

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.6.7>

УДК: 621.382

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ ШНУРОВАНИЯ ТОКА В МОЩНЫХ ВЧ и СВЧ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

В.А. Сергеев^{1,2}, И.С. Козликова¹, К.А. Литвинов², Р.Г. Тарасов³, А.А. Куликов^{1,3}

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

² Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32

³ АО «НПП «Завод Искра»
432030, г. Ульяновск, пр-т. Нариманова, д. 75

Статья поступила в редакцию 15 мая 2022 г.

Аннотация. Приведены результаты исследований температурной зависимости напряжения $U_{\text{кл}}$ шнурования тока в мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторах (МБТ) в диапазоне температур от -60 до 90 °С на модернизированной установке УИТЭП-М для измерения теплоэлектрических параметров мощных транзисторов. Принцип работы установки основан на измерении амплитуды переменной составляющей напряжения $\tilde{U}_{\text{эб}}$ на эмиттерном переходе МБТ при пропускании постоянного эмиттерного тока и подаче на коллектор суммы линейно нарастающего и малого переменного напряжения; шнурование тока в транзисторной структуре проявляется в резком возрастании крутизны зависимости $\tilde{U}_{\text{эб}}$. На выборке МБТ типа КТ903А экспериментально установлено, что с увеличением температуры корпуса напряжение шнурования тока заметно уменьшается и при некоторой температуре $T_{\text{кр}}$ достигает минимального значения $U_{\text{клmin}}$, а затем опять возрастает с увеличением температуры корпуса. Показано, что, чем больше тепловое сопротивление переход-корпус транзистора в диодном включении, тем

слабее температурная зависимость напряжения шнурования. Полученные результаты качественно объясняются на основе одномерной модели.

Ключевые слова: мощные ВЧ и СВЧ биполярные транзисторы, напряжение шнурование тока, температурная зависимость, измерение.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01134).

Автор для переписки: Сергеев Вячеслав Андреевич, sva@ulstu.ru

Введение

Наименее надежным классом полупроводниковых приборов в современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) остаются мощные биполярные ВЧ и СВЧ транзисторы (МБТ), для которых характерно явление тепловой неустойчивости токораспределения, приводящее к стягиванию тока в узкий шнур в локальной области транзисторной структуры и к образованию так называемых «горячих пятен» (ГП) [1,2]. Этот режим, как правило, приводит к отказам МБТ в РЭА; даже кратковременное нахождение МБТ в этом режиме, не приводящее к катастрофическому отказу, сопровождается большими локальными перегревами и термомеханическими напряжениями в приборной структуре и, как следствие, интенсивной генерацией дефектов в активной области, и приводит к значительному снижению времени безотказной работы МБТ.

Исследованию эффектов шнурования в МБТ посвящено много работ [3-5], однако влияние внешних факторов на условия шнурования исследованы недостаточно. Поскольку РЭА с применением МБТ эксплуатируется в широком диапазоне рабочих температур, то актуальной является задача исследования влияния внешней температуры и температуры корпуса на условия образования и параметры ГП в мощных ВЧ и СВЧ транзисторах.

1. Методы и режимы исследования

Исследования влияния температуры на условия образования и параметры ГП в МБТ были выполнены на модернизированной установке УИТЭП-М для измерения теплоэлектрических параметров мощных транзисторов [6, 7].

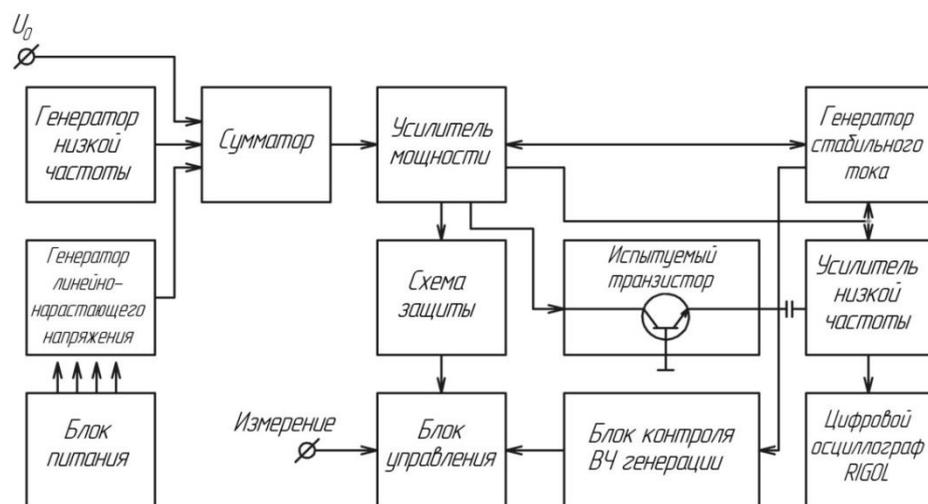


Рис. 1. Структурная схема установки УИТЭП-М

Принцип работы установки поясняется эпурами на рис. 2 и состоит в следующем. В течение импульса заданной длительности через испытуемый транзистор, включенный в схеме с общей базой, пропускают стабильный эмиттерный ток $I_{э}$, а на коллектор с выхода усилителя мощности подается сумма линейно нарастающего и малого гармонического напряжений частотой Ω , вырабатываемых генератором пилообразного напряжения и генератором низкой частоты, соответственно. При постоянной амплитуде переменной составляющей коллекторного напряжения $U_{Кин} = 1$ В амплитуда напряжения на эмиттерном переходе транзистора $\tilde{U}_{эб}$ пропорциональна модулю теплового импеданса транзистора на частоте модуляции [6,7].

Для исследования температурных зависимостей исследуемые образцы транзисторов размещались в камере температурной испытательной системы TEMPTRONIC ATS-545 ThermoStream, температура которой задавалась в диапазоне – 60 до 90 °С с погрешностью не более 1 °С.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены характерные зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ транзисторов КТ903А. Из рисунка видно, что у ряда образцов приборов при некотором значении коллекторного напряжения $U_{КЛ}$ модуль теплового импеданса возрастает в несколько раз, что свидетельствует об образовании «горячего пятна» в структуре транзистора.

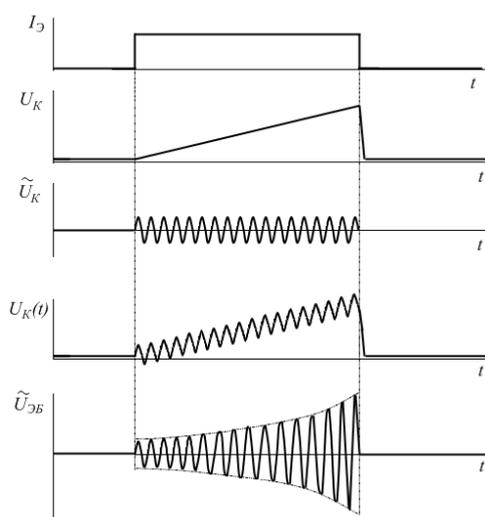


Рис. 2. Эпюры напряжений и токов, поясняющие принцип измерения напряжения $U_{КЛ}$ в МБТ на установке УИТЭП-М

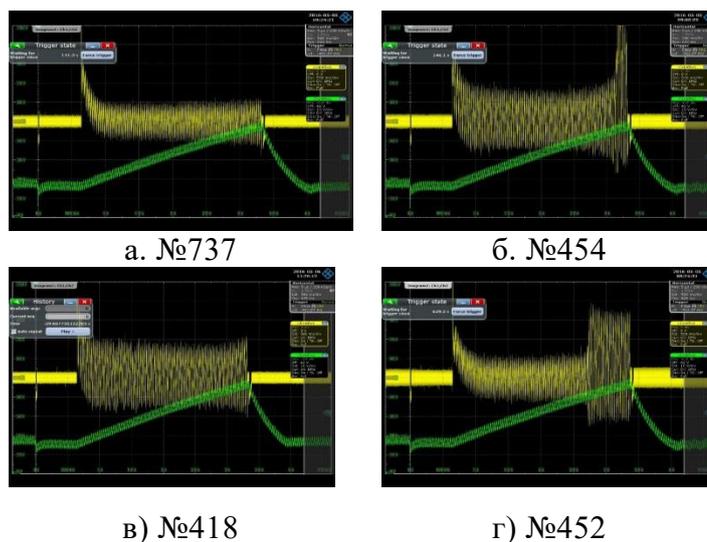


Рис. 3. Зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ транзисторов КТ903Б при $I_C = 0,5$ А и $U_{Кmax} = 60$ В:
а), б) – без образования ГП;
в), г) – с образованием ГП

На рисунке 4 показаны осциллограммы $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ для одного из образцов транзистора КТ903А, измеренные при $U_{Кmax} = 54$ В, $\Omega=40$ Гц, токе 0,8 А, длительности импульса 1,5 с и трех значениях температуры корпуса. Из приведенных осциллограмм видно, что с ростом температуры напряжение шнурования сначала уменьшается, а затем опять возрастает. При этом амплитуда переменной составляющей $\tilde{U}_{ЭБ}$ практически линейно уменьшается с ростом температуры (рис. 5).

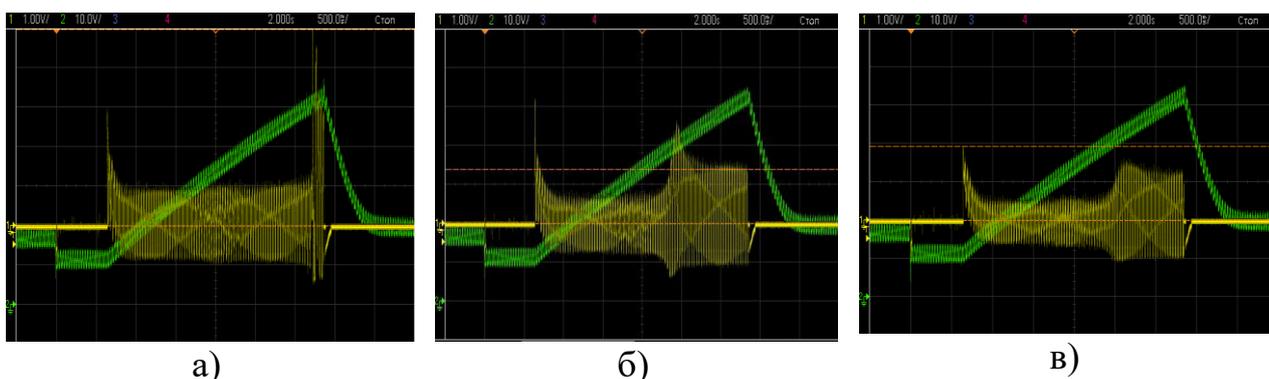


Рис. 4. Форма зависимости $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$ при разных температурах корпуса транзистора $T_K = -60\text{ }^\circ\text{C}$ (а); $T_K = 40\text{ }^\circ\text{C}$ (б); $T_K = 90\text{ }^\circ\text{C}$ (в)

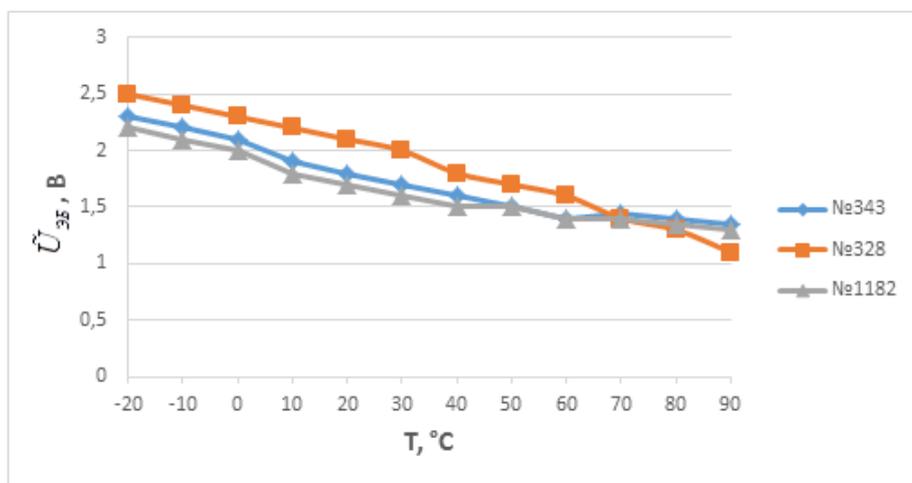


Рис. 5. Зависимость амплитуды $\tilde{U}_{ЭБ}$ (после усиления) от температуры $\tilde{U}_{ЭБ}$

С ростом температуры наблюдается также и уменьшение максимального значения (пика) характеристики $\tilde{U}_{ЭБ}(U_K)$, что свидетельствует о снижении максимальной температуры в ГП.

На рис. 6. приведены графики зависимостей напряжения шнурования тока от температуры корпуса $U_{кл}(T_K)$ нескольких образцов транзисторов типа КТ903А, измеренные при указанных выше параметрах режима в диапазоне температур от минус 60 до 90 °С с шагом 10 °С. При измерениях транзистор размещался в термостате с погрешностью задания температуры не более 1 °С. Перед каждым измерением прибор выдерживался в течение 20 мин для установления равновесной температуры всех элементов конструкции прибора, равной температуре термостата.

С увеличением температуры корпуса транзистора T_K напряжение $U_{КЛ}$ заметно уменьшается и при некоторой температуре $T_{КР}$ достигает минимального значения $U_{КЛmin}$, а затем опять начинает расти с увеличением T_K . У исследованных образцов МБТ минимум $U_{КЛ}$ наблюдается при разных значениях температуры корпуса, но значения $U_{КЛmin}$ у всех исследованных образцов лежат в диапазоне от 41 до 39 В (за исключением образца № 971 с аномальной температурной зависимостью), то есть довольно близки между собой, несмотря на значительный разброс при низких температурах. Это минимальное напряжение шнурования тока, характерное для конкретного типа МБТ, и определяет максимально допустимое коллекторное напряжение в реальных условиях эксплуатации МБТ.

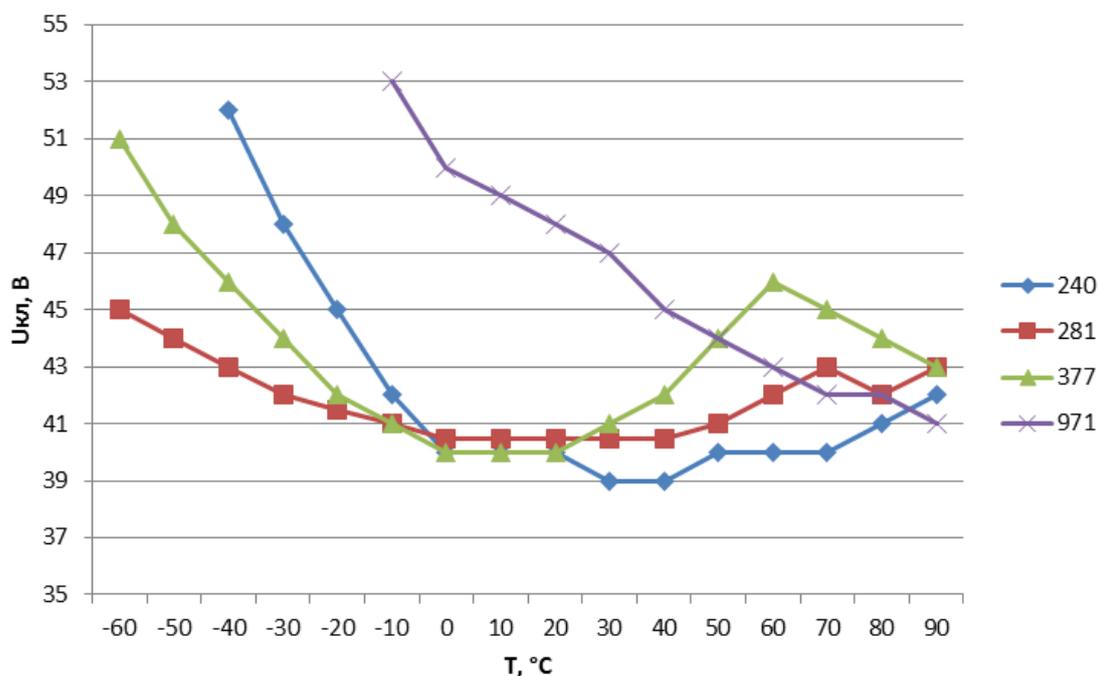


Рис. 6. Зависимости напряжения шнурования тока от температуры корпуса транзисторов типа КТ903А при эмиттерном токе 0,8 А

Для транзисторов типа КТ903 №328, №343 и №1182 были проведены измерения модуля теплового импеданса Z_T с помощью измерителя теплового импеданса полупроводниковых приборов LEDMeter [8] в трех вариантах диодного включения (Э-Б, К-Э и К-Б) на частоте модуляции греющей мощности 4 Гц и греющем токе 700 мА. Результаты измерения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимости модуля теплового импеданса МБТ в диодном режиме Z_T , К/Вт

№ транзистора	Вариант диодного включения		
	Э-Б	К-Э	К-Б
328	3,74	4,07	2,6
343	5,32	4,92	3,29
1182	6,3	5,69	3,88

У всех трех образцов наблюдается спад $U_{КЛ}$ в диапазоне температур от минус 20 до 0 °С, затем наблюдается небольшой подъем и максимум $U_{КЛ}$ примерно при 6÷10 °С, далее снова спад (рис. 7).

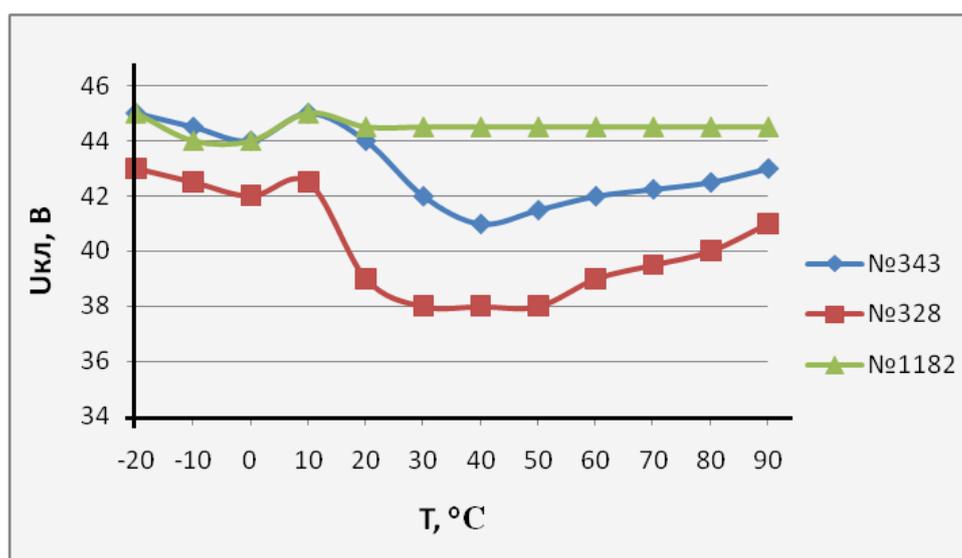


Рис. 7. Зависимости напряжения шнурования тока от температуры корпуса трех транзисторов типа КТ903А при эмиттерном токе 0,8 А

У образца № 328 $U_{КЛmin} = 38$ В при температуре 30 °С, рост $U_{КЛ}$ начинается при температуре 60 °С. У образца № 343 рост начинается при температуре 42 °С. У образца № 1182 напряжение $U_{КЛ}$ с ростом температуры практически не изменяется. Можно отметить, что, чем больше модуль теплового импеданса перехода эмиттер-база исследованных образцов данного типа транзисторов, тем слабее температурная зависимость напряжения шнурования.

Полученные зависимости $U_{КЛ}(T_K)$ качественно можно объяснить в рамках одномерной модели [1,2], согласно которой тепловая неустойчивость в МБТ развивается при условии

$$\xi_T I_{\text{Э}} U_{\text{КЭ}} R_{\text{П-К}} > 1, \quad (1)$$

где $R_{\text{П-К}}$ – тепловое сопротивление переход-корпус МБТ, а

$$\xi_T = \frac{1}{I_{\text{Э}}} \frac{\partial I_{\text{Э}}}{\partial T_n} = \frac{3kT_n + E_g - qU_{\text{ЭБ}}}{kT_n^2} \left(1 + \frac{I_{\text{Э}} r_n}{\varphi_T} \right)^{-1}$$

– температурный коэффициент эмиттерного тока; $r_n = r_{\text{Э}} + r_{\text{Б}}/\beta$ – входное сопротивление; $r_{\text{Э}}, r_{\text{Б}}$ – сопротивления эмиттера и базы МБТ соответственно; β – коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ; $T_n = T_{\text{К}} + I_{\text{Э}} U_{\text{КЭ}} R_{\text{П-К}}$ – температура эмиттерного перехода; E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника, $\varphi_T = kT_n/q$ – тепловой потенциал; q – заряд электрона.

С ростом температуры корпуса стабилизирующее действие токовыравнивающих сопротивлений в транзисторной структуре снижается из-за увеличения коэффициента передачи тока, причем снижается сильнее, чем растет выравнивающее действие средней температуры структуры. Поэтому $U_{\text{КЛ}}$ снижается с ростом температуры $T_{\text{К}}$ корпуса вплоть до некоторой критического значения $T_{\text{КР}}$, при котором достигается минимальное значение $U_{\text{КЛmin}}$. При дальнейшем увеличении $T_{\text{К}}$ превалирует выравнивающее действие температуры и напряжение локализации растет.

Заключение

Получены зависимости $U_{\text{КЛ}}(T_{\text{К}})$ напряжения шнурования тока от температуры корпуса транзисторов типа КТ903А в диапазоне температур от минус 60 до 90 °С. Показано, что с ростом температуры корпуса напряжение шнурования заметно уменьшается и при некоторой температуре $T_{\text{КР}}$ достигает минимального значения $U_{\text{КЛmin}}$, а затем опять возрастает с увеличением температуры корпуса. При этом у всех исследуемых образцов МБТ минимальное напряжение шнурования лежит в диапазоне от 41 В до 39 В и определяет максимально допустимое коллекторное напряжение в реальных условиях эксплуатации МБТ. Для повышения надежности РЭА очевидно необходима отбраковка потенциально ненадежных МБТ по минимальному значению

напряжению локализации тока. Связь крутизны температурной зависимости с модулем теплового импеданса транзисторов в диодном включении требует дополнительного исследования.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01134).

Литература

1. Сергеев В.А. «Горячие пятна» в мощных биполярных транзисторах. *Петербургский журнал электроники*. 1997. №2. С.40-42.
2. Синкевич В.Ф. Физические основы обеспечения надежности мощных биполярных и полевых транзисторов. *Электронная промышленность*. 2003. №2. С.232-244.
3. *Understanding Power Transistors Breakdown Parameters*. Semiconductor Components Industries, LLC. 2017. 17 p.
4. Patent USA №20080228415. Ladbroke P., Goodship N. *Semiconductor testing instrument to determine safe operating area*. Application Date: 08.03.2006. Publication Date: 18.09.2008. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/cd/f5/c2/435d32b4fc79f9/US20080228415A1.pdf>
5. Гусев В.А., Капранов И.Ю. Неразрушающий метод контроля образования «горячих» областей в структуре транзистора. *Вестник СевГТУ. Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр.* Севастополь. 2008. №93. С.106-109.
6. Сергеев В.А., Дулов О.А., Куликов А.А. Контроль однородности токораспределения в биполярных транзисторах по зависимости коэффициента внутренней обратной связи от коллекторного напряжения. *Известия вузов. Электроника*. 2009. №2. С.10-16.
7. Сергеев В.А., Куликов А.А., Тарасов Р.Г., Тетенькин Я.Г. Установка для измерения напряжения шнурования тока в структурах мощных ВЧ- и СВЧ транзисторов. *Автоматизация процессов управления*. 2017. №3. С.96-102.

8. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Shorin A.M. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices. *Microelectronics Reliability*. 2018. V.80. P.205-212. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.11.024>

Для цитирования:

Сергеев В.А., Козликова И.С., Литвинов К.А., Тарасов Р.Г., Куликов А.А. Температурная зависимость напряжения шнурования тока в мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.6.7>