

УДК 681.518.3

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАНДАРТНОГО И МОДУЛЯЦИОННОГО МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОЩНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

В. И. Смирнов<sup>1,2</sup>, В. А. Сергеев<sup>1,2</sup>, А. А. Гавриков<sup>1</sup>, А. А. Куликов<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 7 января 2019 г.

**Аннотация.** Представлены результаты измерений теплового сопротивления мощного биполярного СВЧ-транзистора в активном режиме работы стандартным методом и методом, использующим модуляцию греющей мощности. Модуляция мощности осуществляется посредством пропускания через объект измерения греющих импульсов, длительность которых изменяется по гармоническому закону. Модуляционный метод реализован в модернизированном варианте аппаратно-программного измерительного комплекса с отдельным измерением напряжения на контролируемом изделии при протекании через объект измерения импульсов греющего тока и температурочувствительного параметра при протекании измерительного тока в паузах между импульсами греющего тока, что позволяет измерять тепловое сопротивление биполярных транзисторов в активном режиме. Измерительный комплекс включает в себя управляемый микроконтроллером измеритель теплового сопротивления, компьютер и специализированное программное обеспечение. Сравнительный анализ показал, что результаты измерений, полученные модуляционным методом и методом по стандарту ОСТ 11 0944-96, отличаются менее чем на 5%. При этом, в отличие от стандартного метода, модуляционный метод позволяет проводить измерения теплового сопротивления без предварительного определения тепловой постоянной времени «переход-корпус».

**Ключевые слова:** тепловое сопротивление, измерение, модуляционный метод,

мощный биполярный транзистор, тепловая постоянная времени.

**Abstract.** The paper describes the results of the thermal resistance measurements of power bipolar UHF-transistor in active mode using standard method and method using harmonic modulation of heating power. Heating power modulation performed by passing heating pulses through the device under test (DUT) with duration varying harmonically. The modulation method is implemented in a modernized version of a hardware-software measuring complex with separate measurement of the voltage on the DUT during of the pulses of heating current and temperature-sensitive parameter through the device during the flow of measuring current in the intervals between pulses of heating current, which allows to measure the thermal resistance of bipolar transistors in active mode. The measuring complex includes a microcontroller based thermal resistance meter, a personal computer, and specialized software.

Comparative analysis shows that measurement results by the standard method (OST 11 0944-96) and modulation method differs less than 5%. Modulation method instead of standard one allows thermal resistance measuring without prior determination of the «junction-to-case thermal time constant».

**Keywords:** thermal resistance, measurement, modulation method, power bipolar transistor, thermal time constant.

## 1. Введение

Элементная база современной электроники развивается по нескольким направлениям, среди которых можно выделить силовую электронику (мощные MOSFET- и IGBT-транзисторы) и СВЧ-электронику (HEMT-, MESFET- и HBT-транзисторы) [1]. Несмотря на то, что мощные биполярные транзисторы по основным параметрам уступают указанным выше транзисторам, они активно используются как в силовой электронике, так и в СВЧ-электронике. Обычно мощные биполярные транзисторы работают в режимах близких к предельным, что требует контроля качества отвода тепла от активной области кристалла к корпусу транзистора и далее в окружающую среду. Параметром,

характеризующим качество теплоотвода, является тепловое сопротивление «переход-корпус»  $R_{Tjc}$  транзистора, которое определяется выражением:

$$R_{Tjc} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{P}, \quad (1)$$

где  $T_j$  – температура  $p$ - $n$ -перехода (эмиттерного или коллекторного) транзистора;

$T_c$  – фиксированная температура корпуса транзистора;

$P$  – мощность, рассеиваемая в транзисторе.

Методы измерения теплового сопротивления биполярных транзисторов изложены в стандарте ОСТ 11 0944-96 [2]. Для измерения теплового сопротивления используют импульсный режим разогрева транзистора, включенного по схеме с общей базой, пропуская через объект однократные импульсы тока и измеряя температурочувствительный параметр (ТЧП) до и после греющего импульса. В качестве ТЧП используют прямое падение напряжения на эмиттерном переходе при малом измерительном токе, которое линейно зависит от температуры  $p$ - $n$ -перехода. Зная рассеиваемую в транзисторе мощность  $P$  и изменение температуры перехода  $\Delta T_j$ , по формуле (1) вычисляют тепловое сопротивление  $R_{Tjc}$ .

Метод обладает невысокой точностью, что обусловлено несколькими причинами. Во-первых, не определена длительность импульса греющего тока. Согласно стандарту длительность импульса  $t_{и}$  должна быть равной  $t_{и} = (3-5)\tau_{jc}$  где  $\tau_{jc}$  – тепловая постоянная времени «переход-корпус». Стандартом рекомендуется ряд дискретных значений длительностей, но вероятность того, что установленная из этого ряда длительность будет в 3–5 раз превышать значение  $\tau_{jc}$ , не велика.

Во-вторых, измерение теплового сопротивления необходимо проводить при постоянной температуре корпуса. Фиксация температуры корпуса маломощных объектов проблем не вызывает, но для мощных транзисторов с рассеиваемой мощностью десятки и сотни ватт это является сложной задачей. Сложная и разнообразная геометрия корпуса биполярных транзисторов не дает возможности использовать так называемые «холодные плиты» [3].

Альтернативным вариантом измерения теплового сопротивления является модуляционный метод [4–6]. В отличие от стандартного метода, основанного на разогреве объекта измерения однократным импульсом или серией импульсов греющего тока, в модуляционном методе объект разогревается переменной греющей мощностью, модулированной по гармоническому закону. Модуляция греющей мощности осуществляется путем пропускания через объект последовательности импульсов тока постоянного периода следования  $t_{имп}$ , длительность которых изменяется по гармоническому закону:

$$\tau(t) = \tau_{cp}(1 + a \cdot \sin 2\pi vt),$$

где:  $\tau_{cp}$  – средняя длительность импульсов;

$a$  – коэффициент модуляции греющей мощности ( $a = 0,5$ );

$v$  – частота модуляции.

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ-модуляция) греющих импульсов вызывает рассеяние в объекте измерения переменной мощности, среднее за период следования значение  $\bar{P}(t)$  которой определяется выражением:

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{t_{имп}} \int_0^{t_{имп}} P(t) dt = I_{cp} U_{cp} \frac{\tau}{t_{имп}} = I_{cp} U_{cp} \frac{\tau_{cp}}{t_{имп}} (1 + a \cdot \sin 2\pi vt) = P_0 + P_1 \cdot \sin 2\pi vt,$$

где:  $U_{гр}$  – напряжение на вершине греющих импульсов;

$I_{гр}$  – амплитуда греющих импульсов;

$P_0$  – постоянная составляющая греющей мощности;

$P_1$  – амплитуда переменной составляющей греющей мощности.

В результате рассеяния в объекте переменной тепловой мощности происходят периодические колебания температуры  $p$ - $n$ -перехода  $T_j(t)$ , сдвинутые по фазе относительно греющей мощности:

$$T_j(t) = T_0 + T_1 \cdot \sin(2\pi vt - \phi),$$

где:  $T_0$  – постоянная составляющая температуры перехода;

$T_1$  – амплитуда переменной составляющей температуры перехода на частоте модуляции  $v$ ;

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

Отношение амплитуд переменных составляющих температуры перехода  $T_1$  и мощности  $P_1$  определяет модуль  $Z_T(\nu)$  теплового импеданса на частоте модуляции  $\nu$ , а отношение мнимой и вещественной Фурье-трансформант температуры перехода – тангенс фазы  $\varphi(\nu)$  теплового импеданса. Амплитуда переменной составляющей греющей мощности  $P_1$  определяется на основе измерения напряжения  $U_{гр}$  на вершине греющих импульсов при установленных значениях амплитуды  $I_{гр}$  греющих импульсов.

Температура  $p$ - $n$ -перехода объекта измерения определяется косвенным способом на основе измерения ТЧП, линейно зависящего от температуры перехода. В качестве ТЧП для мощных MOSFET-транзисторов используют напряжение между стоком и истоком  $U_{СИ}$  при закрытом канале транзистора или сопротивление открытого канала  $R_{ОН}$  [7], для IGBT-транзисторов – напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{КЭ}$  при малом постоянном токе коллектора [8]. Для биполярных транзисторов в качестве ТЧП рекомендуется использовать прямое падение напряжения  $U_{БЭ}$  между базой и эмиттером транзистора [9].

Использование модуляционного метода позволило существенно снизить влияние температурного тренда корпуса объекта измерения, поскольку определение теплового сопротивления производится на основе измерения амплитуды переменной составляющей температуры перехода. Это было подтверждено экспериментально на основе исследований теплофизических характеристик мощных MOSFET- и IGBT-транзисторов [10].

## **2. Аппаратно-программный комплекс для измерения теплового сопротивления**

Модуляционный метод измерения теплового сопротивления реализован в аппаратно-программном комплексе, функциональная схема которого представлена на рис. 1. Процессы измерения и обработки результатов измерения осуществляются под управлением компьютера. Оператор выбирает нужный

режим работы комплекса, предусмотренный программным обеспечением, устанавливает параметры измерения и инициирует начало измерений. Информация с установленными параметрами измерений передается микроконтроллеру, который формирует последовательность ШИМ-импульсов греющего тока, измеряет напряжение на объекте во время протекания через него импульсов греющего тока (на вершине импульса) и в паузах между ними, передает результаты измерений в компьютер, контролирует возникновение нештатных ситуаций и передает коды ошибок в компьютер для их распознавания.

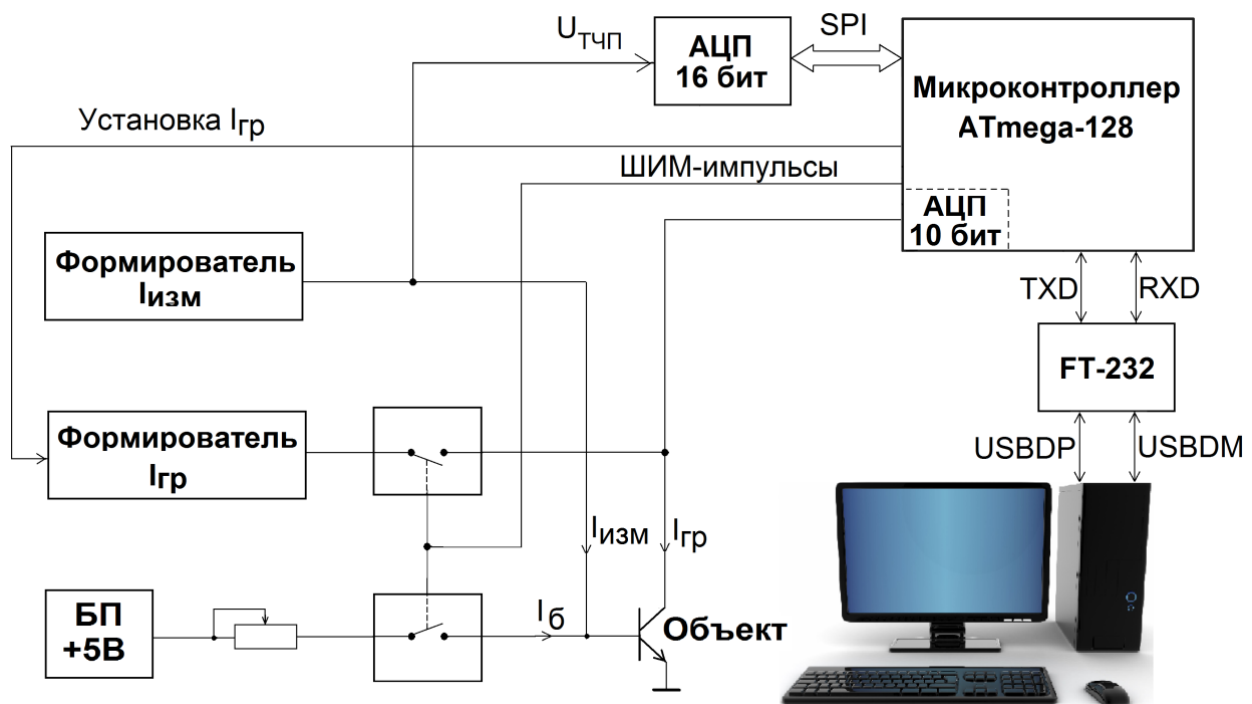


Рис. 1. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса

В представленном варианте измерительного комплекса каналы греющего и измерительного токов реализованы отдельно. Напряжение  $U_{кэ}$  на вершине греющего импульса измеряется встроенным в микроконтроллер 10-разрядным АЦП, напряжение  $U_{бэ}$  в паузе между импульсами – с помощью внешнего 16-разрядного АЦП. Внешний АЦП взаимодействует с микроконтроллером посредством скоростного последовательного интерфейса SPI. Взаимодействие микроконтроллера с компьютером осуществляется посредством USB-

интерфейса. Поскольку у микроконтроллера ATmega128 данный тип интерфейса отсутствует, то для преобразования интерфейса RS-232 в USB используется конвертор FT-232.

Получив результаты измерений, компьютер вычисляет модуль и фазу теплового импеданса при установленных значениях частоты модуляции греющей мощности, анализирует зависимость теплового импеданса от частоты модуляции, что позволяет определять компоненты теплового сопротивления. Все результаты обработки исходной информации представляются в графической и текстовой форме и хранятся в специальном электронном журнале с полной информацией о проведенных измерениях.

### 3. Измерения теплового сопротивления модуляционным методом

В качестве объекта измерения был выбран мощный биполярный СВЧ-транзистор типа КТ920В, имеющий предельные эксплуатационные параметры:  $U_{КЭ\max}=36$  В;  $I_{К\max}=3$  А;  $P_{\max}=25$  Вт;  $R_{Tjс}=4$  К/Вт. Транзистор подключался к измерителю по схеме с общим эмиттером. Величина греющего тока  $I_{гр}$  варьировалась в диапазоне от 200 мА до 1500 мА, напряжение  $U_{КЭ}$  с помощью регулирования базового тока устанавливалось равным 20 В. Температурный коэффициент напряжения  $U_{БЭ}$ , измеренный экспериментально, для исследуемого образца транзистора был равен  $-1,80$  мВ/К. В процессе измерений корпус транзистора закреплялся на массивном радиаторе с применением термопасты.

Результаты измерения зависимости переменной составляющей температуры  $p$ - $n$ -перехода от времени представлены на рис. 2. Период следования греющих импульсов тока составлял 100 мкс, длительность импульсов модулировалась в диапазоне от 25 до 75 мкс (верхнее окно на рис. 2); частота модуляции равнялась 50 Гц; амплитуда импульсов тока составляла 600 мА. Амплитуда переменной составляющей температуры перехода  $T_1 = 8,5$  °С, амплитуда мощности  $P_1 = 3$  Вт, отсюда модуль теплового импеданса на частоте модуляции 50 Гц получается равным 2,83 К/Вт. Расчет фазы теплового импеданса дает значение  $\varphi = 19,1$  градуса.

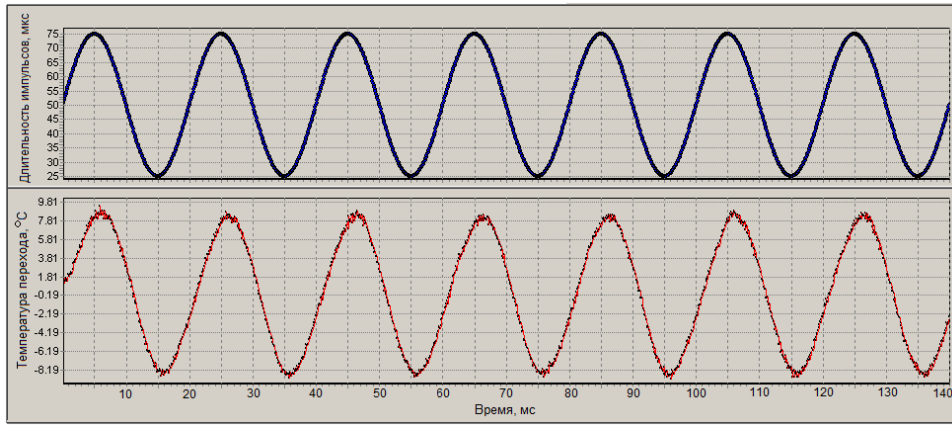


Рис. 2. Осциллограммы температуры перехода транзистора КТ920В при частоте модуляции греющей мощности 50 Гц ( $I_{гр}=600$  мА;  $U_{КЭ}=20$  В)

Для определения компоненты теплового сопротивления «переход-корпус» производились измерения зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности, результаты которых представлены на рис. 3. По оси абсцисс показаны номера измерений с различными частотами, убывающими с равномерным шагом по логарифмической шкале частот.

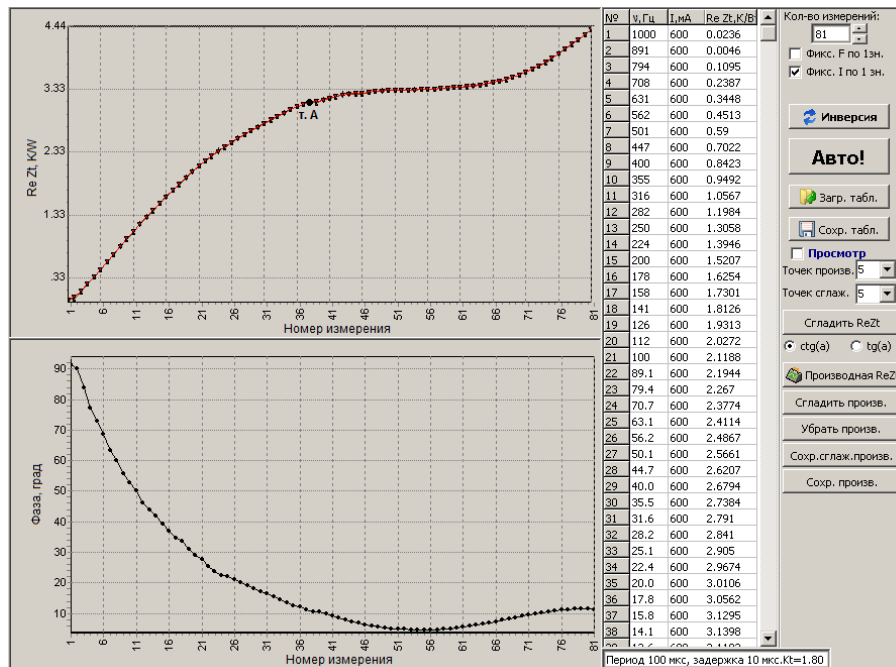


Рис. 3. Частотная зависимость вещественной части теплового импеданса  $Re Z_T(\nu)$  (в верхнем окне) и его фазы  $\phi(\nu)$  (в нижнем окне)



Конкретные значения частоты модуляции для каждого измерения приведены в текстовом окне справа от графиков. Диапазон частот модуляции  $\nu$  составлял от 0,1 до 1000 Гц, количество измерений на одной декаде равнялось 20.

Пологий участок на графике  $\text{Re } Z_T(\nu)$  и минимум на графике фазы  $\varphi(\nu)$  указывают на наличие компоненты теплового сопротивления «переход-корпус». Точное значение этой компоненты определяется на основе анализа зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$ , включающей в себя процедуру сглаживания 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  $R_T$ . Результат такой обработки показан на рис. 4. Положение максимума относительно оси ординат определяет значение теплового сопротивления «переход-корпус»  $R_{Tjc}$ . Для биполярного СВЧ-транзистора КТ920В значение  $R_{Tjc}$  получилось равным 3,33 К/Вт.

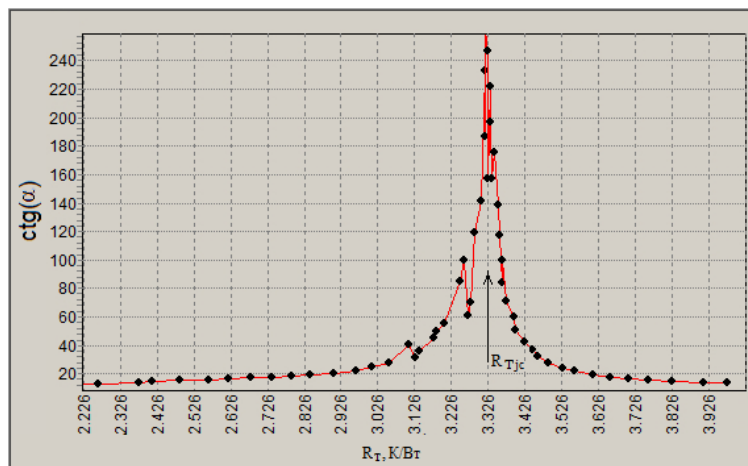


Рис. 4. Результат обработки зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$

В представленном на рис. 4 диапазоне тепловых сопротивлений должна была бы проявиться также компонента «корпус-радиатор». Как показали оценки, тепловое сопротивление слоя термопасты, посредством которой корпус транзистора крепится на радиатор, не превышает величины 0,1 К/Вт. Это составляет около 3% от измеренного значения  $R_{Tjc}$ . Учитывая, что погрешность измерения теплового сопротивления составляет 5%, надежно измерить компоненту «корпус-радиатор» не удалось.

#### 4. Измерения теплового сопротивления стандартным методом

В стандартном методе измерения теплового сопротивления биполярных транзисторов [2] через объект пропускают импульс греющего тока определенной длительности и измеряют температуру перехода до и после импульса. Основным недостатком метода заключается в неопределенности длительности греющего импульса. Она должна в 3–5 раз превышать тепловую постоянную времени «переход-корпус»  $\tau_{jc}$ , но методики ее определения в стандарте не приводится. Значение  $\tau_{jc}$  можно определить, опираясь на модуляционный метод измерения.

Для анализа тепловых процессов в полупроводниковых приборах (ПП) широко используют теплоэлектрическую аналогию [11], согласно которой любой конструкции ПП соответствует тепловая модель по Фостеру или по Кауэру в виде нескольких последовательно соединенных RC-звеньев [12]. Сопротивление резистора  $R$  и емкость конденсатора  $C$  каждого звена соответствуют тепловому сопротивлению и теплоемкости отдельно взятого элемента конструкции ПП, а напряжение и сила тока – температуре и греющей мощности соответственно. Если использовать схему Фостера, в которой объект представляется в виде нескольких последовательно соединенных RC-звеньев, то тепловой импеданс  $Z_T(j\omega)$  такой  $n$ -звенной схемы будет описываться выражением:

$$Z_T(j\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{1+j\omega\tau_i},$$

где:  $R_{Ti}$  – компоненты теплового сопротивления  $i$ -го звена;

$j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;

$\omega = 2\pi \nu$  – циклическая частота греющей мощности;

$\tau_i = R_{Ti} \cdot C_i$  – тепловая постоянная времени  $i$ -го звена ( $C_i$  – теплоемкость).

Как следует из рис. 4, в исследуемом диапазоне частот модуляции греющей мощности проявляется только одна компонента теплового сопротивления, значение которой равно 3,33 К/Вт. Поэтому для описания объекта измерения можно использовать однозвенную модель, для которой тепловой импеданс равен

$$Z_T(j\omega) = \frac{R_{Tjc}}{1 + j\omega\tau_{jc}}$$

Вещественная часть теплового импеданса  $\text{Re } Z_T(\omega)$  в этом случае будет определяться выражением:

$$\text{Re } Z_T(\omega) = \frac{R_{Tjc}}{1 + (\omega\tau_{jc})^2}$$

При выполнении условия  $\omega\tau_{jc} \ll 1$  величина  $\text{Re } Z_T \rightarrow R_{Tjc}$ . Данное условие выполняется при значениях  $\omega\tau_{jc}$  от 1/5 до 1/3. Например, при  $\omega\tau_{jc} = 1/4$  величина  $\text{Re } Z_T$  составляет 94% от  $R_{Tjc}$ . Это позволяет на частотной зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$ , представленной на рис. 3, найти точку с ординатой  $0,94 \cdot R_{Tjc}$  (отмеченную на рис. 3 как т. А), для которой выполняется условие  $\omega\tau_{jc} = 1/4$ . Частота модуляции греющей мощности  $\nu$  для т. А равна 14,1 Гц. Отсюда следует, что тепловая постоянная времени «переход-корпус» исследуемого образца  $\tau_{jc} = 2,8$  мс.

Знание  $\tau_{jc}$  позволяет устранить основной недостаток стандартного метода, связанный с неопределенностью длительности греющего импульса. Если длительность греющего импульса составляет  $(3-5)\tau_{jc}$ , то обеспечиваются оптимальные условия для нагрева кристалла, при которых кристалл нагревается до стационарного состояния, при этом температура корпуса транзистора остается практически постоянной.

Результаты измерения теплового сопротивления мощного биполярного СВЧ-транзистора КТ920В представлены на рис. 5. Длительность греющего импульса устанавливалась равной  $4\tau_{jc}$ , т.е. равной 11 мс. По оси ординат показано напряжение на эмиттерном переходе транзистора  $U_{БЭ}$ , по оси абсцисс – номера отсчетов АЦП до греющего импульса и по его окончанию. Периодичность аналого-цифрового преобразования (интервал между соседними отсчетами ТЧП) составляла 14 мкс. Во время прохождения через транзистор импульса греющего тока (номера отсчетов ТЧП от 11 до 20) интервал между аналого-цифровыми преобразованиями составлял 1/10 длительности импульса.

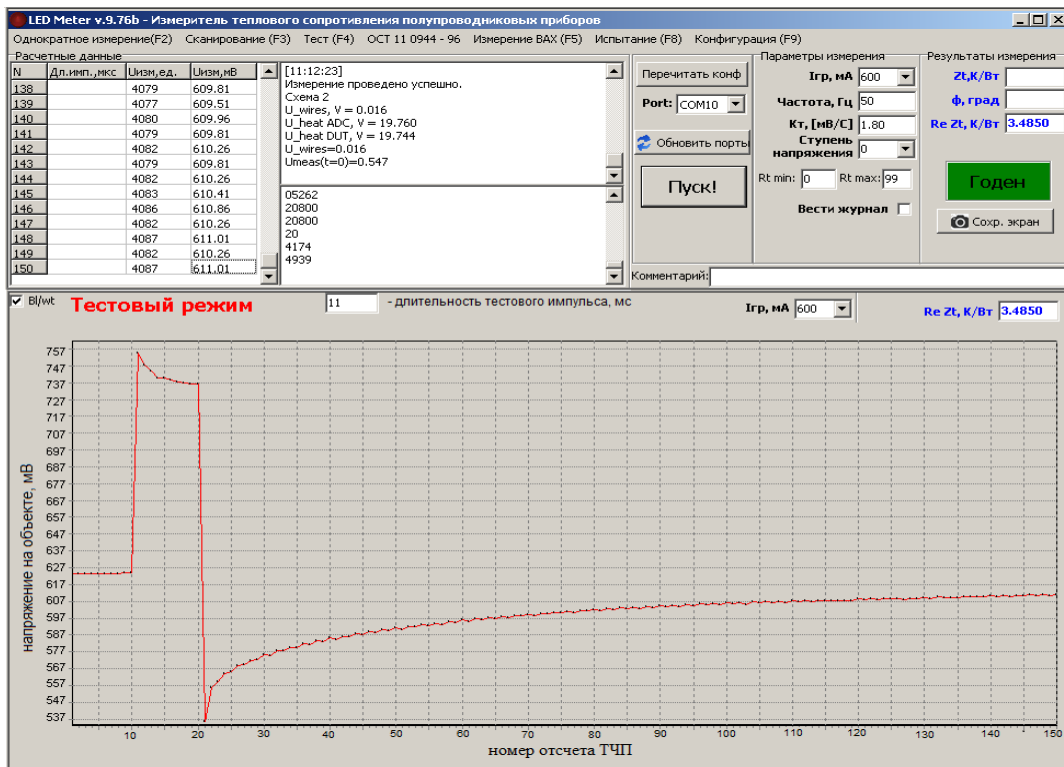


Рис. 5. Результат измерения теплового сопротивления мощного биполярного СВЧ-транзистора КТ920В стандартным методом

При определении температуры перехода после окончания греющего импульса необходимо учитывать переходные электрические процессы, связанные с инжекцией носителей заряда через эмиттерный переход с последующим их рассасыванием [13]. Измерение ТЧП (прямого напряжения на эмиттерном переходе) необходимо проводить после завершения переходных процессов, т.е. с некоторой временной задержкой. Выбор времени задержки, как это следует из рис. 5, существенно влияет на результат измерения теплового сопротивления. Для разных объектов измерения продолжительность переходных электрических процессов различна, поэтому и выбор времени задержки должен быть индивидуален. Влияния времени задержки на результаты измерения можно избежать, если использовать экстраполяцию значений ТЧП (отсчеты с номерами  $n > 21$  на рис. 5) к моменту окончания греющего импульса. В стандартах ОСТ 11 0944-96 [2] и JESD51-14 [10] рекомендуется использовать для такой экстраполяции корневую зависимость ТЧП от времени. Поэтому для определения ТЧП в момент окончания импульса

предварительно рассчитывалась зависимость ТЧП от  $\sqrt{t}$ , после чего методом наименьших квадратов вычислялось уравнение линейной регрессии.

При длительности импульса греющего тока 11 мс, амплитуде 600 мА, напряжении  $U_{кэ} \approx 20$  В и, соответственно, амплитуде греющей мощности 12 Вт изменение ТЧП составило 75 мВ, и значение теплового сопротивления «переход-корпус» получилось равным 3,48 К/Вт (рис. 5). Этот результат хорошо согласуется со значением  $R_{Tjс}=3,33$  К/Вт, полученным модуляционным методом.

## 5. Заключение

Проведенные исследования показали, что модуляция греющей мощности позволяет проводить измерения теплового сопротивления биполярных СВЧ-транзисторов без предварительного определения тепловой постоянной времени «переход-корпус». При этом результаты измерений, полученные модуляционным методом и методом, изложенным в стандарте ОСТ 11 0944-96, отличаются менее чем на 5%. Достоинством модуляционного метода является также то, что в нем существенно снижены требования к поддержанию температуры корпуса объекта постоянной. Это дает возможность измерять тепловое сопротивление объектов с большой рассеиваемой мощностью, в частности, мощных MOSFET- и IGBT-транзисторов, а также силовых модулей на их основе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Правительства Ульяновской области, номер проекта № 18-47-730024.

## Литература

1. Шурыгина В. Дискретные силовые полупроводниковые приборы // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 3. С. 12–25.
2. ОСТ 11 0944-96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. М.: ГУП НПП Пульсар, 1997. 110 с.

3. Total Thermal Solutions [электронный ресурс] // Lytron Inc. Catalog. Дата обращения 05.01.2019. Режим доступа <http://www.lytron.com/Cold-Plates>.
4. V. I. Smirnov, V. A. Sergeev, A. A. Gavrikov, A. M. Shorin. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices // Microelectronics Reliability. 2018. Vol. 80. P. 205–212.
5. В.И. Смирнов, В. А. Сергеев, А. А. Гавриков. Измерение теплового сопротивления солнечных модулей модуляционным методом // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/14/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.14
6. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Шорин А.М. Измерение теплового импеданса мощных транзисторов // Радиотехника. 2017. № 6. С. 83–90.
7. Thermal Impedance Measurements for Vertical Power MOSFETs (Delta Source-Drain Voltage Method). JEDEC JESD24-3 standard.
8. Thermal Impedance Measurement for Insulated Gate Bipolar Transistors – (Delta  $V_{CE(on)}$  Method). JEDEC JESD24-12 standard.
9. Thermal Impedance Measurements for Bipolar Transistors (Delta Base-Emitter Voltage Method). JEDEC JESD 24-4 standard.
10. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Shorin A.M. Thermal impedance meter for power MOSFET and IGBT transistors // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 33, No. 7 P. 6211– 6216.
11. Сергеев, В.А. Контроль качества мощных транзисторов по теплофизическим параметрам. Ульяновск. : УЛГТУ, 2000, 256 с.
12. 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. JEDEC JESD51-14 standard.
13. V.A. Sergeev, V.V. Yudin Measurement of the thermal parameters of semiconductor products using pulse-amplitude modulation of the heating power // Measurement Techniques. 2010, Vol. 53, No. 6. P. 679–685.

**Для цитирования:**

В. И. Смирнов, В. А. Сергеев, А. А. Гавриков, А. А. Куликов, А. М. Шорин. Сравнительный анализ стандартного и модуляционного методов измерения теплового сопротивления мощных биполярных транзисторов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/3/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.3