

Уточненная модель низкоомных пленочных резисторов с гребенчатой структурой

В.Д. Садков, А.В. Лопаткин

*Институт радиоэлектроники и информационных технологий
Нижегородского государственного технического университета
им. Р.Е. Алексеева*

Методами конечных элементов и конформных отображений построены аналитические модели низкоомных и ультранизкоомных пленочных резисторов основных типов гребенчатых (встречно-штыревых) структур при произвольных отношениях удельных поверхностных сопротивлений резистивной и проводящей пленок. В результирующем сопротивлении учтены сопротивления электродов гребенчатой структуры и объединяющих электродов, а также дополнительное сопротивление, связанное с переходом тока из проводящей пленки в резистивную и наоборот. Выявлены условия, при которых граница раздела пленок может считаться эквипотенциальной. Построена схема замещения низкоомных гребенчатых резисторов, используемых в качестве датчиков тока в схемах стабилизации, контроля, тепловой и токовой защиты.

Ключевые слова: сопротивление низкоомного пленочного резистора с гребенчатой структурой; контактное сопротивление; схема замещения пленочного резистора.

More Precise Model of Low Impedance Film Resistors with Comb Structure

V.D. Sadkov, A.V. Lopatkin

*Institute of Radio Electronics and Information Technologies
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod*

Using the methods of finite elements and conformal mappings the analytical models of the low resistance film resistors of the main types of comb (interdigital) structures with arbitrary relations of the specific resistances of resistive and conductive films have been built. In the resultant resistance the resistances of comb-like structure electrodes and connecting electrodes as well as additional resistance associated with the transmission of current from the conductive film to the resistive one and vice versa have been taken into account. The conditions, under which the boundary between the films can be considered as equipotential have been revealed. For this case the calculation has been performed by conformal mappings. The circuit of substitution of the low-impedance comb resistors, used as the current sensors in schemes of stabilization, control, thermal and current protection, has been constructed.

Keywords: resistance of low-impedance film resistor of rectangular and comb structure; contact resistance; equivalent circuit of the film resistor.

Введение. Низкоомные и ультранизкоомные пленочные резисторы с высокой температурной и временной стабильностью, низким уровнем шумов, высокими частотно-мощностными характеристиками и малой погрешностью воспроизведения номиналов широко используются в качестве датчиков тока в схемах стабилизации, контроля, тепловой и токовой защиты [1–3]. Разработка таких резисторов требует не только перехода к более сложным топологиям, но и тщательного учета их контактных сопротивлений, включающих сопротивление собственно электродов контактов и дополнительное сопротивление области перехода тока из проводящей пленки в резистивную и наоборот [4, 5]. Последнее обусловлено резкой неравномерностью тока вблизи области перехода как по длине, так и по толщине пленок [6]. Вычисление данных параметров в работах [4, 5] проведено либо с неприемлемой для практики точностью, либо по простейшим соотношениям без учета двумерной в общем случае структуры поля потенциалов и токов.

В настоящей работе с использованием методов конечных элементов и конформных отображений построены аналитические модели низкоомного и ультранизкоомного пленочного резистора с гребенчатой структурой с учетом объединяющих электродов и дополнительного сопротивления, связанного с переходом тока из проводящей пленки в резистивную и наоборот.

Традиционная гребенчатая структура [5] представлена на рис.1,а. Структура на рис.1,б позволяет несколько продвинуться в область малых номиналов сопротивлений.

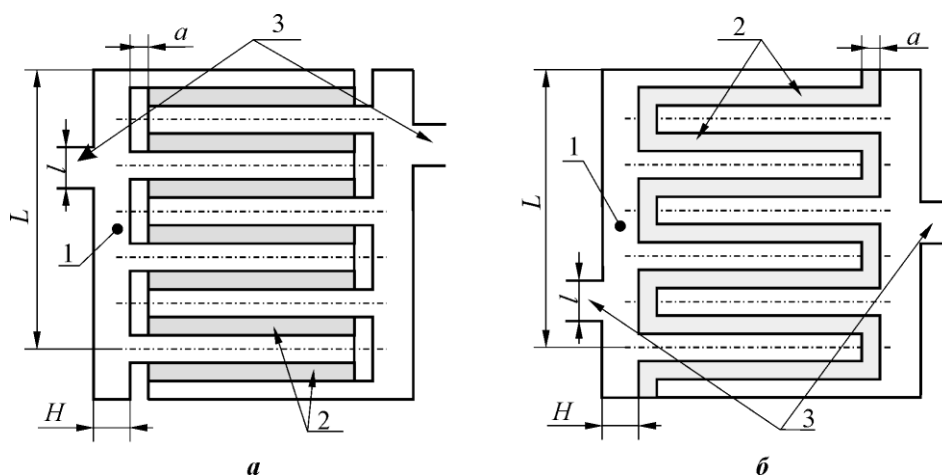


Рис.1. Структура пленочных гребенчатых резисторов в ГИС:
а – низкоомный; б – ультранизкоомный (1 – проводящие контакты;
2 – резистивная пленка; 3 – контакты подключения)

Искомое сопротивление резистора включает в себя сопротивление собственно гребенчатой структуры, сопротивление электродов объединяющих контактов и дополнительное сопротивление области перехода тока из проводящей пленки в резистивную и наоборот. Положение контактов подключения относительно электродов проводящих контактов произвольное.

Сопротивление собственно гребенчатой структуры образовано соединением базовых элементов (рис.2).

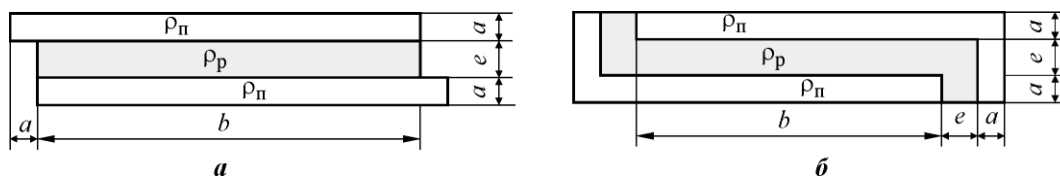


Рис.2. Базовые элементы структур пленочных гребенчатых резисторов: а – низкоомный; б – ультранизкоомный

Размер L через параметры базовых элементов определяется как

$$L = ne + (n + 1)a/2,$$

где n – число резистивных полосок.

Для обеспечения эквипотенциальности на границах базовых элементов размер H должен выбираться из условия [7]:

$$H/L \geq 0,7 + 0,057/(1,3 - l/L) - 0,08/(1,3 - l/L)^2.$$

Расчет сопротивления базовых элементов. Методом конечных элементов рассчитаны сопротивления R_6 базовых элементов (см. рис.1) для широкого диапазона отношений параметров ($3 \leq b/a \leq 30$, $0,25 \leq e/a \leq 5$, $30 \leq \Omega = \rho_p / \rho_n \leq 5\,000$, где ρ_p , ρ_n – удельное поверхностное сопротивление резистивной и проводящей пленок соответственно).

Выяснено, что при достаточно больших Ω ($\Omega \approx 400$) граница проводящей и резистивной пленок может быть неэквипотенциальной (рис.3). Это не позволяет рассматривать в базовом элементе области электродов контактов и резистивной пленки и их сопротивления $R_{6,э}$ и $R_{6,р}$. Для общности результатов сопротивление проводящей пленки ρ_n принимаем равным 1 Ом/□. Значения $R_{6,э}$ и $R_{6,р}$ (существующие при определенных условиях отдельно) для заданного Ω и конкретного ρ_n уменьшаются во столько раз, во сколько ρ_n меньше 1 Ом/□.

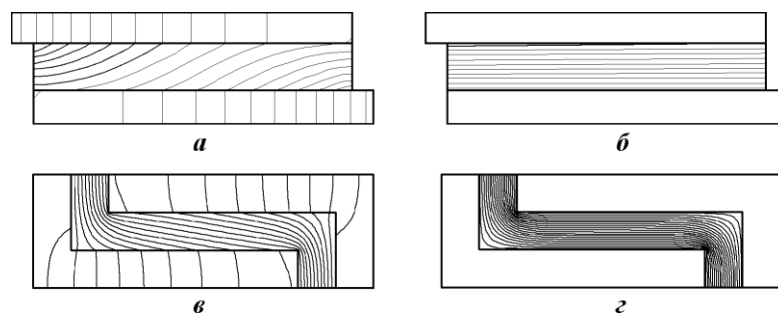


Рис.3. Структура поля потенциалов в базовых элементах при $\Omega = 100$ (а, в) и 5000 (б, г)

Соотношения, связывающие параметры b/a , e/a и Ω , при выполнении которых граница пленок с погрешностью менее 2% может считаться эквипотенциальной, имеют вид:

- для топологии низкоомного резистора (см. рис.2,а)

$$b/a \leq 0,21(e/a)^{0,52} \Omega^{0,5},$$

- для топологии ультранизкоомного резистора (см. рис.2,б)

$$b/a \leq (0,06 - 0,006e/a) \Omega^{(0,05e/a + 0,61)}.$$

(1)

Если при построении инженерной методики сопротивление резистивной пленки $R_{б,р}$ вычислять по стандартным формулам для базовых элементов структур низкомного и ультранизкомного резистора соответственно

$$R_{б,р} = \rho_p \frac{e}{b} = \Omega \frac{e}{b},$$

$$R_{б,р} = \rho_p \frac{1}{1 + (2 + b/a)/(e/a)} = \frac{\Omega}{1 + (2 + b/a)/(e/a)},$$
(2)

то сопротивление двух контактов определяется в виде

$$R_{б,к} = R_{б,р} - R_{б,п} = 2(R_{б,э} + R_{б,к}) \text{ или } R_{б,к} = R_{б,р} + 2(R_{б,э} + R_{б,к}).$$
(3)

Здесь $R_{б,}$, $R_{б,э}$ и $R_{б,к}$ – полное сопротивление базового элемента, сопротивление его электродов и сопротивление, обусловленное переходом тока из проводящей пленки в резистивную и наоборот. Результаты расчетов $R_{б,э}$ могут быть представлены в аналитическом виде с погрешностью менее 3 %.

Для топологии рис.2,а (сопротивление контактов подключения $2\rho_{п}$ исключено)

$$R_{б,э} = [k_e \ln \Omega + c_e](b/a) + m_e \ln \Omega + n_e,$$
(4)

$$k_e = -0,001 \ln(e/a) + 0,08, \quad c_e = 0,011 \ln(e/a) + 0,27,$$

$$m_e = 0,013 \ln(e/a) - 0,047, \quad n_e = -0,104 \ln(e/a) + 0,442.$$

Для топологии рис.2,б

$$R_{б,э} = [\alpha(b/a)^2 + \beta(b/a) + \gamma] \ln \Omega + \delta(b/a) + \tau,$$
(5)

$$\alpha = -0,0004(e/a) + 0,001, \quad \beta = 0,006(e/a)^2 + 0,005(e/a) + 0,03,$$

$$\gamma = 0,127(e/a)^2 - 0,256(e/a) + 0,408,$$

$$\delta = -0,042(e/a)^2 + 0,106(e/a) + 0,23, \quad \tau = 0,35(e/a)^2 + 0,007(e/a) + 0,26.$$

Для сопротивления $R_{б,к}$ топологий рис.2 получаем с учетом [7, 8] и принятого $\rho_{п} = 1 \text{ Ом}/\square$

$$R_{б,к} = \frac{2 \ln 2}{\pi a} \frac{\rho_{вп} + \rho_{вр}}{A} = \frac{2 \ln 2}{\pi a} \frac{\rho_{п} \Delta_{п} + \rho_{р} \Delta_{р}}{A} = \frac{2 \ln 2}{\pi a} \frac{(1 + \Omega \Delta_{р} / \Delta_{п})}{A},$$
(6)

$$A = \begin{cases} b/a & (\text{см. рис.2,а}), \\ b/a + e/a + 2 & (\text{см. рис.2,б}), \end{cases}$$

где $\rho_{вп}$, $\Delta_{п}$ и $\rho_{вр}$, $\Delta_{р}$ – удельные объемные сопротивления и толщины проводящей и резистивной пленок.

Таким образом, получены все составляющие сопротивления $R_{б}$ по (2)–(6).

Поскольку работа мощных низкоомных резисторов связана с протеканием через них больших токов, в качестве контактов используют проводящие пленки достаточно большой толщины. При этом отношение удельных поверхностных сопротивлений резистивной и проводящей пленок $\Omega > 10^3$, граница пленок практически эквипотенциальна. Это позволяет раздельно рассматривать и рассчитывать методом конформных отображений сопротивления контактов и резистивной пленки.

Для сопротивления электрода базового элемента структуры низкоомного резистора с учетом $b \gg a$ получаем, отображая (рис.4) прямоугольник в плоскости Z на верхнюю полуплоскость W с помощью функции $w = \operatorname{sn}[zK/(a/2), k]$ при $K'/K=(b+a)/(a/2)$ [9]:

$$R_{6.3} = \rho_{\Pi} \frac{K(\operatorname{th}\pi/2)}{K'(\operatorname{th}\pi/2)}. \quad (7)$$

Здесь использованы обозначения, принятые в теории эллиптических функций и полных эллиптических интегралов.

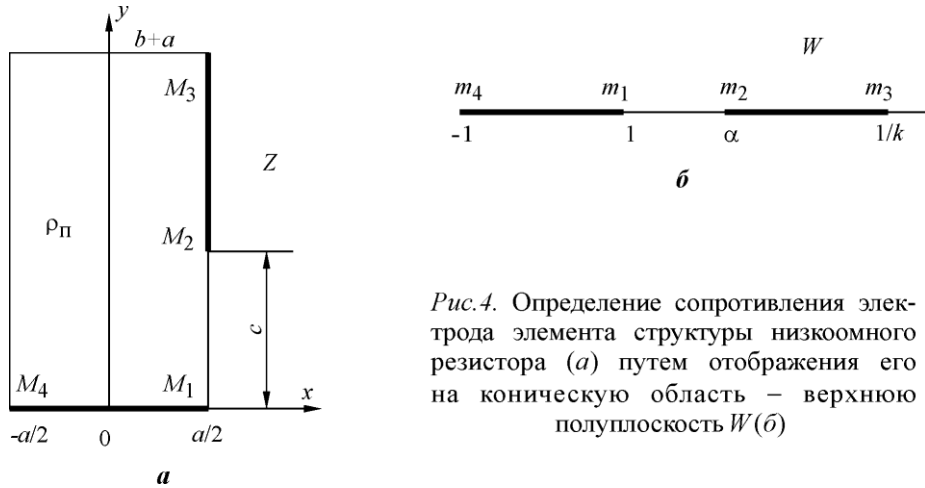


Рис.4. Определение сопротивления электрода элемента структуры низкоомного резистора (а) путем отображения его на коническую область – верхнюю полуплоскость W (б)

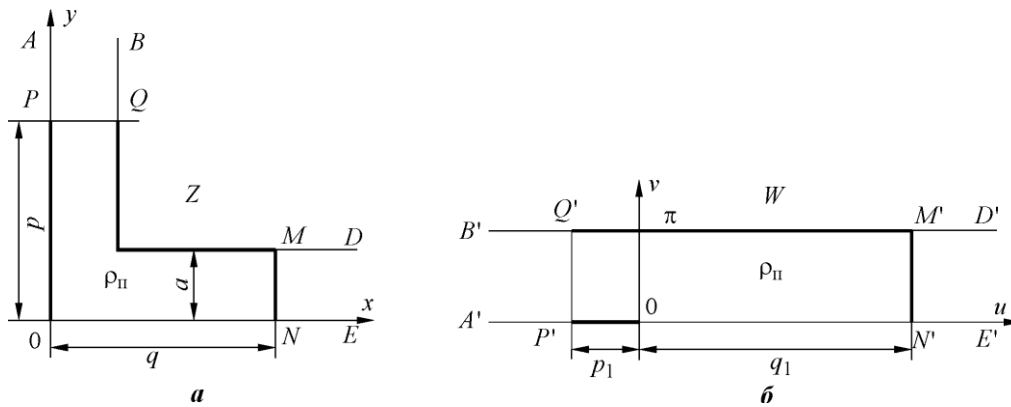


Рис.5. Определение сопротивления электрода элемента структуры низкоомного резистора путем отображения полосы (б) на полосу с изгибом (а)

Расчет сопротивления электрода базового элемента структуры низкоомного резистора проводим, отображая полосу в плоскости W (рис.5,б) на полосу с изгибом в плоскости Z (рис.5,а) с помощью функции [9]:

$$z = \frac{2\Delta}{\pi} \left[\operatorname{arctg} m + \frac{1}{2} \ln \frac{1+m}{1-m} \right], \quad m = \left[\frac{e^w - 1}{e^w + 1} \right]^{1/2}.$$

При этом $p_1 = (e + a)\pi/a - \pi/2 + \ln 2$, $q_1 = (b + a + e)\pi/(2a) - \pi/2 - \ln 2$. Масштабируя до прежней ширины электрода охватывающего контакта a , получаем для его размеров

$$p_{1m} = p_1 a / \pi = e + a/2 + (a/\pi) \ln 2, \quad q_{1m} = q_1 a / \pi = b + a/2 + e - (a/\pi) \ln 2. \quad (8)$$

Устанавливая масштабированный прямоугольник на рис.5,б, как на рис.4,а, аналогично получаем с учетом $p_{1m} + q_{1m} \gg a/2$

$$R_{6,3} = \rho_{\pi} \frac{K[\operatorname{th}(\pi p_{1m}/2a)]}{K'[(\operatorname{th}(\pi p_{1m}/2a))]} \quad (9)$$

Таким образом, при $\Omega > 10^3$ сопротивление базовых элементов низкоомного и ультранизкоомного резисторов вычисляются по соотношениям (2), (3), (5) – (9).

Расчет сопротивления объединяющего электрода. Сопротивление объединяющего электрода R_3 структуры ультранизкоомного резистора с учетом эквипотенциальности на границах базовых элементов вычисляется аналогично $R_{6,3}$ (d – размер, определяемый положением контакта подключения длиной l снизу по вертикали) [9]:

$$R_3 = \rho_{\pi} \frac{K(m)}{K'(m)}, \quad m = \operatorname{ch}\left(\frac{\pi d}{2H}\right) / \operatorname{ch}\left(\frac{\pi d+l}{2H}\right). \quad (10)$$

Перемещение электрода от середины к краю приводит к изменению $R_3 \sim$ в 1,5 раза. Полное сопротивление структуры ультранизкоомного резистора равно:

$$R = R_6/n + 2R_3, \quad (11)$$

где R_6/n – сопротивление n параллельно соединенных базовых элементов.

Формулу (11) также можно использовать для вычисления полного сопротивления низкоомной структуры (см. рис.1,а). В случае ультранизкоомной структуры (см. рис.1,б) расчет усложняется. Схему замещения электрода, объединяющего базовые элементы низкоомного резистора, представим в виде многополюсника (рис.6).

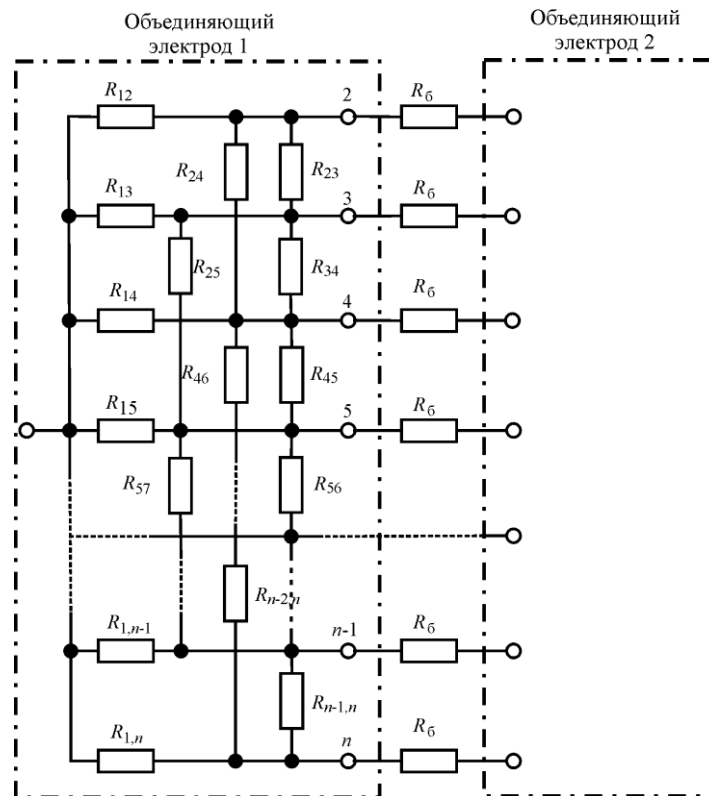


Рис.6. Схема замещения резистора с гребенчатой структурой

Параметры (сопротивления между объединяющим электродом и электродами базовых элементов, сопротивления между электродами самих базовых элементов) данного многополюсника можно определить путем отображения прямоугольника в плоскости Z (рис.7,а) на верхнюю полуплоскость W (рис.7,б) с помощью эллиптического синуса $w = \text{sn}[z/(L/2)K, k]$ при $K'/K=H/(L/2)$ [9].

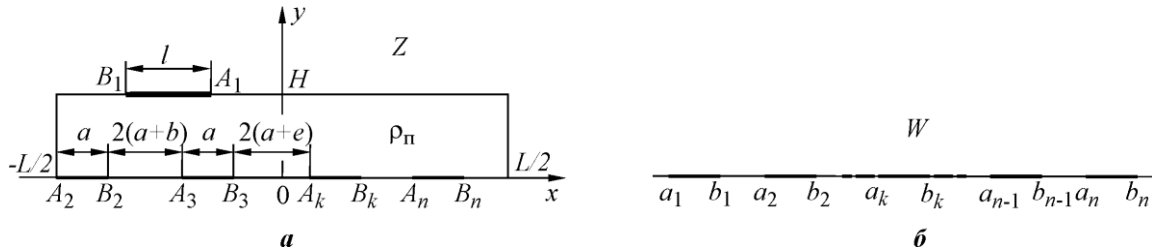


Рис.7. Отображение объединяющего электрода низкоомного резистора (а) на верхнюю полуплоскость W (б)

Координаты соответствующих точек определяются из соотношений:

$$a_i = \text{sn}[z_{A_i} K / (L/2), k], \quad b_i = \text{sn}[z_{B_i} K / (L/2), k].$$

Матрица сопротивлений $[R]$ задачи вычисляется следующим образом [9]:

$$R_{k,1} = \rho_{\pi} / (2X_{k,1}), \quad R_{k,n} = -\rho_{\pi} / (2X_{k,n-1}), \quad R_{k,p} = \rho_{\pi} / [2(X_{k,p} - X_{k,p-1})],$$

$$X_{k,j} = \det[E_{k,j}] / \det[F],$$

где n – число базовых элементов структуры; $k = 1, 2, 3, \dots, n$; $p = 2, 3, \dots, n-1$; $j = 1, 2, 3, \dots, n$.

Элементы матриц

$$[F] = \begin{bmatrix} F_{1,n-2} & F_{1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{1,0} \\ F_{2,n-2} & F_{2,n-3} & \cdot & \cdot & F_{2,0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ F_{n-1,n-2} & F_{n-1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{n-1,0} \end{bmatrix}, \quad [E_{k,j}] = \begin{bmatrix} F_{1,n-2} & F_{1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{1,0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ F_{j-1,n-2} & F_{j-1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{j-1,0} \\ E_{k,n-2} & E_{k,n-3} & \cdot & \cdot & E_{k,0} \\ F_{j+1,n-2} & F_{j+1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{j+1,0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ F_{n-1,n-2} & F_{n-1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{n-1,0} \end{bmatrix}$$

выражаются следующими гиперэллиптическими интегралами:

$$F_{k,m} = (-1)^k \int_{b_k}^{a_{k+1}} \frac{t^m dt}{\sqrt{R(t)}}, \quad E_{k,m} = (-1)^{k-1} \int_{a_k}^{b_k} \frac{t^m dt}{\sqrt{-R(t)}}, \quad (12)$$

$$R(t) = (t - a_1)(t - b_1)(t - a_2)(t - b_2) \dots (t - a_n)(t - b_n).$$

С помощью подстановок $t = x(b_k - a_k)/2 + (b_k + a_k)/2$ для $E_{k,m}$ и $t = x(a_{k+1} - b_k)/2 + (a_{k+1} + b_k)/2$ для $F_{k,m}$ интегралы в (12) приводятся к стандартному

интервалу интегрирования $(-1, 1)$ и вычисляются с использованием следующих квадратурных формул наивысшей алгебраической степени точности [10]:

$$\int_{-1}^1 \frac{g(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx \approx \frac{\pi}{N} \sum_{n=1}^N g\left(\cos \frac{2n-1}{2N} \pi\right).$$

Количество удерживаемых членов $N \geq (L/H)^2$.

Опыт показывает, что достаточно учесть между электродами только связи первого порядка (сопротивления между данным проводником i и соседними проводниками $i-1$ и $i+1$).

Аналогичным образом вычисляется матрица сопротивлений для другого объединяющего контакта. Результирующее сопротивление по полученной схеме замещения может быть вычислено с помощью любой программы схемотехнического моделирования.

Предложенная методика проверена экспериментально на образцах резисторов в габаритах 0805, 1206, 2010 и 2520 (контакты вдоль меньшей стороны) на диапазон 1–200 мОм как в тонкопленочном, так и в толстопленочном вариантах. Тонкопленочные резисторы выполнялись на подложке из нитрида алюминия с шириной резистивной и проводящей пленок в области гребенки 0,04–0,1 мм. Удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки, получаемой методом магнетронного распыления, составляло 1 Ом/□, проводящей пленки толщиной 3–60 мкм – 0,004–0,0002 Ом/□. Толстопленочные резисторы реализовывались с использованием двух слоев низкоомных паст Пр-0,05 (резистивная) и ПП-17 (проводящая) с шириной пленок в области гребенки 0,25 мм.

Заключение. В построенных математических моделях низкоомных и ультранизкоомных пленочных резисторов с гребенчатой структурой учтены сопротивления объединяющих контактов, электродов гребенчатой структуры и переходное сопротивление, обусловленное неравномерностью тока по длине и толщине пленок в области их контакта. Выявлено, что при выполнении условий эквипотенциальности границы проводящей и резистивной пленок сопротивления гребенчатых электродов и резистивной пленки можно рассматривать отдельно.

Отметим, что расчет пленочных чип-резисторов с гребенчатой структурой с охватывающими или планарными (с металлизацией нижней стороны подложки для посадки на радиатор) контактами проводится с учетом [8] аналогично.

Литература

1. *Седаков А.Ю., Смолин В.К.* Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления. – М.: Радиотехника, 2011. – 168 с.
2. *Лугин А.Н.* Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов. – Пенза: ИИЦ ПензГУ, 2008. – 288 с.
3. *Колпаков А.* Измерение тока в мощных импульсных преобразовательных устройствах // Электронные компоненты. – 2004. – № 2. – С. 77–83.
4. *Гельмутдинов А.Х., Ермолаев Ю.П.* Модели оценки сопротивления пленочных контактов и резисторов с распределенными параметрами. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2005. – 76 с.
5. *Спирин В.Г.* Сопротивление электродов тонкопленочного резистора // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 7. – С. 19–24.
6. *Лугин А.Н.* Наноразмерные эффекты в тонкопленочном контакте // Петербургский журнал электроники. – 2012. – № 1. – С. 41–45.
7. *Садков В.Д., Еремеев Ю.В., Якимов Д.Ю.* Методика расчета сопротивления прецизионного пленочного гантельного резистора // Изв. вузов. Электроника. – 2011. – № 3. – С. 44–49.
8. *Садков В.Д., Еремеев Ю.В., Старанчук П.Н.* Моделирование многослойного контакта прецизионного чип-резистора // Изв. вузов. Электроника. – 2014. – № 6 (110). – С. 14–21.

9. **Ямпури Н.П., Широков Л.В., Садков В.Д.** Современные вопросы радиоэлектроники с позиций теории аналитических функций. – Арзамас: АГПИ, 2014. – 209 с.
10. **Крылов В.И.** Приближенное вычисление интегралов. – М.: Наука, 1967. – 500 с.

Статья поступила
3 марта 2015 г.

Садков Виктор Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий в проектировании и производстве Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. *Область научных интересов:* моделирование пленочных структур ВЧ- и СВЧ-диапазонов.

Лопаткин Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий в проектировании и производстве Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. *Область научных интересов:* компьютерные технологии проектирования электронных средств. **E-mail:** lopatkin@nstuedu.com

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2016 г. в редакции с любого номера. Стоимость одного номера – 1000 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ, комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05. E-mail: magazine@miee.ru

<http://www.miet.ru/structure/s/894>