

УДК 621.3.011.73

А.Е. Горяинов, Л.И. Бабак

Методика автоматизированного синтеза параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ-монокристаллических интегральных схем

Предложена методика автоматизированного синтеза параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ-монокристаллических интегральных схем (МИС) в виде эквивалентных схем (ЭС), при этом элементы ЭС зависят от конструктивных параметров компонентов (например, геометрических размеров). Методика позволяет автоматизировать решение задач поиска структуры ЭС, а также определения оптимальных порядков аппроксимирующих многомерных полиномов по отдельным переменным, в качестве которых выступают конструктивные параметры. Как пример, представлено построение параметрической модели интегрального МДМ-конденсатора для 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии изготовления МИС.

Ключевые слова: СВЧ-монокристаллические интегральные схемы, пассивные компоненты, параметрическая модель, модели в виде эквивалентных схем, синтез, GaAs, МДМ-конденсатор.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-4-101-107

Для повышения эффективности проектирования СВЧ-монокристаллических интегральных схем (МИС) широко используются параметрические модели, описывающие зависимость электрических характеристик активного или пассивного компонента от его конструктивных параметров (например, геометрических размеров) [1–6].

В частности, параметрические модели применяются при построении топологии интегральных схем. Здесь требуется выполнить переход от значений электрических параметров пассивных компонентов (сопротивлений, емкостей, индуктивностей и т.д.) к конструктивным параметрам, определяющим топологию компонентов. Другим применением являются параметрический и структурно-параметрический синтез СВЧ-устройств [6–10]. В этих случаях для учета паразитных эффектов предполагается осуществление оптимизации или синтеза устройства с использованием точных моделей реальных компонентов при вариации их конструктивных параметров.

Одним из способов построения параметрических моделей в виде эквивалентных схем (ЭС) является аппроксимация (например, с помощью многомерных полиномов) зависимостей значений элементов ЭС от конструктивных параметров [3, 4]. При этом всевозможные комбинации дискретных значений конструктивных параметров формируют так называемую сетку конструктивных состояний компонента [3, 4]. Параметрическая ЭС-модель в таком случае представляет собой ЭС, элементы которой описываются с помощью многомерных полиномов, где в качестве переменных выступают конструктивные параметры компонента, например: длина и ширина обкладок конденсатора, количество витков катушки индуктивности и т.д.

Необходимым условием для построения параметрической модели компонента на основе аппроксимации является необходимость единой (одной и той же) структуры ЭС для всех возможных конструктивных состояний. Однако существующие мето-

дики построения параметрических моделей [3, 4] не дают решения задачи поиска такой общей (тем более оптимальной) структуры ЭС.

В связи с этим обычно подходящая структура ЭС находится путем проб и ошибок. Вначале разработчик выбирает некоторую начальную структуру ЭС и выполняет экстракцию значений её элементов для каждого конструктивного состояния компонента. В случае, если некоторые из полученных для всех конструктивных состояний ЭС-моделей выбранной структуры не обеспечивают необходимой точности, выбирается другая, более сложная структура ЭС, и процесс повторяется.

В результате таких итераций определяется структура параметрической ЭС-модели, обеспечивающая приемлемый компромисс между требуемым значением ошибки модели на всей сетке конструктивных состояний и сложностью ЭС.

Значительной трудоемкостью обладает также существующий способ нахождения многомерного аппроксимирующего полинома [3, 4], где порядки полинома по каждой переменной подбираются тоже путем проб. В результате на практике процесс построения параметрической модели может занять продолжительное время – до нескольких дней.

В статье предлагается новая методика автоматизированного синтеза параметрических моделей пассивных СВЧ-компонентов. Она обеспечивает автоматизированное решение задач как определения структуры ЭС, так и построения многомерных полиномов, описывающих зависимость элементов ЭС от конструктивных параметров компонента. Эффективность методики продемонстрирована на примере синтеза параметрической модели МДМ-конденсатора для 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии изготовления МИС.

Алгоритм автоматизированного синтеза параметрических ЭС-моделей СВЧ-компонентов

В качестве базы используется предложенная в [11] методика синтеза (определения структуры и

значений элементов) ЭС-моделей СВЧ-компонентов. Она основана на декомпозиции модели, оптимальном выборе структуры звеньев и прямой экстракции элементов звеньев. Преимуществами методики являются автоматизация и малое время построения модели, а также возможность контроля ее структуры с помощью задания допустимого множества звеньев.

В задаче построения параметрических моделей с помощью методики [11] возможно получение ЭС-моделей для каждого отдельного конструктивного состояния компонента. Однако при этом не гарантируется, что для всех конструктивных состояний будет определена одна и та же структура ЭС, даже при условии одинаковых ограничений на множество допустимых звеньев. Таким образом, сама по себе методика [11] не обеспечивает построения адекватных параметрических моделей.

Конструктивное состояние СВЧ-компонента можно характеризовать вектором $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_h ($h = 1, 2, \dots, n$) – конструктивные параметры компонента; n – число конструктивных параметров. Обозначим конструктивные состояния СВЧ-компонента как K_q ($q = 1, 2, \dots, Q$), где Q – число конструктивных состояний. Тогда каждому конструктивному состоянию K_q будет соответствовать определенное значение вектора конструктивных параметров $\mathbf{X}_q = (x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{nq})$.

Для решения обозначенной выше проблемы синтеза параметрической модели СВЧ-компонента можно предложить следующую методику:

1) получение (измерение) параметров рассеяния $S_{ij}(K_q)$ пассивного СВЧ-компонента как двухполосника или четырехполосника для всех требуемых конструктивных состояний K_q ($q = 1, 2, \dots, Q$); $i, j = 1, 2, \dots, N$; N – число портов СВЧ-компонента;

2) задание единого морфологического множества допустимых структурных схем модели и структур (схем) звеньев, которые будут использоваться для всех конструктивных состояний K_q ($q = 1, 2, \dots, Q$) пассивного СВЧ-компонента;

3) нахождение для каждого конструктивного состояния K_q согласно методике [11] соответствующего множества S_q возможных структур ЭС-модели, описывающих пассивный компонент с погрешностью не хуже заданной величины ϵ_0 . В результате для Q конструктивных состояний будет получено Q таких множеств структур: S_1, S_2, \dots, S_Q ;

4) выбор в полученных на шаге 3 множествах структур ЭС-моделей S_q ($q = 1, 2, \dots, Q$) общей структуры (структуры параметрической ЭС-модели), присутствующей в каждом множестве S_q ;

5) если на шаге 4 не удалось определить структуру параметрической ЭС-модели, обеспечивающую ошибку не более ϵ_0 , необходимо расширение морфологического множества допустимых структур либо увеличение величины ϵ_0 и переход к шагу 3;

6) построение полиномов, описывающих зависимости значений каждого элемента выбранной на шаге 4 ЭС от конструктивных параметров СВЧ-ком-

понента. Такое построение может быть выполнено на основе многомерной полиномиальной аппроксимации значений элементов ЭС на сетке конструктивных состояний [11]. Усовершенствованный вариант аппроксимации представлен ниже;

7) верификация параметрической модели компонента.

В качестве ошибки в процессе синтеза параметрической модели используется абсолютная СКО $\Delta_{|S|}$ параметров рассеяния модели:

$$\Delta_{|S|} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta(|S_{ij}|)^2}, \quad (1)$$

где

$$\Delta(S_{ij}(\omega_k)) = |S_{ij}^{\text{Meas}}(\omega_k) - S_{ij}^{\text{Model}}(\omega_k)|; \quad (2)$$

M – количество частотных точек; S_{ij}^{Meas} – измеренные параметры СВЧ-компонента как многополосника; S_{ij}^{Model} – параметры модели СВЧ-компонента.

Таким образом, из множества возможных структур ЭС-моделей, полученных для каждого конструктивного состояния компонента, алгоритм определяет схему, способную с достаточной точностью описать все конструктивные состояния. При наличии нескольких потенциальных структур параметрической модели разработчик самостоятельно выбирает наиболее приемлемую из них.

При автоматизированном синтезе параметрических моделей пассивных СВЧ-компонентов разработчику необходимо самостоятельно выполнить пп. 1 и 2. Остальные шаги методики могут быть выполнены автоматически.

Алгоритм автоматизированного построения аппроксимирующих многомерных полиномов

Для автоматизированного решения задачи многомерной аппроксимации в описанной выше методике синтеза нами ниже предлагается алгоритм построения полиномов, описывающих зависимости элементов параметрической ЭС-модели от конструктивных параметров компонента.

Обозначим через e_t ($t = 1, 2, \dots, T$) значения (параметры) сосредоточенных элементов ЭС; T – общее число элементов ЭС. Значение каждого элемента e_t как функцию конструктивных параметров СВЧ-компонента x_1, x_2, \dots, x_n будем приближенно описывать соответствующим полиномом P_t :

$$e_t(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx P_t(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3)$$

В общем случае полином является многомерным и может быть записан в виде суммы одночленов-мономов:

$$P_t(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 0}^n c_{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n}^{(t)} x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n}. \quad (4)$$

Здесь α_h – показатели степеней переменных x_h ($h = 1, 2, \dots, n$), они могут принимать только целые значения $0, 1, 2, \dots, m_h$; $c_{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n}^{(t)}$ – вещественные коэффициенты полинома. Порядок многомерного полинома P_t равен наибольшему порядку входящих в него одночленов-мономов; под порядком монома

понимается сумма степеней входящих в него переменных [12]). Вводится также порядок m_h полинома P_t по каждой переменной x_h ($h = 1, 2, \dots, n$), он равен максимальному значению степени α_h . Величину $m_\Sigma = m_1 + m_2 + \dots + m_n$ назовем суммарным порядком многомерного полинома по всем переменным, или просто суммарным порядком.

Задачей аппроксимации является определение коэффициентов $c_{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n}^{(t)}$ полинома $P_t(x_1, x_2, \dots, x_n)$, аппроксимирующего зависимость $e_t(x_1, x_2, \dots, x_n)$ по набору заданных значений элемента e_{tq} во всех конструктивных состояниях K_q , $q = 1, 2, \dots, Q$ (предполагается, что эти значения находятся путем экстракции ЭС в каждом конструктивном состоянии K_q):

$$e_{tq} \equiv e_t(x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{nq}). \quad (5)$$

Для построения многомерных полиномов целесообразно использование метода наименьших квадратов (МНК) [13]. В этом случае требуется также задать порядки полинома m_h (максимальные значения степеней α_h) по каждой переменной x_h . Чем больше эти порядки, тем лучше в общем случае точность воспроизведения зависимости $e_t(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Однако, с другой стороны, при больших порядках m_h резко растет число мономов, что ведет к увеличению времени расчета значений полинома P_t , т.е. фактически к уменьшению быстродействия параметрической модели. Таким образом, необходимо найти полином, который обеспечивает нужный компромисс между точностью и быстродействием модели. Как уже отмечалось, в существующих подходах [3, 4] определение порядков полинома P_t по отдельным переменным выполняется самим разработчиком путём перебора определенных (выбираемых эмпирически) значений m_h , это увеличивает время и трудоемкость построения параметрической модели.

Задача определения подходящего аппроксимирующего полинома может быть автоматизирована с помощью следующего алгоритма:

1. Получение значений e_{tq} элемента ЭС e_t для каждого конструктивного состояния компонента K_q ($q = 1, 2, \dots, Q$).
2. Задание максимально допустимой величины Δ_0 ошибки аппроксимации значений e_{tq} с помощью полинома P_t .
3. Задание целых неотрицательных чисел M_h , которые определяют максимально возможные значения порядков m_h многомерного полинома по каждой переменной x_h (т.е. $m_h \leq M_h$).
4. Последовательное нахождение с использованием МНК множества полиномов P_{td} ($d = 1, 2, \dots, D$), каждый из которых описывает элемент ЭС e_t . Указанные полиномы строятся для всех возможных комбинаций порядков m_h относительно каждой переменной x_h при вариации в пределах $0 \leq m_h \leq M_h$, число таких полиномов равно $D = (M_1 + 1)(M_2 + 1) \dots (M_n + 1)$.
5. Определение суммарного порядка $m_{\Sigma d}$ для каждого полинома P_{td} , $d = 1, 2, \dots, D$.
6. Расчет значения ошибки Δ_{td} для каждого полинома P_{td} , $d = 1, 2, \dots, D$.

7. Определение среди полиномов P_{td} ($d = 1, 2, \dots, D$) полинома P_{tg} , который обеспечивает необходимый уровень ошибки $\Delta_{tg} \leq \Delta_0$ при минимальном суммарном порядке (т.е. $m_{\Sigma g} = \min m_{\Sigma d}$, $d=0, 1, 2, \dots, D$).

8. Если заданный уровень ошибки менее Δ_0 обеспечивают несколько полиномов с одинаковым суммарным порядком m_Σ , среди них выбирается полином с наименьшей ошибкой.

9. Если ни один из полиномов P_{td} не обеспечивает требуемый уровень ошибки ниже Δ_0 , выбираются более высокие максимальные порядки M_h многомерного полинома по каждой переменной x_h , переходим к п. 4.

В качестве ошибки Δ_t предлагается использовать максимальную относительную СКО воспроизведения полиномом P_t заданных значений e_{tq} элемента ЭС e_t на сетке конструктивных состояний K_q , $q = 1, 2, \dots, Q$:

$$\Delta_t = \max_q \frac{|P_t(x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{nq}) - e_{tq}|}{e_{tq}}. \quad (6)$$

Таким образом, предложенный алгоритм не только выполняет нахождение многомерного полинома P_t с требуемым уровнем ошибки $\Delta_t \leq \Delta_0$, но и обеспечивает минимальный суммарный порядок полинома m_Σ . При построении параметрической модели необходимо выполнить предложенный алгоритм для каждого элемента e_t выбранной структуры ЭС, в результате получаем набор полиномов P_t ($t = 1, 2, \dots, T$), описывающий все элементы ЭС-модели.

Синтез параметрической модели интегрального МДМ-конденсатора

Рассмотрим синтез параметрической модели МДМ-конденсатора, изготовленного по 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии СВЧ МИС. Для целей исследования методики в качестве исходных данных взяты параметры рассеяния, рассчитанные в диапазоне частот до 60 ГГц по имеющейся верифицированной модели МДМ-конденсатора в библиотеке PL15-10 компании Win Semiconductors. Варьируемыми конструктивными параметрами в модели выступают геометрические размеры обкладок конденсатора – ширина w и длина l , т.е. $x_1 \equiv w$, $x_2 \equiv l$. Эти параметры изменяются в диапазоне 10–100 мкм. Расчет параметров рассеяния МДМ-конденсатора по верифицированной модели был выполнен в 25 конструктивных состояниях, на рис. 1 они отмечены черными кружками.

В соответствии с методикой [11] выберем П-образную структуру ЭС-модели МДМ-конденсатора (рис. 2, а). На основании проведенного в [11] морфологического анализа зададим возможные структуры звеньев Y_1 – Y_3 модели: в центральном звене Y_2 могут использоваться цепи рис. 2, б–д, в параллельных звеньях Y_1 и Y_3 – цепи рис. 2, е, в, д, е, описывающие паразитные ёмкости конденсатора на землю и потери в GaAs-подложке.

Обычно желаемое значение абсолютной СКО параметров рассеяния $\Delta_{|S|}$ для построения точных моделей СВЧ-компонентов находится в диапазоне

0,001–0,05. Однако в настоящем примере для наглядности и получения большего числа возможных структур ЭС параметрической модели зададим максимально допустимый уровень ошибки $\Delta_{|S|} = 0,2$.

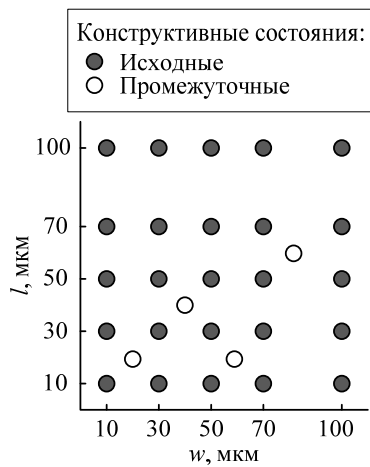


Рис. 1. Сетка конструктивных состояний МДМ-конденсатора

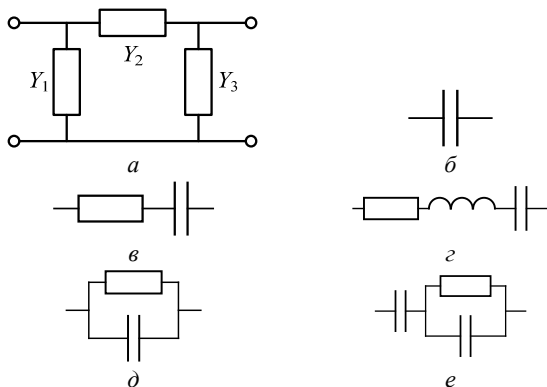


Рис. 2. Структурные ограничения для модели МДМ-конденсатора

С использованием методики [11] для каждого конструктивного состояния было получено несколько различных схем ЭС. Анализ показал, что в этом множестве структур четыре схемы (рис. 3) являются общими для всех конструктивных состояний и могут быть выбраны в качестве ЭС для параметрической модели конденсатора.

Для схем на рис. 3 рассчитаны ошибки параметров рассеяния $\Delta_{|S|}$ (табл. 1). В последней строке таблицы приведены максимальные ошибки этих моделей $\Delta_{|S|_{max}}$ по всем конструктивных состояниям.

Из табл. 1 следует, что наименьшие значения ошибок ϵ_S обеспечивают структуры рис. 3, а ($\epsilon_{S_{max}} = 0,0048$) и рис. 3, з ($\epsilon_{S_{max}} = 0,0048$). Значения ошибок для структур рис. 3, б, в на порядок выше, что делает их выбор в качестве ЭС для параметрической модели неприемлемым. Из двух схем рис. 3, а и з для параметрической модели целесообразно выбрать схему рис. 3, а как более простую.

В табл. 2 приведены значения элементов ЭС на рис. 3, а, полученные с помощью методики [11] для каждого конструктивного состояния конденсатора.

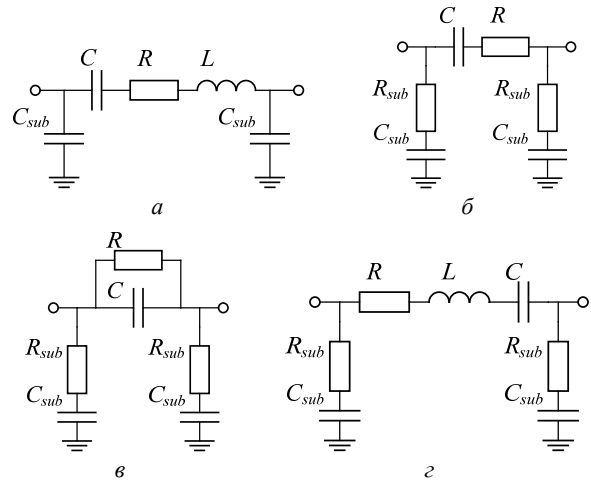


Рис. 3. Структуры параметрической ЭС-модели МДМ-конденсатора, полученные в результате автоматизированного синтеза

Таблица 1

Значения ошибок моделей МДМ-конденсатора в различных конструктивных состояниях (рис. 3)

КС*, w×l, мкм	Ошибка $\Delta_{ S }$			
	Модель рис. 3, а	Модель рис. 3, б	Модель рис. 3, в	Модель рис. 3, з
10×10	0,000313	0,0475	0,0474	0,000312
10×30	0,000393	0,0843	0,0843	0,000393
10×50	0,000457	0,1119	0,1119	0,000456
10×70	0,001056	0,1369	0,1369	0,001055
10×100	0,001771	0,1719	0,1719	0,00177
30×10	0,000264	0,057	0,057	0,000264
30×30	0,000328	0,0803	0,0803	0,000326
30×50	0,000936	0,1	0,1	0,000935
30×70	0,00136	0,119	0,119	0,00136
30×100	0,00239	0,147	0,147	0,00239
50×10	0,000238	0,0598	0,0598	0,000237
50×30	0,001078	0,0786	0,0786	0,00108
50×50	0,001327	0,0956	0,0956	0,001326
50×70	0,001926	0,1122	0,1122	0,00192
50×100	0,003251	0,136	0,136	0,003249
70×10	0,000658	0,0624	0,0624	0,000658
70×30	0,00112	0,0784	0,0784	0,001113
70×50	0,00173	0,0935	0,0935	0,00173
70×70	0,00254	0,108	0,108	0,00254
70×100	0,00343	0,130	0,130	0,00343
100×10	0,00091	0,066	0,066	0,00091
100×30	0,00159	0,0797	0,0797	0,00159
100×50	0,00196	0,0926	0,0926	0,00196
100×70	0,00371	0,105	0,105	0,00371
100×100	0,00480	0,124	0,124	0,00480
$\Delta_{ S _{max}}$	0,00480	0,1719	0,1719	0,00480

*КС – конструктивное состояние.

При решении задачи полиномиальной аппроксимации зависимостей элементов ЭС от конструктивных параметров – геометрических размеров w и l (табл. 2) зададим максимально допустимую относительную ошибку аппроксимации для каждого элемента $\Delta_0 = 5\%$. Рассмотрим более подробно построение аппроксимирующего полинома для элемента $e_1 \equiv C$ в ЭС (см. рис. 3, а). В этом случае выбраны следующие максимальные порядки двумер-

ного полинома $P_1(w, l) \equiv P_C(w, l)$ по переменным w и l : $M_w = M_l = 2$. Перебор всех возможных сочетаний порядков m_w и m_l относительно этих переменных в пределах $0 \leq m_w \leq M_w = 2$ и $0 \leq m_l \leq M_l = 2$ дает 9 различных аппроксимирующих полиномов P_{C_d} ($d = 1, 2, \dots, 9$). Значения порядков и рассчитанных ошибок Δ_c для 9 из этих полиномов приведены в табл. 3.

Таблица 2
Значения элементов ЭС-модели МДМ-конденсатора в различных конструктивных состояниях (см. рис. 3, а)

КС*, $w \times l$, мкм	C , пФ	L , пГн	R , мОм	C_{sub} , фФ
10×10	0,056	43,39	156,39	2,6
10×30	0,14604	59,35	213,4	3,61
10×50	0,23631	75,5	270,89	4,63
10×70	0,32613	91,16	327,44	5,55
10×100	0,46143	114,79	407,24	7,04
30×10	0,14602	40,77	120,39	4,04
30×30	0,40433	53,16	146,49	5,44
30×50	0,66228	65,45	172,65	6,71
30×70	0,92075	77,78	197,42	8,07
30×100	1,30934	95,78	232,75	10,11
50×10	0,23623	40,9	110,15	5,03
50×30	0,66714	51,27	127,52	6,62
50×50	1,08886	61,74	144,39	8,26
50×70	1,51612	72,32	160,48	9,9
50×100	2,15902	87,57	184,01	12,36
70×10	0,32606	41,65	105	5,85
70×30	0,92055	50,89	117,97	7,75
70×50	1,51584	60,32	130,27	9,65
70×70	2,11249	69,45	142,06	11,55
70×100	3,0107	82,82	160,36	14,53
100×10	0,46114	43,35	100,75	7,09
100×30	1,30834	51,41	109,72	9,35
100×50	2,15735	59,31	118,25	11,71
100×70	3,009	67,09	127,14	13,89
100×100	4,2931	78,4	139	17,5

Таблица 3
Порядки и ошибки аппроксимирующих полиномов для элемента С модели МДМ-конденсатора

P_C	m_w	m_l	m_{Σ}	Δ_c , %
P_{C1}	0	0	0	2003,6
P_{C2}	0	1	1	386,9
P_{C3}	1	0	1	386,9
P_{C4}	2	0	2	149,2
P_{C5}	1	1	2	133,1
P_{C6}	0	2	2	149,2
P_{C7}	1	2	3	2,3
P_{C8}	2	1	3	2,2
P_{C9}	2	2	4	1,9

Данные табл. 3 подтверждают тот закономерный факт, что при увеличении порядков полинома P_C по переменным w и l ошибка аппроксимации Δ_c уменьшается. При этом наиболее точно исходные значения элемента C на сетке конструктивных состояний описывает полином P_{C9} с суммарным порядком $m_{\Sigma 9} = 4$. Однако допустимый уровень ошибки $\Delta_c \leq \Delta_0 = 5\%$ также обеспечивают полиномы P_{C7} и P_{C8} , обладающие меньшим суммарным порядком

($m_{\Sigma 7} = m_{\Sigma 8} = 3$). Таким образом, для описания зависимости элемента C от геометрических размеров w и l МДМ-конденсатора алгоритм выберет полином P_{C8} .

В результате выполнения алгоритма для каждого элемента ЭС на рис. 3, а получим следующие полиномы:

$$C(w, l) = 1,12 \times 10^{-2} + 1,56 \times 10^{-4} w + 2,382 \times 10^{-4} l + 6,838 \times 10^{-7} w^2 + 4,23 \times 10^{-4} wl; \quad (7)$$

$$L(w, l) = 4,03 \times 10^{-2} + 3,01 \times 10^{-4} w + 7,932 \times 10^{-4} l + 3,174 \times 10^{-6} w^2 - 4,278 \times 10^{-6} wl - 1,478 \times 10^{-7} l^2; \quad (8)$$

$$R(w, l) = 0,1771 - 5,36 \times 10^{-3} w + 3,511 \times 10^{-3} l + 1,052 \times 10^{-4} w^2 - 7,489 \times 10^{-5} wl - 1,598 \times 10^{-6} l^2 - 6,014 \times 10^{-7} w^3 + 4,493 \times 10^{-7} w^2 l + 1,515 \times 10^{-8} w l^2; \quad (9)$$

$$C_{sub}(w, l) = 1,43 \times 10^{-3} + 6,991 \times 10^{-5} w + 4,392 \times 10^{-5} l - 2,64 \times 10^{-7} w^2 + 7,308 \times 10^{-7} wl. \quad (10)$$

Следует отметить, что при построении полиномов были получены коэффициенты отдельных мономов, близкие к нулю (менее 10^{-20}). Так как их влияние пренебрежимо мало, данные мономы были исключены из полиномов.

Система двумерных полиномов (7)–(10) в совокупности со структурой ЭС на рис. 3, а представляет собой построенную параметрическую модель МДМ-конденсатора.

Рисунок 4 иллюстрирует сравнение параметров рассеяния, рассчитанных по исходной (библиотечной) и разработанной модели, для МДМ-конденсатора 30×30 мкм. Такое же сравнение было выполнено для других геометрических размеров конденсатора в узлах конструктивной сетки (см. рис. 1). Значение ошибки параметров рассеяния в исходных конструктивных состояниях не превышает 3% по модулю и 4° по фазе.

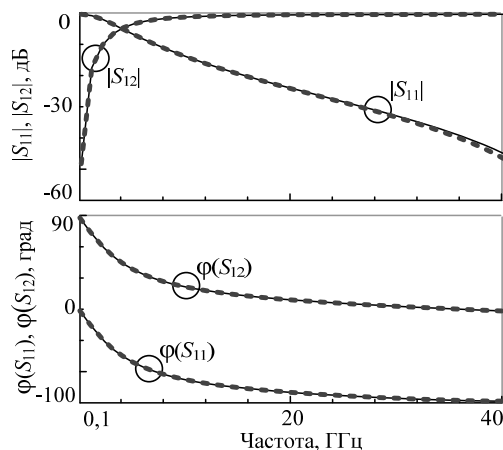


Рис. 4. Сравнение параметров рассеяния исходной и разработанной моделей МДМ-конденсатора 30×30 мкм

При верификации параметрических моделей необходимо также оценить способность воспроизведения моделью характеристик СВЧ-компонента в промежуточных конструктивных состояниях, т.е. в состояниях, отличающихся от исходных, на базе которых была построена модель. Для верификации модели МДМ-конденсатора были взяты следующие сочетания длины и ширины $w \times l$: 20×20, 40×40,

60×20, 85×60 (см. рис. 1, светлые кружки). На рис. 5 приведено сравнение параметров рассеяния исходной и разработанной моделей МДМ-конденсатора 85×60 мкм. Ошибка параметров рассеяния в промежуточных конструктивных состояниях не превышает 4% по модулю и 5° по фазе.

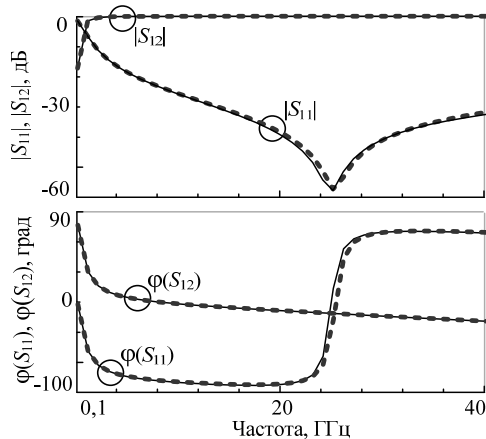


Рис. 5. Сравнение параметров рассеяния исходной и разработанной моделей МДМ-конденсатора 85×60 мкм

Приведенные данные показывают, что разработанная параметрическая модель МДМ-конденсатора с достаточной точностью воспроизводит значения параметров рассеяния в частотном диапазоне до 40 ГГц как в исходных, так и промежуточных конструктивных состояниях. Предложенная методика синтеза параметрических моделей пассивных СВЧ-компонентов была реализована в программе Parametric, написанной в вычислительной среде Matlab. Отметим, что общее время для автоматизированного синтеза модели МДМ-конденсатора с помощью программ Extraction-P и Parametric составило 45 мин, включая построение ЭС-моделей в каждом конструктивном состоянии согласно методике [11], выбор структуры параметрической ЭС-модели и нахождение многомерных аппроксимирующих полиномов для всех элементов модели. При этом большая часть времени потребовалась для задания исходных данных и верификации модели в промежуточных конструктивных состояниях. Для сравнения укажем, что время построения аналогичной параметрической модели «ручным» способом [1] составляет порядка одного-двух дней. Это подчеркивает эффективность и высокую степень автоматизации предлагаемой методики, а также её практическую значимость.

Заключение

Предложенная методика синтеза параметрических моделей СВЧ-компонентов обладает рядом преимуществ. В частности, она даёт возможность автоматизированного поиска оптимальной структуры ЭС-параметрической модели на базе синтеза ЭС-моделей во всех конструктивных состояниях. При этом разработчик может осуществлять контроль структуры ЭС с помощью ограничения морфологического множества допустимых цепей в звеньях [11],

что важно для сохранения физичности модели и управления сложностью ЭС. Также методика обеспечивает высокую степень автоматизации построения модели при значительном выигрыше во времени по сравнению с существующими подходами. Это позволяет упростить и ускорить создание моделей и библиотек элементов для различных технологий изготовления СВЧ-устройств как на дискретных компонентах, так и в монолитном исполнении.

Работа выполнена в рамках проекта № 16-47-700286 «Анализ, исследование и разработка перспективных радиотехнических систем и устройств силовой электроники для робототехнических комплексов космического, воздушного, морского и наземного базирования», получившего поддержку по результатам конкурса «Конкурс проектов фундаментальных научных исследований, проводимый РФФИ и субъектами Российской Федерации».

Литература

1. Mellberg A. An evaluation of three simple scalable MIM capacitor models / A. Mellberg, J. Stenarson // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2006. – Т. 54, № 1. – PP. 169–172.
2. Gao W. Scalable compact circuit model and synthesis for RF CMOS spiral inductors / W. Gao, Z. Yu // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2006. – Т. 54, № 3. – PP. 1055–1064.
3. Lin S. Scalable lumped model with multiple physical parameters for embedded passives / S. Lin, L. Yang, H. Chang // Electronic Components and Technology Conference, Proceedings, 2005. – Vol. 2. – PP. 1842–1845.
4. Горяинов А.Е. Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ-монолитных интегральных схем с использованием программы Extraction-P / А.Е. Горяинов, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2(26), ч. 2. – С. 98–103.
5. Сальников А.С. Построение параметрической модели монолитного тонкопленочного резистора на основе СВЧ-измерений и электромагнитного моделирования / А.С. Сальников и др. // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 3(33). – С. 109–117.
6. Automatic Synthesis of MMIC Amplifiers, using a Genetic Algorithm and Parametric Models of Passive Elements / А.А. Калентьев, И.М. Добуш, Д.В. Гарайс, А.Е. Горяинов, А.А. Коколов, А.В. Степачева, Л.И. Бабак // 2nd Postgraduate International Consortium International workshop Proceedings (ICST-2012, 10–13 Sep., 2012). – Tomsk, 2012. – PP. 146–153.
7. Программа автоматизированного проектирования СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма / Д.В. Гарайс, А.А. Калентьев, И.М. Добуш, Д.А. Жабин, А.Е. Горяинов, А.С. Сальников, Л.И. Бабак // Автоматизация в промышленности. – 2015. – № 9. – С. 39–44.
8. Структурный синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием параметрических моделей монолитных элементов / А.А. Калентьев, Д.В. Гарайс, Л.И. Бабак, А.А. Коколов, И.М. Добуш // Матер. 22-й Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012). Севастополь. – 2012. – С. 131–132.
9. Структурный синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с применением моделей пассивных элементов в виде наборов S-параметров / А.А. Калентьев, Д.А. Жабин, И.М. Добуш, Д.В. Га-

райс, Л.И. Бабак // Матер. 24-й Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). – Севастополь, 2014. – С. 117–118.

10. Калентьев А.А. Структурно-параметрический синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием моделей монолитных элементов / А.А. Калентьев и др. // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2(26), ч. 2. – С. 104–112.

11. Горяинов А.Е. Автоматизированный синтез моделей пассивных СВЧ-компонентов в виде эквивалентных схем на основе оптимального выбора звеньев и прямой экстракции / А.Е. Горяинов // Доклады ТУСУРа. – 2016. – № 3(19). – С. 32–41

12. Курош А.Г. Курс высшей алгебры / А.Г. Курош. – М.: Наука, 1975. – 375 с.

13. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – 2-е изд. – М.: Физматгиз, 1962. – 336 с.

Горяинов Александр Евгеньевич

Мл. науч. сотрудник

лаб. интеллектуальных компьютерных систем ТУСУРа

Тел.: +7-913-841-24-29

Эл. почта: goryainov.alex@gmail.com

Бабак Леонид Иванович

Д-р техн. наук, профессор каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа

Тел.: +7-960-969-91-52

Эл. почта: leonid.babak@mail.ru

Goryainov A.E., Babak L.I.

Technique for automated synthesis of scaled models of passive MMIC-components

A technique for constructing scaled models of passive MMIC-components (resistors, capacitors, inductors, etc.) in the form of equivalent circuits (ECs) is presented. In such models, the elements of EC depend on constructive parameters (e.g., sizes, etc.) of component. The technique allows the automate the search of EC schematic as well as the determination of optimal degrees of approximating polynomials for each constructive parameter. As an example, the synthesis of scaled model of MDM-capacitor produced using 0.15 μm GaAs pHEMT-process is presented.

Keywords: MMIC, passive components, scaled model, equivalent circuit, synthesis, GaAs, MDM-capacitor.