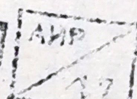


- 55 -

59



146 афз

коф

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕЦИЗИОННЫХ РЕЗИСТОРОВ

Инж. К. Я. БЕМБЕН, канд. техн. наук доц. А. Ф. ВИСОЦКИЙ,
канд. техн. наук ст. научн. сотр. А. И. ТИХОНОВ

Наличие распределенных индуктивностей и емкостей вызывает изменение сопротивления резисторов на повышенных частотах. Распределение потенциала и тока в резистивном элементе (РЭ) на повышенных частотах описывается системой уравнений Максвелла относительно скалярного и трех компонент векторного потенциала [1]. Следовательно, для каждого значения частоты при вычислении комплексного сопротивления резистора необходимо решить систему четырех дифференциальных уравнений в частных производных. Трудоемкость решения такой системы не позволяет использовать ее для расчета частотных характеристик резисторов.

В связи с этим в настоящее время для оценки частотных характеристик резисторов используются схемы замещения. Конструкция резистора разбивается на ряд элементов, каждому из которых в схеме замещения ставится в соответствие активное сопротивление, емкость и индуктивность. Комплексное сопротивление рассчитывается с помощью анализа схемы замещения. Несмотря на простоту указанному подходу присущи два недостатка: во-первых процессы в конструкциях резисторов носят существенно распределенный характер, что требует разбиения конструкции на большое число элементов, а во-вторых, затруднена оценка численных значений реактивных параметров схемы замещения, что приводит к значительным погрешностям при расчете частотных характеристик. Последний фактор весьма существенен для прецизионных резисторов из-за малых допустимых отклонений на сопротивление. Сокращение размерности системы уравнений, описывающей распределение токов и потенциалов в РЭ, дает разработанная О. В. Тозони [1] теория цепей с токами высокой частоты. Основным постулатом теории является предположение о том, что в РЭ вектор плотности тока одинаков по его сечению и совпадает по направлению с касательной к средней линии РЭ. Внутри РЭ распределение потенциала носит одномерный характер; вне его напряженность электрического поля перпендикулярна к поверхности РЭ. Указанное предположение, как это можно показать, выполняется при $f \cdot R \leq 10^{12}$ Ом.Гц, где f - частота, а R - сопротивление резистора. Сделанное предположение позволяет существенно упростить математичес-

к-ю модель, свела ее к безразмерной системе интегро-дифференциальных уравнений:

$$-\frac{dU}{dt} = [F(\ell) + j\Omega M_0(\ell)] \dot{i}(\ell) + j\Omega \sum_{k=1}^N M_k(\ell) \dot{i}_k(\ell); \quad (1)$$

$$-\frac{dI}{dt} = j\Omega [C_0(\ell) \dot{u}(\ell) + \sum_{k=1}^N C_k(\ell) (u(\ell) - u_k(\ell))]; \quad (2)$$

$$M_0(\ell_0) = D_1 \int_{\ell_p} \frac{\dot{i}(\ell_p)}{i(\ell_0)} \cdot K_1(\ell_0, \ell_p) \cdot \cos(\ell_0, \ell_p) d\ell_p; \quad (3)$$

$$C_0(\ell_0) = 1 - D_2 \int_{\ell_p} K_2(\ell_0, \ell_p) \cdot C_0(\ell_p) \frac{\dot{u}(\ell_p)}{u(\ell_0)} d\ell_p, \quad (4)$$

где ℓ - текущая безразмерная координата; $\dot{u}(\ell)$ - безразмерный потенциал в РЭ; $\dot{i}(\ell)$ - безразмерный ток в РЭ; L - общая длина электрической цепи, включая выводы резистора; M_0 - собственная безразмерная индуктивность; C_0 - собственная безразмерная емкость; M_k и C_k - коэффициенты взаимной индукции и емкости между РЭ и остальными элементами конструкции резистора. Безразмерная круговая частота связана с частотой соотношением

$$\Omega = 3,49 \cdot 10^{-9} \epsilon_c R L f,$$

где ϵ_c - относительная диэлектрическая проницаемость. Относительное приращение сопротивления по длине РЭ и выводов выражается как

$$F(\ell) = R^{-1} dR(\ell)/d\ell.$$

Величины D_1 и D_2 равны соответственно $1,79 \cdot 10^2 \epsilon^{-1} R^{-2}$ и $5,0$. Криволинейные интегралы (3) и (4) берутся по средней линии РЭ. Функции $K_1(\ell_0, \ell_p)$ и $K_2(\ell_0, \ell_p)$ содержат информацию о непосредственном окружении РЭ. Для простейших случаев структура K_1 и K_2 приведена в [2].

В более сложных случаях влияние элементов конструкции и окружения резистора на его частотные характеристики приходится учитывать с помощью индуктивностей M_k и емкостей C_k . Краевые условия для системы уравнений (1)-(4) имеют вид $I(0) = I(L) = I$. (5)

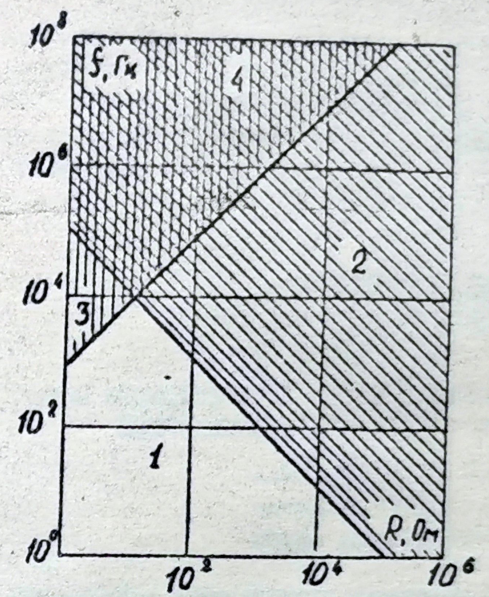


Рис.1. Области, характеризующие вид реактивной составляющей сопротивления резистора

Соотношение (5) означает, что резистор подключен к источнику тока. В этом случае его комплексное сопротивление выразится как

$$\dot{Z}(f) = R(\dot{u}(0) - \dot{u}(L)). \quad (6)$$

Заметим, что уравнения (1), (2) по виду напоминают уравнения длинной линии. Анализ системы показывает, что для низкоомных резисторов преобладают индуктивные эффекты на повышенных частотах, а для высокоомных - емкостные. На рис.1 в области 1 отклонение комплексного сопротивления от сопротивления на нулевой частоте не превышает сотых долей процента, в области 2 преобладают емкостные эффекты, в 3 - индуктивные, а в области 4 необходим учет как индуктивных, так и емкостных эффектов.

Для расчета частотных характеристик использовался итерационный метод решения системы уравнений (1)-(4). В качестве начального приближения на нулевой частоте принималась линейная зависимость потенциала от ℓ и постоянное распределение тока по РЭ. Далее по формулам (3) и (4) рассчитывались $C_0(\ell)$ и $M_0(\ell)$ и решалась система (1) и (2). Рассмотренная процедура продолжается до тех

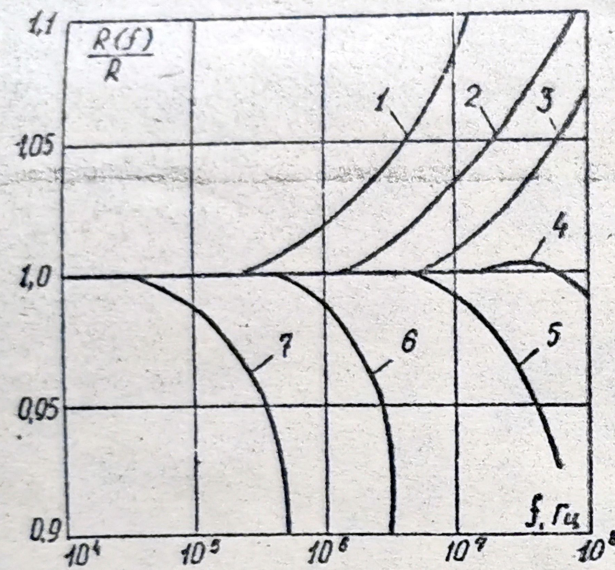


Рис. 2. Частотные зависимости активной составляющей сопротивлений резисторов С2-14 с различными номинальными сопротивлениями $R_{ном}$:
 1 - 1 Ом; 3 - 100 Ом; 5 - 10 кОм; 7 - 1 МОм;
 2 - 10 Ом; 4 - 1 кОм; 6 - 100 кОм;

пор, пока относительное изменение комплексного сопротивления на двух итерациях не станет меньше 10^{-6} . На рис. 2 представлены расчетные зависимости для резисторов с габаритами С2-14 для номинальных сопротивлений от 1 Ом до 1 МОм.

Следует заметить, что для резисторов с номинальным сопротивлением до 100 Ом реактивная составляющая комплексного сопротивления носит индуктивный характер, в то время как для резисторов с номинальным сопротивлением более 1 кОм реактивная составляющая сопротивления чисто емкостная.

Расхождения рассчитанных по рассмотренной методике комплексных сопротивлений с экспериментально измеренными не превышает 10%.

1. Тозони О.В. Метод вторичных источников. - М.: Энергия, 1975. - 323 с.
 2. Зайцев В.В., Рудовол Г.Г., Тихонов А.И. Расчет частотных характеристик переменных пленочных резисторов. - Тр./Моск.энерг. ин-т, 1976, вып. 296, с.37-42.

147

59-6
 [Handwritten signatures and stamps]

МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОНТАКТИРОВАНИЯ НЕПРОВОЛОЧНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗИСТОРОВ

Инж. В. А. УНАВИН, канд. техн. наук ст. научн. сотр.
 Н. В. СТАНЕВ, канд. техн. наук ст. научн. сотр.
 Л. А. КОЛМАКОВА

Проволочные прецизионные резисторы, которые в настоящее время находят наиболее широкое применение в электронных схемах, имеют существенные недостатки: ограниченную разрешающую способность и малый ресурс работы.

Непроволочные переменные резисторы (НПР) пленочного типа имеют практически неограниченную разрешающую способность и большой ресурс работы, но, в свою очередь, имеют такие недостатки, как большой момент трогания, высокий уровень шумов и т.д. Однако при дальнейшем усовершенствовании конструкции и технологии изготовления НПР эти недостатки будут сведены к минимуму, и НПР найдут широкое применение как элементы регулирования и в качестве потенциометрических датчиков.

В работе [1] автором указано на необходимость контроля у НПР такого важного параметра, как качество контактирования. В настоящей статье предлагается методика для количественной оценки качества контактирования НПР.

Как известно, в зависимости от способа включения (реостатного или потенциометрического) НПР может проявлять разные функциональные характеристики (рис. 1а, б).

Разница между двумя характеристиками обусловлена наличием переходного сопротивления $R_{пер}$ между подвижным контактом и резистивным элементом (рис. 1 в).

ОРИГИНАЛ ПЛОХОГО КАЧЕСТВА

ВИНИТИ № 20