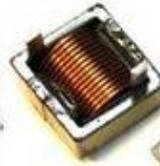


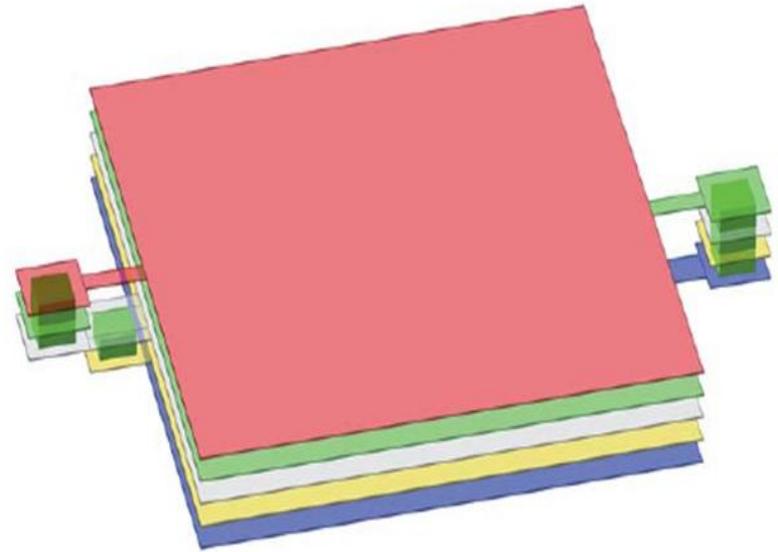
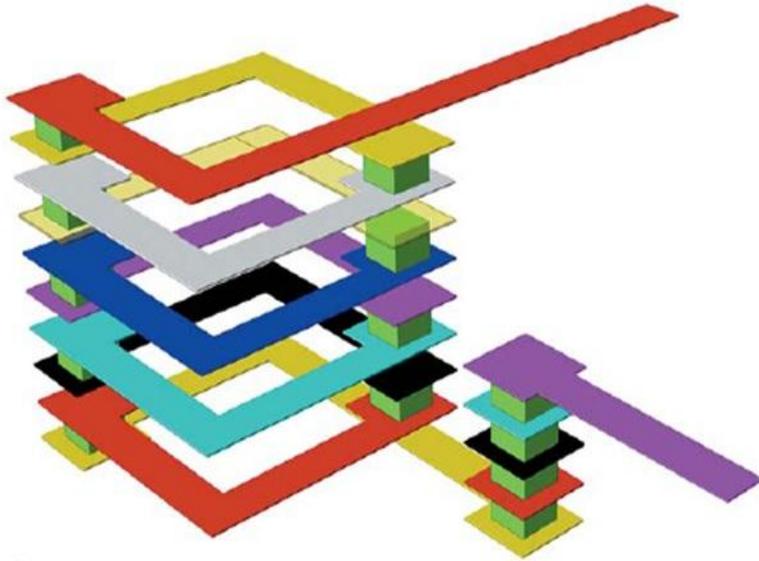
# Моделирование LTSS индуктивностей ВЧ и СВЧ диапазона

Выполнила студентка гр. ФРМ-702-О  
Гирько Кристина Геннадьевна

# Катушки ИНДУКТИВНОСТИ



# Использование многослойной структуры для создания миниатюрных компонентов



**Цель работы:** Определение численных зависимостей LTCC индуктивностей дециметрового диапазона с учетом добротности и частоты собственного резонанса.

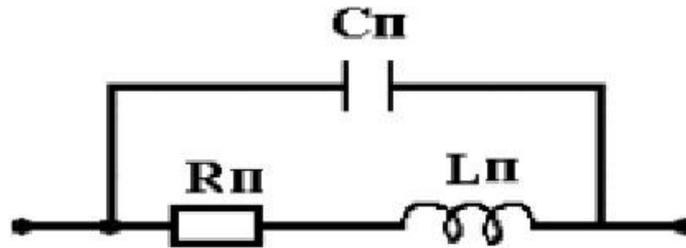
**Задачи:**

- Изучить технологические возможности LTCC производства интегральных LC элементов для определения граничных условий для проектирования (воспроизводимые размеры элементов, толщина слоев и т.д.)
- Провести расчеты и моделирование LTCC индуктивностей с воспроизводимыми технологическими параметрами для определения диапазона достижимых номиналов L-элементов.

## Основные характеристики индуктивностей:

- Индуктивность ( $L$ )
- Добротность ( $Q$ )
- Частота собственного резонанса ( $f_{res}$ )
- Паразитная емкость ( $C_{\Pi}$ )
- Сопротивление потерь ( $R_{п}$ )

# Расчет характеристик планарных ИНДУКТИВНОСТЕЙ



$$L_{\Pi} = \frac{39,39n^2 a^2}{(8a + 11c)} \text{ [нГн]},$$

$$a = \frac{(d_{in} + d_{out})}{4}, \quad c = \frac{(d_{out} - d_{in})}{2},$$

где

$n$  – количество витков;

$d_{in}$  – внутренний диаметр катушки индуктивности, мм;

$d_{out}$  – внешний диаметр катушки индуктивности, мм.

$$R_{\Pi} = 1,5 \cdot \frac{\pi \cdot a \cdot R_{sh} \cdot n}{w} [\text{Ом}],$$

$$C_{\Pi} = 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot d_{out} + 0.06 [\text{пФ}]$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\Pi}C_{\Pi}}}$$

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

Где

$R_{sh}$  — сопротивление на квадрат, Ом/□;

$w$  — ширина линии, мм;

$t$  — толщина линии, мм.

# Расчет характеристик многослойных индуктивностей

$$L_t \cong n^2 L,$$

где  $n$  — количество слоев в стеке.

$$C_{\Pi} = \frac{1}{3n^2} \left( 4 \sum_{i=1}^{n-1} C_i + C_n \right)$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_t C_{\Pi}}}$$

# Конструкции интегральных катушек ИНДУКТИВНОСТИ



а) Круглая спираль



б) Квадратная спираль

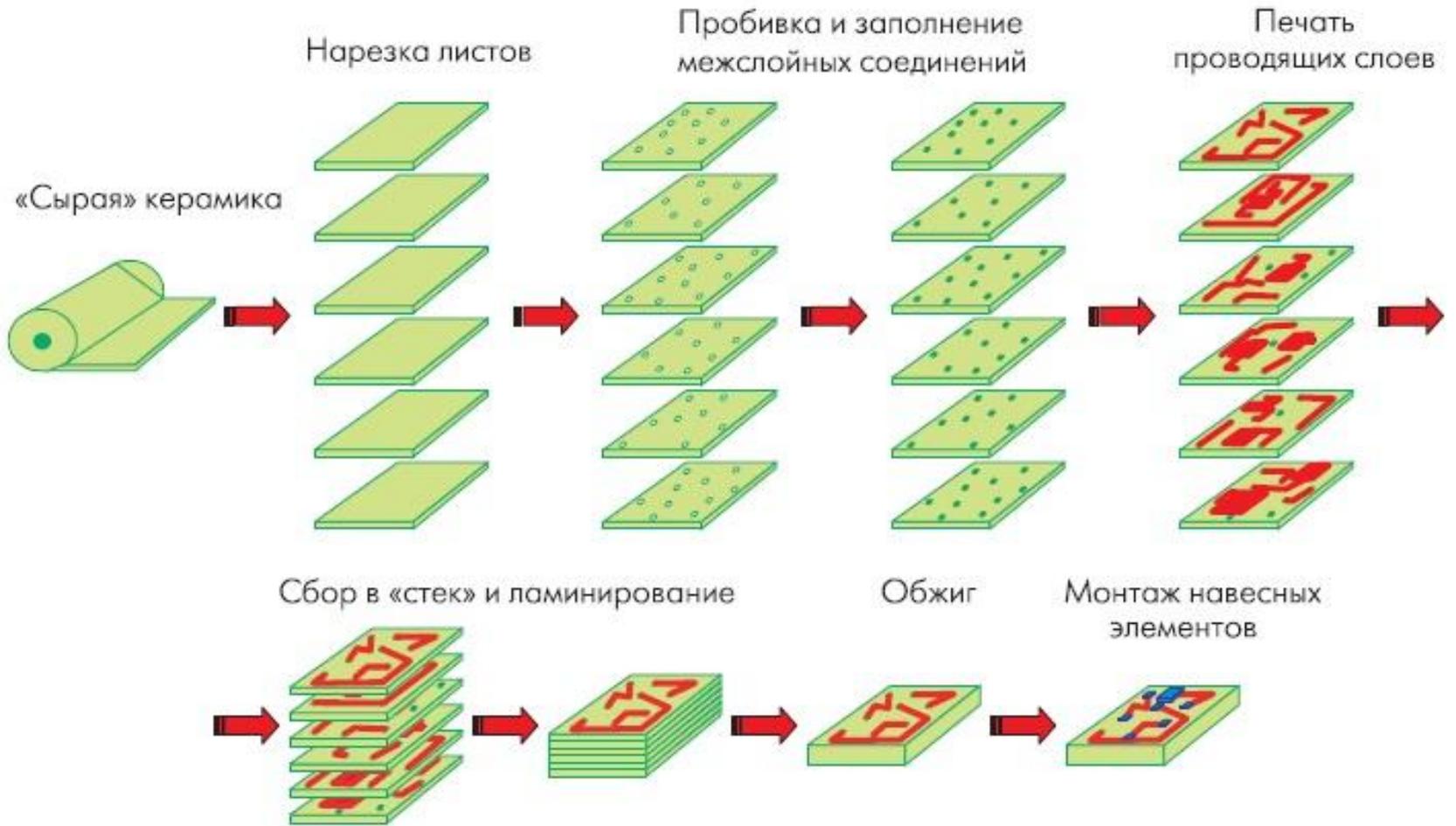


в) 3D Г-образная спираль



г) Квадратная "стековая" спираль

# Технология LTCC



Технологический процесс изготовления многослойных ИС на КНТО

Характеристики материала GREEN TAPE™, LTCC			
Параметры		Значение	
Толщина слоя сырой/вожженной керамики, мкм			
		951PT	114/96
		951P2	165/140
		951PX	254/216
Диэлектрическая постоянная, $\epsilon_r$		7.8	
Тангенс угла диэлектрических потерь, $tg\delta \times 10^{-3}$		1.5	
Основные характеристики применяемых паст			
Рекомендации по применению	Основа проводящих паст	Толщина вожженного слоя, мкм	
Внутренний совместновжигаемый проводник	Ag	$\leq 10$	
	Au	$\leq 8$	
	Ag	$\leq 8$	
Заполнение внутренних межслойных отверстий	Ag	-	
	Au	-	
Заполнение внешних отверстий	Pd/Ag	-	

Наименование параметра	Наиболее технологичное значение
Расстояние от проводника до края платы, мкм	150
Минимальная ширина проводника, мкм	125
Минимальное расстояние между проводником и металлизированной областью большой площади, мкм	150
Минимальное расстояние между проводниками, мкм	125

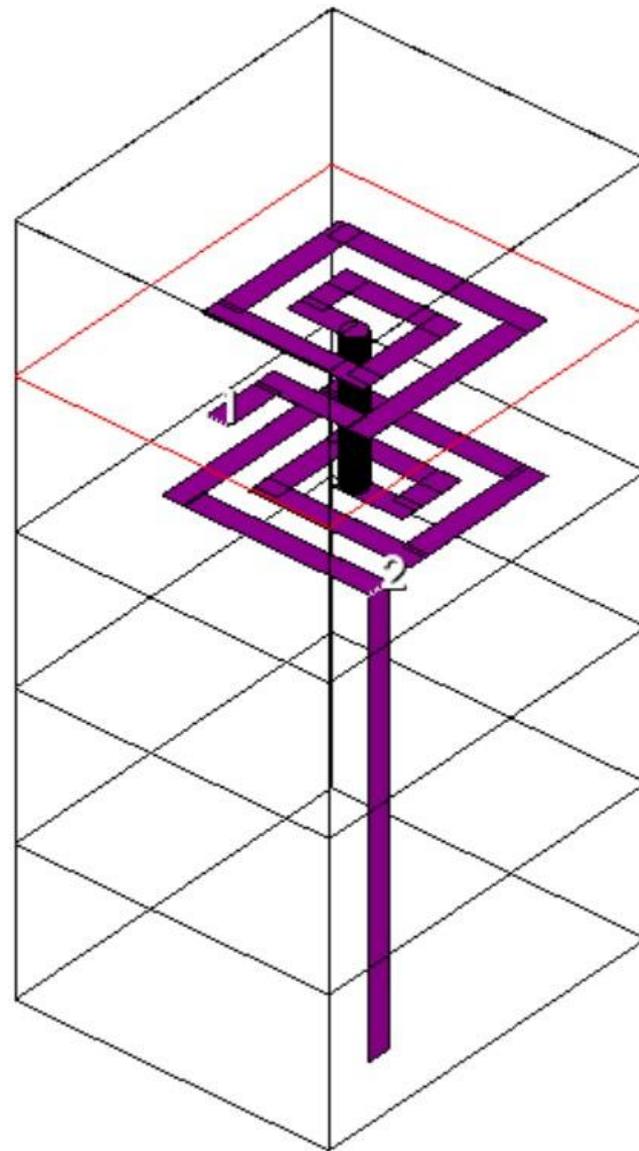
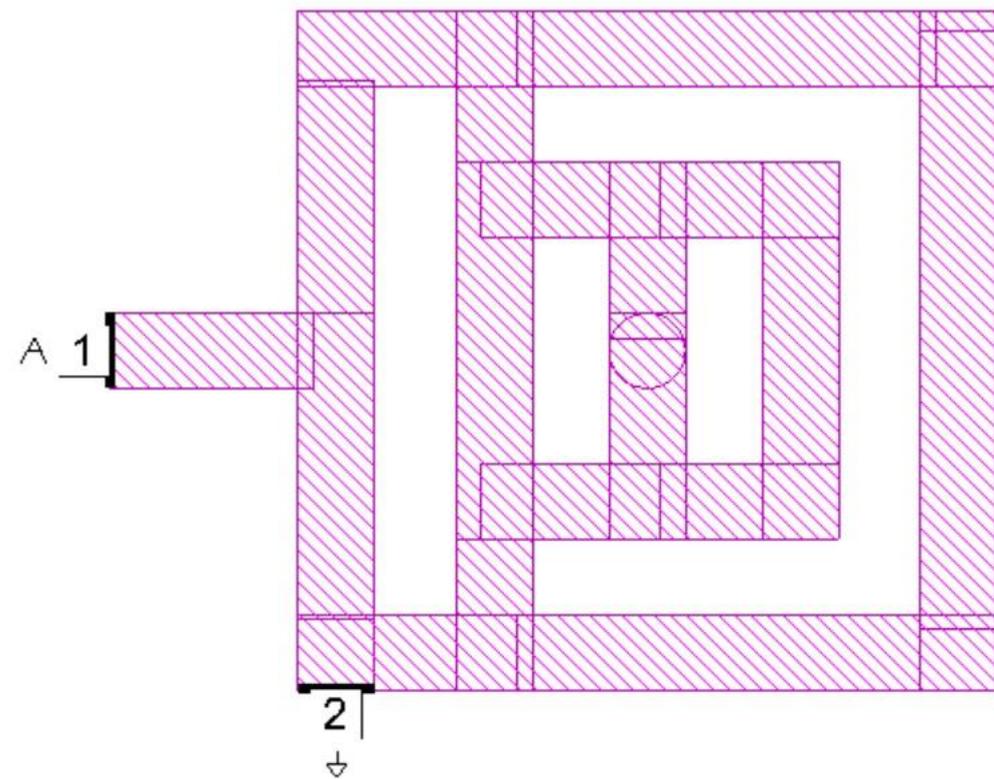
# Выбор САПР и метода моделирования

Фирма	Программный продукт	Марки EM симуляторов	
		3D	2.5D
Agilent Eesoft EDA	ADS	TD	MoM
National Instruments	AWR Design Environment	FEM	MoM
Ansoft Corp.	Ansoft HFSS	FEM	-

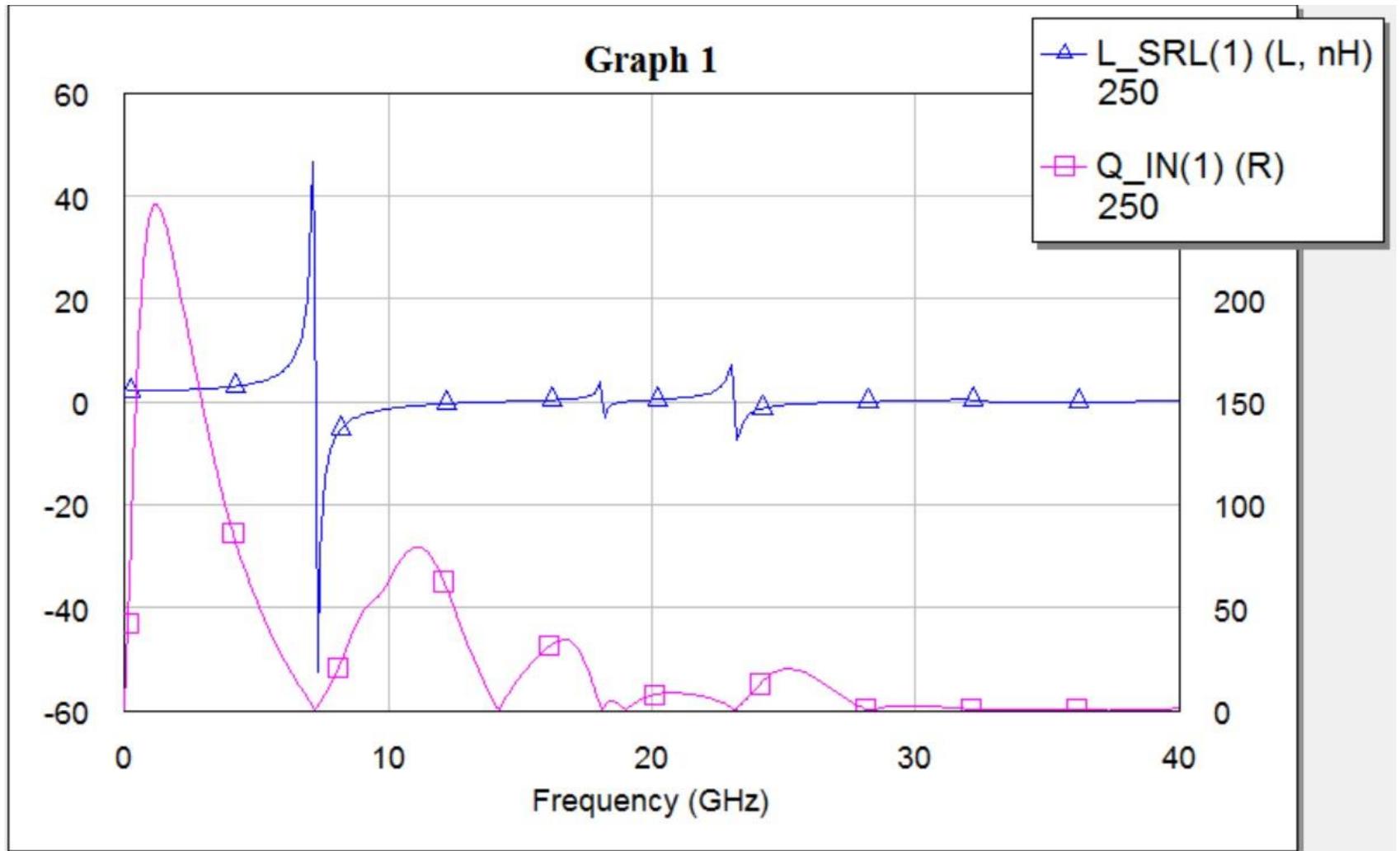
# Результаты аналитического расчета L элементов

		Индуктивность, L		
Ширина полоска/зазора, мкм		150/150	250/250	350/350
1 слой	1 виток	0,391	0,652	0,912
	2 витка	2,321	3,847	5,385
	3 витка	6,930	11,550	16,257
2 слоя	1 виток	1,564	2,608	3,648
	2 витка	9,284	15,388	21,540
	3 витка	27,720	46,200	65,028
3 слоя	1 виток	3,519	5,868	8,208
	2 витка	20,889	34,623	48,465
	3 витка	62,370	103,950	146,313

# Моделирование L в среде AWR DE



# Зависимости индуктивности и добротности от частоты



# Результаты моделирования L элементов

		Индуктивность, L при f=500 МГц			Добротность, Q при f=500 МГц			Частота собственного резонанса, f <sub>рез</sub>		
		150/150	250/250	350/350	150/150	250/250	350/350	150/150	250/250	350/350
Ширина полоска/зазора, мкм										
1 слой	1 виток	1,41	2,15	2,72	149,88	179,20	187,10	12700	7100	4900
	2 витка	4,32	6,53	8,63	107,20	157,40	185,00	4500	2600	1800
	3 витка	10,44	16,36	24,31	106,40	146,00	150,54	2200	1300	900
2 слоя	1 виток	2,56	4,15	5,66	123,40	166,00	186,50	7500	4100	2700
	2 витка	11,62	19,83	34,06	51,56	94,42	144,26	2100	1100	700
	3 витка	36,34	-	-	54,75	55,49	139,53	900	500	300
3 слоя	1 виток	3,84	6,90	8,94	101,70	154,30	164,60	5800	3000	2000
	2 витка	22,05	51,02	149,20	60,87	41,12	155,49	1500	800	500
	3 витка	130,00	-	-	27,75	48,97	86,39	600	300	200

# Выводы

- В ходе выполнения моей научно-исследовательской работы были достигнуты следующие результаты.
- Определены численные зависимости LTCC индуктивностей дециметрового диапазона с учетом добротности и частоты собственного резонанса.
- Произведена оценка степени влияния соотношения ширина полоска к ширине зазора на индуктивность, добротность и частоту собственного резонанса, а именно были определены следующие закономерности:
  - Изменение ширины полоска/зазора на 40% приводило к увеличению индуктивности на 50%, а добротности на 30%.
  - Изменение количества витков приводило к увеличению индуктивности на 60% и уменьшению добротности на 15%.
  - Изменение количества слоев приводило к увеличению индуктивности на 50% и уменьшению добротности на 15%.
  - Изменение ширины полоска на 40% или увеличение количества слоев и витков приводило к смещению резонанса.
- Сделан вывод о необходимости включения в дальнейшее исследование ещё одного конструкционного параметра — формы катушки (3D Г-образная спираль, 3D Г-образная сужающаяся спираль, квадратная и стековая спираль).

# Список литературы

1. Борейко Д.А. Исследование параметров катушек индуктивности, выполненных по LTCC технологии [текст] / Д.А. Борейко, Т.С. Дьяченко, А.И. Тюменцев // Техника радиосвязи. – 2012. - Вып. 17. – С. 73 – 83.
2. Босый Н.Д. Электрические фильтры [текст] / Н.Д. Босый. – К: Технической литературы, 1957. - 516 с.
3. Вендик И.Б. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига [текст] / И.Б. Вендик, Д.В. Холодняк, А. В. Симин // Компоненты и технологии. - 2005, Вып. 5. – С. 190 – 196.
4. Вендик И.Б. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига. Часть 2. Средства проектирования и реализация пассивных устройств [текст] / И.Б. Вендик, Д.В. Холодняк, А. В. Симин // Компоненты и технологии. - 2005, Вып. 6. – С. 210 – 216.
5. Вендик И.Б. Многослойные интегральные схемы СВЧ на основе керамики с низкой температурой обжига. Часть 3. Активные устройства, антенны и многофункциональные СВЧ модули [текст] / И.Б. Вендик, Д.В. Холодняк, А. В. Симин // Компоненты и технологии. - 2005, Вып. 7 – С. 208 – 213.
6. Дьяченко Т.С. «Система в корпусе»: установка бескорпусных кристаллов как метод повышения интеграции многофункциональных модулей [текст] / Т.С. Дьяченко // Успехи современной радиоэлектроники. – 2011. - Вып. 7 – С. 60 – 64.
7. Егоров Г.Н. Многослойные керамические микросхемы. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика [текст] / Г.Н. Егоров // Электроника. – 2006. - Вып. 3. – С. 60 – 65.

8. Зелях Э.В. Пьезоэлектрические фильтры [текст] / Э.В. Зелях, Я. И. Великин, З. Я. Гельмонт. – М.: Связь, 1966. - 396 с.
9. Ханзел Г. Е. Справочник по расчету фильтров [текст] / Пер. с англ. под ред. А.Е. Знаменского. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
10. Bahl Inder Lumped Elements for RF and Microwave Circuits [текст] / Inder Bahl// Artech House. - 2003. – 488 p.
11. Imanaka Yoshihiko Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) [текст] / Yoshihiko Imanaka // Technology. Springer.- 2005. – 229p.
12. Rhea W. HF Filter Design and Computer Simulation [текст] / W. Rhea //Randall.- 1994. – 448p.
13. Гупта, К. Машинное проектирование СВЧ устройств [текст] / К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха. - М.: Радио и связь. – 1987. - 432 с.
14. Дьяченко Т.С. Оптимизация топологии толстопленочного фильтра СВЧ для улучшения характеристики в полосе задерживания [текст] / Т.С. Дьяченко, А.И. Тюменцев // Материалы IV Всероссийской молодежной научно-технической конференции «СВЧ –2012».– Омск: ЦКБА, 2012. – С. 65 – 67.
15. Хроленко Т.С. Реализация LC-фильтров в структуре многослойных печатных плат [текст] /Т.С. Хроленко, А.И.Тюменцев, А.Н.Яковлев, В.П.Кисмерешкин //Омский научный вестник.- 2013.-Вып.1(117).-С.248-253.
16. Тули М. Карманный справочник по электронике: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993. –С. 176.

Спасибо за внимание