

УДК 621.314.25: 621.372.54.061

П. А. Ушаков, доктор технических наук, Ижевский государственный технический университет  
К. О. Максимов, аспирант, Ижевский государственный технический университет

## РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ R-C-NR-ЭЛЕМЕНТОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Представлен подход к построению составной структурной модели толстопленочных RC-элементов с распределенными параметрами (RC-ЭПП) из базовых конструктивных элементов, учитывающих конструктивно-технологические особенности их изготовления. Проведена количественная и качественная оценка адекватности разработанной структурной модели на партии экспериментальных образцов RC-ЭПП.*

**Ключевые слова:** RC-элемент с распределенными параметрами, фрактальный элемент, идентификация модели.

Применение RC-ЭПП позволяет существенно улучшить электрические характеристики аналоговых устройств обработки сигналов (фильтров, фазовращателей, интеграторов и т. п.) [1]. RC-ЭПП особенно востребованы в тех случаях, когда применение цифровых или иных систем невозможно: работа устройств в режиме реального времени, управление быстропротекающими процессами, обработки высокочастотных сигналов и т. п. Кроме того, RC-ЭПП, являясь «фрактальными» элементами [2], перспективны для физической реализации операций интегрирования/дифференцирования дробного порядка в системах генерирования и обработки фрактальных сигналов (в радиолокации, радионавигации, распознавании изображений и др.) [3], создания ПИД-регуляторов дробного порядка, для физического моделирования электрохимических процессов, происходящих на границе «электрод – электролит» и многое другое.

Решение вопросов анализа и синтеза конструкций RC-ЭПП по заданным передаточным или импедансным характеристикам [4] является необходимым, но совершенно недостаточным условием для физической реализации синтезированных конструкций методами интегральной технологии. Причин для этого несколько.

Во-первых, разработанные алгоритмы анализа и синтеза оперируют грубыми математическими моделями RC-ЭПП, которые в большинстве случаев не учитывают технологических аспектов изготовления RC-ЭПП: неидеальность свойств проводящих, резистивных и диэлектрических материалов; наличие переходных слоев, возникающих при контакте различных материалов, и др. Во-вторых, известные математические модели не учитывают конструктивные ограничения, определяемые принятой технологией изготовления, например, припуски на совмещение слоев RC-ЭПП, появление паразитных резистивных и емкостных элементов с сосредоточенными параметрами и т. п. В-третьих, практически не существует методик идентификации параметров, которые входят в состав моделей RC-ЭПП.

По этим причинам характеристики RC-ЭПП, изготовленных по результатам синтеза, сильно отличаются от заданных. Таким образом, одной из важных задач, решение которой позволит сделать следующий шаг в направлении внедрения новой элементной базы на основе RC-ЭПП, является разработка их адекватных математических моделей, чему и посвящена данная работа.

С учетом используемых методов анализа конструкций RC-ЭПП [4] такими моделями будут их схемы замещения, отражающие основные конструктивные и технологические особенности изготовления RC-ЭПП. При этом необходимо идентифицировать структуру схемы замещения RC-ЭПП (структурная идентификация) и параметры этой схемы (параметрическая идентификация) по реализациям ее входных и выходных сигналов.

В качестве объекта исследования был выбран трехслойный RC-ЭПП со структурой слоев «резистор – диэлектрик – резистор», в дальнейшем R-C-NR [5]. Этот выбор обусловлен наличием идеализированной математической модели RC-ЭПП с данной структурой слоев и наличием программ анализа и синтеза его конструкций по заданным частотным характеристикам [6]. Для построения точной структурной модели R-C-NR детально проанализируем особенности его конструкции и технологии изготовления.

Рассматривая экспериментальные R-C-NR, следует отметить, что у всех конструкций существуют концевые области, представляющие собой контактные площадки (проводящие обкладки). В таких участках R-C-NR преобразуется в структуру типа «проводник – резистор – диэлектрик – резистор – проводник» (сокращенно 0-R-C-NR-0) либо в структуры 0-R-C-NR, R-C-NR-0. Так как площадь перекрытия проводящими обкладками бывает значительной (это необходимо для улучшения контакта), то и влияние концевых областей на электрические характеристики всей конструкции R-C-NR может оказаться существенным. Учет данной особенности в структурной модели R-C-NR реализуем разбивкой топологии R-C-NR-структуры на базовые конструктивные элементы (рис. 1, а).

Безусловно, основной вклад в характеристики пленочного элемента вносит центральная часть структурной модели – однородный RC-ЭПП со структурой слоев вида R-C-NR. Его математическая модель с учетом потерь в диэлектрическом слое под-

робно рассмотрена в [6]. Однако в этой модели необоснованно введена связь между параллельным сопротивлением потерь активной мощности в диэлектрике  $r$  и сопротивлением верхнего резистивного слоя структуры  $R_b$ .

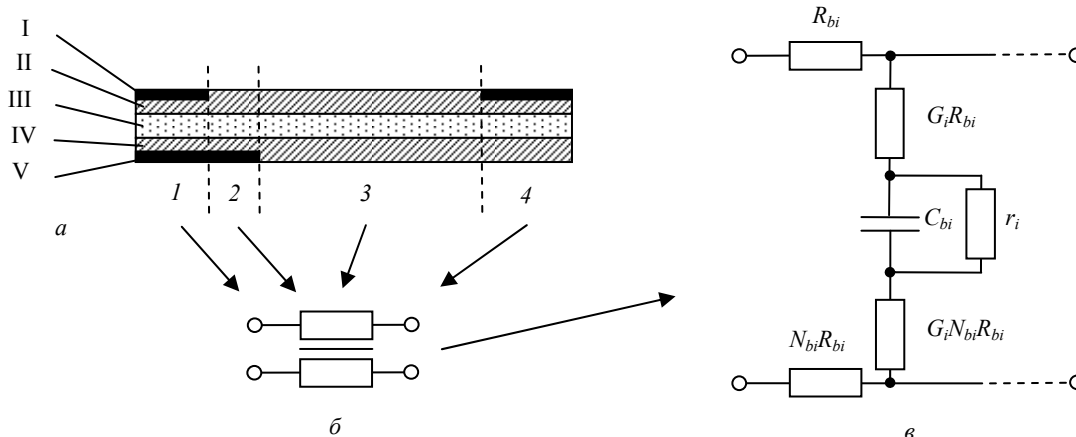


Рис. 1. Пример разбивки топологии R-C-NR на базовые конструктивные элементы: а) 1 – 0-R-C-NR-0, 2 – R-C-NR-0, 3 – R-C-NR, 4 – 0-R-C-NR. На условном продольном разрезе: I, V – проводящие обкладки, II – верхний резистивный слой, III – диэлектрический слой, IV – нижний резистивный слой; б) условное графическое обозначение базового конструктивного элемента; в) схема замещения в виде многозвенной лестничной цепи (показано только одно  $i$ -е звено цепи)

На наш взгляд, потери активной мощности в диэлектрике концевых областей пленочного элемента будут отличаться от потерь в диэлектрике центральной части модели. Причем сопротивление утечки  $r$ , включенное параллельно емкости структуры  $C_b$ , останется неизменным, так как материал диэлектрического слоя один и тот же, а последовательное сопротивление потерь изменится пропорционально эквивалентным сопротивлениям верхнего и нижнего резистивных слоев. Последовательное сопротивление потерь ( $G_i R_{bi}$ ) характеризует потери в диффузионных слоях, образованных на границах «диэлектрик – резистор».

последовательное емкости  $C$ ;  $r_p$  – шунтирующее сопротивление обкладок;  $L$  – длина базового элемента, нормированная относительно единичной длины всей структуры.

Таким образом, на основании [6] и предложенных уточнений, детализированная структурная модель любого базового конструктивного элемента будет представлять собой схему замещения (рис. 1, в). Тогда структурную модель реального образца R-C-NR можно представить как каскадное соединение указанных схем замещения в зависимости от количества базовых элементов, из которых состоит конструкция R-C-NR.

Таблица 1. Параметры компонентов схемы замещения базовых элементов

Базовый элемент	Параметры компонентов структурной модели	Примечание
R-C-NR	$R_b, C_b, N_b, G, r, r_p, L$	$C_b = LC; R_b = LR;$ $N_b = LRN$
0-R-C-NR-0	$R_b, C_b, N_b, G, r, r_p, L$	$C_b = LC; R_b = \frac{LRr_p}{LR+r_p};$ $N_b = \frac{N(LR+r_p)}{NLR+r_p}$
0-R-C-NR	$R_b, C_b, N_b, G, r, r_p, L$	$C_b = LC; R_b = \frac{LRr_p}{LR+r_p};$ $N_b = \frac{N(LR+r_p)}{r_p}$
R-C-NR-0	$R_b, C_b, N_b, G, r, r_p, L$	$C_b = LC; R_b = LR;$ $N_b = \frac{Nr_p}{NLR+r_p}$

Параметры компонентов схемы замещения для различных базовых элементов будут различными (табл. 1), а их идентификация есть многокритериальная оптимизационная задача, решение которой – тема отдельной статьи [7].

Поскольку RC-ЭПП в программах анализа и синтеза характеризуется системой у-параметров, то целесообразно на основе структурной модели вычислять частотную характеристику (ЧХ) одного из у-параметров модели и сравнивать ее с измеренной ЧХ исследуемого образца RC-ЭПП при соответствующей

В таблице 1:  $R$  – сопротивление верхнего резистивного слоя всей структуры;  $N$  – коэффициент, определяющий сопротивление нижнего резистивного слоя всей структуры;  $C$  – емкость всей структуры;  $r$  – сопротивление потерь активной мощности, параллельное емкости  $C$ ;  $G$  – коэффициент, определяющий сопротивление потерь активной мощности,

сих граничных условиях. Для вычисления матрицы  $y$ -параметров общей модели пленочного R-C-NR элемента необходимо предварительно найти аналитические выражения коэффициентов матриц проводимости каждого базового элемента, представленного в модели в виде четырехполюсника. Затем, используя метод многополюсных подсхем, найти матрицу проводимости общей модели пленочного элемента [4].

Для разработки и тестирования методики идентификации RC-ЭРП была изготовлена партия опытных толстопленочных образцов со структурой слоев R-C-NR [8]. Фотография одного из образцов представлена на рис. 2. Заданные конструктивные и технологические параметры образцов RC-ЭРП следующие: сопротивление нижнего резистивного слоя 6 МОм, сопротивление верхнего резистивного слоя 700 кОм, емкость между слоями 200 пФ, коэффициент формы  $K_\phi = 8$ . Для обеспечения надежного контакта между проводящими дорожками и резистивными слоями в конструкции RC-ЭРП предусмотрено перекрытие этих слоев, величина которого составляет 0,02 от общей длины элемента.

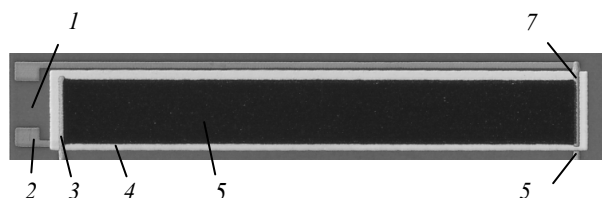


Рис. 2. Фотография образца толстопленочного RC-ЭРП со структурой слоев вида R-C-NR: 1 – подложка; 2 – вывод от контакта к нижнему резистивному слою; 3 – контакт к верхнему резистивному слою; 4 – диэлектрик между слоями; 5 – верхний резистивный слой; 6 – вывод от второго контакта к нижнему резистивному слою; 7 – второй контакт к верхнему резистивному слою

Поперечный разрез R-C-NR-структуры условно показан на рис. 3, а. В соответствии с ним данную конструкцию можно условно разбить на три базовых конструктивных элемента: однородная R-C-NR структура, левая и правая концевые области со структурой 0-R-C-NR-0 (рис. 3, б). Тогда детализированная структурная модель будет представлять собой схему замещения (рис. 3, в).

Для имеющихся опытных образцов, используя алгоритм параметрической идентификации [7], получили следующие параметры модели:  $R = 800$  кОм;  $N = 9,33$ ;  $C = 325$  пФ;  $r = 100$  МОм;  $G = 8 \cdot 10^{-4}$ ;  $r_p = 10$  Ом;  $L = 0,02$ . На рис. 4 показаны в сравнении ЧХ параметров  $y_{11}$  и  $y_{33}$  исследуемой структурной модели, структурной модели без учета концевых областей и реального образца R-C-NR. Графики остальных  $y$ -параметров не приведены, так как они имеют аналогичный характер.

Оценим количественно адекватность структурной модели опытному образцу. В качестве критериев выберем математические ожидания ( $M_a, M_p$ ) и среднеквадратические отклонения ( $\sigma_a, \sigma_p$ ) абсолютных ошибок ( $\delta_{ai}, \delta_{pi}$ ) АЧХ и ФЧХ  $y$ -параметров структурной модели ( $y_{si}$ ) относительно измеренных АЧХ и ФЧХ  $y$ -параметров физического образца ( $y_i$ ) по совокупности  $n$  измеренных значений ЧХ на частотном диапазоне от 25 Гц до 1 МГц (табл. 2):

$$M_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{ai} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|y_{si}| - |y_i|);$$

$$M_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{pi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\arg(y_{si}) - \arg(y_i)];$$

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_{ai} - M_a)^2}, \quad \sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_{pi} - M_p)^2}.$$

Критерии адекватности:  $\{M_a \rightarrow 0, \sigma_a \rightarrow 0, M_p \rightarrow 0, \sigma_p \rightarrow 0\}$ .

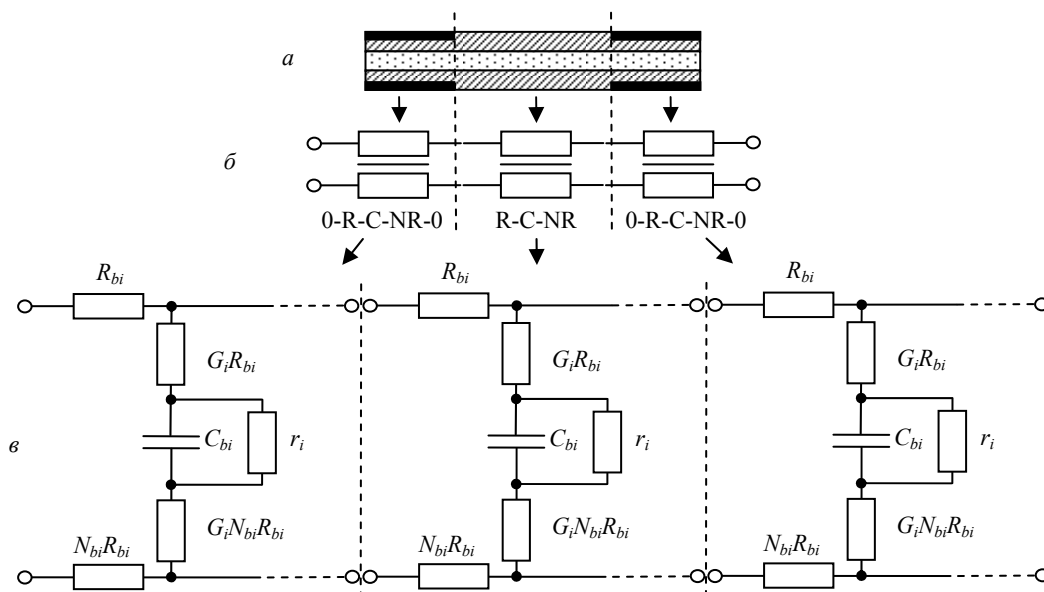


Рис. 3. Структурная модель толстопленочного R-C-NR: а – условный продольный разрез; б – условное графическое обозначение модели; в – детальная схема замещения

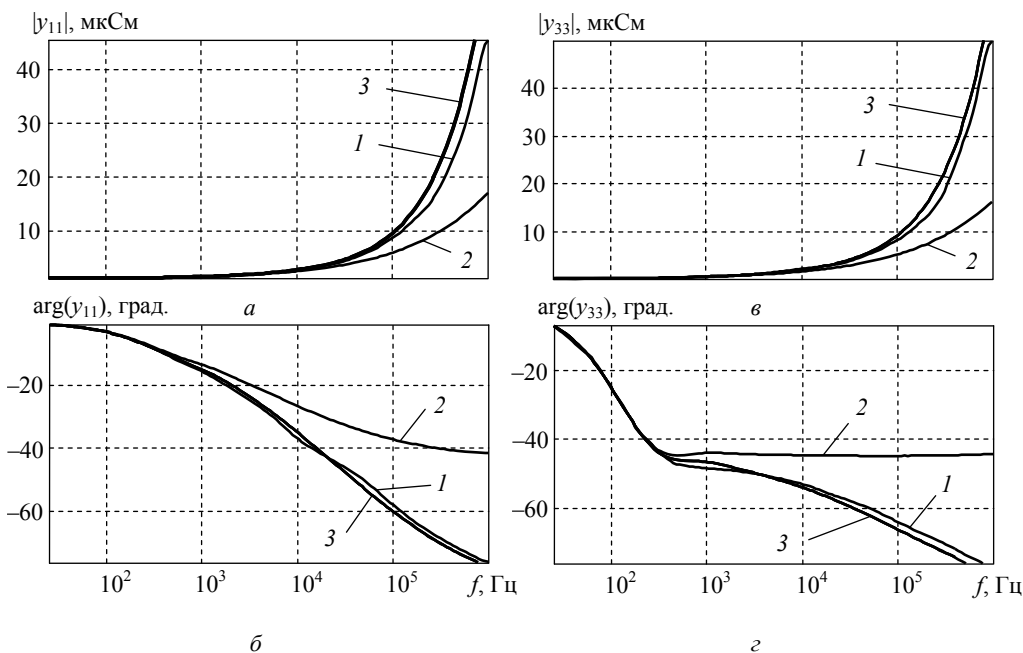


Рис. 4. Графики: а – АЧХ  $y_{11}$ ; б – ФЧХ  $y_{11}$ ; в – АЧХ  $y_{33}$ ; г – ФЧХ  $y_{33}$ . На графиках: 1 – измеренная ЧХ физического образца; 2 – ЧХ идеального R-C-NR без учета концевых областей; 3 – ЧХ структурной модели R-C-NR

Таблица 2. Оценки критериев адекватности структурной модели опытному образцу R-C-NR

Параметр	$M_a$ , См	$\sigma_a$ , См	$M_p$ , град.	$\sigma_p$ , град.
$y_{11}$	$-1,18 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-6}$	0,27	1,25
$y_{33}$	$-8,39 \cdot 10^{-7}$	$1,73 \cdot 10^{-6}$	0,65	1,35

Таким образом, полученные оценки доказывают адекватность предложенной структурной модели реальному толсто пленочному образцу. Наблюдаемые отклонения критериев адекватности от нулевых значений объясняются наличием случайных и приборных погрешностей, а также паразитных помех при измерениях.

Следует отметить, что данная структурная модель не универсальна. Область ее применения ограничена толсто пленочной технологией, а также рассмотренной конфигурацией слоев и контактных площадок. При изменении технологии, количества слоев, расположения их относительно друг друга потребуется коррекция структурной модели. Тем не менее общие подходы идентификации структурных элементов останутся аналогичными.

#### Список литературы

1. Ушаков П. А., Гильмутдинов А. Х. Пленочные резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами: конструкции, применение, перспективы // Датчики и системы. – 2003. – № 7. – С. 63–70.

2. Ушаков П. А., Потапов А. А., Гильмутдинов А. Х. Системные принципы и элементная база фрактальной радиоэлектроники. Ч. I // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53. – № 9. – С. 1033–1080.

3. Ушаков П. А., Гильмутдинов А. Х., Потапов А. А. Применение резистивно-емкостных элементов с распределенными параметрами и фрактальной размерностью: прошлое, настоящее и будущее // Нелинейный мир. – 2008. – Т. 6. – № 3. – С. 183–213.

4. Ушаков П. А. Методы анализа и синтеза многослойных неоднородных RC-элементов с распределенными параметрами и устройств на их основе : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Казань : КГТУ, 2009. – 35 с.

5. Ушаков П. А., Красноперов К. В., Филиппов А. В. Математические модели RC-элементов с распределенными параметрами со структурой слоев вида R-CG-NR // Вестник ИжГТУ. – 2008. – № 2. – С. 54–57.

6. Филиппов А. В. Структурно-параметрический синтез резистивно-емкостных элементов с распределенными параметрами со структурой слоев R-CG-NR : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск : ИжГТУ, 2010. – 18 с.

7. Максимов К. О., Ушаков П. А., Тарануха В. П. Методика идентификации параметров RC-элементов с распределенными параметрами со структурой слоев R-CG-NR // Приборостроение в XXI веке. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2010.

8. Maksimov K. O., Ushakov P. A., Filippov A. V. Research of fractal thick-film elements frequency responses // 11-th International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2010. – P. 165–167.

P. A. Ushakov, Doctor of Technical Sciences, Izhevsk State Technical University

K. O. Maksimov, Postgraduate Student, Izhevsk State Technical University

#### Design and Substantiation of Structural Model of Thick-Film R-C-NR-Elements with Distributed Parameters

An approach to construction of the compound structural model of thick-film RC-elements with distributed parameters (RC-EDP) from the base constructive elements considering design and technological features of their manufacturing is presented. Quantitative and quality adequacy estimation of the developed structural model is given by means of experimental RC-EDP sample party.

**Key words:** RC-element with distributed parameters, fractal element, model identification.