УДК 621.3.038

Д.В. Озеркин, С.А. Русановский

Методология моделирования температурной стабильности резисторных блоков Б19К в SPICE-подобных симуляторах

Приведена методология моделирования температурной стабильности резисторных блоков Б19К в программном комплексе Cadence OrCAD. Показан характер температурной зависимости сопротивления резистивных элементов на примере шести образцов резисторных блоков. Определены необходимые и достаточные физические параметры для синтеза адекватной SPICE-модели с позиции температурной стабильности. Проведено тестовое схемотехническое моделирование одного из образцов резисторного блока Б19К.

Ключевые слова: температурная стабильность, бортовая радиоэлектронная аппаратура, температурный коэффициент сопротивления, резисторный блок, SPICE модель, OrCAD.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-49-54

Одним из показателей качества космических аппаратов и систем, требования к которым постоянно возрастают, является срок активного существования [1]. На значение срока активного существования влияют различные факторы, среди которых существенное значение имеет температурный режим функционирования, в частности температурная стабильность радиоэлектронной аппаратуры.

В номенклатуре ЭРИ, разрешенных к применению в бортовой космической радиоаппаратуре, достаточно распространены резисторные блоки с планарными выводами семейства Б19К. Блоки Б19К мощностью рассеяния до 1 Вт предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного токов и в импульсных режимах. В зависимости от конструкции и электрической принципиальной схемы блоки изготавливают одного типа, трех видов и тридцати четырех вариантов [2].

Цель настоящего исследования – совершенствование методологии синтеза адекватных математических моделей резисторных блоков Б19К с позиции температурной стабильности.

Задачи исследования:

- установление законов изменения температурного коэффициента сопротивления для семейства резисторных блоков Б19К;
- выделение физических параметров резисторных блоков Б19К, необходимых и достаточных для синтеза SPICE-модели;
- тестовое схемотехническое моделирование резисторного блока Б19К.

В работах отечественных ученых В.Н. Леухина, Ю.В. Кандырина, В.Г. Спирина и др. рассматривались вопросы проектирования и технологии пленочных резисторных блоков. Так, в [3] проведен анализ влияния различных видов подгонки величины сопротивления и последующих технологических операций на стабильность сопротивления толстопленочных резисторных блоков типа Б19М. В [4] рассмотрена методика и принципы построения САПР резисторных сборок для промышленного и частного применения. Работа [5] посвящена исследованию влияния адгезионного слоя на температурную стабильность тонкопленочного резистора. Однако ме-

тодологические вопросы синтеза адекватных математических моделей резисторных блоков с позиций температурной стабильности в должной мере еще не исследованы.

Широко распространена классическая методика экстракции параметров SPICE-моделей по справочным данным, представленным в табулированном или графическом виде [6]. К достоинствам методики можно отнести простоту реализации, экономию временных ресурсов и отсутствие значимых материальных затрат. Но применительно к задачам синтеза SPICE-моделей резисторных блоков с позиций температурной стабильности указанная классическая методика плохо применима по следующим причинам:

- отсутствие в известных SPICE-симуляторах программного средства синтеза моделей резистора;
- сведения в справочной литературе по температурным коэффициентам сопротивления (ТКС), как правило, отражают максимально допустимые (предельные) значения, не совпадающие с реальными значениями образцов;
- отсутствие в справочной литературе информации о трендах температурной зависимости сопротивления.

В настоящей работе предлагается методология создания SPICE-моделей резисторных блоков, основанная на следующих основных этапах:

1. Экспериментальное исследование температурной зависимости сопротивления каждого резистивного элемента резисторного блока.
2. Группировка температурных зависимостей по критерию сходственности и подобия.
3. Усреднение группированных температурных зависимостей.
4. Установление линейных и нелинейных ТКС.

Для исследования были отобраны две партии однотипных блоков Б19К производства ОАО «Контакт» (рис. 1):

1. Б19К1-1-1 $\kappa\text{Ом} \pm 10\%$ ОЖ0.206.018ТУ. Приемка «9» – изделия категории качества «ОС».
2. Б19К2-100 $\text{Ом} \pm 5\%$ ОЖ0.206.018ТУ. Приемка «9» – изделия категории качества «ОС».

ОАО «Контакт» (в прошлом Марийский завод радиодеталей) основано в 1964 г. и всегда позицио-

нировалось как специализированное предприятие по изготовлению проволочных переменных и постоянных резисторов [7].

Рис. 1. Резисторные сборки с планарными выводами семейства Б19К: Б19К1-1-1 кОм – а; Б19К2-100 Ом – б

Резисторные блоки, помимо номиналов и допусков, отличаются также электрической схемой. Так, блок Б19К1-1-1 кОм представляет собой семь независимых (не связанных между собой) резисторов (рис. 2, а). Блок Б19К2-100 Ом содержит восемь резисторов. В этом блоке реализованы внутреннее соединение одного из полюсов каждого резистора в общий узел и внешний вывод этого узла под номером 9 (рис. 2, б). Блоки Б19К изготавливаются по толстопленочной технологии с элементами, резистивными на основе рутения и стекла.

Рис. 2. Схемы электрические резисторных сборок Б19К: Б19К1-1-1 кОм – а; Б19К2-100 Ом – б

Первая часть методологии направлена на проведение измерений температурной зависимости сопротивления резисторных сборок Б19К. Выбрано 6 образцов резисторных сборок из разных партий, причем 3 образца Б19К1-1-1 кОм и 3 образца Б19К2-100 Ом. Для измерений использовалась экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 3.

Основа экспериментальной установки – комплекс для температурных испытаний ЭРИ ThermoStream TP04310A. Комплекс TP04310A специально разработан для быстрых, качественных и точных испытаний печатных плат, электронных компонентов и модулей [8]. Принцип работы комплекса построен на температурном воздействии сжатого воздуха с большим расходом на испытываемый образец (микросхему или печатную плату). Вся

остальная неиспытываемая поверхность объекта накрывается защитным термоизолирующим полотном (держатель термоизолирующий). Большой расход воздуха и давление позволяют комплексу менять температуру на образце за считанные секунды в очень широком диапазоне. Этот диапазон температур шире, чем у любых стандартных климатических камер. Главным преимуществом комплекса TP04310A является очень высокая точность контроля температуры ($\pm 0,1$ °C), этот параметр превышает показатели самых качественных климатических камер.

Рис. 3. Структурная схема измерительной установки

Измерения сопротивления образцов при разных температурах осуществляется измерителем RLC, прецизионным GW Instek LCR-821. Степень погрешности аппарата низка (0,1%), а надежность выгодно выделяет именно эту модель среди всех приборов такого рода [9].

Результаты измерений представлены в графическом виде (рис. 4, 5). Каждая координатная плоскость соответствует определенному образцу резисторного блока Б19К. На координатной плоскости отображается температурная зависимость сопротивления для всех резистивных элементов, входящих в блок. Диапазон изменения температуры в эксперименте от -60 до $+80$ °C, что соответствует предельным значениям пониженной и повышенной температуры по справочной документации на резисторный блок [2].

Проведем качественный анализ экспериментальных данных шести образцов. Температурные зависимости сопротивления блоков Б19К1-1-1 кОм отличаются разнообразием трендов (рис. 4). В зависимости от принадлежности к партии резисторных блоков резистивные элементы имеют в пределах одного блока: разнонаправленные тренды (образец №1) ТКС, положительный тренд ТКС (образец №2), отрицательный тренд ТКС (образец №3, за исключением резистора R3). В [3] приводится объяснение этому факту: технологическая операция пайки решетки ($420-440$ °C) при изготовлении резисторных блоков является дестабилизирующим фактором, влияющим на повторяемость параметров. В целом функции ТКС всех трех образцов имеют слабо выраженный нелинейный закон изменения. Наиболее нелинейность выражена у ТКС образца №3, наименьшая нелинейность – у образца №2.

Рис. 4. Зависимость температурного коэффициента сопротивления сборок Б19К1-1-1 кОм: образец 1 – а; образец 2 – б; образец 3 – в

Температурные зависимости сопротивления резисторных блоков Б19К2-100 Ом (рис. 5) классически правильные. В области низких температур наблюдается отрицательный тренд ТКС, в области высоких температур – положительный тренд ТКС. Качественный анализ зависимостей позволяет предположить квадратичный характер функции. Минимум функции ТКС достигает при $T = -25^\circ\text{C}$. Наиболее нелинейность выражена у ТКС образца №6, наименьшая нелинейность – у образца №4.

Для образцов №2, 3, 4, 5, 6 функции ТКС в пределах одного резисторного блока являются сходственными и подобными. Представим ТКС первого резистивного элемента i -го образца как функцию от температуры в виде $y_{i1} = f(T)$. Тогда из экспериментальных зависимостей видно, что ТКС всех резистивных элементов i -го образца будут:

$$\begin{cases} y_{i1} = f(T); \\ y_{i2} = f(T) + a_2; \\ y_{i3} = f(T) + a_3; \\ \dots \\ y_{in} = f(T) + a_n, \end{cases} \quad (1)$$

где n – количество резистивных элементов в образце; a – коэффициент параллельного переноса.

Рис. 5. Зависимость температурного коэффициента сопротивления сборок Б19К2-100 Ом: образец 4 – а; образец 5 – б; образец 6 – в

Следовательно, будет достаточно найти параметры нелинейности только для одной функции $f(T)$ в пределах каждого резисторного блока, а коэффициент a определять технологическим разбросом сопротивления относительно номинального значения. Аналогично можно поступить с образцом №1, если независимо рассматривать в этом блоке две группы ТКС – с отрицательным и с положительным трендом.

Дальнейший количественный анализ и аппроксимацию экспериментальных данных проведем для образца №6 Б19К2-100 Ом. Экспериментальные значения системы (1) для образца №6 преобразуем в усредненный эквивалент (рис. 6):

$$y_{6\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_{j=1}^n y_{6j}}{n} = \frac{\sum_{j=1}^8 y_{6j}}{8}.$$

Линейная аппроксимация экспериментальных данных потребуется для ориентировочной оценки ТКС. Квадратичная аппроксимация будет служить для более точного соответствия с экспериментальными данными (рис. 7).

Матричное представление линейной модели имеет вид

$$y = Xb + \varepsilon,$$

где X – матрица экспериментальных значений; ε – случайная ошибка линейной модели.

Рис. 6. Усредненная температурная зависимость сопротивления для образца №6 резисторной сборки Б19К2-100 Ом

Тогда вектор оценок $\hat{y}$ и вектор остатков e регрессии соответственно равны:

$$\begin{aligned}\hat{y} &= Xb; \\ e &= y - \hat{y} = y - Xb.\end{aligned}$$

Рис. 7. Аппроксимация температурной зависимости: линейный полином – 1; квадратичный полином – 2; экспериментальная зависимость – 3

Сумма квадратов остатков регрессии будет равна $D = e^T e = (y - Xb)^T (y - Xb)$.

Дифференцируя эту функцию по вектору параметров b и приравняв производные к нулю, получим систему уравнений:

$$(X^T X)b = X^T y.$$

Решение этой системы уравнений позволяет найти коэффициенты линейной модели b_0, b_1 :

$$b_{\text{лин}} = (X^T X)^{-1} X^T y = \begin{cases} b_0^{\text{лин}} = 99,884; \\ b_1^{\text{лин}} = 2,43 \cdot 10^{-3}. \end{cases}$$

Аналогичным образом для квадратичной модели:

$$b_{\text{кв}} = (X^T X)^{-1} X^T y = \begin{cases} b_0^{\text{кв}} = 99,821; \\ b_1^{\text{кв}} = 1,72 \cdot 10^{-3}; \\ b_2^{\text{кв}} = 3,55 \cdot 10^{-5}. \end{cases}$$

В результате полиномы имеют вид

$$R(T) = 99,884 + 2,43 \cdot 10^{-3} \cdot T; \quad (2)$$

$$R(T) = 99,821 + 1,72 \cdot 10^{-3} \cdot T + 3,55 \cdot 10^{-5} \cdot T^2. \quad (3)$$

Температурный коэффициент сопротивления, рассчитанный по линейной модели, составляет

$$TKC = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta T} = \frac{0,342}{100 \cdot 140} = 2,443 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Заметим, что полученный ТКС на порядок меньше заявленного значения в справочной документации [2].

Среднеквадратическое отклонение для квадратичной модели по сравнению с экспериментальными данными составляет $\sigma = 0,011$ Ом. Полученное значение σ следует считать приемлемым, поскольку относительная погрешность составляет

$$\delta = \frac{\sigma}{R} \cdot 100\% = \frac{0,011}{100} \cdot 100 = 0,011\%.$$

Дальнейшее повышение степени полинома аппроксимации не требуется.

Известно [10], что температурная зависимость в SPICE-модели резистора описывается выражением вида

$$R(T) = R_0(1 + TC1 \cdot (T - T_0) + TC2 \cdot (T - T_0)^2), \quad (4)$$

где R_0 – номинальное значение сопротивления; $TC1$, $TC2$ – линейный и квадратичный ТКС; T_0 – температура окружающей среды.

Сравнивая уравнения (3) и (4), получим выражения для вычисления $TC1$ и $TC2$:

$$TC1 = \frac{b_1^{\text{кв}}}{b_0^{\text{кв}}} = \frac{1,72 \cdot 10^{-3}}{99,821} = 17,229 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$TC2 = \frac{b_2^{\text{кв}}}{b_0^{\text{кв}}} = \frac{3,55 \cdot 10^{-5}}{99,821} = 355,591 \cdot 10^{-9} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Полученная экспериментальная информация позволяет перейти к следующему этапу исследования – схемотехническому моделированию. Для этого воспользуемся программным комплексом OrCAD v.16 [11]. Исходное представление резисторного блока Б19К2-100 Ом в программном комплексе OrCAD возможно двумя способами. Первый способ предполагает изображение условного графического обозначения (УГО) резисторного блока (рис. 8, а) вместе со схемой замещения (рис. 8, б). Схема замещения характеризуется как подчиненная (с иерархической точки зрения) по отношению к УГО. Каждый резистивный элемент в схеме замещения помимо номинального значения сопротивления имеет свойства:

- $TOLERANCE = 5\%$ – технологический разброс параметров согласно справочной информации [2];
- $TC1 = 17,229 \cdot 10^{-6}$ – линейный ТКС;
- $TC2 = 355,591 \cdot 10^{-9}$ – квадратичный ТКС.

Второй способ замещения УГО состоит в текстовом описании макромоделли резисторного блока на языке SPICE (рис. 9, б). Схемы включения резисторного блока на рис. 8, а и 9, а идентичны. Напряжение 1 В подано на резистивный элемент R1, остальные резистивные элементы соединены между собой.

Условия схемотехнического моделирования в OrCAD:

- температура окружающей среды $T_0 = 0^\circ\text{C}$;
- диапазон варьирования источника напряжения $U_{\text{BX}} = 0 \dots 10 \text{ В}$;
- шаг варьирования источника напряжения $\Delta U_{\text{BX}} = 0,1 \text{ В}$;
- диапазон изменения температуры $T = -60 \dots +80^\circ\text{C}$;
- шаг изменения температуры $\Delta t = 10^\circ\text{C}$;
- значение сопротивления резистивного элемента $R1 = 99,821 \text{ Ом}$ [соответствует найденному значению b_0 в уравнении (3)].

Графический постпроцессор Probe программно-го комплекса OrCAD не позволяет в явном виде получать температурную зависимость сопротивления $R = f(T)$. Однако на основе многовариантного анализа $I_{R1} = f(U_{R1}, T)$ имеется возможность построения целевой функции [12]:

$$x/\text{YatX}(y, x), \quad (5)$$

где **YatX** – шаблон целевой функции в постпроцессоре Probe, находит значение функции y при заданном значении x . Для нашего исследования $y = I_{R1}$; $x = 5 \text{ В}$ – середина диапазона значений U_{R1} .

Рис. 8. Первый способ представления резисторного блока: схема включения резисторного блока – а; эквивалентная схема замещения УГО резисторного блока – б

Рис. 9. Второй способ представления резисторного блока: схема включения резисторного блока – а; текстовое описание резисторного блока – б

Применение целевой функции (5) к семейству характеристик $I_{R1} = f(U_{R1}, T)$ позволяет представить в графическом виде искомую зависимость $R_{\text{МОД}} = f(T)$. Для сравнения на одной координатной плоскости (рис. 10) представлены усредненная экспериментальная зависимость $R_{\text{ЭКС}} = f(T)$ и импортированная из постпроцессора Probe зависимость $R_{\text{МОД}} = f(T)$ на основе целевой функции (5). Можно видеть, что характеристики 1 и 2 на рис. 10 попарно совпадают с характеристиками 3 и 2 на рис. 7. Следовательно, разработанная SPICE-модель резисторного блока Б19К2-100 Ом адекватно отражает поведение образца №6.

В схеме замещения (см. рис. 8, б) присвоим каждому резистивному элементу значение сопротивления, совпадающее с экспериментальными значениями образца №6 при $T_0 = 0^\circ\text{C}$:

$R1 = 99,792 \text{ Ом}$; $R2 = 99,812 \text{ Ом}$; $R3 = 99,752 \text{ Ом}$;
 $R4 = 99,860 \text{ Ом}$; $R5 = 99,866 \text{ Ом}$; $R6 = 99,889 \text{ Ом}$;
 $R7 = 99,897 \text{ Ом}$; $R8 = 99,675 \text{ Ом}$.

Рис. 10. Сравнение температурных зависимостей сопротивления: усредненная экспериментальная зависимость – 1; результат моделирования в OrCAD – 2

Схемотехническое моделирование с указанными начальными условиями приведет к имитации температурной зависимости образца №6 по всем

резистивным элементам (рис. 11). Наблюдается аналогия поведения резисторного блока на рис. 5, в.

Рис. 11. Моделирование температурной зависимости всех резистивных элементов образца №6

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенная методология моделирования температурной стабильности резисторных блоков Б19К позволяет имитировать температурные зависимости реальных образцов с высокой точностью. Относительная погрешность результатов экспериментальных измерений и результатов моделирования ТКС для испытуемого образца №6 составило 0,011%.

2. Применение классической методики синтеза SPICE-моделей по справочным данным приводит к завышенным на порядок значениям ТКС. Так, для испытуемого образца №6 справочные данные указывают предельное значение ТКС, равное $\pm 350 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [2], в то время как реальное значение линейного ТКС составляет $24,43 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

3. Наличие в семействе резисторных блоков Б19К тридцати четырех вариантов исполнения приводит к множеству конкретных реализаций SPICE-моделей. В связи с этим перспективным способом усовершенствования предложенной методологии является создание программного средства «Генератор SPICE-моделей резисторных блоков Б19К».

4. Недостатком предложенной методологии моделирования температурной стабильности резисторных блоков следует признать требование наличия высокопроизводительного измерительного оборудования [8]. Так, для получения экспериментальных данных по образцу №6 потребовалось 120 частных измерений: 8 резистивных элементов при 15 значениях температуры.

5. Предложенная методология может быть распространена на другие семейства резисторных блоков отечественного и зарубежного производства.

Литература

1. ГОСТ Р 56526–2015. Требования надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://standartgost.ru/g/ГОСТ_Р_56526–2015, свободный (дата обращения: 30.04.2017).

2. Резисторы. Группы 6010, 6020, 6060. РД 11 0856.3–93: Сборник справочных листов. – СПб.: РНИИ «Электронстандарт», 1994. – 224 с.

3. Леухин В.Н. Анализ влияния технологических операций на выходные показатели качества резистивных сборок / В.Н. Леухин, А.В. Андрейкин, А.А. Нагаев // Вестник МарГТУ. – 2008. – № 2. – С. 56–62.

4. Хла М. САПР резистивных сборок / М. Хла, Ю.В. Кандырин // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 6(185). – С. 63–70.

5. Спирин В.Г. Сопротивление контактов тонкопленочного резистора // Технология и конструирования в электронной аппаратуре. – 2008. – № 5(77). – С. 20–23.

6. Златин И. Создание и редактирование моделей в OrCAD 15.7 (программа Model Editor) // Компоненты и технологии. – 2007. – № 7. – С. 149–154.

7. Официальный сайт ОАО «Контакт» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zavod-kontakt.ru>, свободный (дата обращения: 21.02.2017).

8. TP04310A. Mobile Temperature System for Testing Components, Hybrids, Parts, Modules, Subassemblies and Printed Circuit Boards at Precise Temperature [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Temprotronic-TP04310A-Datasheet.pdf>, свободный (дата обращения: 21.02.2017).

9. LCR-800 Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gwinstek.com/en-global/products/LCR_Meters/Benchtop_LCR_Meters/LCR-800, свободный (дата обращения: 21.02.2017).

10. Nagel L.W. SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) / L.W. Nagel, D.O. Pederson. – Berkeley: University of California, 1973. – 65 p.

11. OrCAD Capture Tutorial [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.orcad.com/resources/orcad-tutorials>, свободный (дата обращения: 30.04.2017).

12. PSpice Tutorials [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uta.edu/ee/hw/pspice/>, свободный (дата обращения: 30.04.2017).

Озеркин Денис Витальевич

Канд. техн. наук, доцент каф. конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР) ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 70-15-22
Эл. почта: ozerkin.denis@yandex.ru

Русановский Сергей Александрович

Канд. техн. наук,
генеральный директор АО «НПП «Полюс», Томск
Тел.: +7 (382-2) 55-46-94
Эл. почта: rusa10@yandex.ru

Ozerkin D.V., Rusanovskiy S.A.

Methodology for modeling the temperature stability of the B19K resistor blocks in SPICE simulators.

The article presents a methodology for modeling the temperature stability of the B19K resistor blocks in the Cadence OrCAD. The character of the temperature dependence of the resistance of each block resistive elements is shown. The necessary and sufficient physical parameters for the synthesis of adequate SPICE model from the perspective of temperature stability are defined. A test circuit simulation of a resistor block patterns B19K is done.

Keywords: temperature stability, on-board radio-electronic equipment, temperature coefficient of resistance, the resistor unit, the SPICE model, OrCAD.