

Моделирование сверхширокополосных полосковых СВЧ фильтров, встроенных в печатную плату

В.А. Маклашов¹, М.Н. Пиганов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Проведено электродинамическое моделирование сверхширокополосных полосковых СВЧ фильтров, выполненных на базе многослойной печатной платы. Выполнены расчеты основных параметров фильтров. Приведены результаты экспериментальных исследований. Проведено сравнение расчётных и экспериментальных данных. Установлено влияние температуры на характеристики фильтров. Показаны преимущества полосковых фильтров по сравнению с микрополосковыми. Даны рекомендации по расчету параметров, выбору материалов и структуры многослойной печатной платы.

1. Введение

В настоящее время весьма востребованы малогабаритные комплексы нового поколения для защиты летательных аппаратов различного назначения с функциями радиотехнической разведки и радиоэлектронного подавления [1-6], выполненные по модульной технологии VPX [7].

Системы телекоммуникации этих комплексов поддерживают различные стандарты связи и используют множество полос частот СВЧ – диапазона, для выделения которых применяются полоспропускающие фильтры (ППФ). Тенденции их развития направлены на использование всё новых полос частот, что требует дальнейшего увеличения количества СВЧ – фильтров [8].

При разработке сверхширокополосной радиоприемной аппаратуры этих комплексов актуальной задачей является уменьшение габаритных размеров и повышение технологичности с одновременным улучшением технических характеристик. Как правило, приемный тракт сверхширокополосной аппаратуры является многоканальным и построен по супергетеродинной схеме с одним преобразованием частоты. Многие параметры приемного устройства определяются характеристиками полосовых фильтров. Поэтому конструкции фильтров уделяется важное значение. В то же самое время, фильтры остаются одними из наиболее сложно интегрируемых элементов приемного тракта. Это обусловлено высокими требованиями к их электрическим характеристикам в современной аппаратуре. Так, например, фильтры-преселекторы должны обеспечивать подавление зеркального канала приема на величину не менее 60 дБ при ослаблении в полосе пропускания не более 1..3 дБ, а фильтры основной селекции (фильтры промежуточной частоты) должны иметь коэффициент прямоугольности по уровню минус 50 дБ не менее 0,9. Традиционное построение полосовых фильтров СВЧ диапазона имеет микрополосковое исполнение на таких диэлектриках как Al_2O_3 (поликор), либо фольгированных диэлектриках типа Rogers. Для обеспечения хороших электрических характеристик микрополосковые фильтры требуют помещения их в электрогерметичную

микросборку с разделением металлическими перегородками, к тому же для защиты от воздействия внешней окружающей среды (в первую очередь от воздействия влаги, инея и росы) микросборки герметизируют и заполняют осушенным азотом. Такая конструкция приводит к утяжелению аппаратуры и увеличению стоимости из-за низкой технологичности и высокой металлоёмкости. Одним из решений уменьшения габаритов и повышения технологичности СВЧ устройств является использование встроенных в печатную плату полосковых фильтров. Встроенные в многослойную печатную плату элементы имеют лучшие тепловые характеристики. Интегрированные планарные компоненты целесообразно использовать в случае сложности окружающих цепей, например, для преобразователей и устройств обработки сигналов. Преимущество полосковых фильтров над микрополосковыми заключается в том, что электрическое поле не излучается в пространство, а сосредоточено между металлическими электропроводящими слоями. За счет этого обеспечивается большая добротность, а значит снижаются потери и улучшается избирательность. Т.к. в полосковых фильтрах отсутствует связь по «воздуху» между входом и выходом, для обеспечения высокой избирательности возможно построение фильтров большого порядка (более 10-12-го порядка) с недостижимыми электрическими характеристиками для микрополосковых фильтров.

Однако методики проектирования и моделирования таких фильтров не обеспечивают в ряде случаев требуемой точности и трудоёмкости. Цель работы – моделирование характеристик ППФ СВЧ диапазона и разработка методики проектирования таких фильтров.

2. Выбор материалов для полосковых фильтров

При проектировании полосковых фильтров необходимо внимательно отнестись к выбору диэлектрического материала, т.к. от свойств диэлектрического материала будут зависеть основные характеристики фильтра. Первое требование к диэлектрическому материалу - это возможность сборки в многослойную конструкцию и наличие расчетных толщин в номенклатуре поставляемого материала, а также минимальное отклонение толщины от номинальной при производстве и стабильность геометрических размеров (особенно по оси Z) при механических (dimension stability) и температурных (coefficient of thermal expansion) воздействиях при эксплуатации. Вторым параметром, на который необходимо обратить пристальное внимание - это стабильность относительной диэлектрической постоянной ϵ_0 материала при изменении температуры (thermal coefficient of ϵ_0) и частоты. И наконец, третьим значимым параметром при выборе материала для фильтров, является значение тангенса угла диэлектрических потерь $\tan\delta$. Другие параметры, такие как влагопоглощение (moisture absorption), коэффициент теплопроводности (thermal conductivity) и др. носят второстепенный характер.

Из всех представленных на рынке диэлектрических материалов СВЧ для многослойных печатных плат, наиболее полно удовлетворяет требованиям для построения высококачественных полосковых фильтров СВЧ диапазона материал фирмы Rogers серии RO3000. В данную серию входят материалы с различной диэлектрической постоянной и работающих на частотах до 40 ГГц. Основные характеристики материалов приведены в таблице 1.

Особенно хотелось бы выделить материал RO3003 из-за его высокой стабильности. Для обеспечения геометрической точности рисунка топологии фильтра, толщину проводящего медного слоя (фольги) необходимо выбирать из двух значений: 17 мкм ($\frac{1}{2}$ oz.) либо 9 мкм ($\frac{1}{4}$ oz.). Для уменьшения потерь из-за шероховатости поверхности (актуально на частотах более 10 ГГц) предпочтение (указывается при заказе материала) надо отдавать фольге полученной роликотным методом (rolled copper foil). При проектировании необходимо минимизировать потери энергии в ПТФ.

Таблица 1. Основные характеристики материалов.

Наименование материала	Относительная диэлектрическая постоянная ϵ_0	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$	Температурный коэффициент изменения ϵ_0 , ppm/oC
RO3003	3,00	0,0010	-3
RO3035	3,60	0,0015	-45
RO3006	6,50	0,0020	-262
RO3010	11,20	0,0022	-395

3. Потери энергии в полосно-пропускающих фильтрах

Важнейшими параметрами АЧХ полосно-пропускающего фильтра являются: центральная частота $f_0 = \sqrt{f_1 * f_2}$; ширина полосы пропускания $\Delta f = f_2 - f_1$; уровень неравномерности ослабления в полосе пропускания L_p ; уровень ослабления за пределами полосы пропускания L_z частотная избирательность, которая определяется крутизной фронтов АЧХ; коэффициент отражения в полосе пропускания S_{11} ; а для реального фильтра на диссипативных элементах также уровень вносимых потерь в полосе пропускания.

Минимальные вносимые потери достигаются на центральной частоте полосы пропускания f_0 . Потери L_A [дБ], вносимые полосно-пропускающим фильтром на центральной частоте f_0 , определяются формулой [9,10]:

$$L_A(f_0) = \frac{10}{\ln(10)} \frac{f_0 \sum_{i=1}^N g_i}{\Delta f Q_0} \cong 4,343 \frac{f_0 \sum_{i=1}^N g_i}{\Delta f Q_0}, \quad (1)$$

где N – порядок фильтра, g_i – нормированные параметры низкочастотного прототипа, Δf – ширина полосы пропускания, Q_0 – собственная добротность резонаторов.

Вносимые потери в полосе пропускания Δf можно оценить, используя приближенную формулу из [11]:

$$L_A \cong \frac{\tau_i}{\tau_0} L_A(f_0), \quad (2)$$

где τ_i и τ_0 – групповая задержка на частотах $f_i \in [f_1; f_2]$ и $f_0 = \sqrt{f_1 * f_2}$, соответственно; f_1 и f_2 – нижняя и верхняя граничные частоты полосы пропускания.

Согласно (1) и (2) потери (L_{A_i}), вносимые фильтром в полосе пропускания, зависят от относительной ширины полосы пропускания ($\Delta f / f_0$), собственной добротности резонаторов (Q_0) и порядка фильтра (количества используемых резонаторов – N).

Для создания фильтров с низкими вносимыми потерями необходимы резонаторы с высокой собственной добротностью.

Собственная добротность резонатора учитывает энергию, рассеянную в самом резонаторе на резонансной частоте и определяется как отношение энергии, запасенной в резонаторе, к мощности потерь за период колебания [9]:

$$Q_0 = \frac{w_0 W_n}{P_p}, \quad (3)$$

где W_n – реактивная энергия, накопленная в системе в режиме установившихся колебаний; $P_{пов}$ – мощность, рассеиваемая в резонансной системе.

Собственная добротность определяется электродинамической структурой резонатора, т.е. распределением электрического и магнитного полей в резонаторе.

Потери в реальных контурах на элементах с сосредоточенными параметрами обусловлены добротностью реальных индуктивных и емкостных элементов, а также потерями в проводниках и в диэлектрике соединительных отрезков планарных линий передачи.

Потери в планарной линии передачи определяются коэффициентом затухания электромагнитной волны [12]:

$$\alpha = \frac{R_1}{2Z_0} + \frac{G_1 Z_0}{2}, \quad (4)$$

где R_1 – погонное сопротивление проводников линии, G_1 – погонная проводимость диэлектрической среды, Z_0 – волновое сопротивление.

Потери в проводниках рассчитываются по формуле:

$$\alpha_c = 8,868 \frac{R_1 + R_2}{2Z_0}, \quad (5)$$

где R_1 и R_2 – соответственно погонные сопротивления полоскового проводника и заземленного экрана (рисунок 3.2). Они, в свою очередь, определяются поверхностным сопротивлением материала проводников $R_{пов}$ и геометрией микрополосковой линии [12]:

$$R_{1,2} = \frac{R_{пов\ 1,2}}{W}. \quad (6)$$

Если толщина металла превышает глубину проникновения электромагнитного поля в проводник, т.е. глубину скин-слоя на данной частоте ($\delta_{ск} = \sqrt{2/\omega\mu_0\sigma}$), то поверхностное сопротивление находится как [9-12]:

$$R_{пов} = \frac{1}{\delta_{ск}\sigma} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}, \quad (7)$$

где σ – удельная электропроводность материала.

Потери в диэлектрике определяются тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и могут быть рассчитаны по формуле:

$$\alpha_d = 27,3 \frac{\varepsilon_r(\varepsilon_{эф}-1)}{\sqrt{\varepsilon_{эф}(\varepsilon_r-1)}\lambda_0} \text{tg}\delta, \quad (8)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки, $\varepsilon_{эф}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость, λ_0 – длина волны в свободном пространстве.

4. Моделирование полосковых фильтров

Для расчета и исследования ППФ полоскового типа использовались методы теории электрических цепей и численные методы электродинамического моделирования. Было предложено использовать программы CST Studio Suite фирмы Dassault Systemes и Microwave Office фирмы National Instruments.

Программа CST STUDIO SUITE позволяет проводить 3D моделирование, разработку и оптимизацию конструкций электронных и телекоммуникационных устройств, работающих в широком диапазоне частот с высокой точностью и скоростью. Она имеет удобный интуитивный пользовательский интерфейс.

С помощью встроенного макроязыка VBA она позволяет автоматизировать подготовку и решение различного вида задач. Она является идеальным продуктом для расчетов широкополосных устройств, при которых используется периодические граничные условия. Она имеет периодический вычислитель мод в граничных портах. Для описания направления излучения вместо фазового сдвига может быть использован геометрический угол сканирования, что повышает точность расчета активных фазированных антенных решёток.

Использовалась следующая процедура электродинамического моделирования. На первом этапе в пакете CST Studio выполнялся полноволновой анализ электромагнитного поля в планарной структуре, представляющей собой печатную плату со встроенной полосковой линией. На выходе была получена частотно-зависимая матрица S-параметров структуры, рассчитанная численным методом.

На втором этапе рассчитанная матрица рассеяния структуры была импортирована в пакет Micro Wave Office. При этом к портам исследуемой структуры были подключены четырехполосники с модельным описанием и экспериментальными частотными зависимостями S-параметрами полосковых линий.

На третьем этапе в том же пакете методами схемотехнического моделирования выполнялся расчет результирующей матрицы рассеяния контура, в процессе которого учитывались как результаты электродинамического анализа частотных характеристик, разработанной печатной платы, так и параметры полосковой линии.

Расчет топологии полоскового фильтра носил итерационный характер. Первоначально задавались граничные значения частот пропускания и заграждения, задается минимальное значение затухания в полосе заграждения. Используя встроенные в программы электромагнитного моделирования утилиты синтеза электрических фильтров определяли вид фильтра (Чебышевский, эллиптический и др.) и количество каскадов фильтра (порядок) для обеспечения заданных характеристик. Далее переходили к подбору материалов и структуры полоскового фильтра, возможного для реализации. При этом ограничивались номенклатурой толщин выбранного диэлектрического материала. При подборе структуры учитывалась точность обеспечения ширины проводников и зазоров, а также влияние на характеристики фильтра изменения ширины в производстве. Так, при изготовлении по 5-у классу обеспечивается точность ширины проводника/зазора 0,1/0,1 мм.

5. Экспериментальное исследование полосковых фильтров

В полосковом исполнении могут быть реализованы фильтры различных типов: фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры высоких частот (ФВЧ), полосно-пропускающие фильтры (ППФ) и полосно-заграждающие фильтры (ПЗФ).

Для исследования полосковых фильтров и проверки методики их расчета был изготовлен макет (рисунок 1) печатной платы с 17 фильтрами различного типа (ФНЧ, ФВЧ, ППФ) и разной топологии в широком диапазоне частот.

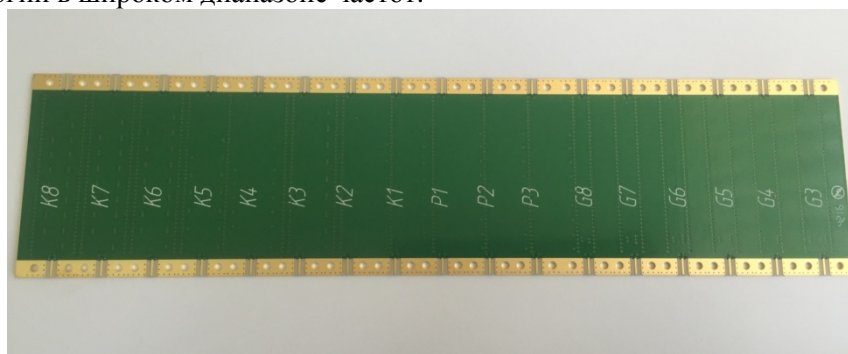


Рисунок 1. Макет многослойной печатной платы со встроенными полосковыми фильтрами.

Структура макета многослойной печатной платы со встроенными полосковыми фильтрами представлена в таблице 2.

Таблица 2. Макет многослойной печатной платы со встроенными полосковыми фильтрами.

	№ слоя	Наименование слоя	Материал	Толщина, мм
	1	Top (GND)	медь	0,018
			RO3003	0,254
	2	Signal	медь	0,018
			RO3003	0,127
	3	Bottom (GND)	медь	0,018

На рисунке 2 приведена топология полосового фильтра 7-го порядка макетной платы с габаритными размерами (ДхШ): 34,55 x 10,0 x 0,435 мм.

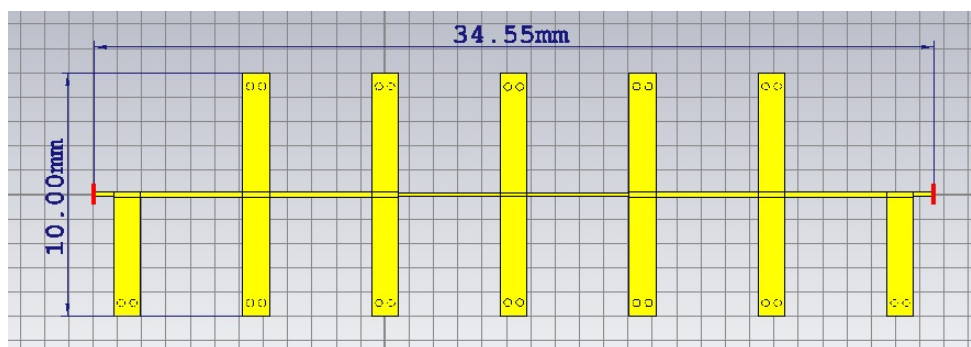


Рисунок 2. Топология и габаритные размеры полосового фильтра в программе электромагнитного моделирования.

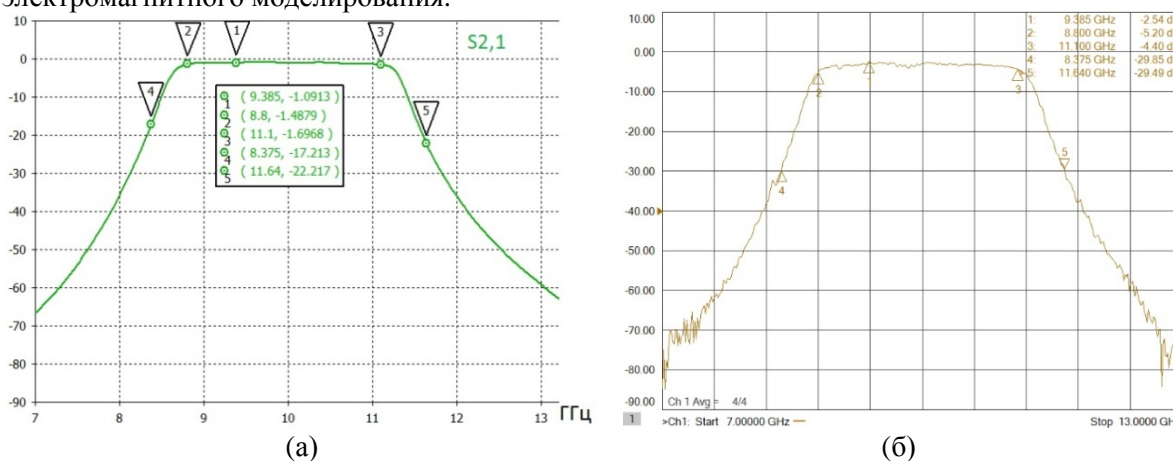


Рисунок 3. Графики коэффициента передачи S₂₁ полосового фильтра для расчетного по модели (а) и экспериментального образца (б).

Сравним расчетные и экспериментальные характеристики (рисунок 3) семизвенного полосового фильтра приведенного на рисунке 2. Проимоделированные частотные характеристики фильтра имеют следующие характеристики: центральная частота $f_0 = 9,95$ ГГц, затухание в полосе пропускания $L_0 = 1$ дБ, ширина полосы пропускания по уровню минус 2 дБ $BW(2 \text{ дБ}) = 2,6$ ГГц, коэффициент прямоугольности по относительным уровням затухания 2 и 60 дБ $K2/60 \approx 2,2$. Из экспериментального графика коэффициента передачи S₂₁ можно сделать вывод, что макетный фильтр очень близок по характеристикам к расчетному, так частотное смещение составляет не более 50 МГц или в относительных единицах не более 0,5 % и обусловлено точностью соблюдения геометрии топологии и толщины диэлектрика при производстве печатной платы, а также отличием реальной диэлектрической постоянной материала от расчетной. В какой-то степени частотный сдвиг можно учесть путем задания уточненных параметров модели после эксперимента. Дополнительное ослабление в 1,5 дБ обусловлено СВЧ потерями в разъемах, переходных отверстиях и подводящих микрополосковых линиях макетной платы.

Для исследования стабильности характеристик фильтров при изменении температуры окружающей среды макетная плата была помещена в тепловую камеру. Сравнительные характеристики коэффициента передачи S₂₁ при изменении температуры от 25 °С до минус 60 °С и с 25 °С до 85 °С приведены на рисунке 4, а и 4, б соответственно.

Экспериментальные данные показали, что при изменении температуры в диапазоне от минус 60 °С до 85 °С частотный сдвиг составляет 59 МГц или 0,4 МГц/ °С на частоте 11 ГГц. Такое температурное смещение частоты сравнимо с температурным смещением частоты фильтров на Al_2O_3 (поликоре), которое составляет 0,52 МГц/ °С на частоте 11 ГГц/ °С.

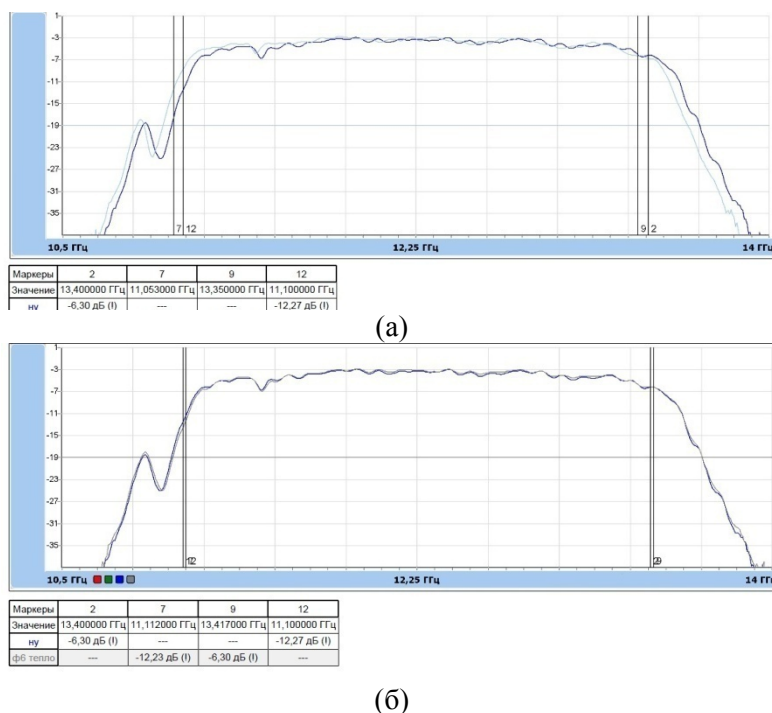


Рисунок 4. Сравнительные графики коэффициента передачи S_{21} полоскового фильтра при температуре минус $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и при температуре $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б).

6. Заключение

Предложен новый подход к проектированию ППФ на полосковых линиях с высокой избирательностью.

Программный продукт CST был интегрирован в имеющийся на предприятии маршрут проектирования СВЧ устройств на основе известных EDA и CAD систем и позволил повысить точность численного моделирования фильтров и преобразователей гигагерцового диапазона (до 11 ГГц), сократить время анализа электромагнитной совместимости и целостности сигналов в печатных платах.

Результаты электродинамического моделирования и экспериментальные данные подтверждают достоверность теоретических расчётов и предложенных подходов к проектированию.

Установлено, что в целях миниатюризации и повышения технологичности радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона частот возможна замена микрополосковых фильтров, выполненных на Al_2O_3 (поликор), на встроенные в многослойную печатную плату полосковые фильтры.

Рассмотрены результаты расчетов и экспериментальных исследований характеристик сверхширокополосных полосковых СВЧ фильтров, выполненных на многослойной печатной плате, показано влияние температуры на характеристики фильтров. Даны рекомендации по расчету, выбору материалов и структуре многослойной печатной платы.

7. Литература

- [1] Шерстнёв, Д.В. Малогабаритный модульный комплекс РТР и РЭП индивидуальной защиты летательных аппаратов / Д.В. Шерстнёв, В.А. Маклашов, Ю.В. Мазуров, В.К. Тезейкин // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах Российской Федерации. – 2017. - №1. – С. 172-173.
- [2] Добыкин, В.Д. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В.Д. Добыкин, А.И. Куприянов, В.Г. Пономарёв, Л.Н. Шустов. – М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с.

- [3] Цветнов, В. В. Радиоэлектронная борьба. Радиоразведка и радиопротиводействие / В.В. Цветнов, В.П. Демин, А.И. Куприянов. – Москва: МАИ, 1998. – Т. 2. – 248 с.
- [4] Куприянов А.И. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2007. – С. 59-64.
- [5] Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств / Л.С. Гуткин // Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 36-37.
- [6] Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2002. – 251 с.
- [7] Маклашов В.А. Модульная технология VPX в технике РЭБ / В.А. Маклашов // Радиотехника. – 2016. – № 1. – С. 28-31.
- [8] Ingels, M. A5 mm2 40 nm LP CMOS 0.1-to-3 GHz multistandard transceiver / M. Ingels et al. // Proc. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., San Francisco, CA, USA, 2010. – С. 458-459.
- [9] Баскакова А.Э. Перестраиваемые фильтры СВЧ на элементах с сосредоточенными параметрами: канд. дисс. / А.Э. Баскакова. – СПб, 2016. – 116 с.
- [10] Cohn, S.B. Dissipation loss in multiple-coupled-resonator filters / S.B. Cohn // Proc. IRE. – 1959. - Vol. 47(8). – С. 1342-1348.
- [11] Crawford, J. Accurately predict finite Q effects in bandpass filters / J. Crawford // Applications in Filter Handbook, 1991. – P. 4-6.
- [12] Вендик, И.Б. Микроэлектроника СВЧ. Линии передачи и линейные многополюсники СВЧ: учеб. пособие. для вузов / И.Б. Вендик, Д.В. Холодняк. – Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001. – 64 с.

Simulation of ultrawideband embedded multilayer RF filters embedded in a printed circuit board

V.A. Maklashov¹, M.N. Piganov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. Mathematical simulation is carried out of ultrawideband embedded multilayer RF filters, made on the basis of a multilayer printed circuit board. Fulfilled calculations of key parameters of filters. Are presented the results of experimental studies. Are brought the calculated and experimental data are compared. The effect of temperature on the characteristics of the filters is established. Are shown the advantages of strip filters are compared with microstrip filters. Recommendations are given on the calculation of parameters, the choice of materials and the structure of a multilayer printed circuit board.

Keywords: simulation, filter, printed circuit board, calculations, parameter, experimental, comparison, temperature.