

Точный синтез планарных индуктивностей интегральных схем СВЧ

А.М. Румянцева, Э.Ю. Седышев

СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Аннотация: в работе исследуется математический аппарат синтеза индуктивностей для интегральных схем СВЧ. Произведено сравнение различных методик синтеза круглых спиральных индуктивностей и алгоритмов их расчёта. Рассмотрено влияние паразитных параметров на номинал индуктивных элементов схем. Сопоставлением полученных результатов расчёта с результатами эксперимента произведена сверка методик между собой. С помощью различных методов оценки реактивностей выполнен эксперимент.

Ключевые слова: интегральные схемы, сверхвысокие частоты, плоские спиральные индуктивности, паразитные параметры, квазидинамическое приближение, ЧПУ

1. Введение

Изготавливая конструктивные индуктивные элементы, инженерам для получения точного номинала индуктивности с конкретной геометрией в требуемом диапазоне частот необходимо иметь высокую разрешающую способность технологического процесса, а также выбрать наиболее точную методику расчёта.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Спиральная индуктивность (рисунок 1) может быть рассмотрена с помощью таких параметров как: число витков (N), внутренний диаметр ($D1$), внешний диаметр ($D2$), ширина спирали (B), расстояние между витками (t) (рисунок 1, а). 3D-модель индуктивного элемента представлена на рисунке 1, б.

Для анализа точности методик расчёта был изготовлен макет, содержащий планарную индуктивность с перемычкой и две контактные площадки (рисунок 1, в).

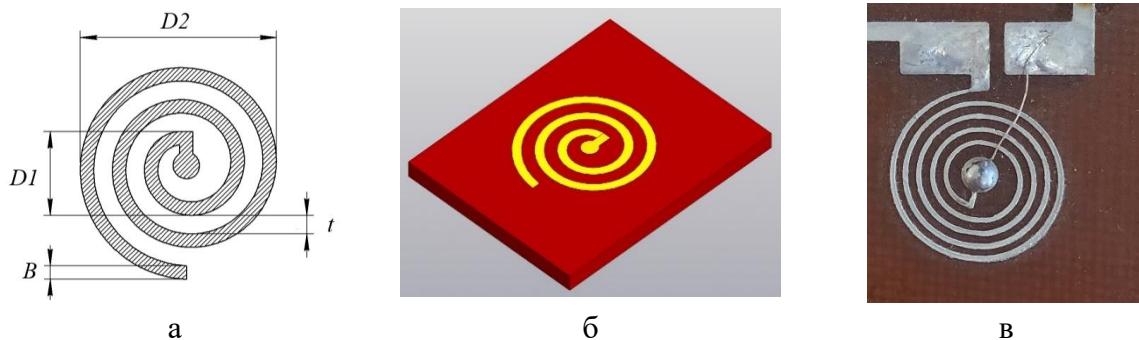


Рисунок 1. Спиральная индуктивность: а) Чертёж планарной круговой индуктивности; б) 3D-модель планарной круговой индуктивности; в) общий вид исследуемого макета.

Ранее были рассмотрены формулы расчёта плоских спиральных индуктивностей различных инженерных методик [1]. В данной работе с помощью квазистатического метода производилась оценка точности этих методик. По итогу работы были выбраны три методики расчёта индуктивностей для дальнейшего исследования [2, 3, 4]. В таблице 1 представлены выбранные формулы и результаты расчёта планарной индуктивности синтезированного макета, где: $R2$ – внешний радиус, $R1$ –

внутренний радиус, φ – коэффициент заполнения, $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр, a – средний радиус, b – ширина катушки.

Таблица 1. Формулы расчёта индуктивности

№	Формула индуктивности	Полученное значение
1	$L = 2,475 \cdot D_{\text{ср}} \cdot \sqrt[3]{N^5} \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot D_{\text{ср}}}{b}\right)$ <p>где $D_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (D_2 + D_1)$, $b = R_2 - R_1$, $R_2 = 0,5 \cdot D_2$, $R_1 = 0,5 \cdot D_1$</p>	$L = 74,142$ нГн
2	$L = 4,978 \cdot a \cdot \sqrt[3]{N^5} \cdot \lg\left(\frac{8 \cdot a}{b}\right)$ <p>где $a = 0,5 \cdot (R_2 + R_1)$.</p>	$L = 74,562$ нГн
3	$L = N^2 \cdot D_{\text{ср}} \cdot \left[\ln\left(\frac{2,46}{\varphi}\right) + 0,2 \cdot \varphi^2\right]$ <p>где $\varphi = \frac{D_2 - D_1}{D_2 + D_1}$.</p>	$L = 78,675$ нГн

В СВЧ диапазоне паразитные параметры проводников и диэлектрической подложки оказывают влияние на работу устройства. На рисунке 2 представлена принципиальная схема макета с учётом паразитных параметров.

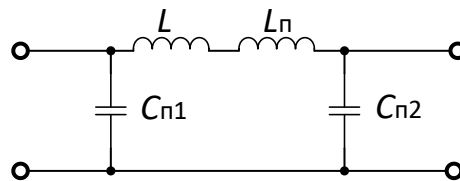


Рисунок 2. Принципиальная схема колебательного контура, L – индуктивность, $L_{\text{п}}$ – паразитная индуктивность, $C_{\text{п1}}$, $C_{\text{п2}}$ – паразитные ёмкости.

При расчёте перемычки планарной индуктивности, представляющую собой также индуктивность, используется формула индуктивности одиночного прямолинейного круглого провода

$$L_{\text{п}} = 2 \cdot l \cdot \left(\ln \frac{4l}{d} - 1\right) \cdot 10^{-9}, \quad (1)$$

где $L_{\text{п}}$ – индуктивность одиночного прямолинейного круглого провода, l – длина провода, d – диаметр провода. Индуктивность перемычки в исследуемом макете составила 9,47 нГн.

Паразитные ёмкости рассчитываются по формуле плоского конденсатора

$$C_{\text{п}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{h}, \quad (2)$$

где $C_{\text{п}}$ – ёмкость плоского конденсатора, ε_0 – электрическая постоянная, ε_r – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, S – площадь пластины конденсатора, h – высота подложки.

В предложенном макете, как видно на рисунке 1, в, имеется две паразитные ёмкости $C_{\text{п1}}$ и $C_{\text{п2}}$ со значениями 0,649 пФ и 1,168 пФ соответственно.

Был проведён эксперимент со снятием амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) макета. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3, а.

Далее в нашем исследовании была произведена эмуляция работы эквивалента на компьютере. Первым этапом мы рассмотрели значения индуктивностей,

представленных в таблице 1 без учёта паразитных параметров. Во втором учитывались паразитные параметры с девиацией 25...40%. В таблице 2 приведено сравнение параметра S21 с результатами квазидинамического приближения. Полученная АЧХ при эмуляции для варианта 2.6 из таблицы 2 представлена на рисунке 3, б.

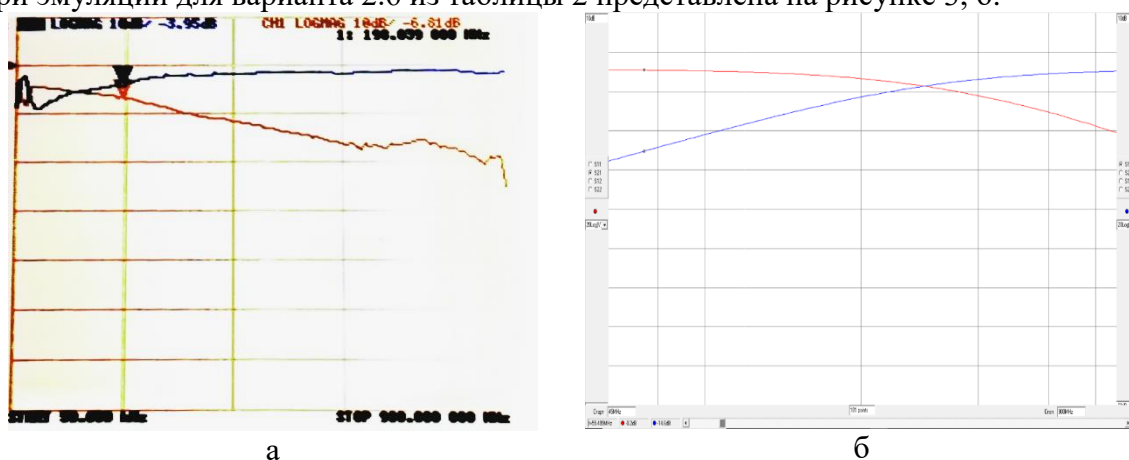


Рисунок 3. Амплитудно-частотная характеристика макета: а) полученная в эксперименте; б) полученная на компьютере.

Таблица 2. Результаты квазидинамического приближения

f, МГц	Эксперимент	Результаты полученные на компьютере								
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
	S21, dB	S21, dB	S21, dB	S21, dB	S21, dB	S21, Db	S21, Db	S21, dB	S21, dB	S21, dB
45	-0,24	-0,19	-0,19	-0,21	-0,21	-0,22	-0,21	-0,32	-0,13	-0,09
90	-0,42	-0,71	-0,71	-0,78	-0,79	-0,82	-0,77	-1,16	-0,48	-0,35
207	-1,14	-2,9	-3,10	-3,11	-3,15	-3,23	-3,07	-4,19	-2,11	-1,63
288	-2,84	-4,47	-4,51	-4,81	-4,88	-5	-4,77	-6,2	-3,46	-2,77
360	-3,51	-5,87	-5,59	-6,2	-6,31	-6,46	-6,17	-7,78	-4,66	-3,84
486	-5,55	-7,87	-7,91	-8,31	-8,51	-8,72	-8,23	-10,12	-6,6	-5,68
594	-7,98	-9,39	-9,42	-9,83	-10,13	-10,39	-9,89	-11,8	-8,1	-7,16
720	-7,64	-10,85	-10,93	-11,96	-11,78	-12,12	-11,48	-13,5	-9,67	-8,78
819	-11,2	-11,92	-11,96	-12,4	-12,94	-13,35	-12,6	-14,7	-10,79	-9,97

Варианты с уточнением параметров цепи для каждого этапа при эмуляции в программе:

1.1 - L=74,142 нГн;

2.1 - L=74,142 нГн, $L_{п}$, $C_{п1}$, $C_{п2}$;

1.2 - L=74,562 нГн;

2.2 - L=74,142 нГн, $L_{п}+25\%$, $C_{п1}+25\%$, $C_{п2}+25\%$;

1.3 - L=78,675 нГн;

2.3 - L=74,142 нГн, $L_{п}-25\%$, $C_{п1}-25\%$, $C_{п2}-25\%$;

2.4 - L=74,142 нГн +25%, $L_{п}$, $C_{п1}$, $C_{п2}$;

2.5 - L=74,142 нГн -25%, $L_{п}$, $C_{п1}$, $C_{п2}$;

2.6 - L=74,142 нГн -40%, $L_{п}+40\%$, $C_{п1}+40\%$, $C_{п2}+40\%$;

3. Заключение

Как видно из таблицы 2 результаты, полученные в эксперименте и на компьютере при варианте 2.6, имеют самые близкие значения. Полученные результаты показывают, что для исследуемого диапазона частот наиболее точна формула №1 с учётом паразитных параметров и разбросом значений 40%.

В дальнейшем планируется изготовление опытных образцов индуктивностей (рисунок 4) на станках с ЧПУ в программной среде FREECAD, а также создание программной библиотеки конструктивных индуктивных элементов с известными номиналами.

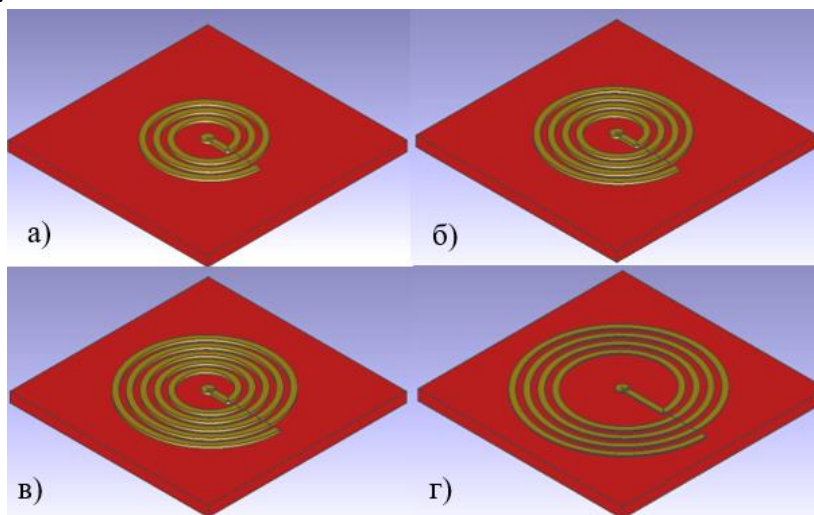


Рисунок 4. Варианты исполнения опытных образцов индуктивностей с номиналом: а) 104,873 нГн; б) 180,231 нГн; в) 279,201 нГн; г) 323,061 нГн.

Для получения более высокой точности расчёта необходимо увеличить частотный диапазон исследования, а также уменьшить зависимость передаточной характеристики от паразитных элементов (увеличить номинал исследуемой индуктивности).

Список литературы

1. Бочаров Е.И., Румянцева А.М., Седышев Э.Ю. Сравнение методов расчета конструктивных индуктивностей интегральных схем СВЧ // Региональная научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей; сборник лучших докладов конф. / Сост. Н. Н. Иванов. – СПб.: СПбГУТ, – 2021. – С. 330-334.
2. Скрипников Ю.Ф. Колебательный контур. М.: Энергия, – 1970. – 128 с.
3. Торгонский Л.А. Проектирование интегральных микросхем и микропроцессов: учебное пособие. В 3-х разделах. – Томск: ТУСУР, 2011. – Раздел 2. – 228 с.
4. Sunderarajan S. Mohan, Maria del Mar Hershenson, Stephen P. Boyd, and Thomas H. Lee. Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances// IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 34, no. 10, pp. 1419-1424, October 1999.