной мощности  $P_y(t)$  и измеряя температурный отклик  $T_x(t)$ , можно и вычисляя и находя частное из двух в частотной области, поперечная связь между входной и выходной точками определяется выражением:

$$Z_{T_{xy}}(\omega) = \frac{F(T_x(t))}{F(P_y(t))} = \frac{T_x(\omega)}{P_y(\omega)}, \quad (2)$$

где  $T_x(t)$  и  $P_y(t)$  представляют собой временные зависимости температурного отклика в точке X и мощности, рассеиваемой в точке Y;  $T_x(\omega)$  и  $P_y(\omega)$  – их Фурье-трансформанты, вычисляемые с помощью дискретного преобразования Фурье.

Формирование сигнала PRBS с помощью микроконтроллера упрощает реализацию данного метода, однако, частотный диапазон, в котором спектральная плотность мощности постоянна, оказался довольно узким. Максимальная частота этого спектрального диапазона не превышает 0,4 Гц [5]. В то же время известно, что тепловые постоянные времени большинства элементов силового модуля составляют десятки и сотни миллисекунд [7]. Поэтому компоненты теплового сопротивления модуля, связанные с такими

элементами должны проявлять себя на частотах, превышающих 1 Гц. Альтернативой является метод, использующий воздействие на объект измерения тепловой мощности, модулированной по гармоническому закону, и измерении температурного отклика объекта на такое воздействие при различной частоте модуляции.

### 1. Модуляционный метод измерения теплового импеданса

Суть модуляционного метода заключается в следующем [8]. Через объект измерения пропускают последовательность импульсов греющего тока, период следования  $t_{и}$  которых постоянный, а длительность  $\tau_{и}$  изменяется по гармоническому закону:

$$\tau_{и} = \tau_{и.ср} (1 + a \cdot \sin 2\pi vt), \quad (3)$$

где  $\tau_{и.ср}$  – средняя длительность импульсов;  $\nu$  – частота модуляции;  $t$  – время;  $a$  – коэффициент модуляции, определяемый выражением  $(\tau_{\max} - \tau_{\min})/t_{и}$ , в котором через  $\tau_{\max}$  и  $\tau_{\min}$  обозначена максимальная и минимальная длительность импульсов.

В результате протекания через объект импульсов тока средняя за период следования греющая мощность  $\bar{P}(t)$  будет, как и длительность импульсов  $\tau_{и}$ , изменяться по гармоническому закону:

$$\bar{P}(t) = I_{гр} U_{гр} \frac{\tau_{и}}{t_{и}} = P_{ср} (1 + a \cdot \sin 2\pi vt) = P_{ср} + P_1 \cdot \sin 2\pi vt, \quad (4)$$

где  $P_{ср} = I_{гр} \cdot U_{гр} \frac{\tau_{и.ср}}{t_{и}}$  – среднее значение греющей мощности;  $U_{гр}$  – напряжение на объекте во время протекания через него импульсов тока;  $P_1 = a \cdot P_{ср}$  – амплитуда переменной составляющей греющей мощности.

Модуляция греющей мощности вызывает колебания температуры  $p$ - $n$ -перехода, сдвинутые по фазе относительно мощности:

$$T_j(t) = T_{j0} + T_{j1} \cdot \sin(2\pi vt - \varphi),$$

где  $T_{j0}$  – постоянная составляющая температуры  $p$ - $n$ -перехода;

$T_{j1}$  – амплитуда переменной составляющей температуры  $p$ - $n$ -перехода на частоте модуляции  $\nu$ ;

$\varphi$  – сдвиг фаз между переменными составляющими температуры  $p$ - $n$ -перехода и греющей мощности.

Температура перехода  $T_j(t)$  измеряется в паузах между импульсами греющего тока на основе измерений температурочувствительного параметра, в качестве которого используется прямое падение напряжения  $U_{ТЧП}$  на  $p$ - $n$ -переходе при малом измерительном токе. У измеренной зависимости  $T_j(t)$  с помощью преобразования Фурье производится вычисление спектра, осуществляется его цифровая фильтрация и восстановление отфильтрованной зависимости  $T_j(t)$ . Отношение амплитуд переменных составляющих температуры перехода  $T_{j1}$  и мощности  $P_1$  определяет модуль  $Z_T(\nu)$  теплового импеданса на частоте модуляции  $\nu$ , а отношение мнимой  $\text{Im } T_{j1}$  и вещественной  $\text{Re } T_{j1}$  Фурье-трансформант температуры перехода – тангенс фазы  $\varphi(\nu)$  теплового импеданса:

$$Z_T = \frac{T_{j1}}{P_1}, \quad \varphi = \arctg \frac{\text{Im } T_{j1}}{\text{Re } T_{j1}}. \quad (5)$$

Обычно тепловое сопротивление объекта включает в себя ряд компонент, связанных с элементами его конструкции (кристалл, кристаллодержатель, корпус, радиатор). Определение компонент теплового сопротивления в модуляционном методе производится на основе измерения частотных зависимостей модуля  $Z_T(\nu)$ , фазы  $\varphi(\nu)$  и вещественной части  $\text{Re } Z_T(\nu)$  теплового импеданса, которые имеют особенности в виде пологих участков или точек перегиба, связанные с той или иной компонентой теплового сопротивления. Выявление этих особенностей осуществляется на основе вычисления производных указанных величин по частоте модуляции. Как было показано в [8], наиболее высокую точность обеспечивает анализ частотной зависимости вещественной части  $\text{Re } Z_T(\nu)$  теплового импеданса.

Модуляционный метод реализован в измерителе теплового сопротивления, функциональная схема которого представлена на рис. 1.

Функционирование прибора осуществляется под управлением микроконтроллера, который на основе поступивших из компьютера параметров измерения формирует импульсы греющего тока заданной амплитуды  $I_{гр}$ , периода следования и частоты модуляции. Формирователь греющих импульсов реализован по известной схеме [9] и включает в себя цифровой потенциометр (ЦП), преобразователь уровня (ПУ), электронный ключ (Кл) и операционный усилитель с полевым транзистором в цепи обратной связи. По аналогичной схеме реализован и формирователь измерительного тока  $I_{изм}$ , используемого для измерения температурочувствительного параметра  $U_{ТЧП}$ . Сигнал In/Out предназначен для коммутации греющего и измерительного токов, протекающих через различные транзисторы силового модуля.

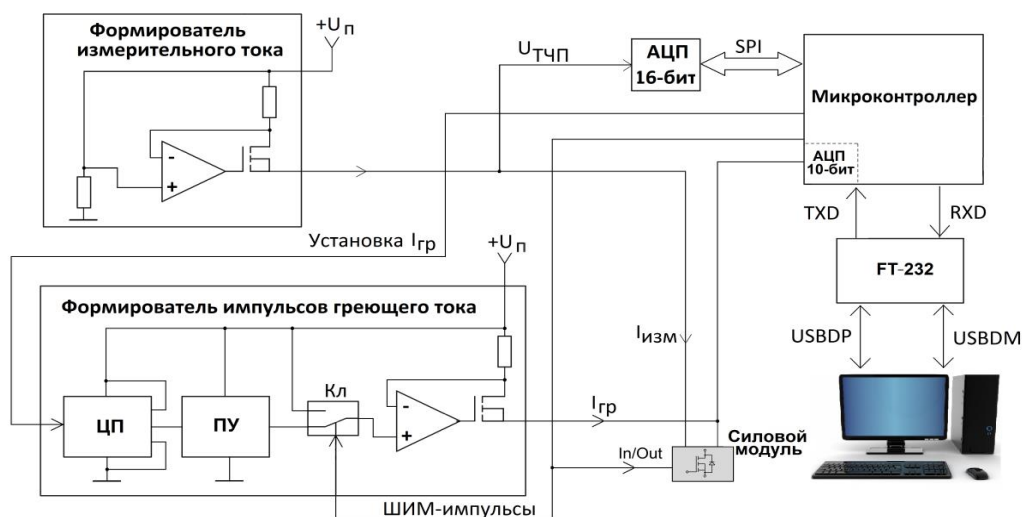


Рис. 1. Функциональная схема измерителя теплового сопротивления

Измерение напряжения на объекте во время протекания через него импульсов греющего тока производится встроенным в микроконтроллер 10-разрядным АЦП. Измерение  $U_{ТЧП}$  производится внешним 16-разрядным АЦП, связанным с микроконтроллером скоростным интерфейсом SPI. Взаимодействие измерителя в компьютере осуществляется посредством интерфейса USB. Поскольку в микроконтроллере отсутствует данный тип интерфейса, то используется конвертер «USB-RS232», реализованный на микросхеме FT-232.

## 2. Измерение компонент матрицы тепловых импедансов

Объектом измерений являлся силовой модуль SK85MH10T производства компании Semikron. Конструкция модуля и его электрическая схема представлены на рис. 2. Модуль включает в себя 4 мощных MOSFET-транзистора, смонтированных на медно-керамической плате, изготовленной по технологии DBC (Direct Bond Copper). В процессе измерений основание модуля через термопасту крепилось на радиатор. Для того чтобы иметь возможность пропускать импульсы греющего тока индивидуально через каждый транзистор, а измерять температурный отклик у остальных транзисторов, силовой модуль подключался к измерительному прибору с использованием внешних переключателей  $S_1$  и  $S_2$ , выполненных на MOSFET IRFP3206 с сопротивлением открытого канала около 3 мОм.

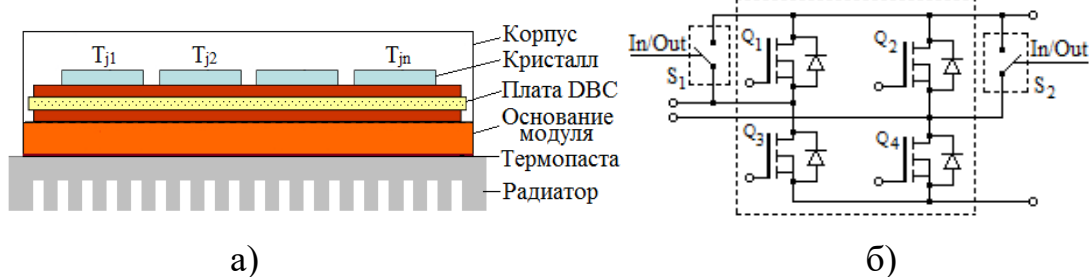


Рис. 2. Конструкция (а) и электрическая схема (б) силового модуля SK85MH10T

Для измерения диагональных компонент матрицы тепловых импедансов импульсы греющего тока  $I_{гр}$  пропускались поочередно через каждый транзистор модуля  $Q_1 - Q_4$  (рис. 2, б), а в паузах между импульсами при протекании через этот же транзистор измерительного тока  $I_{изм}$  измерялась температура перехода  $T_j(t)$ . На основе измерения амплитуд переменных составляющих температуры перехода и греющей мощности согласно выражениям (5) определялись модуль и фаза теплового импеданса.

Нагрев транзисторов, также как и в работе [10], осуществлялся пропусканием импульсов тока через антипараллельный диод транзистора (body diode). При измерении теплового импеданса транзисторов  $Q_3$  и  $Q_4$  (рис. 2, б) переключатели  $S_1$  или  $S_2$  находились во включенном состоянии, причем падение напряжения на



открытом переключателе измерялось и учитывалось при определении рассеиваемой в транзисторах мощности. Для измерения недиагональных компонент матрицы тепловых импедансов источники греющего  $I_{гр}$  и измерительного  $I_{изм}$  токов подключались к разным выводам силового модуля, что позволяло осуществлять индивидуальный нагрев одного из транзисторов модуля, а измерять температурный отклик всех остальных транзисторов.

Амплитуда импульсов греющего тока устанавливалась равной  $I_{гр} = 12$  А, период следования  $t_{и} = 100$  мкс, коэффициент модуляции  $a = 0,5$ . Измерения частотных зависимостей теплового импеданса осуществлялись в сторону уменьшения частоты модуляции  $\nu$  от 1000 до 0,5 Гц с равномерным шагом по логарифмической шкале частот. Результаты измерений зависимостей вещественной части  $Re Z_T(\nu)$  и фазы  $\phi(\nu)$  теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности представлены на рис. 3. На рис. 3, а представлены результаты измерения диагонального члена матрицы тепловых импедансов  $Z_{22}$ , т.е. нагрев и измерение температуры производились для транзистора  $Q_2$ . На рис. 3, б представлены результаты измерений недиагонального члена матрицы тепловых импедансов  $Z_{13}$ . В этом случае нагревался транзистор  $Q_3$ , а температурный отклик измерялся у транзистора  $Q_1$ .

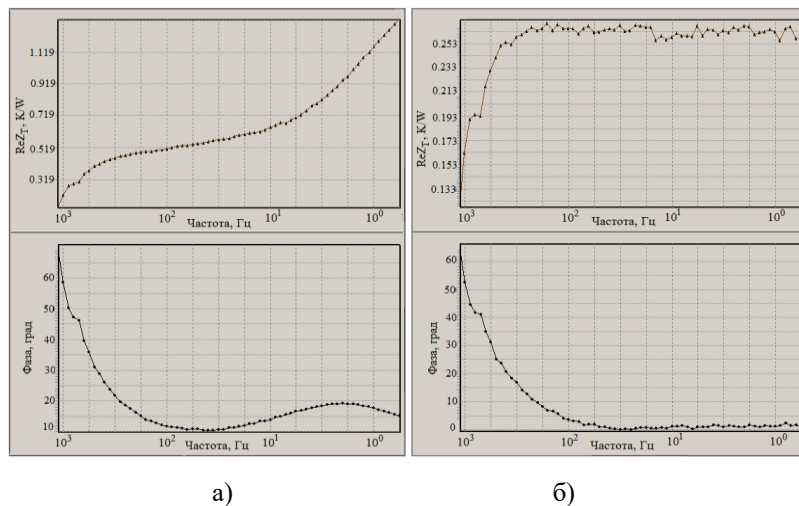


Рис. 3. Результаты измерений частотных зависимостей  $Re Z_T(\nu)$  и фазы  $\phi(\nu)$ :  
 а) для компоненты  $Z_{22}$ , б) для компоненты  $Z_{13}$ .

Как видно из рис. 3, результаты измерений частотных зависимостей для диагональных и недиагональных членов матрицы тепловых импедансов

существенно различаются. В первом случае (рис. 3, а) в зависимости  $\varphi(\nu)$  наблюдается четко выраженный минимум, которому соответствует пологий участок зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$ . Это обусловлено особенностью протекания тепла в вертикальном направлении от нагретого  $p$ - $n$ -перехода через элементы конструкции модуля к радиатору (рис. 2, а). Во втором случае поток распространяется в горизонтальном направлении преимущественно через плату DBC от «активного» (нагреваемого) транзистора к «пассивному», через который  $I_{гр}$  не пропускается. В этом случае при достижении определенной частоты температурный отклик пассивного транзистора перестает зависеть от частоты модуляции греющей мощности.

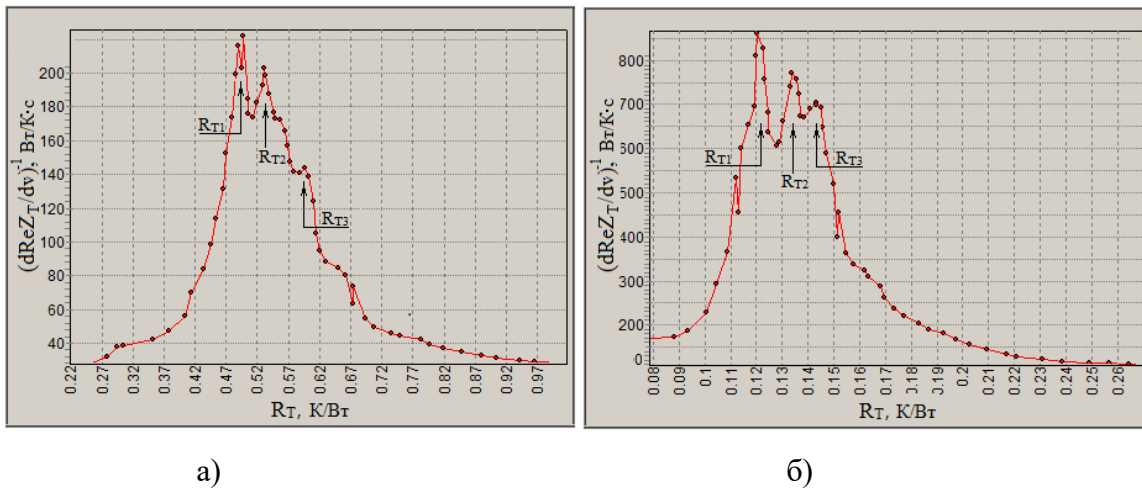


Рис. 4. Результаты измерений компонент теплового сопротивления:  
а) для  $Z_{22}(\nu)$ ; б) для  $Z_{all}(\nu)$

С целью определения компонент теплового сопротивления, связанных с особенностями конструкции модуля, производилась обработка зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$ , описанная в [8]. Она включала в себя процедуру сглаживания зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$  методом «скользящего среднего», вычисления производной  $d\text{Re } Z_T/d\nu$  и построения зависимости  $(d\text{Re } Z_T/d\nu)^{-1}$  от теплового сопротивления  $R_T$ . Компоненты теплового сопротивления определяются по положению максимумов относительно оси абсцисс (рис. 4). На рис. 4, а представлены результат обработки частотной зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$  для

транзистора  $Q_2$ , на рис. 4, б – результат обработки для всего модуля, когда импульсы греющего тока пропускались через все транзисторы модуля.

Три пика на графиках соответствуют компонентам теплового сопротивления  $R_{T1}$  «переход – плата DBC»,  $R_{T2}$  «переход – основание модуля» и  $R_{T3}$  «переход - радиатор». Их значения для транзистора  $Q_2$  равны  $R_{T1}=0,495$  К/Вт,  $R_{T2}=0,532$  К/Вт и  $R_{T3}=0,596$  К/Вт (рис. 4, а). Результаты аналогичных измерений для других транзисторов модуля, представленные ниже, отличаются между собой не более, чем на 3%. Для всего модуля компоненты теплового сопротивления равны соответственно 0,122, 0,135 и 0,143 К/Вт (рис. 4, б), что примерно в 4 раза меньше, чем для одного транзистора модуля. Компонента теплового сопротивления  $R_{T1}$  проявлялась в области частот модуляции греющей мощности от 120 до 150 Гц, компонента  $R_{T2}$  – в области от 50 до 60 Гц, компонента  $R_{T3}$  – в области от 20 до 25 Гц.

Как уже отмечалось, тепловое влияние «активных» транзисторов, которые нагревались протекающим через них током  $I_{гр}$ , на «пассивные», через которые в данный момент времени  $I_{гр}$  не протекал, осуществлялось в основном через плату DBC. Поэтому измерение компонент матрицы тепловых импедансов проводилось при частоте модуляции греющей мощности в диапазоне, в котором проявляется компонента «переход – основание модуля», т.е. от 50 до 60 Гц. Примерно в этом же диапазоне частот фаза компоненты  $Z_{13}$  (рис. 3, б) перестает уменьшаться и принимает постоянное значение на уровне  $1-2^0$ .

Результаты измерения всех компонент матрицы тепловых импедансов представлены выражением (6)

$$Z_{Txy} = \begin{pmatrix} 0,534 + 0,102j & 0,263 & 0,243 & 0,268 \\ 0,267 & 0,532 + 0,104j & 0,273 & 0,263 \\ 0,264 & 0,278 & 0,546 + 0,103j & 0,268 \\ 0,273 & 0,261 & 0,264 & 0,536 + 0,100j \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Диагональные члены матрицы (6) являются комплексными величинами, вещественные части которых определяют компоненты теплового сопротивления «переход – основание модуля» всех транзисторов силового модуля. Для

недиагональных членов матрицы, определяющих перекрестные тепловые связи, фаза не превышает  $2^{\circ}$ , поэтому мнимая часть недиагональных членов практически равна нулю.

### **3. Экспериментальная проверка результатов определения матрицы тепловых импедансов**

Матрица тепловых импедансов позволяет рассчитать температурный отклик любого из транзисторов силового модуля при известной мощности, рассеиваемой в одном транзисторе или группе транзисторов. Расчет температурного отклика осуществляется с помощью матричного уравнения (1). Для экспериментальной проверки правильности определения всех компонент матрицы (6) производился нагрев широтно-импульсно модулированными импульсами тока двух транзисторов ( $Q_1$  и  $Q_2$ ) и измерялись амплитуды переменной составляющей температуры перехода  $T_{j1}$  поочередно у всех транзисторов модуля. Результаты расчета  $T_{j1}$  сравнивались с аналогичными результатами, полученными экспериментально.

Для того, чтобы иметь возможность измерять температурный отклик индивидуально у каждого транзистора модуля, входы «Исток» транзисторов  $Q_1$  и  $Q_2$  (рис. 2, б) соединялись между собой через переключатель, открывающийся во время протекания через объект импульсов греющего тока  $I_{гр}$ , и закрывающиеся в паузе между импульсами. В результате цепь нагрева состояла из двух ветвей – одна включала в себя только транзистор  $Q_1$ , другая, кроме транзистора  $Q_2$ , имела дополнительно переключатель. Это вызывало небольшой дисбаланс токов, протекающих через эти транзисторы. Через транзистор  $Q_1$  протекали импульсы тока амплитудой  $I_{гр} = 6.15$  А, через транзистор  $Q_2$  –  $I_{гр} = 5.85$  А. Падение напряжения  $U_{гр}$  на вершине импульса составляло для обоих транзисторов 0,728 В и 0,710 В соответственно. Согласно выражению (4) амплитуда переменной составляющей греющей мощности, рассеиваемой в транзисторе  $Q_1$  при коэффициенте модуляции  $a = 0.5$  равна  $P_1 = 1,12$  Вт, в транзисторе  $Q_2$  значение  $P_1 = 1,04$  Вт.

Проведенный согласно (1) с учетом (6) расчет температурного отклика, показал, что амплитуды переменной составляющей перехода для всех транзисторов модуля имеют следующие значения:

для транзистора  $Q_1$ :  $T_j = (0.872 + 0.114j)$  К;

для транзистора  $Q_2$ :  $T_j = (0.852 + 0.108j)$  К;

для транзистора  $Q_3$ :  $T_j = 0.585$  К;

для транзистора  $Q_4$ :  $T_j = 0.577$  К;

На рис. 5 представлены результаты измерения временной зависимости температуры перехода для транзистора  $Q_1$  при нагреве импульсами тока транзисторов  $Q_1$  и  $Q_2$ . Для сравнения в верхнее окно выведена временная зависимость длительности импульсов, характер которой соответствует аналогичной зависимости для греющей мощности. Из графиков видно, что между греющей мощностью и переменной составляющей температуры перехода имеется сдвиг фаз, равный  $15.7^\circ$ .

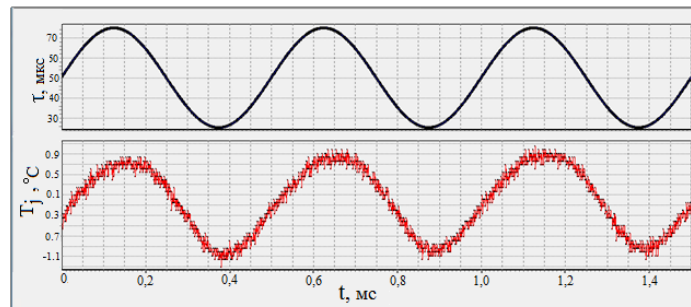


Рис. 5. Временные зависимости длительности  $\tau$  греющих импульсов (вверху) и переменной составляющей температуры  $T_j$  перехода транзистора (внизу)

Амплитуда переменной составляющей температуры перехода для транзистора  $Q_1$  составила 0.87 К. Для транзисторов  $Q_2$ ,  $Q_3$  и  $Q_4$  аналогичные измерения дали значения 0.82, 0.61 и 0.63 К соответственно. Таким образом, полученные экспериментально значения амплитуды переменной составляющей температуры хорошо согласуются со значениями, полученными в результате расчета, что подтверждает правильность определения компонент матрицы тепловых импедансов.

## Заключение

Проведенные исследования показали принципиальную возможность измерения перекрестных тепловых сопротивлений (связей) силовых модулей. В основу положен модуляционный метод, использующий воздействие на объект тепловой мощности, модулированной по гармоническому закону. Измерения проводились с помощью измерителя теплового импеданса, который позволяет нагревать индивидуально каждый транзистор силового модуля, и измерять при этом температурный отклик у остальных транзисторов. Используя сканирование по частоте модуляции греющей мощности, удалось определить все компоненты матрицы тепловых импедансов. Данный метод может быть использован не только для силовых модулей на MOSFET- или IGBT-транзисторах, но также и для гибридных микросхем или печатных плат.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Ульяновской области (проект РФФИ № 18-47-730024).

## Литература

1. Аронов В.Л., Федотов Я.А. Исследование и испытание полупроводниковых приборов. М. : Высшая школа, 1975. 325 с.
2. Вяхирев В. Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности. 2013.– №3. С. 90-92.
3. T. Brückner, S. Bernet. Estimation and Measurement of Junction Temperatures in a Three-Level Voltage Source Converter // IEEE Transactions on Power Electronics. 2007. Vol. 22. P. 3–12.
4. O. Steffens, P. Szabo, M. Lenz, G. Farkas. Thermal transient characterization methodology for single-die and stacked structures // 21st IEEE SEMI-THERM Symposium. 2005. P. 1065–2221.

5. J.N. Davidson, D.A. Stone, M.P. Foster, D.T. Gladwin. Measurement and Characterization Technique for Real-Time Die Temperature Prediction of MOSFET-Based Power Electronics // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016.– Vol. 31. P. 4378–4388.
6. J.N. Davidson, D.A. Stone, M.P. Foster. Real-time prediction of power electronic device temperatures using PRBS-generated frequency-domain thermal cross-coupling characteristics // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. Vol. 30. P. 2950–2961.
7. L. Wei, R.J. Kerkman, R.A. Lukaszewski, B.P. Brown, N. Gollhardt, B.W. Weiss // Junction Temperature Prediction of a Multiple-chip IGBT Module under DC Condition. 41st IAS Annual Meeting. 2006. P. 754-762.
8. Смирнов В.И., Гавриков А.А., Шорин А.М. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация // Автоматизация процессов управления. 2017. № 2 (48). С. 98–105.
9. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3-х томах. Том 1. М. : Мир. 1993. 413 с.
10. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Шорин А.М. Измерения теплового импеданса мощных транзисторов // Радиотехника. 2017. № 6. С. 83–90.

**Для цитирования:**

В. И. Смирнов, В. А. Сергеев, А. А. Гавриков, А. М. Шорин. Измерение перекрестных тепловых сопротивлений силовых модулей. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/6/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.7.6