

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
"ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"**

На правах рукописи

УДК: 53.087.9: 621.373.7:
536.53: 531.787

Ежи Потенцки

**ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫЕ РС СТРУКТУРЫ
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
И МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность

05.27.05. - Интегральные радиоэлектронные устройства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Львов - 1994

Работа выполнена на кафедре "Электронных устройств"
Жешувского политехнического института (Польша)

Научные консультанты: - доктор технических наук, профессор
ГОТРА Зенон Юрьевич, Государственный
университет "Львівська Політехніка"

- доктор технических наук, профессор
КАЛИТА Владимир, Жешувский поли-
технический институт, (Польша)

Главные опоненты: - доктор технических наук, профессор
КОВАЛЬ Владимир Александрович,
Государственный университет "Львівська
Політехніка"

- доктор технических наук, профессор
ОСАДНИК Станислав, Вроцлавский
политехнический институт, (Польша)

- доктор физико-математических наук,
профессор **РАРЕНКО Илларию Михай-**
лович, Черновицкий университет

Ведущая организация: - НПО "Карат", г. Львов

Защита диссертации состоится "16" 12 1994 г. в 14¹⁵ час.
на заседании специализированного совета Д 068.36.06 при
Государственном университете "Львівська Політехніка" (290013, г.
Львов, ул. С. Бандеры, 1).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Государственного университета "Львівська Політехніка" (290013, г.
Львов, ул. Профессорская, 1).

Автореферат разослан "16" 11 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
д.т.н., Бобицкий Я. В.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України



ЛНБ України ім. В. Стефаника



00777214 (S)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: В настоящее время наблюдается динамическое развитие микропроцессорных систем и современных методов преобразования информации, что требует разработки широкого класса датчиков регистрации и воздействия на происходящие процессы.

Известно, что только на американском рынке сегодня находится около 45 тысяч разных датчиков. В последнее десятилетие темп роста их производства составляет в около 18% в год. По прогнозам экспертов производство датчиков увеличится с 4.5 миллиардов долларов в 1990 году до 36 миллиардов долларов в 2000 году [72].

Традиционные датчиковые системы включают датчик и систему управления, с выводом информации в аналоговой форме. Эти системы (Рис. 1а) характеризуются малым отношением сигнала к помехам, в связи с чем ограничена передача аналоговых сигналов на большое расстояние.

Размещение датчика в непосредственной близости к электронным устройствам формирования сигнала (ЭУФ) обеспечивает возможность усиления сигнала, его линеаризацию и коррекцию характеристик (Рис. 1б).



Рис. 1. Блок-схемы датчиковых систем: Д - датчик, ЭУФ - электронное устройство формирования сигнала, АЦП - аналого-цифровой преобразователь, МП - микропроцессорная система, Д/П - преобразователь, СУ - система управления, КСУ - компьютерная система управления.

Известны датчиковые системы - "интеллектуальные сенсоры", являющиеся интегрированными системами датчика и микропроцессора, в которых создается стандартный, очень часто цифровой выходной сигнал, а их использование с интерфейсом создает возможность непосредственного подключения их к компьютерным системам управления и программирования (Рис. 1в). Обычно эти системы требуют применения аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

Датчики с цифровой формой выходного сигнала (Рис. 1г, д) являются новым направлением в развитии датчиков и преобразователей на их

основе. В основу их функционирования положено преобразование физической или химической величины в выходной цифровой сигнал посредством:

- превращения выходного аналогового сигнала датчика в отдельной схеме преобразователя (Рис. 2а),
- применения структуры, в которой датчик является интегральной частью схемы преобразователя (Рис. 2б).

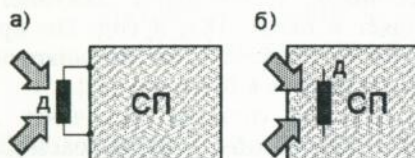


Рис. 2. Основные типы схем преобразователей.

В настоящей работе представлена концепция реализации этого нового класса датчиковых систем, превращающих изменения определенной, характеризующей окружающую среду, физической или химической величины (в зависимости от применяемых материалов) в частотный сигнал. Их реализация основана на использовании электрических и термических связей, в системе многослойной RC структуры с распределенными параметрами (DRC).

Достоинствами этого класса преобразователей являются: частотная форма выходного сигнала, устойчивость к действиям промышленных помех и нестабильности напряжения питания, возможность их взаимодействия с системами типа TTL и CMOS (амплитуда выходного сигнала зависит только от напряжения питания), временная стабильность параметров, возможность получения относительно большой чувствительности при низкой стоимости.

Для их создания выбрана толсто пленочная технология, которая обеспечивает высокую стойкость к внешним воздействиям, высокую временную стабильность параметров и надежность, хорошие условия рассеивания тепла и возможность функциональной коррекции [8, 22, 25, 74].

Цель и задачи работы:

Разработка теории, конструкции, технологии толсто пленочных многослойных DRC структур и преобразователей на их основе.

Для этой цели необходимо:

- проведение синтеза универсальных генерирующих устройств для реализации преобразователей на основе DRC структур и других многослойных систем с использованием электротермических связей,
- разработка комплексного метода компьютерного проектирования систем преобразователей и их использования в микропроцессорных измерительно-контрольных системах,

- изучение влияния материалов и технологических факторов на микроструктуру и электрические свойства системы металл-диэлектрик-резистор,
- разработка конструкции и конструктивно-технологического методов компенсации температурных зависимостей DRC структуры,
- определение схем замещения реальной DRC структуры и разработка адекватных двухмерных моделей, полезных в коррекции непосредственными методами, с целью определения влияния рода и локализации коррекционной резки на положения нулей и полюсов передаточной функции по напряжению структуры,
- выполнение синтеза ряда корректирующих структур типа DRC-R (соединение структуры DRC и резистора с сосредоточенными параметрами) и DRC-DRC (соединение четырехполосниковых и двухполосниковых конфигураций DRC структур), их анализ и практическая реализация,
- разработка ряда преобразователей температуры и давления/силы для систем управления и телеметрии.

Научная новизна:

- Общая теория преобразователей с DRC структурами и комплексный метод их проектирования с использованием современных программ CAD,
- Новые структуры типа DRC-R и DRC-DRC и анализ возможности их использования в системах преобразователей,
- Выявлены электротермические связи в системе многослойной структуры с распределенными параметрами, в аспекте их практического применения в схемах управления,
- Новый метод определения коэффициентов диэлектрических потерь диэлектрика в реальной системе многослойной структуры,
- Новые совместимые составы материалов и технология для реализации стабильных преобразователей температуры и давления/силы с DRC структурами,
- Методы оптимизации конструкции и проектирования толстопленочных датчиков давления/силы, основанных на пьезорезистивным эффекте.

Практическое значение работы:

- Созданы новые преобразователи посредством преобразования определенной физической или химической величины в частоту,
- Определены общие принципы выбора материалов для реализации DRC структур в аспекте их эксплуатационных параметров, стабильности и надежности,

- Разработаны конструктивно-технологические методы компенсации температурной зависимости DRC структуры,
- Разработаны микропроцессорные системы управления и телеметрии с использованием преобразователей на основе DRC структур.

Основные положения выносимые на защиту:

- Комплексная теория и метод проектирования преобразователей с DRC структурами, с использованием современных программ CAD,
- Методика выбора материалов для реализации многослойных DRC структур, базирующаяся на корреляции результатов измерений электрических свойств и анализа микроструктуры пленок на границах систем проводник-диэлектрик и диэлектрик-резистор, с использованием современных методик исследования,
- Метод компенсации температурных характеристик DRC структуры в системе с двухслойным диэлектриком,
- Косвенные методы коррекции характеристик DRC-структур и ряд корригирующих систем типа DRC-R и DRC-DRC,
- Метод измерения распределенной емкости и коэффициента полных потерь DRC структуры в схеме нулевого фильтра,
- Схемы замещения реальной DRC структуры, учитывающие наличие паразитных элементов и потерь в диэлектрике,
- Метод оптимизации конструкции балочных датчиков давления/силы, работающих на основе пьезорезистивного эффекта,
- Конструкции и технология миниатюрных преобразователей температуры с DRC структурами, с чувствительностью 3.5 кГц/К, временной стабильностью параметров 0.4% и временной постоянной, равной 15с,
- Конструкции и технология преобразователей давления/силы с DRC структурами.

Апробация результатов:

Основные результаты диссертационной работы были представлены на 23 симпозиумах и научных конференциях: Polskiej Sekcji International Society for Hybrid Microelectronics (1983, 1984, 1986, 1987, 1989, 1990, 1992, 1993, 1994), Sympozjum "Nowe konstrukcje górniczego sprzętu oświetleniowego", Katowice, 1986, 32. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, TH Ilmenau, (Germany) 1987, 4th Symposium on Sensors and Actuators "Eurosensor II", Enschede (Holland) 1988, 5. Fachtagung Hybridmikroelektronik, Gera, (Germany), 1988, 5th Czechoslovak Conf. on Microelectronics, Bratislava, (Czechoslovakia), 1989, Symposjum Sensoren in Dünn- und Dickfilmtechnik, Fachtagung "Sensortechnik 89", Jena/Gera, (Germany), 1989, XII Krajowa Konferencja Teorii Obwodów i Układów Elektronicznych, Rzeszów-Myczkowce, 1989, 6. Wissenschaftliche Konferenz "Rationalisierung im Maschinenbau durch Schlüsseltechnologien", Fachtagung 8: Elektroautomatisierung, Zwickau,

(Germany), 1989, 16th Spring Seminar on Electronic Technology, Szklarska Poręba, 1993, Hybridmikroelektronik und Mikrosystemtechnik, Berlin, (Germany), 1994, III Konferencja Naukowa "Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne", Warszawa, 1994, International Conference on Electronics Technologies, Windsor, (England), 1994.

По материалам диссертационной работы опубликовано 48 научно-технических статей (цитируется 46), в т.ч. 2 патента, а также 26 отчетов по 12 научно-исследовательским и конструкторско-технологическим работам.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В работе представлена концепция и теория использования RC структур с распределенными параметрами для реализации микроэлектронных преобразователей, общие принципы их проектирования - с учетом современных программ CAD (*Computer Aided Design*) - методы выбора материалов и технология их изготовления.

Преобразователи с DRC структурами:

Структура DRC состоит из 3 слоев: проводящего, диэлектрического и резистивного (рис. 3). В такой схеме резистивный слой создает распределенное сопротивление структуры DRC и одновременно, будучи разделен диэлектриком, вместе со слоем проводимости, формирует распределенную емкость структуры DRC [73].

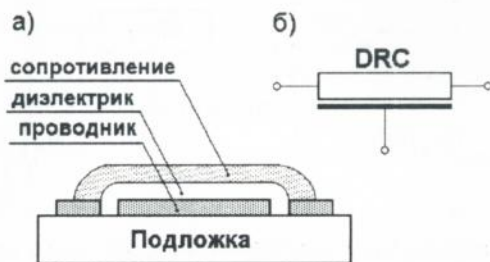


Рис. 3. Структура DRC с распределенными параметрами: а) слоевая модель, в) электрическое обозначение.

Если величина сопротивления и/или емкости структуры DRC зависят от определенной внешней физической или химической величины ξ , характеризующей окружающую среду, то ее постоянная времени и все характерные частоты изменяются в зависимости от типа функции, которая определяет эту зависимость. Выше указанные зависимости создают основу для использования DRC структуры в детектировании и измерении данной величины ξ , а также для выполнения простых схем измерительных преобразователей. Размещая DRC структуру в цепи обратной связи усилителя и выполняя определенные условия баланса (амплитуды и фазы), получаем схему генератора, в котором величина

генерируемой частоты будет изменяться как функция изменения величины ξ [21, 28, 30, 34-36, 39, 42, 44]:

$$\omega(\xi) = \frac{\text{Const}}{R(\xi) \cdot C(\xi)} \quad (1)$$

Структура DRC может выступать в 5 основных четырехполосниковых конфигурациях представленных на рис. 4 [73]. Все они могут быть применены для реализации преобразователей.

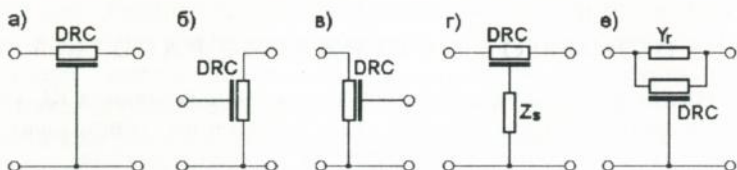


Рис. 4. Четырехполосниковые конфигурации DRC структуры: а) фильтр нижних частот, б) фильтр верхних частот, в) широкополосный фильтр со слабым затуханием, г) нулевой фильтр с импедансом Z_s , е) нулевой фильтр с адмитансом Y_r .

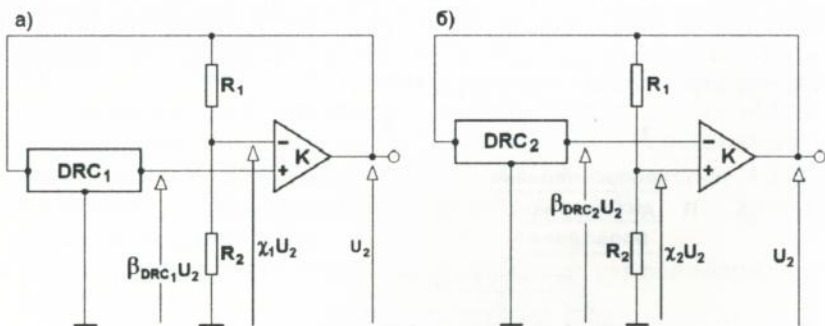


Рис. 5. Основные типы схем преобразователей с DRC структурами.

Общие схемы систем преобразователей с использованием DRC структур представлены на рис. 5 [35, 39].

Для схемы из рис. 5а условия генерации выполнены, если для частоты ω_g :

$$\text{фаза} \left\{ \left[\beta_{\text{DRC}_1}(\xi) - \chi_1 \right] k_u \right\} = \text{фаза} \left[\beta_1(\xi) - k_u \right] = 2n\pi, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

где: $\beta_{\text{DRC}_1}(\xi)$ - коэффициент передачи по напряжению четырехполосника DRC_1 , ξ - определенная физическая или химическая величина, k_u - коэффициент усиления по напряжению усилителя, χ_1 - коэффициент деления делителя R_1 и R_2 .

Одновременно возникает неравенство:

$$\left| [\beta_{\text{DRC}_1}(\xi) - \chi_1] k_u \right|_{\omega_g} = |\beta_1(\xi) k_u| \geq 1 \quad (3)$$

Аналогично для схемы из рис. 5б, зависимости (2) и (3) принимают вид:

$$\text{фаза} \left\{ [\chi_2 - \beta_{\text{DRC}_2}(\xi)] k_u \right\} = \text{фаза} [\beta_2(\xi) k_u] = 2n\pi, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

$$\left| [\chi_2 - \beta_{\text{DRC}_2}(\xi)] k_u \right|_{\omega_g} = |\beta_2(\xi) k_u| \geq 1 \quad (5)$$

Выполнение этих условий возможно в случае применения четырехполосников, обеспечивающих сильную и быстроизменяющуюся с частотой обратную связь.

Преобразователь с DRC структурой в виде фильтра нижних частот:

Этот преобразователь выполняется методом расположения DRC структуры в цепи обратной связи широкополосного усилителя согласно схемам, приведенным на рис. 5. Для выполнения условия баланса фазы необходимо, чтобы DRC структура создавала для определенной частоты ω_g , сдвиг фазы равной $-(2n+1)\pi$, где $n = 0, 1, 2$, и т.д. Частота ω_g , соответствующая этому условию определяется формулой:

$$\tanh \gamma(\xi) \cdot \tan \gamma(\xi) = 0, \quad \text{где: } \gamma(\xi) = \sqrt{j\omega_g R(\xi) C(\xi)} \quad (6)$$

решение которой можно показать в виде:

$$\sqrt{0.5 \cdot \omega_g R(\xi) C(\xi)} = 0, \dots, m\pi, \quad \text{где: } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

Первую действительную частоту, удовлетворяющую это условие, получаем для $m = 1$, в виде выражения:

$$\omega_g = \frac{2\pi^2}{R(\xi)C(\xi)} \quad (8)$$

Эта зависимость правильна при условии, что фазовый угол усилителя близок по величине к $-\pi$, а входное и выходное сопротивления усилителя нагружают DRC структуру в незначительной степени. Условие баланса амплитуды генератора определяется из зависимости:

$$|k_u| \geq \left| \frac{\cosh \gamma(\xi)}{1 - \chi_2 \cosh \gamma(\xi)} \right| \quad (9)$$

Проектирование преобразователя требует дополнительно учета влияния входного и выходного комплексных сопротивлений усилителя, нагружающих вход и выход DRC структуры, что ведет к модификации передаточной функции системы:

$$K(j\omega) = [k_1(\xi) + k_2(\xi) + k_1(\xi)k_2(\xi)] \cdot \frac{1}{\beta_{DRC_2}(\xi)} \quad (10)$$

$$k_1(\xi) = \frac{Z_{outDRC}(\xi)}{Z_{ina}} \quad \text{- коэффициент нагрузки выхода DRC структуры,}$$

$$k_2(\xi) = \frac{Z_{outa}}{Z_{inDRC}(\xi)} \quad \text{- коэффициент нагрузки входа DRC структуры,}$$

Z_{inDRC} , Z_{outDRC} - соответственно входное и выходное комплексные сопротивления DRC структуры, Z_{ina} и Z_{outa} - входное и выходное сопротивления усилителя [30].

Генератор с DRC структурой в виде нулевого фильтра:

Нулевой фильтр (рис. 6) имеет своеобразную фазовую характеристику, что можно использовать для выполнения генерирующих схем в двух конфигурациях, представленных на рис. 5, в зависимости от значения параметра α_n , который определяется из выражения:

$$\alpha_n = R/R_n \quad (11)$$

где: R - сопротивление резистора структуры DRC, R_n - сопротивление добавочного резистора R_n ($Z_s = R_n$).

Для коэффициента $\alpha_n > \alpha_{n0}$, фаза принимает значение $-\pi$ (для определенных частот ω_n), а для $\alpha_n < \alpha_{n0}$, она проходит через нулевую точку (рис. 7). В первом случае нулевой фильтр можно применять в схеме согласно рис. 5б, а во втором преобразователь реализуется в схеме приведенной на рис. 5а [34].

Выбор значения параметра α_n имеет существенное влияние на условия работы и параметры преобразователя. Для $\alpha_n > \alpha_{n0}$, номинальная частота колебаний больше ω_{n0} , и возрастает с увеличением значения α_n (рис. 8). На этом же рисунке, вторая кривая представляет характеристику минимальной величины усиления усилителя, необходимой для выполнения условия баланса амплитуды. Эта величина уменьшается с увеличением значения коэффициента α_n , что имеет существенное значение при настройке схемы на требуемую частоту, которую можно произвести методом коррекции сопротивления R_n [12, 24, 27].

Стабильность частоты колебаний определяет величина наклона характеристики фазового угла коэффициента передачи фильтра вблизи номинальной частоты работы преобразователя:

$$S_\varphi = \frac{d}{d\omega_n} \varphi [\beta_{DRC_2}(\xi)] \Big|_{\omega_n = \omega_g} \quad (12)$$

где: $\varphi[\beta_{DRC_2}(\xi)]$ - является функцией фазового угла коэффициента передачи линейного фильтра, ω_g - номинальная частота колебаний преобразователя.

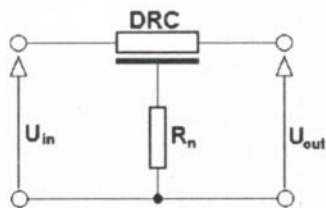


Рис. 6. Схема нулевого фильтра с резистором R_n .

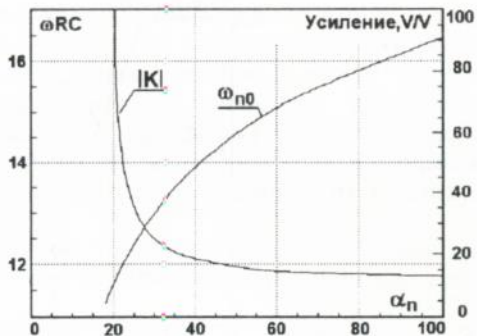


Рис. 8. Зависимость генерируемой частоты и минимального усиления, необходимого для возникновения колебаний от величины изменения параметра α_n .

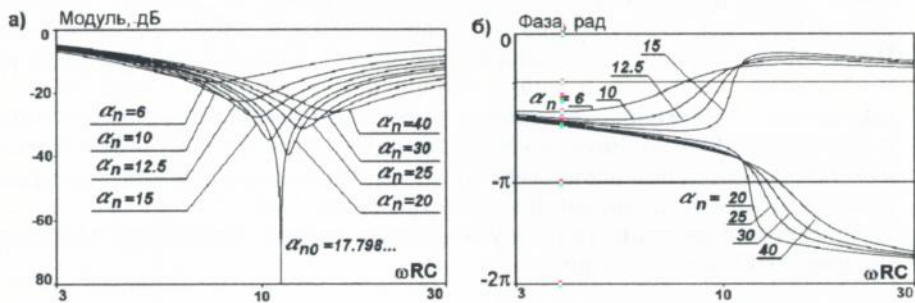


Рис. 7. Амплитудно-фазовые характеристики нулевого фильтра: а) модуль, б) фаза.

С увеличением коэффициента α_n уменьшается наклон фазовой характеристики, что ведет к увеличению влияния изменения сдвига фазы в цепи усиления на частоту колебаний генератора. Поэтому, с целью стабилизации частоты преобразователя, необходимо выбрать значение параметра α_n , лежащего вблизи величины α_{n0} . С другой стороны, величинам α_n , лежащим вблизи α_{n0} соответствуют большие значения минимального усиления усилителя.

Преобразователь с DRC структурой в виде фильтра верхних частот:

В этой схеме используется особенность фильтра верхних частот, при которой его функция переноса в определенном диапазоне частот принимает значение больше единицы (рис. 9). Структура DRC находится в цепи обратной связи усилителя с модулем усиления по напряжению меньше единицы (напр. эмиттерный повторитель). Условие баланса фазы в этом случае выполняется для частоты ω_g , при которой амплитуда выходного сигнала фильтра принимает значение K_1 , которое определяет условие баланса амплитуды генератора.



Рис. 9. Отрезок характеристики коэффициента передачи по напряжению DRC структуры в схеме фильтра верхних частот.

Приведенные выше рассуждения правильны, если генерируемый сигнал имеет вид, приближенный к синусоидальному, а условие баланса амплитуды для этого генератора выполняется с небольшим запасом. В противном случае, для точного определения частоты преобразователя необходимо учитывать наличие входного и выходного динамического импеданса усилителя, а также вносимые усилителем нелинейные деформации (гармонические составляющие), которые нарушают баланс мнимых мощностей в цепи. Эти проблемы невозможно решить, применяя классический метод линейной теории генерации [39].

Анализ влияния нелинейности усилителя позволяет определить величину генерируемой частоты в виде:

$$\omega = \omega_g + \Delta\omega_N \quad (13)$$

где: $\Delta\omega_N$ - определяется как нелинейная поправка частоты. Гармонические составляющие изменяют значения полного угла сдвига фаз, тем самым сдвигая значение частоты на составляющую $\Delta\omega_N$:

$$\Delta\omega_N \approx \frac{-1}{\frac{\partial \text{Im}[\beta_n(\omega)]}{\partial \omega}} \sum_{n=2}^{\infty} n h_n^2 \text{Im}[\beta_n(n\omega)] \quad (14)$$

где: $\text{Im}[\beta_n(n\omega)]$ - мнимая часть модуля n -ой гармонической составляющей коэффициента передачи, h_n - содержание определенной гармонической составляющей в выходном сигнале. Воздействие гармонических составляющих зависит от типа и структуры параметров четырехполосника обратной связи. Эта зависимость увеличивается с увеличением гармонических составляющих высших порядков.

При проектировании преобразователей необходимо учитывать присутствие комплексного сопротивления усилителя, которое нагружает четырехполосник с DRC структурами. Наличие сложной и сильной

обратной связи, которая выступает внутри структуры усилителя, а также тот факт, что выходные каскады современных операционных усилителей работают только в классе А и В (точка работы в месте отсечки), приводят к тому, что малосигнальное выходное комплексное сопротивление в принципе не описывает действительных эксплуатационных свойств, а в случае больших сигналов комплексное сопротивление описать трудно. При этом его зависимость от амплитуды выходного сигнала существенна.

На практике с удовлетворительной точностью возможно проводить расчеты при использовании специализированных компьютерных программ типа CAD [35, 37].

В работе применены программы PSPICE и MicroCap IV. Эти программы обеспечивают моделирование линий передач с потерями с анализом переходных процессов и гармонических составляющих сигнала тока или напряжения (*Fourier Analysis*). В исследованиях автор применил модели операционных усилителей, полученных непосредственно от многих изготовителей (*Advanced Linear Devices, Analog Devices, Burr-Brown, Harris Semiconductor, National Semiconductor, Texas Instruments*). Примеры анализа представлены на рис. 10.

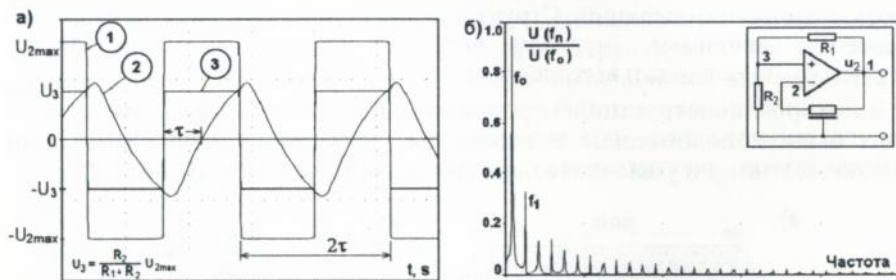


Рис. 10. Преобразователь с DRC структурой в схеме фильтра нижних частот: а) временные характеристики, б) распределение гармонических.

Для расчета систем преобразователей этого типа очень удобными являются методы, характерные для анализа триггеров. В этом случае решение проблемы определения параметров схемы сводится к тому, чтобы найти сигнал ответа цепи обратной связи на единичное возбуждение.

Структурные особенности DRC структур:

В реальных структурах DRC существенную роль играют форма и способ изготовления соответствующих слоев, а также форма и способ реализации электродов токопроводящих дорожек. При проектировании структур DRC важным является подбор соответствующей конфигурации внешних электродов, влияние которых значительно возрастает при уменьшении геометрических размеров структуры [14].

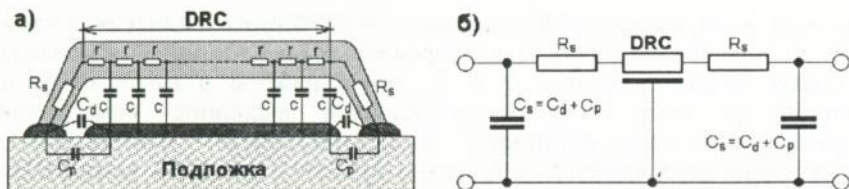


Рис. 11. Конфигурация DRC структуры с электродами выполненными в одном технологическом цикле; а) слойно-электрическая модель, б) схема замещения структуры

Конструкции внешних электродов для практических решений показаны на рис. 11, 12, 13, где соответственно приведены их различные слойно-электрические модели - для отдельных решений, вместе с представлением паразитных элементов, введенных на вход и выход структуры с соответствующей конфигурацией выводов [14, 39].

Разработано конструктивно-технологическое решение DRC структуры (рис. 11), при котором в одном технологическом цикле изготовлена металлизация (проводящий слой структуры) и система электродов резистивного слоя. Эта система обеспечивается минимальным числом технологических операций. Структура этого типа содержит паразитные элементы вводимые системой внешних электродов, нагружающих структуру на ее входе и выходе (сопротивление R_s , емкость C_s).

Во втором конструктивном решении (рис. 12), контакты резистивного слоя были дополнительно нанесены на поверхности диэлектрика, что исключает зазор и уменьшает паразитное сопротивление R_s до нуля.

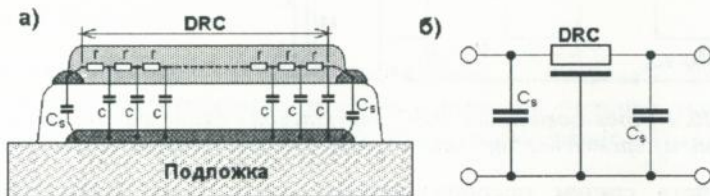


Рис. 12. Конфигурация электродов выполненных на поверхности диэлектрического слоя; а) слойно-электрическая модель, б) схема замещения структуры.

Для обеспечения минимальных паразитных связей разработана структура представленная на рис. 13а, а ее схема замещения приведена на рис. 13б. Эта структура требует, однако, решения ряда проблем, связанных с получением высокого качества проводящего слоя на поверхности резистора [14].

Выбор конкретного решения зависит от ряда требований: допустимых размеров DRC структуры, диапазона частот, величины и характера нагрузки структуры и т.д.. Предлагаемые выше схемы замещения структур DRC правильны для того диапазона частот, в котором

паразитные элементы могут быть представлены как элементы с сосредоточенными постоянными.

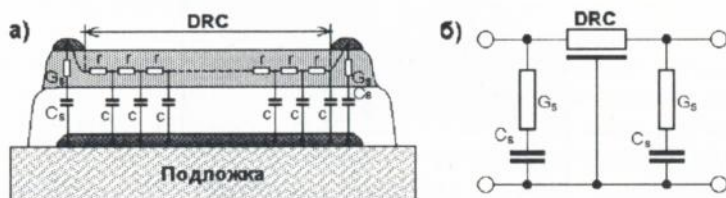


Рис. 13. Конфигурация электродов выполненных на поверхности резистивного слоя; а) слойно-электрическая модель, б) схема замещения структуры.

Метод компенсации температурных зависимостей DRC структуры :

Температурная стабильность DRC структур определяется зависимостью ее постоянной времени τ_{DRC} :

$$TK\tau_{DRC} = TKE + TКС \quad (15)$$

где: $TK\tau_{DRC}$, TKE, TКС - температурные коэффициенты постоянной времени, полной емкости и сопротивления DRC структуры.

Для компенсации температурных зависимостей ($TKE = TКС$) разработана конструкция, использующая структуры с двухслойным диэлектриком, отдельные слои которого выполняются из материалов с различными коэффициентами температурной проницаемости TKE [13]. Для идеального двухслойного конденсатора с разделенными слоями (рис. 14) величина результирующего температурного коэффициента TKE_p определяется из зависимости [13]:

$$TKE_p = \frac{TKE_a h_a \epsilon_b + TKE_b h_b \epsilon_a}{h_a \epsilon_b + h_b \epsilon_a} \quad (16)$$

где: TKE, h, и ϵ - это, соответственно, температурный коэффициент емкости, толщина слоя и диэлектрическая относительная проницаемость. Указатели **a** и **b** относятся к основному (**a**) и дополнительному (**b**) слоям. Температурная компенсация практически выполняется правильным выбором толщины дополнительного слоя h_b согласно выражению [13]:

$$h_b = h_a \frac{\epsilon_b}{\epsilon_a} \cdot \frac{TKE_a - TKE_w}{TKE_w - TKE_b} \quad (17)$$

где: TKE_w - требуемая величина TKE.

Полученные результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность принятой концепции температурной компенсации, которая позволяет получить структуру DRC с коэффициентом $TK\tau_{DRC}$ порядка $\pm 0.01\%/K$ в диапазоне изменения температуры окружающей среды от 298 до 398 К.

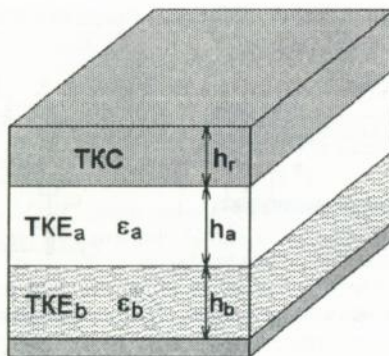


Рис. 14. Структура DRC с двухслойным диэлектриком.

Технология и выбор материалов:

Представленная теория преобразователей с DRC структурами использована для реализации датчиков различных физических и химических величин. Для каждого нового типа датчика необходимо разрабатывать технологию и соответствующую систему материалов. Проведенный цикл исследований электрических свойств и микроструктуры пленок на границах раздела многослойной системы проводник-диэлектрик-резистор, позволяет выделить совокупность технологических факторов и группы физических и химических явлений, которые позволяют сформулировать положения общей методики выбора материалов для реализации датчика определенного типа.

При выполнении DRC структур возникает проблема создания длинных и узких линий с удовлетворительной повторяемостью. Это касается некоторых ее применений в схемах датчиков, конструкции специальных систем корректируемых двухполосников DRC, выполнения DRC структур с точно определенными функциями $s(x)$ и $g(x)$, а также конструкции выводов DRC структуры, для обеспечения минимального расстояния между металлизацией структуры и выводами диэлектрического слоя (ограничение величины паразитных элементов) [14, 18, 31].

В классическом применении фотопечати рекомендуется, чтобы волокна сетки были размещены параллельно краю рамы. Одновременно это условие накладывает на размещение выполняемого рисунка. Другую технику можно применить к печати узких линий. Размещение рисунка под углом другим, чем 1.57 рад позволяет наносить узкие дорожки с хорошими параметрами. Полученная таким образом структура характеризуется значительной неровностью краев, что делает ее непригодной во многих применениях, особенно в высокочастотных схемах, но позволяет выполнить дорожки с шириной порядка $50 \cdot 10^{-6}$ м и расстояниями между ними порядка $75 \cdot 10^{-6}$ м. Работы автора показали возможность выполнения с помощью этой техники дорожек с допуском

средней ширины порядка 2-3% [1, 5, 10, 49-53]. В приведенных работах использованы сетчатые трафареты с непосредственно и косвенно нанесенной эмульсией [2, 5, 10, 49-53]. Удовлетворительные результаты могут быть получены в результате четкой корреляции размеров проводящих дорожек со слоями трафарета и прецизионной установки ее по отношению к волокнам сетки во время процесса экспозиции. Эту технику с успехом применял автор для создания системы проводящих дорожек с шириной $60 \cdot 10^{-6}$ м в схеме термопишущей головки [5, 10, 51-53].

Интересные результаты получены при использовании металлоорганических паст. Разложение образующих ее соединений во время процесса вжигания до чистого металла и значительное уменьшение ее толщины (200-300 кратное) приводят к тому, что эти слои характеризуются очень четкими краями (изменения краев, характерные для фотопечати, почти незаметны). Эти материалы использованы автором только для реализации нижнего металлического слоя и выводов резистивного слоя DRC структуры [14]. Очень малая толщина получаемых слоев и большая гладкость поверхности позволяет уменьшить диэлектрический слой - при сохранении диэлектрической прочности - даже до величины $20 \cdot 10^{-6}$ м, благодаря чему значительно возрастает удельная емкость C_{\square} изготавливаемых структур. Одновременно уменьшается полная толщина (часто порядка $65 \cdot 10^{-6}$ м) DRC структуры, что значительно облегчает изготовление резистивных слоев с воспроизводимыми значениями сопротивления [14].

Для выполнения проводящего слоя автор использовал материалы на основе серебра с добавками палладия, который ограничивает миграционные способности серебра.

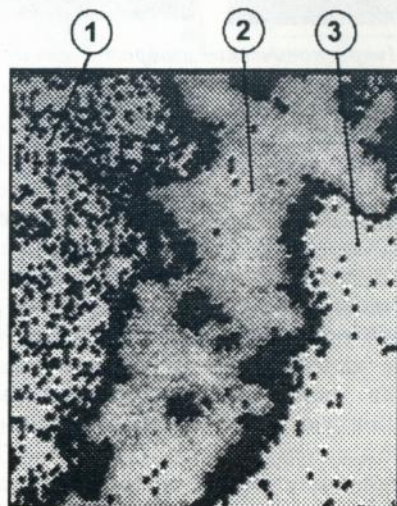


Рис. 15. Карта распределения серебра в сечении структуры DRC; 1) диэлектрический слой, 2) проводящий слой, 3) подложка.

Удовлетворительные результаты получены при использовании композиции материалов, смешанных в пропорциях определяемых отношением атомного числа $Pd/Ag = 4/23$. Эта композиция обеспечивает создание DRC структур без коротких замыканий уже при толщине диэлектрического слоя $25 \cdot 10^{-6}$ м. В этом случае используется диэлектрический слой из системы TiO_2 - стекло [2-3, 7, 14-15]. В этой структуре наблюдается увеличение сопротивления проводящего слоя что обусловлено параметрами и числом операций вжигания. Относительное изменение величины сопротивления не превышало 25% и стабилизировалось практически после 4-х циклов вжигания, что в принципе является типичным количеством операций при изготовлении DRC структур. Наблюдаемое увеличение сопротивления в основном связано с перемещением части проводящего слоя в область диэлектрика (вблизи электрода), вызванным процессом миграции серебра, что подтвердили микроскопические исследования (рис. 15).

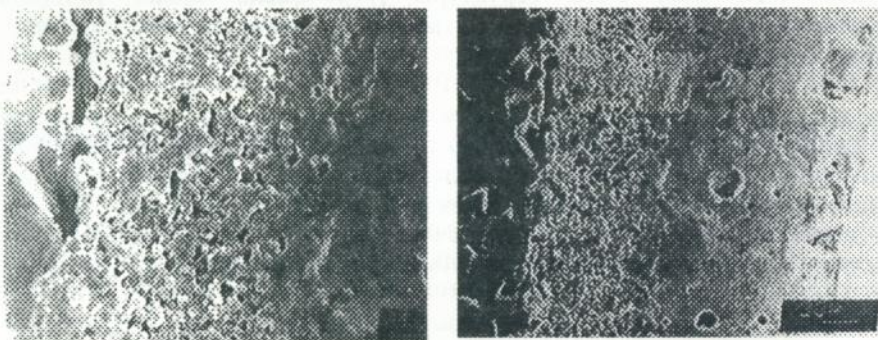


Рис. 16. Микроскопические изображения структур.

Решающее влияние на параметры выполненных DRC структур имеют, прежде всего свойства резистивного слоя. В случае выполнения резистора на диэлектрике, особенно с большой диэлектрической проницаемостью, наблюдается возрастание или уменьшение сопротивления, существенные изменения температурного коэффициента сопротивления (ТКС), коэффициента шумов, временной стабильности и деформационной чувствительности (относительные изменения сопротивления к относительному удлинению резистора, вызванному действием внешних сил) в широком диапазоне изменения параметров технологического процесса. Определение качественных и количественных зависимостей, связывающих свойства резистора на диэлектрике с указанными явлениями, играет основную роль при согласовании материалов для выполнения многослойных схем, которыми являются DRC структуры.

Исследования показали присутствие нового слоя на границе системы диэлектрик-резистор. Толщина этого переходного слоя зависит от параметров технологического процесса (температура и время вжигания, время охлаждения и находится в диапазоне от 9 до $14 \cdot 10^{-6}$ м) [14, 34-35].

Микроскопические изображение поперечного сечения этой многослойной структуры приведены на рис. 16.

Процесс формирования переходного слоя - в случае применения диэлектрика с большим содержанием TiO_2 , который характеризуется большой пористостью - начинается еще во время фотопечати. Во время вжигания наступает диффузия составных элементов обеих композиций в соединении с взаимной реакцией этих элементов. В этой системе происходит уменьшение содержания стекла в приграничном слое резистора и одновременное увеличение содержания стекла в диэлектрическом слое. Это подтверждают результаты исследований распределения относительной концентрации свинца Pb , который является одним из основных составляющих элементов стекла в поперечном сечении многослойной структуры. Результаты этих исследований представлены в виде карт распределения свинца и определенных на этой основе линейных аппроксимаций изменения концентрации Pb вдоль оси сечения (рис. 17).

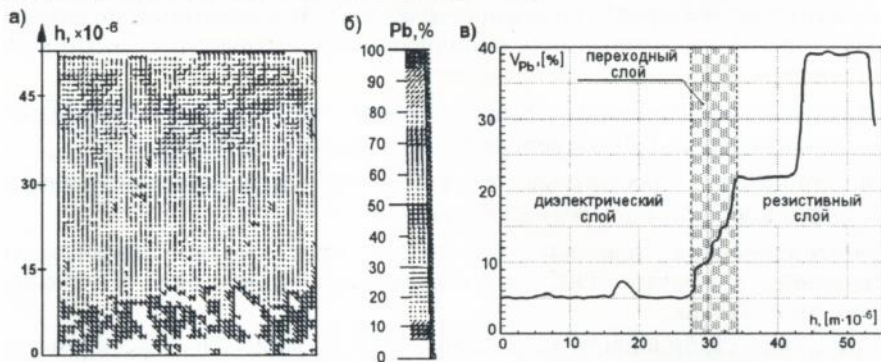


Рис. 17. Распределение концентрации свинца в сечении структуры с диэлектрическим материалом содержащим 90% TiO_2 и резистивным слоем R 315 ($100k\Omega/\square$); а) карта распределения свинца, б) масштаб концентрации, в) концентрация вдоль поперечной оси структуры.

Электрические свойства резистивных пленок, выполненных на слоях TiO_2 , показывают полную корреляцию с обсужденными результатами структурных исследований. Для оценки влияния типа подложки и факторов технологического процесса на свойства выполненных таким образом резистивных пленок введен коэффициент k_{dp} который определяется:

$$k_{dp} = \frac{R_d}{R_p} \quad \left| \begin{array}{l} \text{Параметр - переменные технологического процесса} \end{array} \right. \quad (18)$$

где: R_p и R_d обозначают сопротивление на квадрат, слоев выполненных в одинаковых условиях, на керамической подложке и диэлектрике соответственно (рис. 18 и 19).

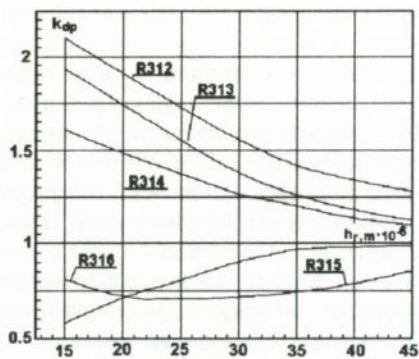


Рис. 18. Зависимость значения коэффициента k_{dp} от толщины слоев; Температура вжигания $T_f=1123K$.

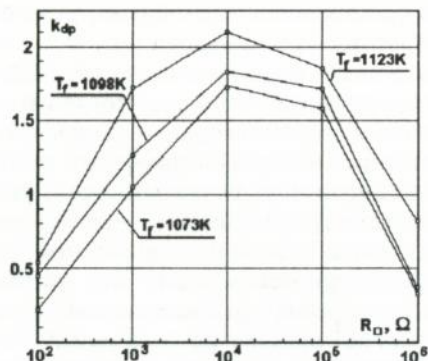


Рис. 19. Зависимость значения коэффициента k_{dp} от сопротивления слоев; Толщина слоев $h_r=15 \cdot 10^{-6}m$.

Анализ температурных зависимостей отдельных композиций позволяет сделать два существенных при выполнении DRC структур с заданными температурными свойствами предположения:

- увеличение толщины сопротивления h_r вызывает смещение характеристик ТКС в сторону положительных значений,
- увеличение температуры вжигания T_f вызывает уменьшение значения ТКС, что показано на рис. 20.

Заштрихованная площадь определяет пространство получаемых изменений значения ТКС в исследуемом диапазоне изменения параметров T_f и h_r .

Временная стабильность резисторов, изготовленных из высокоомных паст на диэлектрике, лучше, чем резисторов изготовленных на керамической подложке. Проведенные исследования стабильности, при ускоренных условиях, совпадают с результатами испытаний влияния искусственно индуцированных в слое механических напряжений на изменение сопротивления исследуемых резисторов - выполненных согласно методике, приведенной на рис. 21 [6, 8]. Подложка вместе с нанесенными слоями сгибается в результате воздействия внешних (регулируемых) сил, которые прикладываются в трех точках при помощи специальной насадки, что является причиной увеличения геометрических размеров резистивного слоя, и тем самым приводит к возникновению напряжений в резисторе, которые определяет коэффициент деформационной чувствительности:

$$k_\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{R}{\Delta R} \quad (19)$$

где: $\Delta L/L$ и $\Delta R/R$ относительные изменения длины и сопротивления резистора соответственно представлены в табл. 1.

Применение стандартных материалов в многослойных системах, использующих диэлектрические композиции с различными свойствами ТКЛР (α_d), может быть причиной существенных изменений параметров получаемых резисторов. Структура схемы с точки зрения ее механики, очень сложна, вследствие своей многослойности (до 7 слоев в случае линии DRC), и возникновения новых промежуточных слоев, состав и свойства которых очень сложно определить. Дополнительно ее усложняют существующие неоднородности, обусловленные, например, присутствием пор в отдельных слоях, микротрещин и микроразрывов.

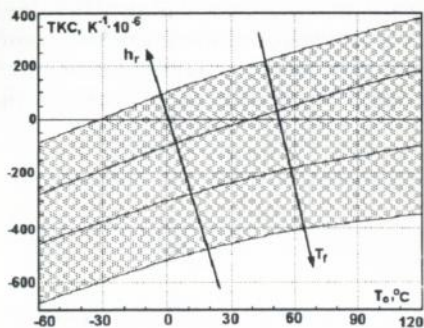


Рис. 20. Влияние толщины слоя h_f и температуры вжигания T_f на ТКС резисторов выполненных на диэлектрике.

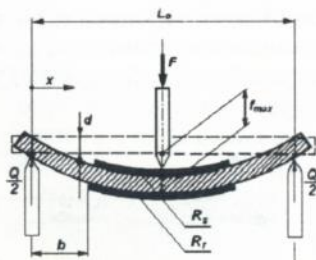


Рис. 21. Принцип измерения влияния напряжения на электрические свойства резистора: F - внешняя сила, Q - реакции опор, f_{max} - стрела прогиба, R_s и R_f резисторы, исследуемые на сжатие и растяжение

Эти напряжения выступают естественным способом, и возникают в результате температурных изменений, которым подвергается резистор во время формирования своей структуры в процессе вжигания - охлаждения, а также во время эксплуатации.

Табл. 1. Пьезорезистивные свойства резисторов, толщина слоя $h_f = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, температура вжигания $T_f = 1120 \text{ К}$, $f_{max} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Тип композиции	Резисторы на алундовой керамике		Резисторы на диэлектрике	
	$\Delta R/R$, [%]	K_E	$\Delta R/R$, [%]	K_E
R 312	0.313 (*)	14.2	---- (**)	----
R 313	0.173 (*)	7.9	13.849	629.4
R 314	0.605	13.7	0.470	10.7
R 315	0.445	10.1	0.435	9.9
R 316	0.546	12.4	0.411	9.3

*) - для $f_{max} < 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}$,

**) - для $f_{max} < 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$

Значения коэффициента деформационной чувствительности k_{ϵ} , определенного для высокоомных паст, меньше для слоев, выполненных на диэлектрике, чем для слоев, выполненных на керамике. Обратное явление наблюдается для низкоомных паст. Подробный анализ полученных данных показывает наличие зависимости коэффициента k_{ϵ} и абсолютной величины разницы ТКЛР слоев. Данные, которые иллюстрируют эту зависимость, представлены на рис. 22.

Результаты микрорентгеновского анализа (карта распределения элементов) в сечении схемы резистор-диэлектрик позволяют отметить, что резистивная пленка, изготовленная на диэлектрике, характеризуется некоторой анизотропией свойств, которую в первом приближении можно представить в виде модели, состоящей из трех параллельно соединенных резисторов R_p , R_a , R_b (рис. 23) образующих отдельные выделенные слои резистора.

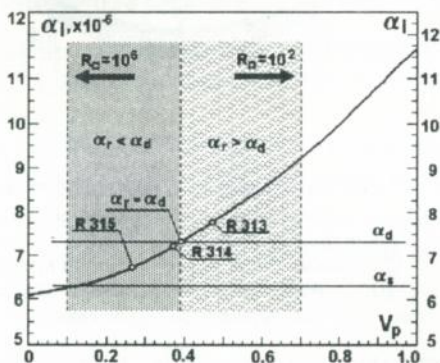


Рис. 22. Характеристика ТКЛР в зависимости от объемной величины V_p проводящей фазы.

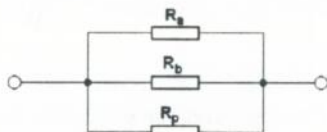


Рис. 23. Приближенная дискретная схема замещения резистора на диэлектрике.

Сопротивление R_p представляет собой переходный слой схемы диэлектрик-резистор, R_a и R_b - резисторы, выполненные из исходного материала, с тем, что R_a представляет собой сопротивление слоя с утечкой стекла к диэлектрику, а R_b - сопротивление верхнего, богатого стеклом слоя, причем выполняется условие $R_p > R_a > R_b$. Эта схема объясняет поведение коэффициента $k_{\text{др}}$ в зависимости от толщины слоя и изменения температуры вжигания. Для паст из ряда (R 313, R 315) при толщине слоев порядка $15 \cdot 10^{-6}$ м, решающую роль играет переходный слой (R_p), влияние которого уменьшается с увеличением толщины резисторов. Для паст R 312 и R 316 можно предполагать что решающую роль играют механизмы, связанные с утечкой стекла в диэлектрик и значительным уменьшением сопротивления слоев, представленных величинами R_a и R_b .

Значение коэффициента $k_{др}$ возрастает для всех исследуемых паст с увеличением температуры вжигания, что связано с заметным увеличением толщины переходного слоя (микроскопические исследования [14]) и увеличением его влияния на полное сопротивление.

Существенная информация о внутренней структуре для разработанных структур получена из рентгеновских исследований.

Автором разработан метод косвенных исследований [14]. Для выполнения этих исследований подготовлены специальные композиции (содержащие прогнозируемые элементы переходного слоя с различным процентным составом) которые являются смесью $Bi_2Ru_2O_7$, TiO_2 и стекла резистивного и диэлектрического слоев. Эти композиции после нанесения на керамическую подложку вжигаются. Для анализируемой схемы исследованы значения сеточных постоянных рутения висмута. Типичные дифрактограммы композиций, определенных как RT-O (без участия TiO_2), а также RT-8 (8 весовых процентов TiO_2), вжигаемых при температуре 1123 К, представлены на рис. 24.

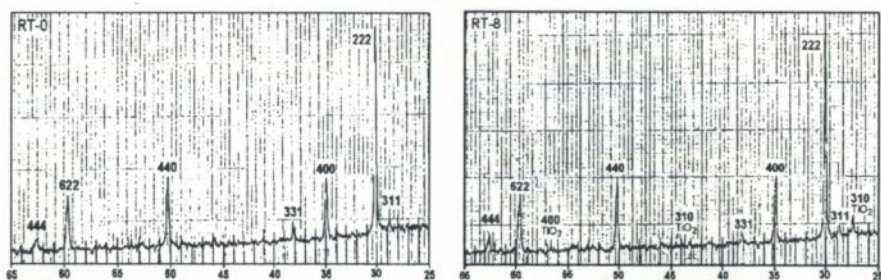


Рис. 24. Дифрактограммы композиций RT-0 и RT-8.

Проведенные исследования не обнаружили присутствия новой по отношению к структуре кристаллической фазы. Наблюдается только незначительный рост сеточных постоянных рутения висмута. Резисторы, выполненные из вышеуказанной композиции RT-8, характеризовались большой чувствительностью сопротивления к изменению параметров процесса вжигания, а также значительным температурным коэффициентом сопротивления, который может достигать величины $-2200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [66].

На основе проведенных исследований можно констатировать, что причины изменения параметров определяются процессами происходящими в промежуточной области:

- химическими реакциями элементов резистивной и диэлектрической композиции во время процесса вжигания,
- изменениями структуры системы резистор-диэлектрик в промежуточном слое, связанными со взаимной диффузией компонентов слоев,
- изменениями фазового состава стекол отдельных слоев,

- внутренними механическими напряжениями.

Схемы замещения реальной толстопленочной структуры DRC:

Теоретический анализ свойств структур DRC проводится на основе анализа одномерной схемы замещения, содержащей идеальные элементы R и C. Реальный диэлектрик характеризуется потерями определенной величины, которые в разработанной схеме замещения (рис. 25) представлены зависимым от частоты сопротивлением $r_s(\omega)$ и постоянной проводимостью g_o .

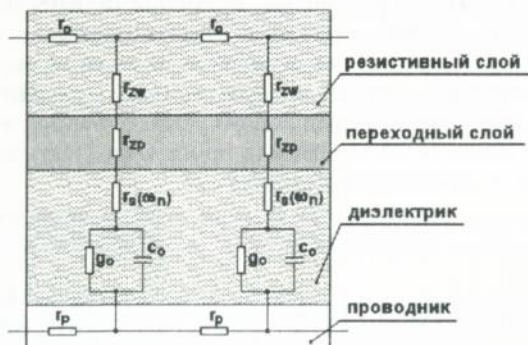


Рис. 25. Слойно-электрическая схема замещения отрезка реальной DRC структуры.

Применение данной схемы замещения для точного проектирования схем преобразователей с DRC структурами (особенно в нулевой конфигурации), является недостаточным. Причины этого явления находятся в применяемой идеализации, которая предполагает существование резистора с нулевой толщиной и связанное с этим одномерное протекание тока. Схема реальной структуры для этого случая представлена на рис. 25. В этом примере потери представлены в виде последовательно соединенных элементов r_{zw} , r_{zp} и $r_s(\omega)$, где r_{zw} , и r_{zp} - соответственно поперечное сопротивление резистора и переходного слоя системы диэлектрик-резистор. Коэффициент полных потерь в DRC структуре можно представить в таком случае в форме [14, 34, 39]:

$$B(\omega) = \frac{r_s(\omega) + r_{zw} + r_{zp}}{r_o} \quad (20)$$

В реальной структуре DRC необходимо дополнительно, в ряде случаев, учитывать присутствие сопротивления нижней металлизации (r_p), индуктивность и сопротивление электродов (L_k, R_k), а также паразитные элементы, вносимые контактами структуры (R_s, C_s). Присутствие этих элементов (Рис. 26) имеет в большинстве случаев второстепенное

значение и надо его учитывать только в случае специфических применений DRC структур [34, 37].

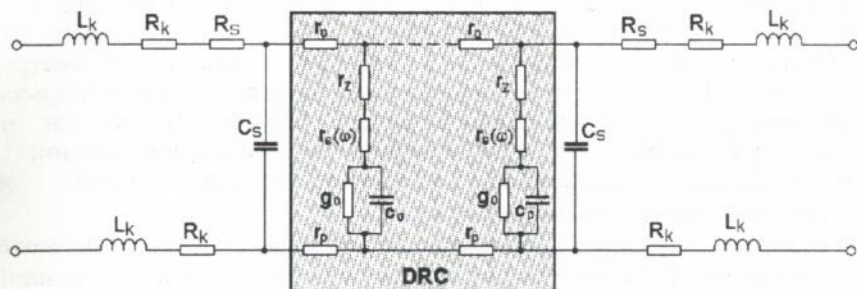


Рис. 26. Полная схема замещения реальной DRC структуры.

Для определения емкости структуры в широком диапазоне изменения частот ω_n разработан косвенный метод, суть которого заключается в измерении нулевых частот f_0 фильтра и коэффициента α_{n0} , в схеме, представленной на рис. 6, и дальнейшем определении емкости C по формуле:

$$C = \frac{\omega_{n0}}{2\pi f_0 R} \quad (21)$$

где: ω_{n0} - нормируемая нулевая частота, которая для идеальной структуры равна 11.186642..., а для реальных структур она определяется из предложенной автором зависимости:

$$\omega_{n0} = 10^m \alpha_n^p = 10^m R^p R_n^{-p} \quad (22)$$

где: m и p постоянные коэффициенты, значение которых определено и равно:

$$m = 0.546... \quad p = 0.242... \quad (23)$$

Точность этого метода зависит от точности определения величины R_n и f_0 , ошибки определения постоянной ω_{n0} в уравнении (22). Сумма всех ошибок меньше чем 0.1% [14, 18, 31]. Емкость реальной DRC структуры в широком диапазоне изменения частот определяется из зависимости:

$$C = \frac{0.5595...}{f_0 R^{0.598} R_n^{0.402}} \quad (24)$$

с точностью, которая обусловлена точностью измерения величины f_0 , R и R_n [14, 18, 31].

Коррекция DRC структур:

Стандартный технологический процесс обеспечивает изготовление DRC структур с точностью основных параметров (R, C) порядка $\pm 10\div 15\%$ [12, 14, 18, 27, 31, 39]. Значительная часть практических их применений требует применения DRC структур с точностью параметров лучше чем 1%, так что неизбежным является дополнительная технологическая операция корректировки. Процесс коррекции по отношению к системам DRC очень сложный из-за следующих причин:

- невозможна независимая коррекция только одного из распределенных параметров R или C,
- свойства структуры описаны формулами, которые являются сложными гиперболическими функциями комплексной переменной, не подлежащими непосредственному анализу,
- процесс контроля параметров структуры во время коррекции очень сложный вследствие того, что некоторые из них практически невозможно измерить непосредственными методами.



Рис. 27. Классификация методов коррекции DRC структур.

Коррекция может быть выполнена при помощи двух основных методов, которые представлены схематически на рис. 27.

К непосредственным методам относятся способы подстройки, в которых процессу коррекции подлежит данная структура DRC, а к косвенным методам, очень полезным в практике, те методы, в которых корректируется соответственно подобранный и соединенный с DRC структурой внешний элемент (R или C) с сосредоточенными или распределенными параметрами [18, 24, 27, 30-31].



Рис. 28. Блок-схема системы коррекции структуры DRC.

В непосредственных методах выполнение корректирующего реза нарушает прохождение тока, вследствие чего в этой схеме не выполняется условие одномерного протекания. Это вызывает необходимость разработки многомерных моделей структуры DRC с учетом методов их решения. Применение их в практике коррекции требовало:

- разработки адекватных двумерных моделей структур DRC и учета в них действующих в реальной структуре паразитных элементов,
- определения влияния позиции реза и его геометрии на перемещение нулей и полюсов передаточной функции структуры DRC,
- разработки соответствующих вычислительных алгоритмов,
- применения быстродействующей компьютерной измерительно-преобразовывающей управляющей системы.

Для коррекции DRC структур разработана поверхностная модель, содержащая $m \cdot n$ основных сегментов (рис. 29), для которой - в случае однородной структуры DRC - величины составных ее элементов определяются из зависимости [12]:

$$R_x = R_{\square} \frac{L}{w} \cdot \frac{n}{m}, \quad R_y = R_{\square} \frac{w}{L} \cdot \frac{m}{n}, \quad C = C_{\square} \cdot \frac{w}{mn} \cdot L \quad (25)$$

где: w - ширина структуры, L - длина структуры, m - количество сегментов на длину, n - количество сегментов на ширину структуры.

Коррекция реализуется методом удаления из основной сети сегментов, конфигурация которых отвечает геометрии анализируемого корректирующего реза. Точность анализа этого метода связана с количеством используемых в модели структуры DRC элементарных сегментов.

Координаты корректирующих резов определяются при помощи трех основных параметров: L_t - позиция реза, w_t - глубина реза, d_t - ширина реза. На рис. 30 и 31 представлены результаты коррекции нулевого фильтра для различных значений параметров коррекционных резов [12].

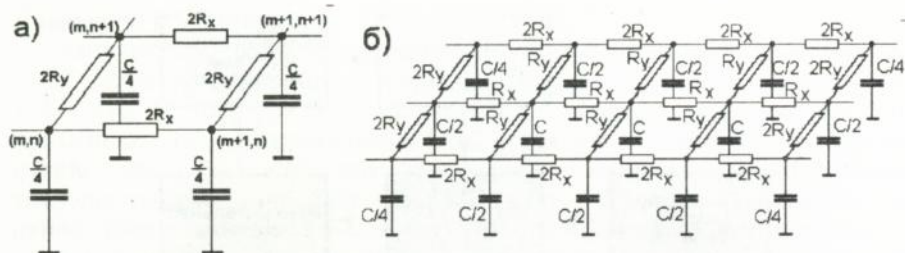


Рис. 29. Двухмерная модель структуры DRC: а) элементарный сегмент б) 8-ми сегментная модель.

Представленный метод коррекции дает возможность подстройки нулевой частоты фильтра, а также моделирования его характеристики (изменение добротности) - причем характер и степень получаемых изменений очень сильно зависит от параметров корректирующих резонансов (l_t , w_t , d_t) [12].

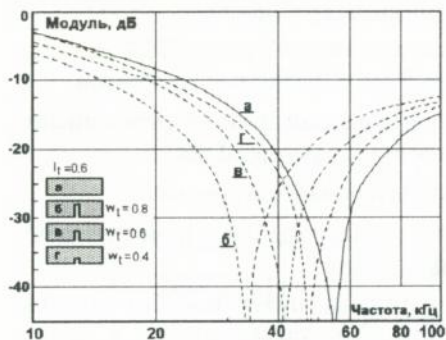


Рис. 30. Влияние глубины реза w_t на характеристику передаточной функции нулевого фильтра.

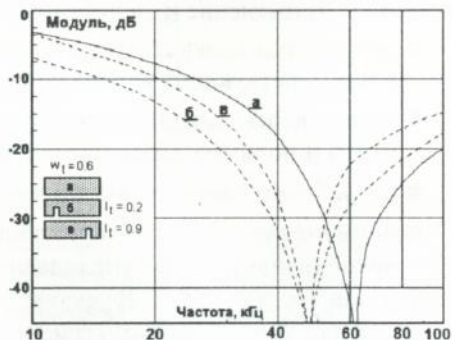


Рис. 31. Влияние положения резонансов l_1 , симметричных оси структуры на характеристику передаточной функции нулевого фильтра.

Проблема коррекции косвенным методом требует синтеза ряда способных к юстировке систем (наиболее часто типа DRC-R и DRC-DRC) и определения чувствительности коэффициента передачи анализируемой системы к изменению величины основного параметра корректируемого элемента.

Коэффициент передачи DRC структур является иррациональной функцией комплексной частоты гиперболического типа. Поэтому, непосредственное применение с этой целью методов синтеза RC-схем с сосредоточенными параметрами невозможно, так что в целом не существует общего решения.

Коррекция в разработанных автором структурах этого типа реализуется:

- изменением вида и величины нагрузки (рис. 32),

- изменением величины сопротивления параллельного резистора (рис. 33),
- изменением параметров (R и C) гребенчатой структуры типа DRC-DRC (рис. 34).

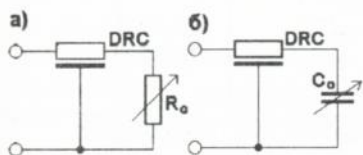


Рис. 32. Коррекция характеристик DRC структуры в схеме фильтра низких частот методом изменения нагрузки; а) резистивная нагрузка, б) емкостная нагрузка.

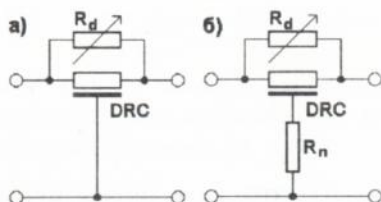


Рис. 33. Схемы типа DRC-R; а) схема фильтра нижних частот, б) схема нулевого фильтра.

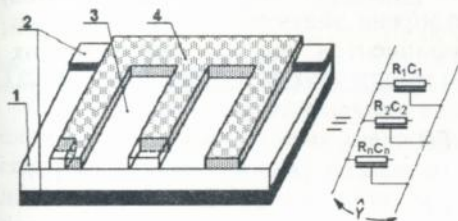


Рис. 34. Гребенчатая структура DRC: 1) подложка, 2) металлический слой, 3) диэлектрик, 4) резистивный слой.

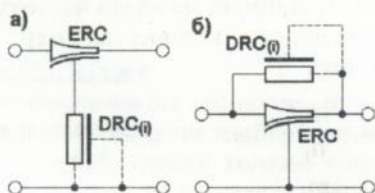


Рис. 35. Нулевые фильтры с экспоненциально сходящей структурой ERC и двухполосниками DRC; а) с импедансом Z_S , б) с адмитансом Y_p

Пример использования структур типа DRC-DRC для реализации нулевых фильтров представлен на рис. 34. Полное сопротивление R и емкость C структуры ERC (экспоненциально сходящей) с аналогичными параметрами двухполосников (R_i, C_i) структуры DRC (рис. 35) описывается зависимостями:

$$R_i = m_i R, \quad C_i = n_i C \quad (26)$$

Степень неоднородности изменения параметров двухполосников DRC определяется параметром $h = m_i/n_i$. Он является определителем процесса коррекции, которая выполняется путем изменения сопротивления (коэффициент m_i) и емкости (коэффициент n_i) присоединенных двухполосников DRC(i) [18, 31].

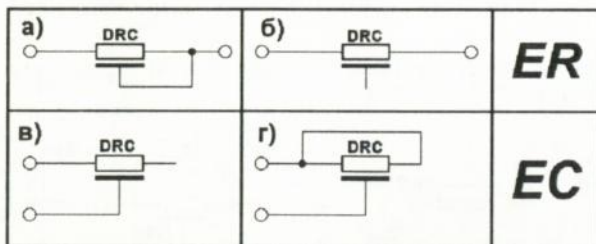


Рис. 36. Двухполюсниковые конфигурации DRC структуры.

Две из этих схем имеют резистивную конфигурацию вводов **ER** и обеспечивают сдвиг фаз от 0 до $-46 \cdot 2\pi/360$ рад, две другие, с емкостной конфигурацией выводов **EC**, обеспечивают сдвиг фаз в пределе $(-43 \cdot 2\pi/360, -\pi/2)$ рад [73]. Отдельные типы схем ERC-DRC(i) выполняют условия нулевого фильтра в ограниченном диапазоне частот и только совместное применение структур двухполюсников типа **ER** и **EC** позволяет выполнять схемы нулевого фильтра в полном диапазоне изменения частот. Данную нулевую частоту ω_{n0} можно получить для теоретически бесконечного количества пар коэффициентов (m_i, n_i) , выполняющих условие:

$$h = \frac{m_i}{n_i} \geq h_{kr} \quad \text{для систем типа ER} \quad (27)$$

$$h = \frac{m_i}{n_i} \leq h_{kr} \quad \text{для систем типа EC}$$

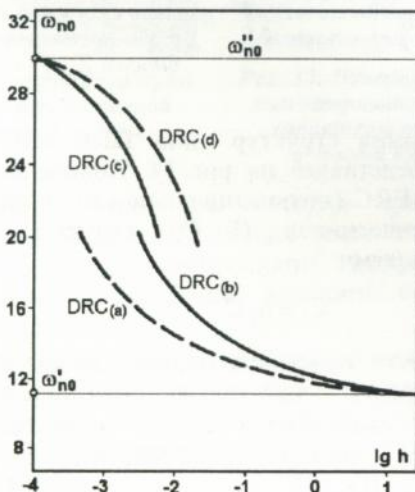


Рис. 37. Зависимость $\omega_{n0}=f(h)$ для различных конфигураций DRC структур.

где: $h_{кг}$ - критическая величина отношения m_i/n_i , определяющая предел выполнения нулевого фильтра с данными двухполосниками $DRC(i)$, зависящая от типа конфигурации DRC и значения коэффициента сходимости \mathbf{B} структуры ERC. Примерное изменение $\omega_{п0}$ в зависимости от параметра h , для различных типов структуры DRC представлено на рис. 37 [18, 31].

В толстопленочной технике рассматриваемую концепцию нулевых фильтров можно реализовать при использовании гребенчатых DRC структур (рис. 35), с комплексной проводимостью:

$$Y = \sum_{i=1}^l Y_{EC(i)} + \sum_{j=1}^p Y_{ER(j)} \quad (28)$$

где: i, j - соответственно тип примененного двухполосника, l, p - соответственно число структур данного типа. Подстройка схемы до требуемой частоты $\omega_{п0}$ осуществляется путем соответствующих нарезов (сокращение и/или сужение) резистивного слоя отдельных индивидуальных структур двухполосников.

Термические связи в системе многослойной структуры:

Современная толстопленочная техника обеспечивает создание многослойных систем, в которых анализируемые элементы цепи температурной связи (источник, датчик) разделены между собой только тонким слоем диэлектрического стекла (рис. 38в). Структуры этого типа характеризуются наиболее сильной температурной связью [23, 29, 32, 39-41].

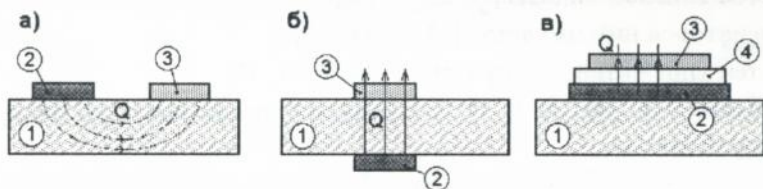


Рис. 38. Виды возможных термических связей в толстопленочных системах, а) планарная схема, б) многослойная схема (двухсторонняя), в) многослойная система (односторонняя); 1 - подложка, 2 - источник, 3 - датчик, 4 - диэлектрик.

Анализ этого процесса возможен на основе протекания тепла в одномерной модели (рис. 39), описанной при помощи аналоговой схемы RC с распределенными параметрами, для расчета которой используются методы, характерные для анализа структур DRC [23, 28, 32, 35, 37, 39-41, 73].

В этой схеме напряжение U является аналогом температуры T , а сопротивление R и емкость C - аналоги, соответственно, теплового сопротивления и емкости анализируемой схемы. В схемах этого типа

возможно использование представленной ранее концепции выполнения генерирующих систем.

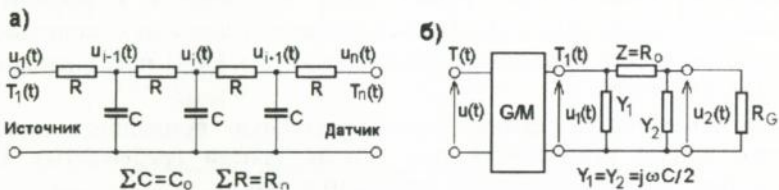


Рис. 39. Схема замещения в виде DRC структуры для моделирования температурных полей, а) электрический аналог, б) упрощенный вид.

В упрощенном виде (рис. 39б), преобразователь G/M представляет выпрямитель или модулятор, который переносит температурный сигнал в форме, зависящей от вида элемента который является источником тепла. Анализ фазовой характеристики этой схемы для планарной системы позволил определить, максимальную предельную частоту для термических связей в пределе 1 - 10 Гц, а в многослойных системах ее можно увеличить даже до нескольких десятков Гц [32, 39-41].

Применение датчика температуры выполненного в виде интегрируемой с подложкой микросхемы (напр. толстопленочный термистор), создает возможность использования существующих в системе термических связей контролируемым способом. Схемы этого типа были использованы автором для реализации:

- систем токовой защиты [20, 29, 55-64],
- генераторов низких частот [32, 39-41, 43],
- систем управления температурой [32, 39-41, 43].

Для примера, на рис. 40 и 41 представлена реализация генератора с термической связью.



Рис. 40. Блок-схема термического генератора.

Эта схема обеспечивает возможность перестройки генерируемой частоты в диапазоне от доли герца до 60 Гц (рис. 42) [32, 39-41, 43].

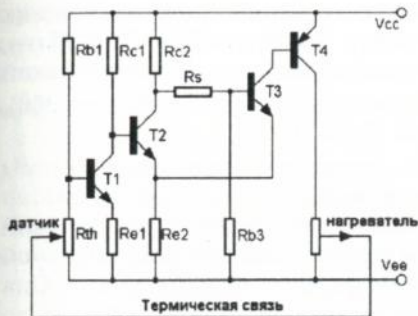


Рис. 41. Принципиальная схема генератора с термической связью.

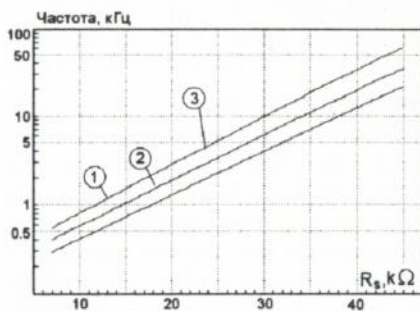


Рис. 42. Характеристика изменения генерируемой частоты в зависимости от величины сопротивления R_g .

Преобразователи температуры.

Реализация преобразователей температуры требовала разработки совместимой системы материалов. Положительные результаты были получены для проводящих композиций на основе Pd-Ag и диэлектрических паст на базе TiO_2 . Особое внимание уделялось терморезистивным материалам. Ряд работ в этом направлении автор проводил с использованием оксидов титана и меди. В этих композициях с целью уменьшения сопротивления применен дополнительно рутений висмута ($Bi_2Ru_2O_7$) [48, 66-71]. Температурные и временные характеристики разработанных паст на основе смеси $Bi_2Ru_2O_7$, TiO_2 и стекла представлены на рис. 43 и 44.

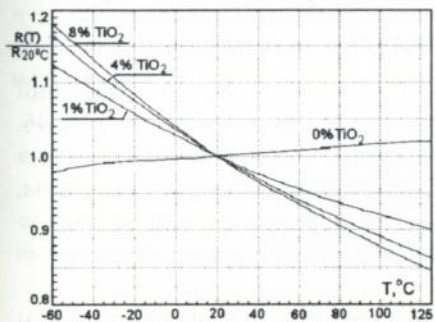


Рис. 43. Зависимость изменения сопротивления от температуры для композиции типа $Bi_2Ru_2O_7 + TiO_2$.

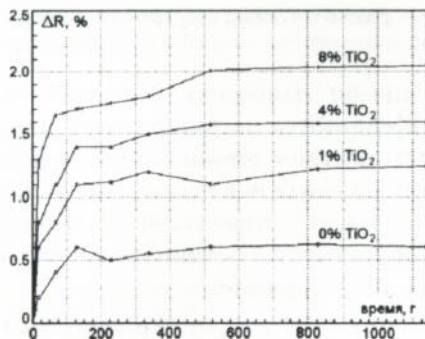


Рис. 44. Зависимость изменения сопротивления от времени принудительного отказа ($T=423$) композиции типа $Bi_2Ru_2O_7 + TiO_2$.

Проведены исследования возможности создания стабильных DRC структур при помощи материалов с меньшей чувствительностью к технологическому процессу. Результаты этих исследований представлены в работах [2-3, 5, 13-14, 22, 25, 32, 35, 36, 66-71]. В разработанных

преобразователях применялась широкая группа диэлектрических материалов фирм Du Pont (DP 9959, DP 5032), Engelhard (*Zero Flow Glass*), Remex, а также композиции с большим коэффициентом диэлектрической проницаемости фирмы Electro Science Laboratories (*ESL 4181* с $\epsilon_r \approx 300$), вжигаемые при температуре порядка 1250 К [66-71].

Для преобразователей температуры возможно применять схемы генераторов с DRC структурами представленные на рис. 5. Выбор определяется требованиями, возникающими из технических условий характерных для данной схемы. В общем случае, наиболее рациональной является система с DRC структурой в схеме фильтра нижних частот. Она дает возможность системной подстройки частоты выходного сигнала до требуемой величины, методом изменения полного сопротивления нагрузки структуры. Простейшим примером схемы этого типа является DRC структура, нагруженная сосредоточенным сопротивлением, которое может быть выполнено в виде элемента, изготовленного из типичной резистивной композиции, или с помощью идентичного терморезистивного материала из которого выполнена DRC структура (рис. 45).

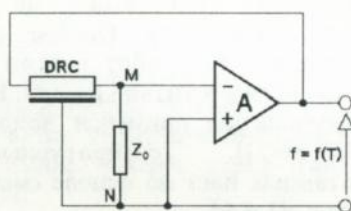


Рис. 45. Схема структуры преобразователя температура/частота с переменной нагрузкой.

Диапазон изменения выходной частоты, для практических значений коэффициента нагрузки структуры m ($m=R/R_1$), представлен на рис. 46. Достоинством термисторной нагрузки является сохранение постоянства коэффициента m во всем диапазоне изменения температур работы схемы, что имеет существенное значение для величины минимального коэффициента усиления усилителя K_{\min} , необходимого для обеспечения условий генерации.

Аналогичные результаты получены путем нагрузки структуры схемами двухполосников DRC, изготовленных в виде гребенчатой структуры. Характеристики изменения частоты для схем этого типа представлены на рис. 47. Символы **A**, **B**, **C** и **D** обозначают соответственно тип анализируемого двухполосника.

Необходимо подчеркнуть тот факт, что совместное использование двухполосных структур типа **ER** и **ES** дает возможность перемещения генерируемой частоты как в направлении высших, так и в направлении низших частот [28, 30]. Относительно большая степень сложности

технологического процесса выполнения нагрузки в виде многослойной структуры уменьшается вследствие выполнения ее в том же технологическом процессе, что и основная структура DRC.

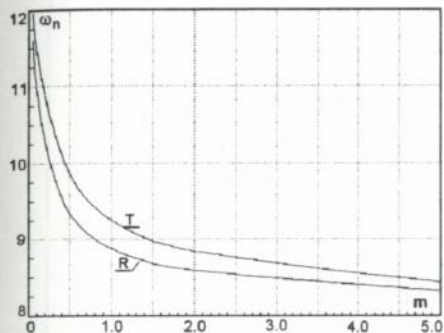


Рис. 46. Диапазон регулирования выходной частоты в зависимости от изменения коэффициента нагрузки m .

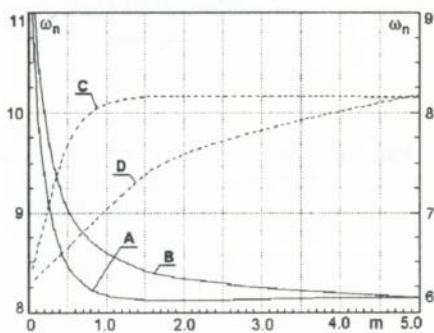
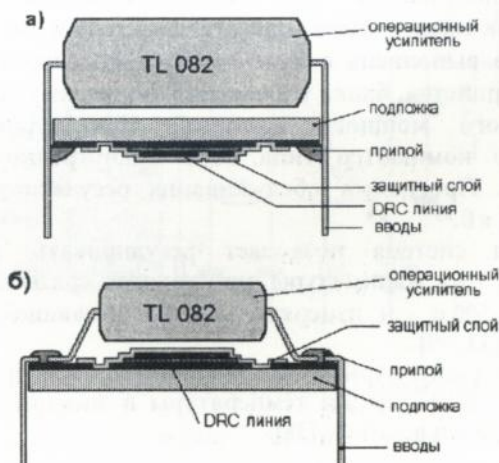


Рис. 47. Характеристика изменения K_{\min} и диапазон регулирования выходной частоты в зависимости от изменения коэффициента нагрузки m , (A, B, C, D - двухполюсные структуры DRC).

Примеры конструктивных решений преобразователей температуры в частоту представлены на рис. 48, а их температурные зависимости на рис. 49. Постоянная времени изготовленных прототипов, в зависимости от типа корпусов применяемых усилителей, равна соответственно 150 с - для схемы типа DIL, 50 с - для элементов типа SMD и почти 16 с для структуры бескорпусной [36, 41]. Достигнута исключительно малая чувствительность генерируемой частоты к изменению питания схемы. Для изменения питания в пределе от 4.5 В до 18 В она не превышает величины $\pm 0.01\%$.



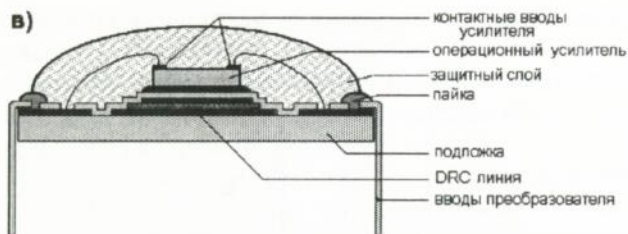


Рис. 48. Конструкции преобразователей температуры с DRC структурой: а) усилитель в корпусе типа DIL; б) усилитель в корпусе типа SMD, в) бескорпусная структура.

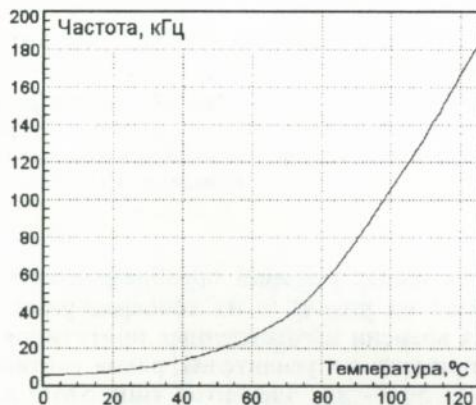


Рис. 49. Зависимость генерируемой частоты от температуры.

Преобразователи температура/частота в микропроцессорных системах измерения и регуляции температуры. Схемы преобразователей с DRC структурами использованы для систем измерения и контроля температуры. Блок-схема системы представлена на рис. 50.

Схема регулятора выполнена в виде четырех функциональных блоков: центрального устройства, блока управления, блока визуализации данных и исполнительного мощного элемента. Центральное устройство регулятора - это компьютер типа 8051 с внутренним генератором частоты 12 МГц. Программа обслуживания регулятора, находится в памяти EPROM 8 кБ.

Представленная система позволяет регулировать температуру с точностью до 1 К - от температуры окружающей среды до температуры 358°K в течение 500 с - и измерять ее с разрешающей способностью порядка 0.0003 К [33, 39].

Расширенный вариант этой компьютерной системы предназначенный для многоканальной регуляции температуры в электрических системах отопления представлен в работе [38].

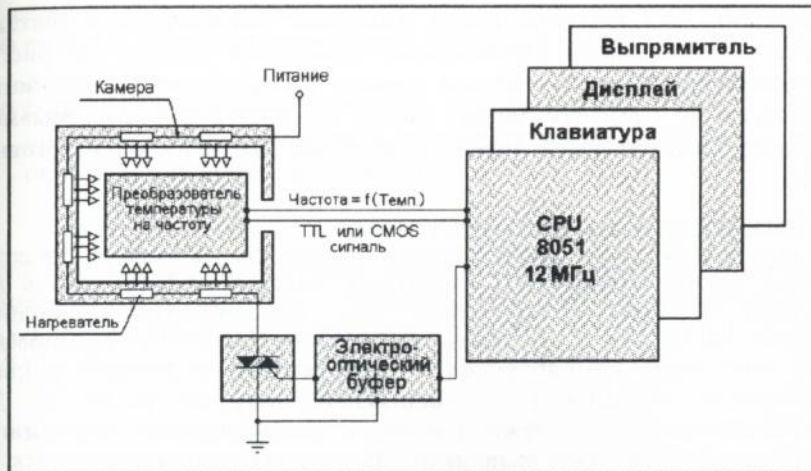


Рис. 50. Блок-схема микропроцессорной системы контроля температуры с преобразователем с DRC структурой.

Преобразователь температура/частота в системах телеизмерения температуры. Разработанные преобразователи с DRC структурами использованы в конструкции миниатюрных телеметрических систем. Системы этого типа выполнены в виде интегрированной структуры, полностью выполненной методом толстопленочной технологии. В этом случае применяется частотная модуляция. Модулируемый сигнал обладает большей помехоустойчивостью. Величина несущей частоты равна 40 МГц [68, 70]. Схема передатчика вместе с датчиком температуры приведена на рис. 51.

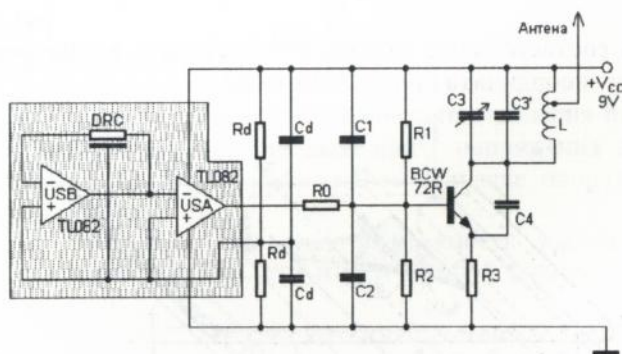


Рис. 51. Схема передатчика с преобразователем температуры.

Разработанная система является примером практического использования функциональных свойств преобразователей с DRC

структурами, для дистанционного измерения температуры в системах беспроводной связи. Проведенные испытания схемы на рис. 51, показали совпадение полученных данных в передатчике и приемнике с точностью до 1 Гц. Эту систему можно применить для непрерывного измерения температуры в объектах, которые находятся на расстоянии 100 м.

Преобразователи давления/силы в частоту:

В преобразователях силы/давления в частоту датчиком, является резистор многослойной DRC структуры, который деформируется под действием внешних сил/давления. При соответствующем подборе исходных материалов, а также параметров процесса термической обработки слоев, не наблюдается значительных изменений емкости структуры в зависимости от приложенной нагрузки [67-68, 70]. Для исключения влияния на характеристики схемы поперечных деформаций слоев, исследуемые схемы выполнены на подложках, длина которых L_p , значительно превышает ширину w_p . Эти конструктивные условия приводят к тому, что разработанные устройства с механической точки зрения можно привести к классическому случаю изгиба балки.

Для этого типа преобразователя разработан балочный датчик, в котором подложка с нанесенными контактами и резистивным слоем или DRC структурой (рис. 52), находится на двух параллельных опорах, и на эту подложку действует сила F , приводящая к деформации подложки по всей ее длине [6, 9, 15-17, 22, 25].

В общем случае среднее значение относительного удлинения $\bar{\epsilon}_x$ резистивного слоя [$x_F = (x_b - x_a)$], можно определить из интеграла [15-17]:

$$\bar{\epsilon}_x = \frac{\Delta x_F}{x_F} = \frac{1}{x_F} \int_{x_a}^{x_b} \epsilon(x) dx = \frac{c_s z_m}{x_b - x_a} \int_{x_a}^{x_b} \chi(x) dx \quad (29)$$

где: x_a и x_b соответственно координаты начала и конца резистора на подложке, x_F - координата приложения силы.

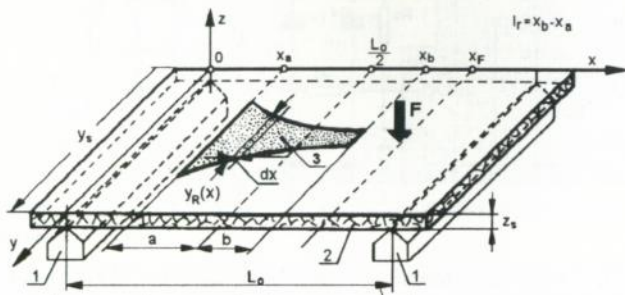


Рис. 52. Схема для определения деформационной чувствительности резистора; 1) опоры, 2) подложка, 3) пьезочувствительная структура.

В разработанном датчике:

- опоры и контакты резистивных слоев размещены параллельно друг другу,
- ширину пьезочувствительного резистивного слоя, которая определена характеристикой изменения координаты $y_R(x)$, можно описать монотонной функцией $w(x)$:

$$y_R(x) = y_R(x_a) \cdot k(x - x_a), \quad (30)$$

Основные параметры датчика давления/силы (чувствительность S_R , разрешающая способность γ , максимальное значение измеряемой силы F_{\max}) определяются конструктивными и технологическими параметрами:

- положением датчика (резистора или структуры DRC) на подложке x_a , его длиной L_R , а также видом функции $w(x)$, определяющей ширину слоя, и так называемым коэффициентом сходимости B_R , являющимся отношением ширины резистивного слоя в начале и конце структуры:

$$B_R = \frac{k(x_a)}{k(x_a + L_R)}, \quad (31)$$

а также расстоянием L_0 между опорами,

- размерами подложки (ширина y_p , длина x_p , толщина z_p), а также значениями ее физических параметров определяемых модулем упругости Юнга E_s и коэффициентом прочности на изгиб S_s ,
- продольными коэффициентами деформации G_L , удельного сопротивления слоя R_s и шумовыми свойствами выраженных индексом¹⁾ шумов k_n ,

Чувствительность и разрешающая способность датчика определяются:

$$S_R = \frac{\Delta R(F)}{R_0 F}, \quad \gamma = \frac{\Delta V_R(F_{\max})}{V_n} \quad (32)$$

где: $\Delta R(F)/R_0$ - относительное увеличение сопротивления под действием силы F , $\Delta V_R(F)$ - приращение выходного напряжения датчика под действием силы F_{\max} , V_n - эффективное значение напряжения шумов низкой частоты [15-17].

Общий вид функции $w(x)$ дает возможность использования для датчиков резисторов или DRC структуры в любой форме.

¹⁾ Индекс шумов определяется как $20 \log(V_n/V_0)$ [dB], где V_n - эффективное значение напряжения шумов на декаду частоты [μ V], а V_0 - значение приложенного постоянного напряжения, измеряемого при помощи измерителя шумов.

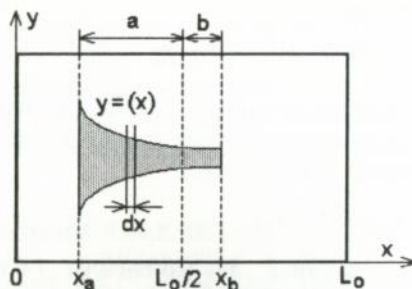


Рис. 53. Схематическое изображение датчика с произвольной функцией формы.

В этом случае сопротивление $dR(x)$ единичного резистора с длиной dx и граничной линией, которую описывает функция $w(x)$ можно представить при помощи выражения:

$$dR(x) = \frac{R_s(x)}{y_R(x)} dx = \frac{R_s}{y_R w(x)} dx \quad (33)$$

Под действием силы F элемент растягивается на величину $d\varepsilon(x)$. Это удлинение вызывает изменение его сопротивления $dR_\varepsilon(x)$ на величину:

$$dR_\varepsilon(x) = G_L(x) \varepsilon(x) dR(x) = \frac{G_L(x) \varepsilon(x) R_s(x)}{y_R(x_a) w(x)} \quad (34)$$

Полное изменение сопротивления R , вызванное действием силы F в пределах, определенных координатами начала x_a и конца x_b пьезочувствительного элемента (рис. 52).

$$R(F) = \frac{c_s z_m}{y_R(x_a)} \int_{x_a}^{x_b} \frac{\chi(x) G_L(x) R_s(x)}{w(x)} dx \quad (35)$$

Для одномерного характера протекания тока в анализируемой структуре, сопротивление недеформированного резистора R_0 определяется методом интегрирования зависимости:

$$R_0 = \int_{x_a}^{x_b} dR(x) dx = \frac{1}{y_R(x_a)} \int_{x_a}^{x_b} \frac{R_s(x)}{w(x)} dx \quad (36)$$

Деформационная чувствительность датчика - в зависимости от его положения на подложке - принимает вид:

$$S_R = c_p \frac{\int_{x_a}^{x_b} \chi(x) G_L(x) R_s(x) [w(x)]^{-1} dx}{\int_{x_a}^{x_b} R_s(x) [w(x)]^{-1} dx} = c_p H \quad (37)$$

где: H - функция, определяющая влияние положения и формы сопротивления на значение чувствительности датчика.

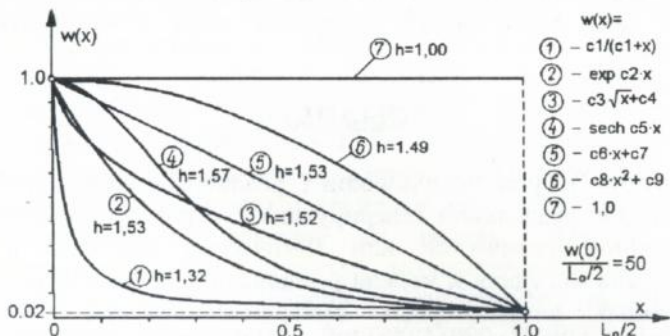


Рис. 54. Характеристики избранных функций формы $w(x)$ с одинаковым коэффициентом сходимости вместе с данными значениями функции формы h .

Для определения влияния формы датчика на его чувствительность удобно ввести обобщенный коэффициент h , который показывает изменение относительной чувствительности датчика, с определенной характеристикой функции $w(x)$, по отношению к элементу, имеющему такую же длину и выполненному в классической форме прямоугольника:

$$h = \frac{H|_{w(x)}}{H_{\square}|_{w(x)=1}} \quad (39)$$

где: H_{\square} определяется из уравнения (38) при условии, что функция $w(x) = 1$.

На рис. 52 представлены характеристики нескольких функций $w(x)$ для $x_a = 0$, $x_F = x_N = L_0/2$ и коэффициента сходимости $B_R = 50$ с известными значениями коэффициента h .

Соответствующий подбор функции $w(x)$ и координат расположения элемента датчика на подложке обеспечивает возможность повышения эксплуатационных параметров [9, 15-17].

Разработан преобразователь силы/давления в частоту (с DRC структурой в схеме фильтра нижних частот), в виде односторонне гнутой балки. В этой схеме изменения сопротивления DRC структуры, вызванные его

расширением под действием внешней силы F , являются причиной изменения частоты генерируемого сигнала.

Для реализации разработанной структуры использован комбинированный состав материалов - изготовленных различными производителями - палладиево-серебряная проводящая композиция P-202 (*ITME Варшава*), диэлектрический материал Zero Flow Glass (*Engelhard*) и резистивная композиция DP 8004 (*Du Pont*) с величиной коэффициента G_L равной 12 (на алундовой подложке). Схема выполнена на алундовой подложке, имеющей следующие размеры $50 \times 10 \times 0.5$ мм, с активной длиной $L_0 = 38$ мм. Схема преобразователя имеет линейную зависимость функции $f = f(F)$ и дает возможность измерения силы с чувствительностью 100 Гц/Н [67].

ВЫВОДЫ:

1. Разработана теория использования различных конфигураций DRC структур для реализации генерирующих устройств преобразователей определенной физической или химической величины в частоту. Разработана методика и модели реальных структур с использованием современных компьютерных программ, которые обеспечивают возможность определения основных параметров выходного сигнала преобразователя с большой точностью ($\pm 0.01\%$). Применяемая нелинейная теория генерации позволяет определить состав гармонических составляющих, вводимых в спектр выходного сигнала и вычислить поправку на генерируемую частоту.
2. Выявлена анизотропия свойств резистивных слоев, изготовленных на диэлектрике, а также активная роль диэлектрика в процессе формирования структуры системы диэлектрик-резистор (переходный слой). Разработана универсальная методика выбора материалов, базирующаяся на использовании методов электронной и оптической микроскопии, рентгенографии и симуляции механических напряжений.
3. Для создания температурно устойчивых DRC структур из материалов с большими абсолютными температурными коэффициентами ТКС и ТКЕ разработан метод компенсации их температурных характеристик в системе с двухслойным диэлектриком.
4. Разработаны методы коррекции характеристик DRC структур - с использованием корректирующих систем типа DRC-R и DRC-DRC. Для реализации коррекции с большой точностью разработаны двумерные модели DRC структур, учитывающие наличие в реальной структуре ряда паразитных элементов. Разработан метод коррекции нулевого фильтра методом изменения дополнительного сопротивления R_d что, совместно с методом непосредственной коррекции, дает возможность перемещения нулевой частоты как в направлении

высоких, так и низких частот, по сравнению с некорректируемой схемой.

5. Разработан метод измерения емкости и коэффициента диэлектрических потерь в системе нулевого фильтра с DRC структурой, который обеспечивает возможность определения этих величин в широком диапазоне частот. Использование определенной эмпирической зависимости, связывающей значение средней частоты и коэффициента α_n , гарантирует достаточную точность воспроизведения параметров.
6. Разработана общая теория проектирования и оптимизации конструкции балочных датчиков давления/силы, работающих на основе пьезорезистивного эффекта. Показано, что методом соответственного подбора подложки, а также формы пьезочувствительного элемента можно получить увеличение чувствительности порядка даже 100%, по отношению к стандартно применяемой конструкции элемента прямоугольной формы.
7. Разработаны новые составы материалов для реализации стабильных преобразователей температуры на основе TiO_2 и $Bi_2Ru_2O_7$. Использование для DRC структур диэлектрических материалов на основе TiO_2 (со средним значением коэффициента диэлектрической проницаемости), обеспечивает многократное увеличение единичной емкости в интегрируемой структуре по отношению к существующим данным.
8. Проведен анализ электротермических связей в системе многослойной структуры с распределенными параметрами, что обеспечивает возможность проектирования новых по форме, маломощных систем управления температурой и термических генераторов низких частот.
9. Разработанные конструкции, материалы и технология обеспечивают возможность реализации микроэлектронных преобразователей температуры с DRC структурами, с чувствительностью 3.5 кГц/К, временной стабильностью параметров 0.4% и временной постоянной, равной 15с, а также преобразователей давления/силы с чувствительностью порядка сотен Гц/Н и работающих в диапазоне до сотен тысяч Па.

Список литературы

1. Kieras M., Potencki J.: Wpływ rodzaju maskowania i parametrów siatki na odtwarzalność rozmiarów powierzchniowych warstw nanoszonych techniką druku sitowego, Prace Instytutu Elektrotechniki, 1980, Nr 3, Rozprawy 25, cc. 87-101.
2. Rząsa B., Potencki J.: Właściwości rezystorów grubowarstwowych wytworzonych na różnych warstwach dielektrycznych, Elektronika, Nr 11-12, 1983, cc. 27-29.
3. Rząsa B., Potencki J.: The properties of thick-film resistors fabricated on various dielectric layers, Hybrid Circuits, No 5, Autumn, 1984, cc. 25-28.
4. Rząsa B., Potencki J.: Thick-film temperature sensors, Proc. of the 4th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Wrocław, 1983, cc. 14.
5. Kieras M., Potencki J.: Realisation of thick-film thermal print heads, Proc. of the 4th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Wrocław, 1983, cc. 15.
6. Paszczyński S., Rząsa B., Potencki J.: Piezoressiveive effects in thick-film structures, Proc. of the 6th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Bystre, 1985, cc. 103-114.
7. Rząsa B., Potencki J.: Thick-film resistors as temperature detectors, Active and Passive Electronics Components, Vol. 12, No 2, 1986, cc. 137-147.
8. Rząsa B., Potencki J., Paszczyński S.: Realisierungsmöglichkeiten von Temperatur und Druckfühlern in Dickschichttechnik, Wissenschaftliche Beiträge 3/85, IH Zwickau (Germany), cc. 66-73.
9. Paszczyński S., Potencki J.: Thick-film force (pressure) sensor: method of optimisation of its construction, 32. Internationales Wissenschaftliche Kolloquium, TH Ilmenau (Germany), 1987, Vortrag - serie "Konstruktive und technologische Probleme elektronischer Funktionsblöcke", cc. 71-74.
10. Kieras M., Potencki J.: Grubowarstwowe głowice termopiszzące, Elektronika, Nr 1, 1987, cc. 20-22.
11. Rząsa B., Potencki J.: Grubowarstwowe czujniki temperatury, Elektronika, Nr 1, 1987, cc. 23-26.
12. Rząsa B., Brydak K., Potencki J.: Trimming effect of thick film RC structure on notch filter parameters, Proc. of the 9th and 10th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, 1987, cc. 62-67.
13. Rząsa B., Potencki J.: Temperature compensation of thick film RC structures with distributed parameters, Proc. of the 9th and 10th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, 1987, cc. 68-73.
14. Potencki J.: Thick-film distributed RC structures, Proc. of the 11th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Koszalin-Kołobrzeg, 1988, cc. 17-22.
15. Kalita W., Paszczyński S., Potencki J., Gerhard H. J.: Übersicht und Optimierungsmöglichkeiten der Konstruktionen von Druckfühlern, Wissenschaftliche Beiträge IH Zwickau (Germany), 1988/4, cc. 6-16.
16. Paszczyński S., Potencki J., Kalita W.: Free-end beam type force sensor with thick-film resistors as strain-sensitive element: Towards an optimum construction, Proc. of the 4th Symposium on Sensors and Actuators "Eurosensor II", Enschede (Holland), 1988.

17. Paszczyński S., Potencki J., Kalita W.: Free-end beam type force sensor with thick-film resistors as strain-sensitive element: Towards an optimum construction, *Sensor and Actuators*, No 17, 1989, cc. 225-233.
18. Kalita W., Potencki J.: Realisierungsmöglichkeiten von Sperr-Filtern mit verteilten RC-Netzwerken in der Dickschichttechnologie, 5. Fachtagung Hybridmikroelektronik, Gera (Germany), 1988, cc. 9.
19. Paszczyński S., Potencki J., Kalita W.: Optimierungsmöglichkeiten der Konstruktion von Kraft/Drück Sensoren, die auf Piezoresistiven Effekt in Dickschichtwiderständen Basieren, 5. Fachtagung Hybridmikroelektronik, Gera (Germany), 1988, cc. 10.
20. Виш Б., Калига В., Потенчки Е.: Полупроводниковые стартеры для люминесцентных ламп, *СВЕТОТЕХНИКА*, No 1, 1990, cc. 16-18.
21. Potencki J.: Thick-film temperature sensor with frequency transducer, *Proc. of the 5th Czechoslovak Conf. on Microelectronics*, Bratislava, 1989, cc. 33.
22. Storch W., Kalita W., Potencki J., Heinze W., Brode W., Schneider B.: Sensoren in Dünn- und Dickfilmentechnik, *Ergebnisse der Tagung "Sensortechnik 89"*, Jena/Gera, (Germany), cc. 87-94.
23. Kalita W., Potencki J., Sperling D.: Low frequency couplings between elements of hybrid microcircuit, *Proc. of the 13th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Szklarska Poręba*, 1987, cc. 62-67.
24. Potencki J.: Korygowalny filtr zerowy z linią RC o parametrach rozłożonych, XII Krajowa Konferencja Teorii Obwodów i Układów Elektronicznych, Rzeszów-Myczkowce, 1989, Tom 2, cc. 175-180.
25. Storch W., Sperling D., Kalita W., Potencki J.: Entwicklungstendenzen von hybridintegrierten Sensoren und Sensormodulen, 6. Wissenschaftliche Konferenz TH Zwickau (Germany) "Rationalisierung im Maschinenbau durch Schlüsseltechnologien", 1989, Fachtagung 8: Elektroautomatisierung, cc. 21-33.
26. Kalita W., Potencki J., Sperling D.: Medium frequency couplings between elements of hybrid microcircuit, *Proc. of the 14th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Warszawa*, 1990, cc. 91-94.
27. Potencki J.: Easily trimmable notch filter with exponentially tapered distributed RC networks, *Proc. of the 14th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Warszawa*, 1990, cc. 141-144.
28. Potencki J.: Improved version of thick-film temperature transducer with DRC networks, *Proc. of the 15th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Kraków*, 1991, cc. 8.
29. Kalita W., Potencki J., Wisz B.: Thick-film starting systems for fluorescent lamps, *Proc. of the 15th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Kraków*, 1991, cc. 7.
30. Potencki J.: Thick-film temperature transducer with DRC networks, *Proc. of the 16th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Kraków*, 1991, cc. 87-92.
31. Kalita W., Potencki J.: On possibility realisation of trimmable notch filters with DRC networks, *Proc. of the 16th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Kraków*, 1992, cc. 57-61.

32. Potencki J.: Thick-film oscillator with thermal feedback, Proc. of the 16th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Kraków, 1992, cc. 83-86.
33. Potencki J., Sabat W., Zając R.: Microprocessor system for temperature control with DRC lines, Proc. of the 16th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Kraków, 1992, cc. 93-96.
34. Potencki J.: Temperature transducer with thick-film distributed RC networks in notch filter configuration, Proc. of the 16th International Spring Seminar on Electronic Technology, "Thick and thin film sensors", 1993, Szklarska Poręba, cc. 40-43.
35. Potencki J.: Distributed RC networks in sensor technique, Proc. of the 17th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Rzeszów-Solina, 1993, cc. 29-35.
36. Potencki J., Ungeheuer C.: Miniaturised temperature-frequency transducers, Proc. of the 17th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Rzeszów-Solina, 1993, cc. 155-158.
37. Potencki J.: Modelling of thick-film elements and circuits with using PSPICE, Proc. of the 17th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Rzeszów-Solina, 1993, cc. 151-154.
38. Potencki J., Sabat W., Wygoda L.: Multichannel microprocessor system for temperature control with using thick-film DRC transducers, Proc. of the 17th Conf. of the ISHM-Poland Chapter, Rzeszów-Solina, 1993, cc. 35.
39. Potencki J.: Application of Multilayer Structures with Resistors in Sensors Manufacturing, Proc. of International Conf. on Electronics Technologies, Windsor (England), 1994, cc. 249-256.
40. Kalita W., Potencki J.: Practical application of thermal couplings, Hybridmikroelektronik und Mikrosystemtechnik, Berlin (Germany), 1994, cc. 43-51.
41. Kalita W., Klose J., Potencki J.: Inter-element couplings in EMC design of thick-film hybrid microcircuit, Hybridmikroelektronik und Mikrosystemtechnik, Berlin (Germany), 1994, cc. 20.
42. Potencki J.: Grubowarstwowe czujniki temperatury z liniami RC o parametrach rozłożonych, III Konferencja Naukowa "Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne", Warszawa, 1994, Tom III, cc. 178-182.
43. Potencki J., Gotra Z., Klose J.: Characteristic of electrical and thermal couplings in multilayer structures, Proc. of the 18th Conf. of the ISHM Poland-Chapter, Warszawa, 1994, cc. 55.
44. Potencki J., Ungeheuer C.: Linearisation of characteristics of temperature transducer with distributed RC networks, Proc. of the 18th Conf. of the ISHM Poland-Chapter, Warszawa, 1994, cc. 54.
45. Gotra Z., Golyaka R., Khalavka A., Berdnik M., Potencki J.: The functional-completed temperature sensitive microblock, 18th Conf. of the ISHM Poland-Chapter, Warszawa, 1994, cc. 33.
46. Gotra Z., Golyaka R., Khalavka A., Potencki J.: A simple model of integrated gas flow sensor, 18th Conf. of the ISHM Poland-Chapter, Warszawa, 1994, cc. 34.
47. Potencki J., Kalita W., Kieras M., Sadecki A., Wisz B.: Urządzenie elektroniczne do zapłonu lampy luorescencyjnej, Патент Nr PT 141 270 - 11.10.1986.

48. Rząsa B., Potencki J.: Sposób wytwarzania termistora grubowarstwowego, Патент Nr P 143 448, - 17.01.1989
49. Potencki J. (соавтор): Opracowanie topologii układu i wykonanie sieci rezystywnej w technice grubowarstwowej do czujnika tokograficznego, FARUM-Zabrze, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 17/79,
50. Potencki J. (соавтор): Badania aplikacyjne i opracowanie wybranych układów oraz podzespołów w zminiaturyzowanym sprzęcie powszechnego użytku z wykorzystaniem grubowarstwowej techniki hybrydowej, UNITRA Rzeszów, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 1/81.
51. Potencki J. (соавтор): Opracowanie głowicy termicznej do zapisu na papierze termoczułym w oparciu o technologię grubowarstwową. FARUM-Warszawa, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie z I-go etapu, Nr 11/81.
52. Potencki J. (соавтор): Opracowanie głowicy termicznej do zapisu na papierze termoczułym w oparciu o technologię grubowarstwową. FARUM-Warszawa, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie z II-go etapu - część pierwsza - Nr 3/82.
53. Potencki J. (соавтор): Opracowanie głowicy termicznej do zapisu na papierze termoczułym w oparciu o technologię grubowarstwową. FARUM-Warszawa, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie z II-go etapu - część druga - Nr 2/83.
54. Potencki J. (соавтор): Założenia i koncepcja rozwiązania układowego wzmacniacza pomiarowego, WSK-PZL Mielec, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 3/84.
55. Kalita W., Kieras M., Potencki J., Wisz B.: Projekt i uruchomienie linii technologicznej do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych oraz opracowanie i wdrożenie do produkcji wybranych układów, Etap II - Koncepcja i projekt elektronicznego zapłonika do lamp fluorescencyjnych zasilanych napięciem 220V i 50Hz, RZLW-POLAM, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 3/85.
56. Kalita W., Kieras M., Potencki J., Wisz B.: Projekt i uruchomienie linii technologicznej do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych oraz opracowanie i wdrożenie do produkcji wybranych układów, Etap III, Elektroniczny hybrydowy zapłonnik do lamp fluorescencyjnych - typ EZH-1/20, Wersja wdrożeniowa, RZLW-POLAM, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 3/86.
57. Kalita W., Potencki J., Wisz B.: Projekt i uruchomienie linii technologicznej do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych oraz opracowanie i wdrożenie do produkcji wybranych układów, Etap III, Elektroniczny hybrydowy zapłonnik do lamp fluorescencyjnych typ EZH-1/20, Tymczasowe wymagania techniczne i program badań, RZLW-POLAM, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 4/86.
58. Kalita W., Potencki J., Wisz B., Zajac K.: Projekt i uruchomienie linii technologicznej do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych oraz opracowanie i wdrożenie do produkcji wybranych układów, Etap IV, Opis techniczny i wyniki badań wersji wdrożeniowej elektronicznego zapłonika do lamp fluorescencyjnych typu EZH-2/40, RZLW-POLAM, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 2/88.

59. Kalita W., Potencki J., Wisz B., Zajac K.: Projekt i uruchomienie linii technologicznej do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych oraz opracowanie i wdrożenie do produkcji wybranych układów, Etap IV, Tymczasowe wymagania techniczne i program badań dla zapłonika typu EZH-2/40, RZLW-POLAM, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 3/88.
60. Potencki J.: Projekt i uruchomienie linii technologicznej do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych oraz opracowanie i wdrożenie do produkcji wybranych układów, Etap IV, Proces technologiczny wytwarzania zapłonika elektronicznego typu EZH-1/20, RZLW-POLAM, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 7/88.
61. Kalita W., Potencki J., Wisz B., Zajac K.: Projekt i uruchomienie linii technologicznej do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych oraz opracowanie i wdrożenie do produkcji wybranych układów, Etap V, Zmodyfikowana wersja wdrożeniowa zapłonników elektronicznych typu EZH-3/20 i EZH-3/40, Wyniki badań stanowiskowych oddziaływania na trwałość lamp fluorescencyjnych, RZLW-POLAM, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 12/88.
62. Potencki J., Kalita W., Zajac K.: Projekt i uruchomienie linii technologicznej do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych oraz opracowanie i wdrożenie do produkcji wybranych układów, Etap V, Opracowanie wersji hybrydowej zapłonika specjalnego, RZLW-POLAM, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 4/89.
63. Potencki J., Kalita W., Zajac K.: Projekt i uruchomienie linii technologicznej do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych oraz opracowanie i wdrożenie do produkcji wybranych układów, Etap V, Zmodyfikowana wersja układu elektronicznego zapłonika hybrydowego typu EZH-4, RZLW-POLAM, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 5/89.
64. Potencki J., Kalita W., Zajac K.: Projekt i uruchomienie linii technologicznej do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych oraz opracowanie i wdrożenie do produkcji wybranych układów, Etap V, Tester do sprawdzania elektronicznych zapłonników hybrydowych typu EZH-3, RZLW-POLAM, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 7/89.
65. Potencki J., Kalita W., Zajac K.: Analiza niezawodności działania potencjometru w układzie regulacji prędkości WG oraz sformułowanie warunków poprawy jakości i ocena możliwości wdrożenia w przemyśle krajowym, Etap I, WSK-PZL Mielec, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 9/89.
66. Potencki J.: Metody syntezy i badania aplikacyjne mikroelektronicznych układów hybrydowych, Глава 4. Technologiczne aspekty realizacji hybrydowych przyrządów funkcjonalnych z wykorzystaniem struktur RC o parametrach rozłożonych, Politechnika Rzeszowska, 1991, Sprawozdanie Nr 2/91, cc. 23-40.
67. Potencki J., Gotfryd M., Kalita W.: Zintegrowany system przetwarzania ciśnienie/siła - napięcie, Możliwości realizacji w technice hybrydowej, Politechnika Rzeszowska, 1991, Sprawozdanie Nr 3/91, cc. 1-16.

68. Potencki J.: Technologiczne aspekty realizacji hybrydowych przyrządów funkcjonalnych z wykorzystaniem struktur RC o parametrach rozłożonych), Metody syntezy i badania aplikacyjne mikroelektronicznych układów hybrydowych, Politechnika Rzeszowska, Sprawozdanie Nr 1/92 z realizacji Umowy U 3071/DS, cc. 13-23.
69. Potencki J.: Analiza elektromagnetycznej i elektrotermicznej kompatybilności mikroukładów hybrydowych, Глава 4., Kompatybilność systemów ze strukturami RC o parametrach rozłożonych, Politechnika Rzeszowska, 1992, Sprawozdanie Nr 2/92 z realizacji Umowy U 3243/BW, cc. 14-16.
70. Potencki J.: Metody syntezy i badania aplikacyjne mikroelektronicznych układów hybrydowych, Глава 4., Technologiczne aspekty realizacji hybrydowych przyrządów funkcjonalnych z wykorzystaniem struktur RC o parametrach rozłożonych, Politechnika Rzeszowska, 1993, Sprawozdanie Nr 1/93 z realizacji Umowy U-3519/DS, cc. 17-19.
71. Potencki J.: Analiza elektromagnetycznej i elektrotermicznej kompatybilności mikroukładów hybrydowych, Глава 4., Kompatybilność systemów ze strukturami RC o parametrach rozłożonych, Politechnika Rzeszowska, 1993, Sprawozdanie Nr 2/93 z realizacji Umowy U 3520/BW, cc. 13-14.

Цитированая литература

72. Brignell J., White N.: Intelligent sensor systems, Sensors Series, IOP Publishing Ltd., Bristol, 1994
73. Białko M.: Filtry aktywne RC, WNT, Warszawa, 1982.
74. Harper Ch.: Handbook of Thick-Film Hybrid Microelectronics, A practical sourcebook for designers, fabricators, and users, McGraw-Hill Book Company, New York, 1980.



Wydano za zgodą Rektora

Redaktor naczelny
Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej
prof. dr hab. inż. Szczepan WOLIŃSKI

Praca nie recenzowana

Druk wykonano z matryc dostarczonych przez autora

ISBN 83-902468-8-0

Redakcja Wydawnictw Uczelnianych Politechniki Rzeszowskiej
ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

Nakład 145 + 45 egz. Ark. wyd. 2,86. Ark. druk. 3,0. Papier offset. kl. III 80g B1.
Oddano do druku w listopadzie 1994 roku. Wydrukowano w listopadzie 1994 roku.
Zakład Poligrafii Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
Zam. nr 321/94

Потенчки Е., Толстопленочные RC структуры с распределенными параметрами (DRC) и микроэлектронные преобразователи на их основе.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.05 - интегральные радиоэлектронные устройства, Государственный университет "Львівска Політехніка", Львов, 1994.

Вид работы: рукопись

В работе представлена концепция и теория DRC структур для микроэлектронных преобразователей, общие принципы их проектирования - с использованием современных программ CAD (*Computer Aided Design*), проведен синтез ряда схем, общие методы выбора материалов, конструкции и технология их изготовления с учетом косвенных методов коррекции, методы определения параметров DRC структур и синтеза схем замещения, метод оптимизации конструкции датчиков давления/силы, показаны примеры практического преобразования температуры и давления в частоту и их применения в цифровых системах управления и телеизмерений.

Основная часть работы состоит из 6 глав.

Объем диссертации: 290 страниц, 186 рисунков, 19 таблиц и 326 наименований цитированой литературы.

Potencki J.: Thick-film RC networks with distributed parameters (DRC) and based on them microelectronic transducers.

Thesis for obtaining of the scientific degree of doctor technical sciences, speciality 05.27.05 - Integrated radioelectronics devices, State University "Lviv Polytechnic", Lvov, 1994.

Dissertation type: manuscript

In dissertation have been presented idea and theory of utilisation of DRC networks for manufacturing of microelectronic transducers, general design principles with application of modern CAD (*Computer Aided Design*) programs, synthesis of series useful circuits, general principles of the material selection, construction and technology of manufacturing with special emphasis put on indirect trimming methods, method of DRC network parameters determination, synthesis of some equivalent electrical models, optimisation method of construction of pressure/force sensors, and examples of practical temperature and pressure/force into frequency converters and theirs application in control and telemetric systems.

The main part of dissertation consists 6 chapters.

Thesis volume: 290 pages, 186 figures, 19 tables and 326 cited literature sources.

Ключові слова: товстоплівкові RC структури з розподіленими параметрами, перетворювачі фізичних, хімічних величин.

1455046

7501.310
AB 31.318

ISBN 83-902468-8-0