

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет
Кафедра квантовой радиофизики и электроники

Направление «Радиофизика»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**РАЗРАБОТКА ПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТЕХНОЛОГИИ LTCC**

«К защите допущен»:

Зав. кафедрой квантовой радиофизики
и электроники,
профессор, д.ф.—м.н.

_____ Бельков С.А.

Научный руководитель,
профессор, д.т.н.

_____ Оболенский С.В.

Научный консультант,
ведущий инженер

_____ Зверев В.Н.

Рецензент,
заведующий кафедрой радиотехники,
к.т.н.

_____ Фитасов Е.С.

Консультант по технике безопасности

_____ Курин В.В.

Студент 2-го курса магистратуры

_____ Листратов А.И.

Нижний Новгород
2017 год

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	3
2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	4
2.1. Описание фильтров.....	4
2.2. История печатных плат.....	8
2.3. Микрополосковая линия.....	11
2.4. Многослойные полосковые фильтры. LTCC технология....	15
2.5. Влияние процессов производства.....	18
3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	20
3.1. Полосно-пропускающий фильтр.....	20
3.2. Проектирование фильтра.....	22
3.3. Электромагнитное моделирование.....	25
3.4. Метод моментов Галеркина.....	26
4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	29
4.1. Схема передающего устройства и модель фильтра на сосредоточенных элементах.....	29
4.2. Создание модели многослойного полосового фильтра.....	31
4.3. Подстройка модели многослойного полосового фильтра....	36
4.4. Учёт производственной погрешности.....	44
4.5. Сравнение модели фильтра с аналогами.....	45
5. ВЫВОД.....	47
6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	48
7. ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	49

1. ВВЕДЕНИЕ

Передающее устройство – электронное устройство для формирования радиочастотного сигнала, подлежащего излучению.

Передачик обладает способностью самостоятельно генерировать переменный ток радиочастоты, который с помощью фидера подводится к передающей антенне, которая, в свою очередь излучает электромагнитные волны.

Передачики, помимо их использования в радиовещании, являются необходимой составной частью многих электронных устройств, которые обмениваются информацией друг с другом, например, мобильные телефоны, беспроводные компьютерные сети, Bluetooth-совместимые устройства, радиостанции на самолетах, кораблях и космических радиолокационных установках и пр. Передачик очень часто используется вместе с приёмником и питающим устройством.

В данной работе рассматривается разработка передающего устройства, и в частности его детали – полосно-пропускающего фильтра, выполненного по технологии LTCC. Выбор технологии LTCC обусловлен тем, что разрабатываемое передающее устройство будет использоваться в военной технике, и для него необходима компактность и надёжность, и это позволяет технология LTCC.

Процесс создания новой техники всегда связан с созданием новых приборов и устройств. Для современной техники необходимо использование миниатюрных компонентов, таких как фильтры и пр.

СВЧ – фильтр можно сделать несколькими способами: фильтр на сосредоточенных элементах, однослойный микрополосковый фильтр и многослойный полосковый фильтр. Рассмотрим подробнее плюсы и минусы каждого из них:

Плюсы фильтров на сосредоточенных элементах это: возможность быстро рассчитать необходимую схему с помощью простейших формул и

малое время расчёта фильтра в системах автоматического проектирования и простая сборка. К минусам можно отнести необходимость пользоваться только имеющимися в наличии компонентами: конденсаторами, катушками индуктивности, резисторами. Так же размеры фильтров, особенно высокочастотных, получаются неоправданно большими.

У однослойных микрополосковых фильтров время расчёта в САПР больше, чем у фильтров на сосредоточенных элементах, но так же не слишком велико. Размеры меньше чем у фильтров на сосредоточенных элементах, но не используется преимущества многослойности, всё на одном слое. Такой фильтр сделать сложнее, требуется специальное оборудование.

У многослойного полоскового фильтра размеры можно уменьшать с увеличением слоёв, в итоге можно получить фильтр крайне малых размеров. Готовый фильтр – единый элемент, влаго-, термостойкий, устойчив к внешним воздействиям. Из недостатков выделим: очень долгое время расчёта, для изготовления необходимо дорогостоящее оборудование.

В дальнейшей работе будем рассматривать только фильтры на сосредоточенных элементах и многослойные полосковые фильтры.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Описание фильтров

Основное назначение фильтра состоит в том, чтобы исключить прохождение сигналов определенного диапазона частот и в то же время обеспечить передачу сигналов другого диапазона частот. Фильтры делятся на активные и пассивные. Активные фильтры представляют собой частотно-избирательный усилительный каскад. К пассивным фильтрам относятся RC- и LC-фильтры. Фильтры также можно классифицировать исходя из диапазона частот, которые они пропускают или подавляют. Существуют четыре типа фильтров:

1. Фильтр нижних частот (рис.1), который пропускает все сигналы с частотой ниже некоторого заданного значения и подавляет сигналы более высоких частот. Коэффициент передачи в комплексном виде может быть выражен формулой (1).

$$K(j\omega) = \frac{U_{\text{вых}}(j\omega)}{U_{\text{вх}}(j\omega)} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (1)$$

Отсюда получим формулы для АЧХ (2) и ФЧХ (3).

$$|K| = 1/\sqrt{1 + (\omega RC)^2} \quad (2)$$

$$\varphi = -\arctg(\omega RC) \quad (3)$$

Положив $|K| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 1/\sqrt{1 + (\omega_{\text{ср}} RC)^2}$ получим выражение для частоты среза $\omega_{\text{ср}}$ (4).

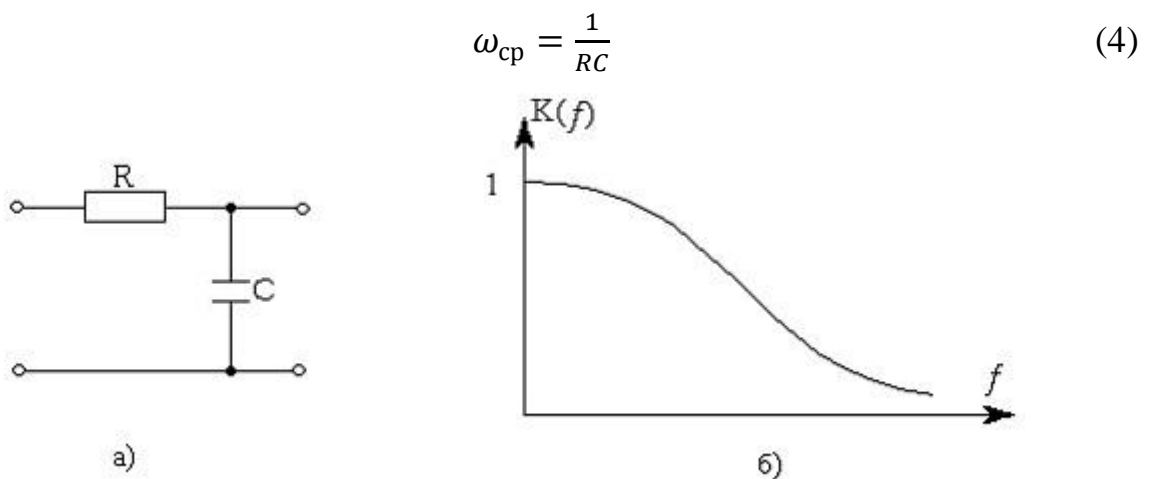


Рис. 1. Простейшая схема и амплитудно-частотная характеристика фильтра нижних частот.

2. Фильтр верхних частот (рис.2), который пропускает все сигналы с частотой выше некоторого заданного значения и подавляет сигналы более низких частот. Частота среза находится по формуле (5).

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5)$$

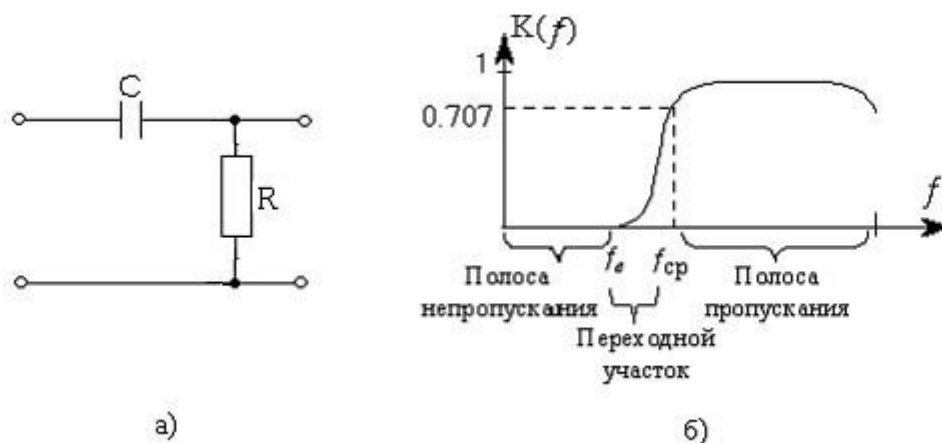


Рис. 2. Простейшая схема и амплитудно-частотная характеристика фильтра верхних частот.

3. Полосно-заграждающий фильтр (режекторный) (рис.3), который используется для подавления сигналов определенного диапазона частот, тогда как сигналы с частотами выше и ниже этого диапазона проходят беспрепятственно. Резонансная частота контура определяется формулой (6).

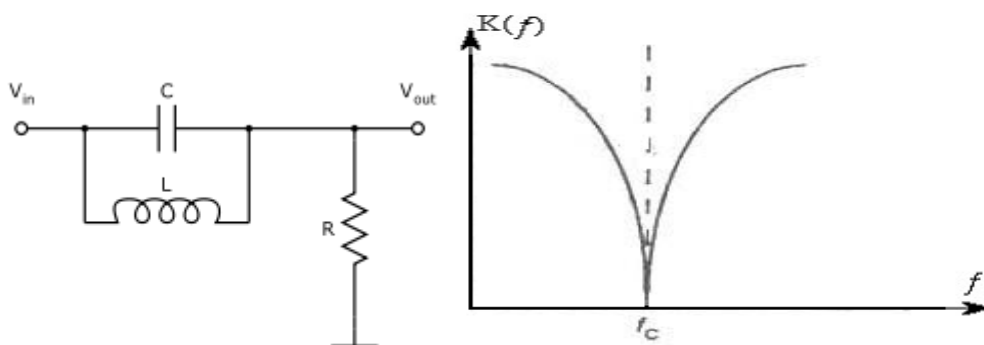


Рис. 3 Полосно-заграждающий фильтр (простейшая схема и амплитудно-частотная характеристика).

4. Полосно-пропускающий фильтр (полосовой) (рис.4), который пропускает сигналы заданной полосы частот и препятствует прохождению

сигналов любых других частот. Резонансная частота определяется формулой (6).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

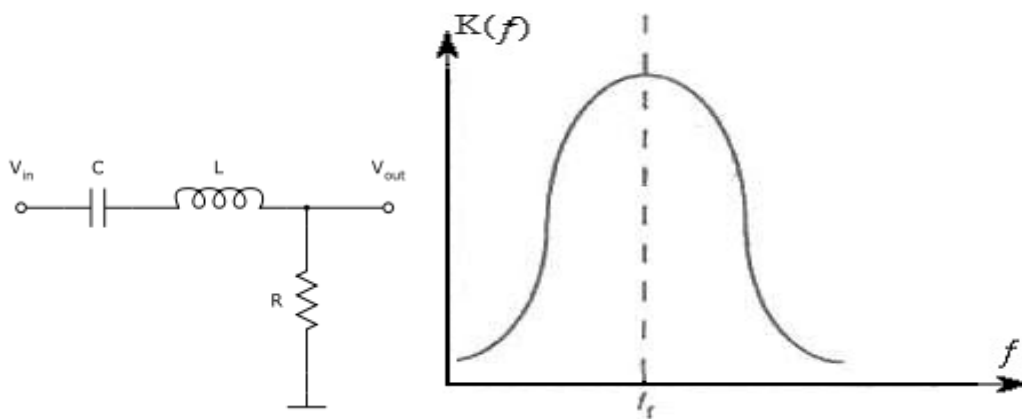


Рис.4. Полосно-пропускающий фильтр (простейшая схема и амплитудно-частотная характеристика).

Достоинства пассивных фильтров:

В качестве фильтрующих цепей, особенно в области низких частот (десятки килогерц и ниже), могут быть использованы различные схемы, образованные только из резисторов и емкостей (RC-цепи). В последнее время в связи с требованиями к микроминиатюризации электронной аппаратуры широко внедряются в практику RC-цепи, образованные не только дискретными R- и C- элементами, но и распределенными. Замена дискретных элементов распределенными приводит в ряде случаев не только к уменьшению габаритных размеров, но и к улучшению электрических характеристик фильтров. К достоинствам следует также отнести простоту конструкции фильтров и надежность.

К недостаткам пассивных фильтров следует отнести их большие масса габариты, особенно это относится к LC-фильтрам. Низкочастотные фильтры обычно никогда не делают на таких базисных элементах, так как здесь

потребовались бы слишком громоздкие и дорогостоящие катушки индуктивности.

2.2 История печатных плат

Современную электронику невозможно представить без печатных плат. Кем и когда были изобретены платы? Какие они бывают? И каково происхождение самого термина «печатная плата»?

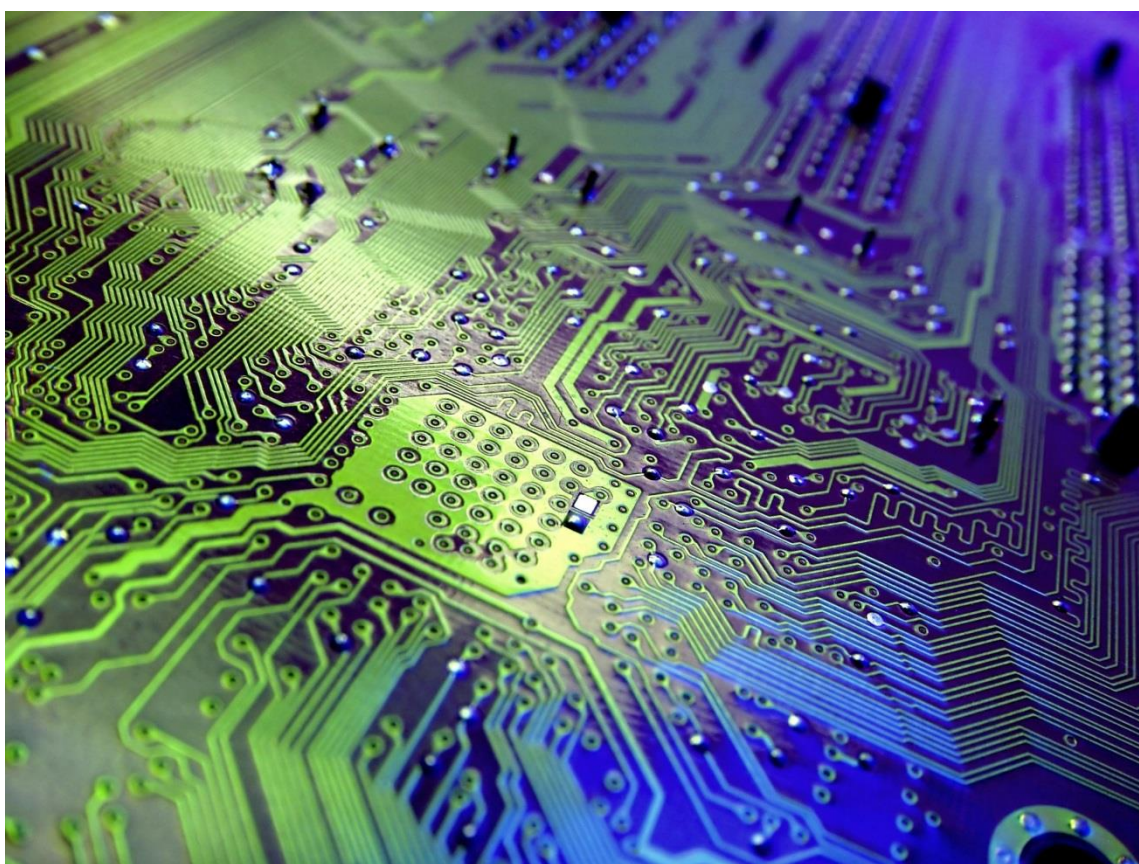


Рис. 5 Вид современной печатной платы

Онлайн словарь электротехнических терминов дает следующее определение термина «печатная плата»: это «изделие, состоящее из одного или двух проводящих рисунков, расположенных на поверхности основания, или из системы проводящих рисунков, расположенных в объеме и на поверхности основания, соединенных между собой в соответствии с

электрической схемой печатного узла, предназначенное для электрического соединения и механического крепления устанавливаемых на нем изделий электронной техники, квантовой электроники и электротехнических изделий». В этом же словаре можно найти перевод и определения иных терминов, относящихся к печатному монтажу. Печатная плата может представлять собой жесткую конструкцию, выполненную из твердого материала, например, стеклотекстолита, или же выполняться на гибком основании.

Сам термин «печатная плата» происходит от английского printing plate — «печатная форма». Это типографский термин, который был в свое время взят на вооружение в связи с тем, что для изготовления плат применялись методы, позаимствованные у типографий. Однако современные платы выполняются иным способом — из фольгированного материала, который подвергается травлению с получением нужного проводящего рисунка. При этом плата часто бывает многослойной, т.е. состоящей из нескольких слоев диэлектрика. В многослойных платах отдельные слои электрически соединяются друг с другом через металлизированные отверстия. Топология печатной платы обычно разрабатывается с применением ЭВМ, поскольку это значительно сокращает трудозатраты.

Первые платы были описаны немецким инженером Альбертом Хансоном, которые представляли собой плоские проводники, нанесенные на изолирующее основание. Далее за дело взялся Томас Эдисон, который использовал для нанесения проводников на бумагу различные химические методы. В итоге уже в 30-е годы XX века печатные платы стали весьма похожи на их современные аналоги.



Рис.6 Печатная плата в составе устройства.

Производство плат — довольно сложный технологический процесс. Рассмотрим его на примере обычной двухсторонней платы. Сначала сверлятся отверстия под радиокомпоненты и переходные отверстия. Затем платы (еще без рисунка) подвергаются электрохимическому меднению для металлизации отверстий, что нужно для получения электрического контакта между слоями платы. Далее фотографическим методом (путем экспозиции с последующими «проявлением» изображения) наносится рисунок. После этого производится травление, удаление защитной пленки и промывка плат. Кроме того, на поверхность обычно наносятся покрыватия, улучшающие паяемость платы, а также паяльные маски, исключая растекание припоя по поверхности в местах пайки. Описанная технология позволяет реализовать процесс группового изготовления плат, что очень удобно при промышленных масштабах производства.

Электронные блоки, выполненные методом печатного монтажа, применяются практически во всех отраслях техники. Однако существовали и альтернативные решения задачи о соединении электронных компонентов

между собой, тем более, что у печатных плат существуют свои технологические проблемы, типа бокового подтравливания проводников, миграции металла по поверхности, неэкологичности производства и др. В одном из способов было предложено ткать платы из проводников и диэлектрических нитей на жаккардовом станке с пришиванием радиокомпонентов на манер пуговиц. Как ни странно, единственным существенным недостатком такого способа была проблематичность размещения сверхминиатюрных компонентов с шагом выводов менее 0.25 мм. Однако не исключено, что описанный способ найдет применение в силовой электронике, где компоненты никогда не бывают слишком мелкими.

2.3. Микрополосковая линия

Конструкция микрополосковой линии чрезвычайно проста: металлический проводник (полоска) шириной и толщиной лежит на обеспечивающей прочность и жесткость конструкции подложке толщиной выполненной из однородного диэлектрика с относительной проницаемостью и покрытой с внешней стороны слоем металла (рис.7). Структура поля в линии носит достаточно сложный характер. Теоретический анализ поля в микрополосковой линии усложняется тем, что лишь часть поля концентрируется в заполненном диэлектриком промежутке между полоской и заземленным проводником, а остальная - над и рядом с полоской в воздухе. Поэтому распространяющаяся в линии мода не чистая ТЕМ, а квази-ТЕМ. С помощью термина "квази-ТЕМ" подчеркивается, что различие в структуре полей, обусловленное присутствием в линии слоистой среды воздух диэлектрик двух мод невелико. На низких частотах анализ, выполненный в предположении, что распространяется мода квази-ТЕМ, дает вполне приемлемую точность, однако по мере повышения частоты становятся все более заметными продольные составляющие полей, что сказывается на результатах анализа. В частности, заметно проявляется дисперсия, т. е.

волновое сопротивление линии и эффективная диэлектрическая проницаемость начинают зависеть от частоты.

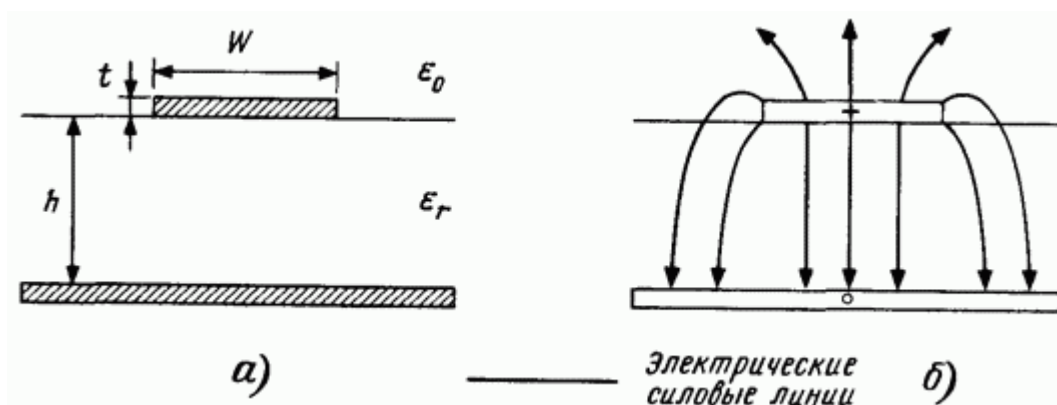


Рис. 7 Конструкция микрополосковой линии и электрические силовые линии поля

При расчете микрополосковой линии возникает необходимость определять величину, получившую название эффективной диэлектрической проницаемости/ Эта величина чрезвычайно полезна, так как характеризует соотношение между энергиями, концентрирующимися в воздухе и диэлектрике. Любая линия с модой ТЕМ характеризуется величиной фазовой скорости.

При отсутствии диэлектрического заполнения фазовая скорость в линии совпадает со скоростью света в свободном пространстве.

Микрополосковая линия с относительно широкой полоской близка по своим свойствам к плоскому конденсатору, в котором практически вся энергия электрического поля концентрируется в диэлектрике под полоской. Поэтому энергия электрического поля распределяется практически поровну между воздухом и диэлектриком.

В литературе приводится множество аналитических выражений для расчета параметров микрополосковых линий. Часть из них получена либо путем обработки результатов экспериментального исследования, либо, что чаще, - результатов расчета на ЭВМ. Без таких аналитических выражений невозможно обойтись при машинном проектировании, когда требуется выполнить большое число расчетов с целью оптимизации конструкции.

Известно, что полосковые фильтры представляют собой систему взаимодействующих резонаторов, каждый из которых, в свою очередь, представляет собой отрезок полосковой или микрополосковой линии (МПЛ). В технике СВЧ часто применяют открытые (неэкранированные) микрополосковые резонаторы. Собственная добротность неэкранированного МПР сравнительно невелика: $Q_0 \approx 200$ (на частоте 1 ГГц) для подложки из материала «Поликор» ($\epsilon=9.8$) толщиной 1 мм, и $Q_0 \approx 400$ у МПР на подложке из материала ТБНС ($\epsilon = 80$) [2]. Можно выделить три основных механизма потерь, которые определяют собственную добротность МПР: омические потери в полосковом проводнике, диэлектрические потери в подложке и потери на излучение. Поскольку применяемые в СВЧ-технике материалы подложек имеют малые диэлектрические потери ($tg\delta < 10^{-4}$), а потери на излучение можно минимизировать, экранируя МПФ, основным механизмом потерь является первый из перечисленных выше. Так как запасаемая резонатором энергия пропорциональна частоте, а поверхностное сопротивление полоскового проводника растет пропорционально квадратному корню из частоты, то у полосковых резонаторов Q_0 растет с частотой пропорционально квадратному корню из нее. Сильное влияние на собственную добротность полосковых резонаторов оказывают неоднородности полоскового проводника, такие как перепады ширины или изгибы. При этом в большинстве случаев они ее уменьшают, и только тогда, когда при введении неоднородности будет уменьшаться физическая длина резонатора, добротность будет возрастать за счет уменьшения потерь на излучение.

Одними из наиболее распространенных частотно-селективных устройств, используемых в технике СВЧ, являются полосно-пропускающие или полосовые фильтры. Селективные свойства таких фильтров определяются в первую очередь коэффициентами крутизны склонов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) вблизи рабочей полосы пропускания (Рис.8). Эти коэффициенты зависят от ширины полосы

пропускания Δf_3 , измеренной по уровню -3 дБ, и ширины полос частот Δf_i и Δf_h , измеренных от частоты f_0 до низкочастотного и высокочастотного склонов на уровне f_{stop} . Кроме того, селективность фильтра характеризуется также величиной потерь f_0 в полосе пропускания, уровнем подавления L_{stop} в полосах заграждения и шириной высокочастотной полосы заграждения Δf_{stop}^h , которая ограничивается второй, паразитной, полосой пропускания.

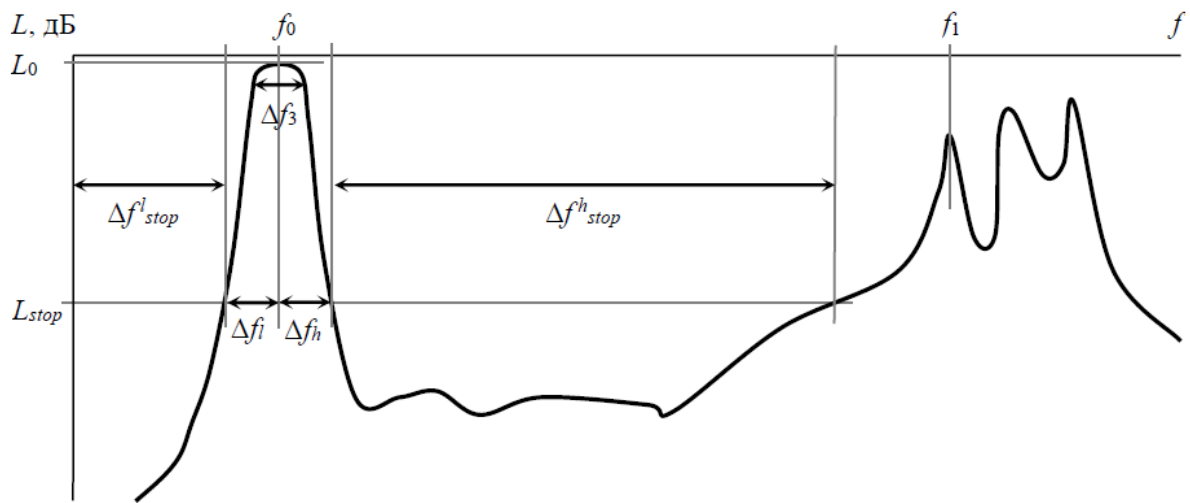


Рис. 8 Основные параметры АЧХ полосового фильтра, определяющие его селективные свойства.

К достоинствам МПФ на регулярных резонаторах следует отнести то, что их характеристики довольно точно определяются на основе расчета одномерных моделей в квазистатическом приближении. Такой подход применяется на частотах вплоть до 20 ГГц. Однако традиционные конструкции фильтров даже на подложках с $\varepsilon = 80$ на частотах ниже 1 ГГц становятся слишком большими. Паразитная полоса пропускания в них отстоит от рабочей, как правило, не более чем на октаву. Максимальная относительная ширина полосы пропускания, которую можно получить для фильтра решетчатого типа, порядка 20%, а на фильтрах со смещением полосковых проводников можно достичь почти 80% , при этом ширина

резонаторов и зазоры между ними становятся предельно малыми, а толщина подложки – довольно большой. При проектировании узкополосных фильтров всегда приходится искать компромисс между потерями в полосе пропускания и селективностью.

2.4 Многослойные полосковые фильтры. LTCC технология.

Основными материалами для производства многослойных печатных плат традиционно являлись органические материалы с низкими значениями диэлектрической проницаемости (FR-4, $\epsilon_r = 3,5 - 4,5$) и керамика с высокими значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon_r = 10 - 12$). Увеличение рабочих частот электронных приборов требовало создания нового материала, который бы, с одной стороны, позволял легко создавать многослойные печатные платы, и, с другой стороны, на высоких частотах имел бы характеристики, схожие с керамикой. Новый материал получил название низкотемпературная совместно обжигаемая керамика (Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC)) (Рис. 9).

Многослойные керамические платы первоначально изготавливались из оксида алюминия Al_2O_3 (High Temperature Cofired Ceramic - HTCC-технология). Данный материал обжигался при высоких температурах ($T \geq 1500^\circ C$), поэтому слои металлизации выполнялись только из тугоплавких металлов: вольфрама и молибдена. Это вносило ряд ограничений в функциональные возможности приборов, в усовершенствование технологии и снижение стоимости производства.

Свое дальнейшее развитие многослойная керамика получила с внедрением технологии LTCC, когда керамику начали смешивать со специальными стеклами. Температура обжига керамики снизилась до $850^\circ C$, что привело к существенному упрощению производственного процесса. В настоящее время к технологии LTCC относят керамику, обжигаемую при температурах ниже $1000^\circ C$.

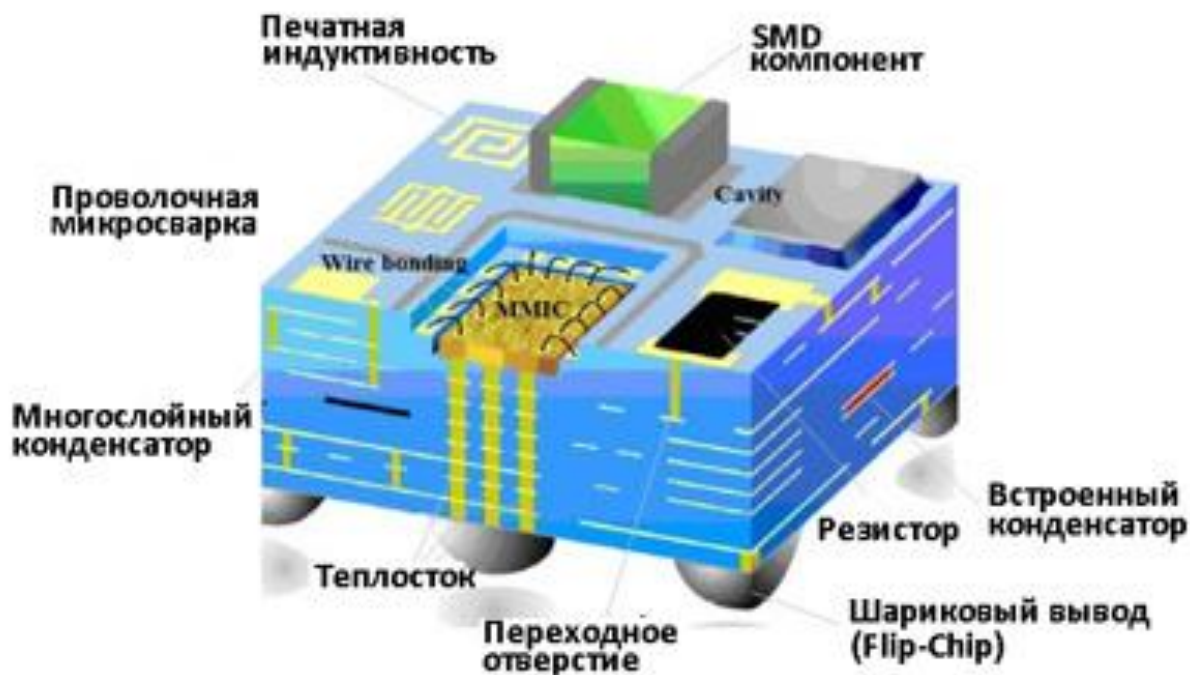


Рис. 9. Структура платы, изготовленной по технологии LTCC.

Низкие потери СВЧ и относительно невысокая стоимость производства являются ключевыми преимуществами LTCC технологии для ВЧ и СВЧ приборов. По стоимости LTCC технология приближается к технологии изготовления печатных плат на основе FR-4, а по своим диэлектрическим характеристикам низкотемпературная керамика сопоставима с алюмооксидной керамикой.

Среди основных преимуществ и особенностей LTCC технологии отметим следующие:

- Очень хорошие электрические характеристики и стабильность до миллиметровых длин волн. В зависимости от используемых материалов диэлектрическая проницаемость низкотемпературной керамики варьируется от 6 до 9, а тангенс угла диэлектрических потерь от 0,001 до 0,006 в гигагерцовом диапазоне. В качестве металлизации используются металлы с низким удельным сопротивлением (Ag, Au, Pt).

- Превосходная механическая стабильность и сохранение линейных размеров. Это преимущество возникает не только из-за малого коэффициента теплового расширения ($5-7 \text{ мкм/мС}$), но и из-за эластичных свойств в широком диапазоне температур.

- Низкий КТР. КТР низкотемпературной керамики близок к КТР основных полупроводниковых материалов электроники (Si, GaAs, InP). Это позволяет монтировать полупроводниковые кристаллы непосредственно на основание платы.

- Хорошая теплопроводность. Теплопроводность LTCC керамики составляет $2-4 \text{ Вт/мК}$, что гораздо выше, чем у печатных плат на основе органических материалов ($0,1-0,5 \text{ Вт/мК}$). Теплопроводность LTCC также может быть улучшена за счёт создания тепловых стоков с помощью металлизации (до 20 Вт/мК).

- Возможность 3D интеграции. Можно легко создавать полости, отверстия, ограничители, встроенные пассивные компоненты.

- Герметичность и возможность высокотемпературной пайки. Плотная структура LTCC керамики не пропускает влагу, поэтому корпуса из керамики могут быть использованы в атмосфере с высокой влажностью без дополнительной защиты. Также LTCC материалы в отличие от органических материалов сохраняют свои свойства во влажной среде (большая часть органических материалов сильно подвержена влиянию влаги).

В дополнение к этому технология LTCC доказала свою надёжность и экономическую эффективность в широком спектре задач СВЧ электроники. Благодаря всем вышеперечисленным особенностям, LTCC технология нашла широкое применение в создании многослойных плат для высокочастотных электронных приборов, корпусов микросхем и выступает в качестве альтернативы многослойным печатным платам из стеклотекстолита и высокотемпературной керамики (рис 10).



Рис. 10. Приёмник Bluetooth из типичного смартфона. Синяя подложка под чипами – это LTCC пластина на которой «нарисованы» дорожки для пайки чипов, а также и сама антенна.

Микросхемы с корпусами на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики успешно применяются в автомобильной, потребительской электронике, телекоммуникациях, спутниковых системах и в военных изделиях. Миллионы устройств уже созданы на основе LTCC технологии и функционируют в настоящее время.

Изначально LTCC технология использовалась для крупносерийного производства СВЧ устройств. Но благодаря своим диэлектрическим и механическим свойствам, а также надёжности и стабильности, низкотемпературная керамика начала активно применяться и для производства различных сенсоров, механических систем (МЭМС-устройств) и трёхмерных интегрированных структур.

2.5. Влияние процессов производства

В основном, заполнение керамикой производится помещением слоя за слоем с фиксированной толщиной каждого слоя. Горизонтальные стенки и резонатор полосковых линий внутри керамики реализуются с помощью

покрытия металлом. Вертикальные стенки реализуются через сетку из близко размещённых отверстий. Если сигнал поддерживает связь между различными слоями, то переходные отверстия применяются также для подключения сигнальных линий. Такие процессы производства будут влиять на эффективность фильтра с нескольких точек зрения.

Во первых, через сетку, реализованные вертикальные стенки фильтра будут влиять на длину резонатора. Расстояние между двумя отверстиями в сетке должен быть выбран как можно меньше, чтобы уменьшить паразитное сопротивление, а также создать эффективное «чистое сопротивление» среды (то есть паразитные индуктивность и ёмкость противодействуют), которое обычно определяется экспериментально. Через сетку положение стенки относительно идеального положения вертикальной стенки должна быть определена, чтобы иметь готовый резонатор, резонирующий на той же частоте, что и идеальный резонатор, в противном случае, фактические значения измерений фильтров будут смещены относительно заложенных конструктивно. Оптимальное расстояние между отверстиями в сетке примерно $S=D/4$.

Во вторых, толщина металлизации золотом обычно варьирует от 0,01 до 0,015 мм. Этот эффект вызывает изменение расстояния ds по вертикали между двумя полосами в резонаторе и, таким образом, сдвиг частоты резонатора. У фильтров, разработанных с меньшим ds этот эффект будет проявляться сильнее, чем у фильтров с большим ds , так как толщина металлизации занимает меньший процент ds . Это может являться одной из причин того, что измеренные значения фильтра смещены от желаемой центральной частоты.

В третьих, заполнение керамикой слой за слоем вызывает изменение диэлектрической проницаемости различных слоёв, т.е. заполнение керамикой не совсем однородно. Относительная диэлектрическая проницаемость может быть от 4,7 до 6,3. Этот эффект вызовет сдвиг частоты и, главным образом, повлияет на все существующие связи в фильтрах. У фильтров с более

крупным Δs этот эффект будет проявляться сильнее, поскольку Δs означает большие вариации изменения диэлектрической проницаемости. Это может быть одной из причин того, что у фильтра второй конструкции сжалась пропускная способность по сравнению с сконструированным.

В фактическом производстве, как правило, в первую очередь изготавливаются и измеряются несколько испытательных образцов. Для уменьшения вышеупомянутых эффектов, условия обработки определяют в соответствии с сравненными измеренным откликом и сконструированным. После того, как условия обработки найдены, массовое производство компонентов может быть налажено с процентом брака менее 5%.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Полосно-пропускающий фильтр.

Полосно-пропускающий фильтр (ППФ) — электронный или любой другой фильтр, эффективно пропускающий частотный спектр сигнала в заданной полосе частот и уменьшающий (подавляющий) частоты сигнала вне этого диапазона частот. Степень подавления каждой частоты зависит от вида фильтра.

Полосовой фильтр – линейная система и может быть представлен в виде последовательности, состоящей из фильтра нижних частот и фильтра верхних частот.

Идеальные полосовые фильтры характеризуются двумя характеристиками:

- нижняя частота среза ω_{C1} ;
- верхняя частота среза ω_{C2} .

В свою очередь, реализация полосового фильтра характеризуется шестью характеристиками:

- нижняя граница частоты пропускания ω_{P1} ;
 - верхняя граница частоты пропускания ω_{P2} ;
 - нижняя граница частоты задержания ω_{S1} ;
 - верхняя граница частоты задержания ω_{S2} ;
- а также
- максимальное подавления в полосе пропускания R_p ;
 - минимальное подавление в полосе пропускания R_s .

Реализация полосно-пропускающего фильтра может быть разнообразной, включая электронные схемы, программные алгоритмы, акустические барьеры, механические системы и т. д. Примером реализации такого фильтра может служить колебательный контур (цепь из последовательно соединенных резистора, конденсатора и индуктивности) (Рис. 11).

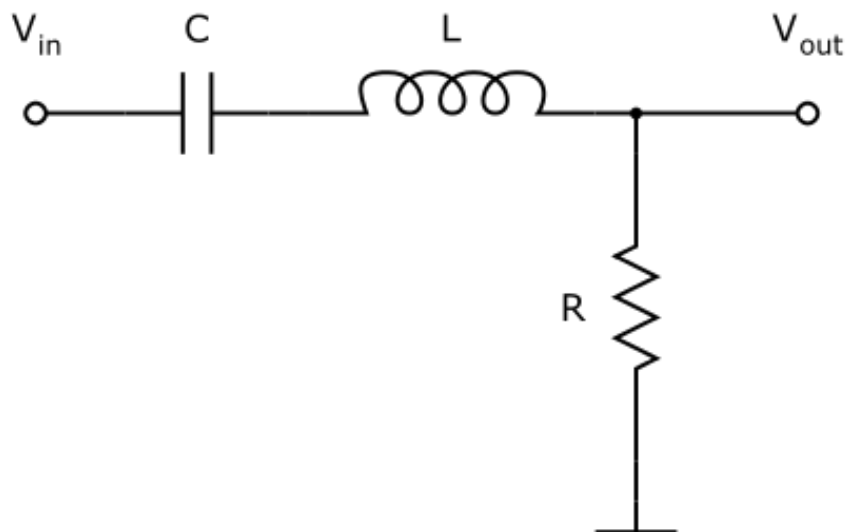


Рис. 11 ППФ, построенный в виде цепочки

Выше частоты среза (в полосе подавления) амплитудно-частотная характеристика ФНЧ 1-ого порядка имеет линейный спад с крутизной 6 дБ на октаву (или 20 дБ на декаду).

Для реализации такого фильтра с помощью технологий LTCC необходимо спроектировать ёмкости и индуктивности, аналогичные ёмкостям и индуктивностям фильтра на сосредоточенных элементах.

Реализация ёмкости и индуктивности представлена на рисунке 12.

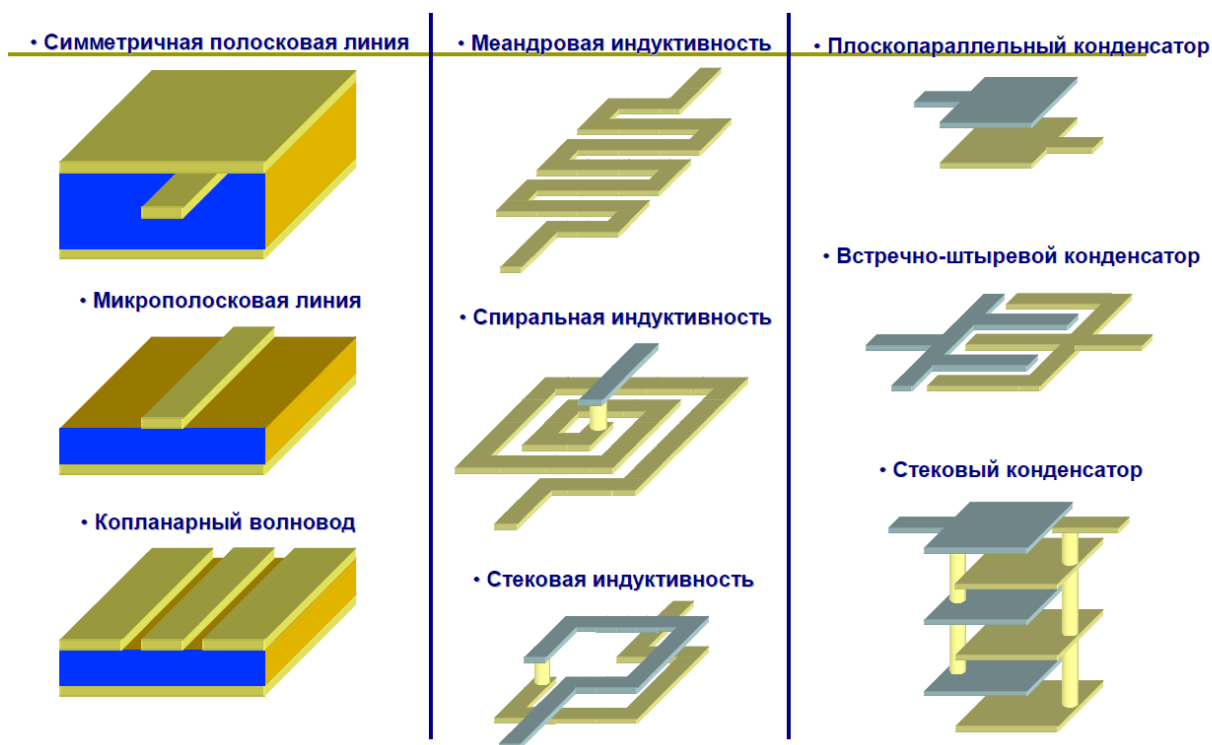


Рис. 12 Элементная база многослойных ИС СВЧ на основе LTCC

3.2. Проектирование фильтра.

Наиболее адаптированным для проектирования полосковых СВЧ-устройств является программный пакет AWR Design Environment. Основным его модулем, использующимся для проектирования СВЧ-устройств и расчета их характеристик является Microwave Office.

Он предназначен для проектирования схем СВЧ-устройств, начиная от сборок различной степени сложности и заканчивая СВЧ-микросхемами.

Модуль позволяет выполнять анализ (моделирование) линейных и нелинейных схемных моделей. Результатом анализа схемных моделей являются графики характеристик СВЧ-устройства. Кроме того, возможна оптимизация характеристик СВЧ-устройства в режиме реального времени, позволяющая контролировать изменение характеристик СВЧ-устройства при изменении параметров схемной модели.

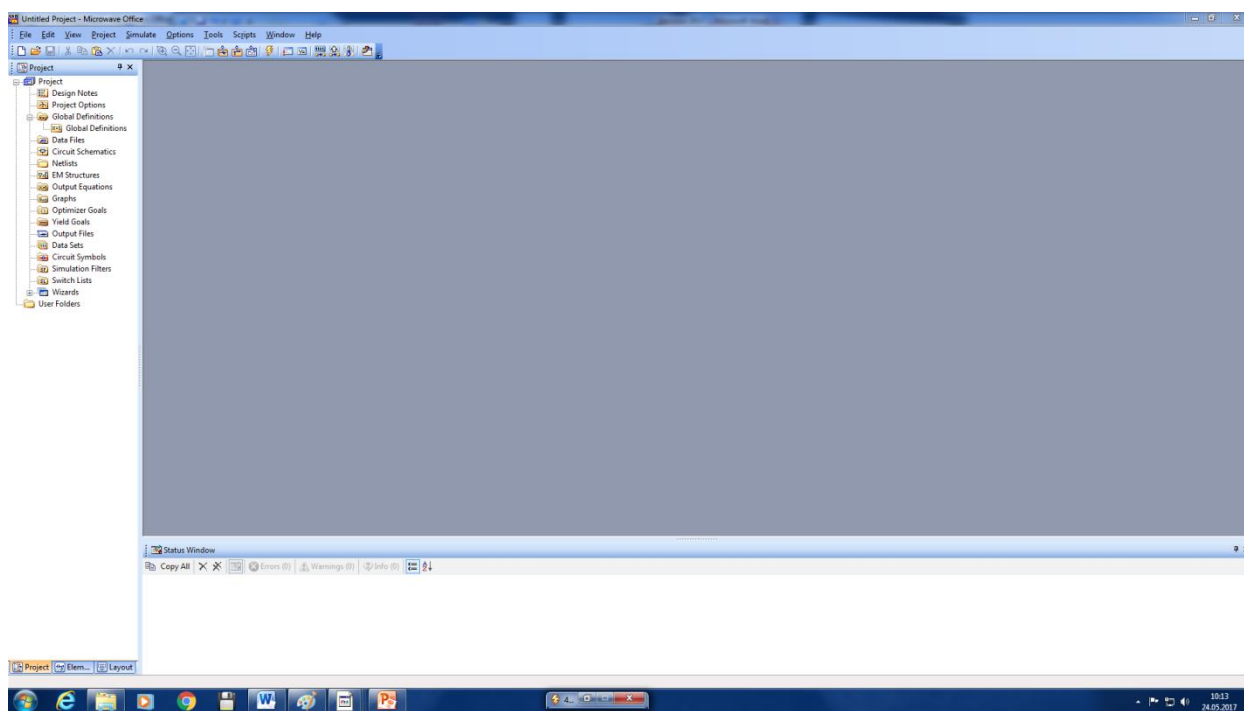


Рис.13. Вид программы Microwave Office.

Модуль Microwave Office также позволяет выполнять анализ электромагнитной модели. Результатом анализа схемной или электромагнитной модели является топология устройства на печатной плате, которую можно экспортировать в программы, работающие с векторной графикой. Кроме модуля Microwave Office в программный пакет входит модуль проектирования систем связи Visual System Simulator (VSS), модуль проектирования аналоговых и радиочастотных микросхем Analog Office, электромагнитные симуляторы AXIEM и EMSight. В последние версии программного пакета AWR Design Environment добавлен мощный симулятор трехмерных объектов Analyst, использующий в своих расчетах метод

конечных элементов. Кроме того, в программный пакет входят полезные утилиты для выполнения предварительных и специальных расчетов. Возможно подключение дополнительных утилит и симуляторов, выпускаемых как компанией AWR, так и другими разработчиками программного обеспечения.

В работе используется программное моделирование в среде AWR Design Environment. При проектировании СВЧ-устройства предлагается с использованием программы, утилиты или вручную выполнить предварительные расчеты, после чего основной расчет и оптимизация характеристик проектируемого устройства выполняются с использованием схемной модели в модуле Microwave Office из пакета AWR Design Environment. Оптимизация считается выполненной, когда достигнуты заданные характеристики проектируемого устройства. При этом созданной модели соответствует топология печатной платы, геометрические размеры которой наряду с номинальными значениями электронных компонентов являются конечной целью процесса проектирования.

Наряду со схемной моделью при проектировании СВЧ-устройств используется электромагнитная модель (ЭМ-модель). Анализ такой модели далее для краткости называется ЭМ-анализом. ЭМ-анализ при наличии достаточно подробной электромагнитной модели позволяет получить более точные характеристики СВЧ-устройства. Однако для ЭМ-анализа требуется большее время. Для решения ряда задач это время на несколько порядков превышает время моделирования с использованием схемной модели. Однако для простых устройств ЭМ-анализ выполняется относительно быстро, что позволяет сравнить скорость и точность анализа этих моделей.

Основой ЭМ-модели является топологический рисунок на плате. Он может быть разработан самостоятельно, однако в большинстве случаев в качестве рисунка целесообразно использовать готовую топологию, полученную при схемном моделировании. Поэтому при проектировании ряда устройств предлагается использовать топологию, полученную в результате

«грубого» расчета, для более точного ЭМ-анализа. При этом появляется возможность наглядного сравнения схемной и электромагнитной моделей. Следует отметить, что из-за требуемых больших затрат времени задача получения оптимальной топологии при ЭМ-анализе не ставится, что, однако, не отменяет такой задачи на практике.

3.3. Электромагнитное моделирование (EMSight).

Электромагнитное моделирование (ЕМ) использует уравнения Максвелла (7-11) для определения характеристик устройства по его заданной физической геометрии.

$$\nabla D = 4\pi\rho \quad (7)$$

$$\nabla B = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \quad (9)$$

$$\Delta \times H = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t} \quad (10)$$

Так же используются материальные уравнения для учёта диэлектрических свойств среды (11,12).

$$P = \chi_e E \quad (11)$$

$$M = \chi_m H \quad (12)$$

Для выполнения электромагнитного моделирования можно использовать встроенные решающие устройства или решающие устройства

из программных продуктов других производителей, поддерживающих интерфейс “EM Socked” (“Канал электромагнитного моделирования”).

Решающее устройство EMSight использует метод моментов Галеркина представляющий точный и устойчивый алгоритм электродинамического моделирования. Могут анализироваться структуры с неограниченным количеством слоёв и с неограниченным числом портов. Структура анализируется внутри ограниченной многослойной области прямоугольной формы, причем боковые границы области всегда представляются как идеальные проводники, в то время как верхняя и нижняя границы могут иметь потери.. При анализе автоматически создаётся электрическая сетка с различным размером ячеек. В местах, где плотность тока изменяется, создаются ячейки с малыми размерами. Там, где плотность тока не изменяется, устанавливаются ячейки с большими размерами. Пользователь может просмотреть автоматически созданную сетку и, при необходимости, изменить её плотность. Минимальный размер ячеек электрической сетки определяется размером ячеек геометрической сетки, которые задаются установкой параметров Grid_X и Grid_Y в свойствах корпуса. Все топологические формы электромагнитной структуры должны совпадать с геометрической сеткой. Чем меньше размер ячеек сетки, тем точнее выполняется анализ, но тем больше времени требуется для анализа. Поэтому рекомендуется сначала выполнять анализ по возможности с крупными ячейками сетки, затем размер ячеек уменьшить. Хорошая точность анализа обеспечивается при размерах сетки меньше $1/10$ длины волны на верхней частоте диапазона анализа. Кроме того, на размер ячеек электрической сетки влияют опции встраивания сетки.

3.4 Метод моментов Галеркина.

Для анализа полей в системе EMSight используется метод моментов Галеркина, метод моментов - метод нахождения приближенного решения

операторного уравнения в виде линейной комбинации элементов заданной линейно независимой системы.

Пусть $F(x)$ - нелинейный оператор, область определения которого лежит в банаховом пространстве X , а область значений - в банаховом пространстве Y . Для решения уравнения

$$F(x) = h \quad (13)$$

методом Галеркина выбираются линейно независимая система элементов из X (координатная система) $\{\varphi_i\}_1^\infty$ и линейно независимая система функционалов $\{\psi_i\}_1^\infty$ из пространства Y^* , сопряженного к Y (проекционная система). Приближенное решение уравнения (13) разыскивается в виде

$$x_n = \sum_{i=1}^n c_i \varphi_i \quad (14)$$

Числовые коэффициенты определяются из системы уравнений c_1, \dots, c_n

$$\langle F(\sum_{i=1}^n c_i \varphi_i), \psi_j \rangle = \langle h, \psi_j \rangle, \quad j = 1, \dots, n. \quad (15)$$

В этой общей постановке задачи нельзя гарантировать, что система (15) имеет хотя бы одно решение. В случае если (15) имеет единственное решение при каждом $n=1,2,\dots$, приближенное решение (14) может не сходиться при даже $n \rightarrow \infty$ слабо к точному решению уравнения (13). Тем не менее, метод Галеркина является мощным средством не только для нахождения приближенных решений, но и для доказательства теорем существования решений линейных и нелинейных уравнений, особенно в задачах для уравнений с частными производными.

В ряде случаев задача определения коэффициентов (14) из системы (15) эквивалентна задаче об отыскании минимума некоторого функционала, и метод Галеркина превращается в вариационный (энергетический) метод.

Наиболее важный из таких методов - Рунца метод. В некоторых случаях эффективно применение для исследования системы (15) топологических методов.

Если пространства X и Y гильбертовы, то метод Галеркина иногда называют методом Галеркина - Петрова. Если, кроме того, координатная и проекционная системы совпадают: то принято говорить о методе Бубнова-Галеркина.

Если $X=Y=H$ - гильбертово пространство, а то этот частный случай метода Галеркина называют методом наименьших квадратов.

В линейном случае, когда $F(x) \equiv Ax$, A - линейный, вообще говоря, неограниченный оператор с областью определения $D(A) \subseteq X$ и с областью значений $R(A) \subseteq Y$, а координатная система выбрана в $D(A)$, уравнение (13) принимает вид:

$$Ax = h \quad (16)$$

При этом система (15) представляет собой систему линейных уравнений с неизвестными:

$$\sum_{i=1}^n c_i \langle A\varphi_i, \psi_i \rangle = \langle h, \psi_i \rangle, \quad j = 1, \dots, n. \quad (17)$$

Если в условиях метода наименьших квадратов на $R(A)$ существует и ограничен обратный оператор A^{-1} , $h \in R(A)$, и система $\{A\varphi_i\}_1^\infty$ полна в H , то приближенное решение (14) при сходится к точному решению уравнения (16). Если в условиях метода Галеркина - Петрова оператор асимметричен, положительно определен, $h \in R(A)$, и система $\{\varphi_i\}_1^\infty$ полна в гильбертовом пространстве H_A - пополнении $D(A)$ в метрике, порожденной скалярным произведением $[x, y] = (Ax, y)$, $x, y \in D(A)$, то приближенное решение (14) сходится к точному решению уравнения (4) как в H_A , так и в H .

Если A - самосопряженный положительно определенный оператор в H , а $\{\varphi_i\}_1^\infty$ - полная ортонормированная система его собственных элементов, то

метод Бубнова - Галеркина и метод наименьших квадратов совпадают с Фурье методом.

Метод Галеркина применяется также для приближенного решения задач на собственные значения и собственные элементы.

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

4.1 Схема передающего устройства и модель фильтра на сосредоточенных элементах.

В данной работе спроектирована схема формирователя задающих сигналов. (рис. 14)

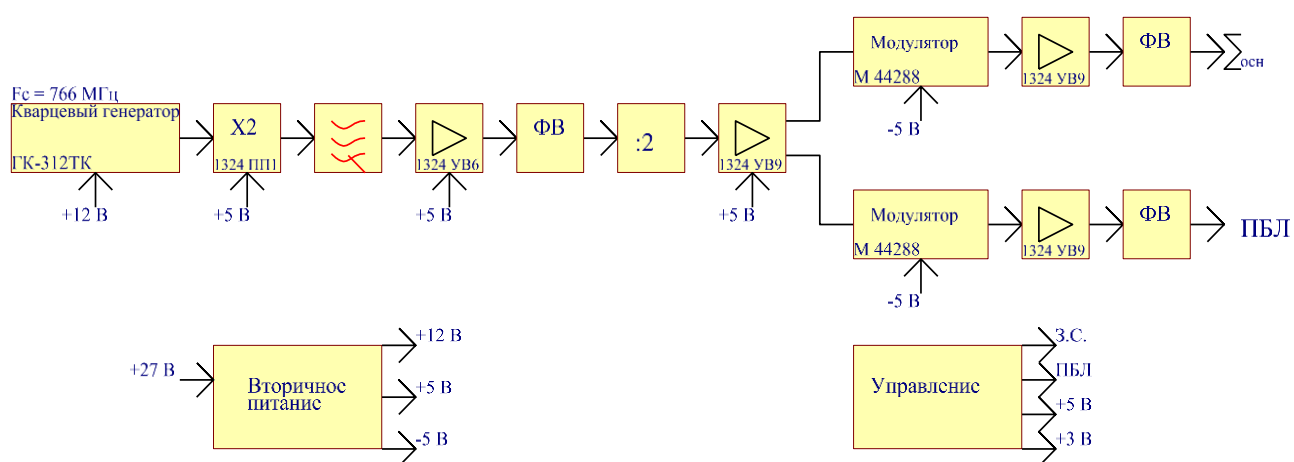


Рис. 14 Структурная схема формирователя задающих сигналов.

В этой схеме присутствует полосно-пропускающий фильтр на частоте 766 МГц, спроектированный по микрополосковой технологии. Реализацию этого фильтра рассмотрим ниже.

Сначала был спроектирован фильтр на сосредоточенных элементах (рис.15). Данный фильтр имеет неплохую амплитудно-частотную характеристику (рис. 16), но можно представить его размеры, если, судя по схеме, необходимо использовать 5 конденсаторов и 5 катушек

индуктивности. Надёжность фильтра так же стоит под вопросом, т.к. для его реализации необходимо использовать 10 независимых элементов, припаивать друг к другу, учитывать условия эксплуатации каждого из них.

Номиналы использованных в схеме элементов: $C1=4$ пФ, $C2=4.127$ пФ, $C3=11$ пФ, $L1=55$ нГн, $L2=1$ нГн, $L3=1.756$ нГн.

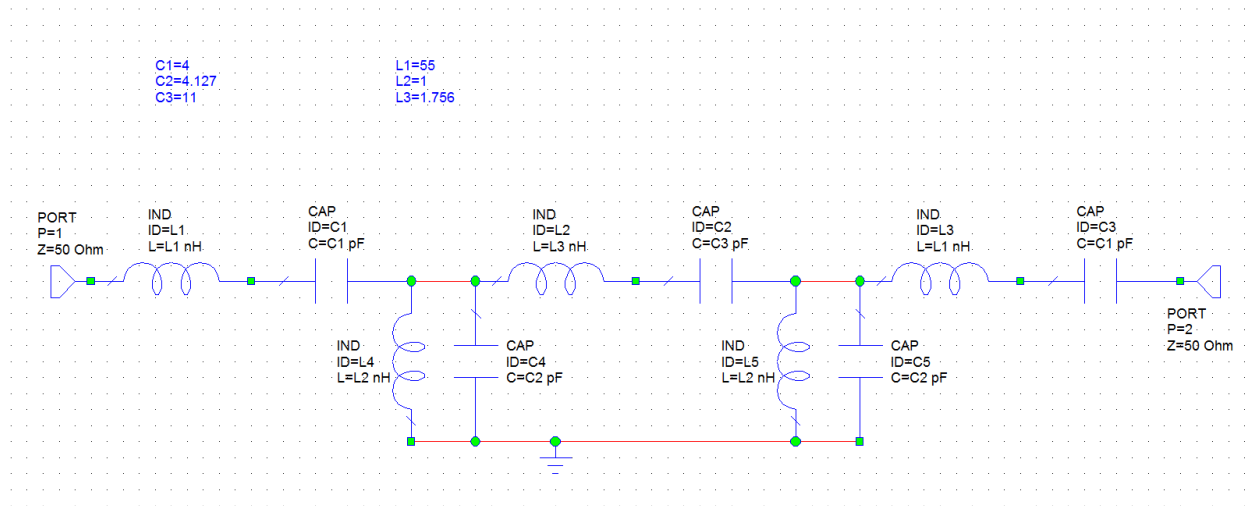


Рис. 15 Схема фильтра

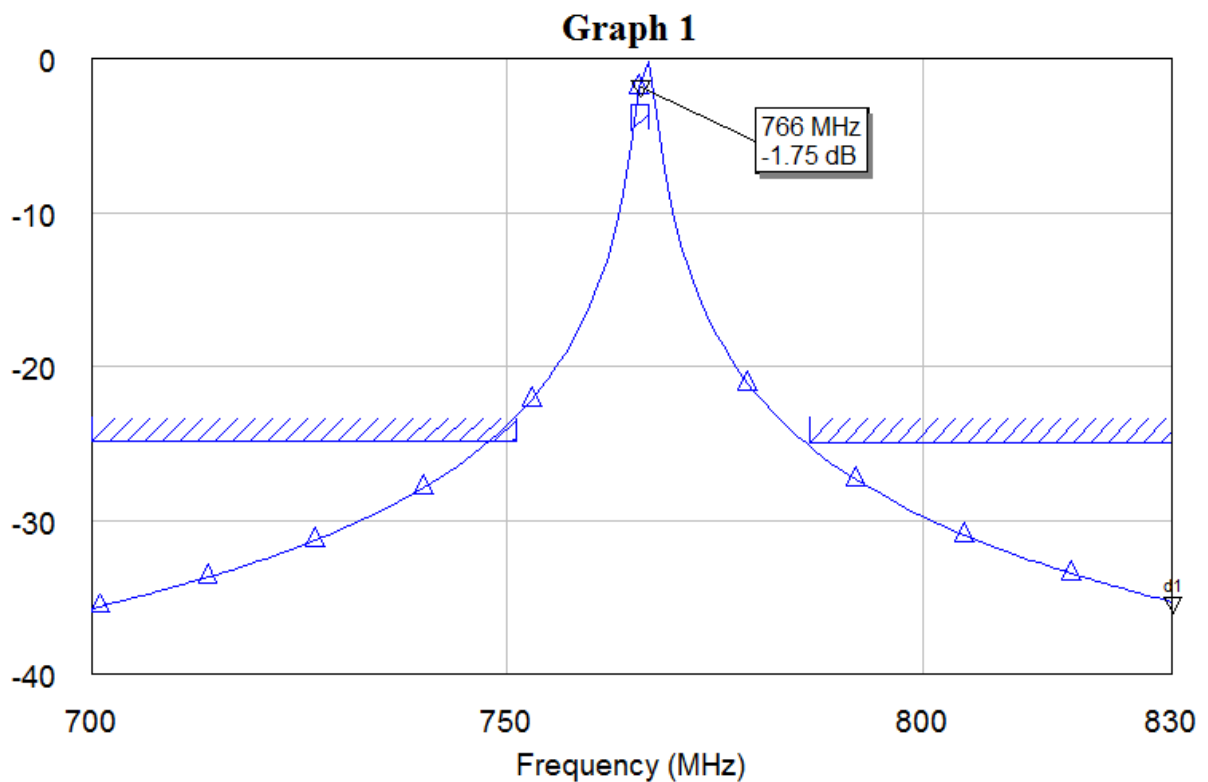


Рис. 16 АЧХ ППФ

4.2 Создание модели многослойного полосового фильтра

Для создания модели, были выбраны следующие характеристики керамики, заполняющей пространство фильтра, а так же металлической пасты, которой будут нарисованы проводящие слои: марка керамики Green Tare 951PX. Толщина слоя «сырой» керамики – 254 мкм, толщина слоя обожженной керамики – 206+2 мкм (именно такой параметр использовался при построении модели). Коэффициент усадки (X, Y), Кус – 1.15. Теплопроводность – 3,0 Вт/м*К. Сопротивление изоляции – 1000 МОм. Напряжение пробоя свыше 1000 В/мм. Диэлектрическая проницаемость на частоте 10 ГГц – 7,8. Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10 ГГц – 0,0015. Предел прочности на изгиб – 320 Мпа. Так же использовалась проводниковая паста фирмы DuPoint 6142D, состоящая из серебра.

Требования к формам и размерам многослойной керамической платы (МКП) приведены в таб.1

№ п/п	Параметр	Рекоменду- емое значение	Предельно допустимое значение
1	Максимальное количество слоев МКП	14	20
2	Минимальное количество слоев МКП	6	4
3	Максимальные габаритные размеры МКП, мм	70×70	85×85
4	Минимальные габаритные размеры МКП, мм	3×2	2×2
5	Точность выполнения габаритных размеров, мкм	± 100	± 75
6	Неплоскостность, мм	0,05	0,05

Таб. 1. Основные требования к форме и размерам МКП

При разводке цепей определяющими факторами являются параметры, приведенные в таблице 2.

Далее, для создания модели многослойного фильтра, было проведено моделирование отдельных компонентов: ёмкости и индуктивности. Результаты моделирования приведены на рисунках 17-22.

№ п/п	Параметр	Рекоменду- емое значение	Предельно допустимое значение
1	Номинальная ширина проводника, А, мкм, не менее	150	125
2	Номинальная ширина зазора между проводниками, С, мкм, не менее	150	125
3	Точность выполнения элементов проводящего рисунка, мкм	± 30	± 25
4	Номинальное расстояние от края проводника до края платы, Е, мкм, не менее	300	200
5	Номинальный диаметр переходного отверстия, I, мкм, не менее (для необожженной керамики)	200	100 (для керамики толщиной 114, 125 мкм)
6	Номинальный диаметр отверстия для теплоотвода	2 толщины слоя керамики	
7	Позиционный допуск осей отверстий, мм	0,035	0,025
8	Номинальное расстояние между центрами отверстий, D, мкм, не менее	500	400
9	Номинальное расстояние между краем отверстия и краем платы, F, мкм, не менее	500	400
10	Номинальное расстояние между краями отверстий, мкм, не менее	300	200
11	Номинальный размер круглой или квадратной контактной площадки с отверстием, Н, мкм, не менее	400	300
12	Максимальная площадь металлизации на подложке для совместновжигаемых паст	50 %.	75 %

Таб. 2. Рекомендуемые параметры при формировании проводящего рисунка

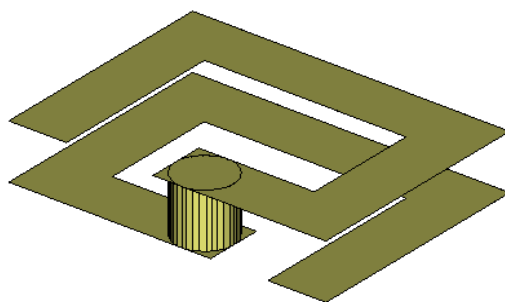


Рис. 17. Индуктивность номиналом 1 нГн. Размеры 0,8*1,1 мм

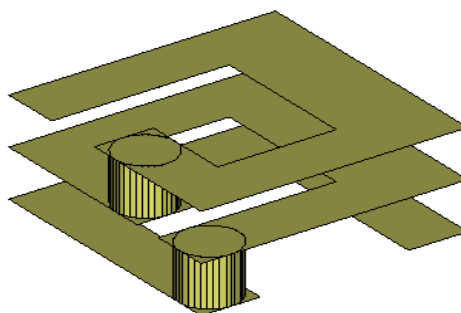


Рис. 18. Индуктивность номиналом 1,75 нГн. Размеры 0,9*0,85 мм

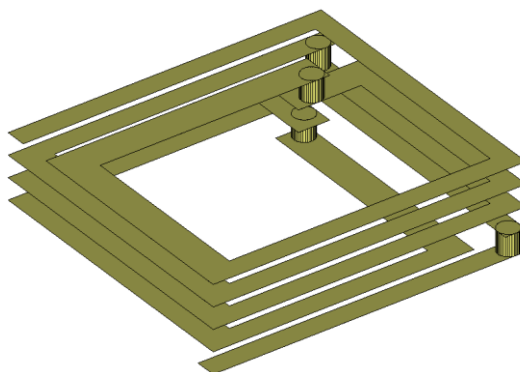


Рис. 19. Индуктивность номиналом 55 нГн. Размеры 3*2,7 мм

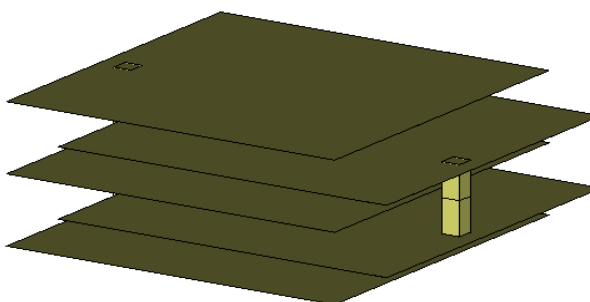


Рис. 20. Ёмкость номиналом 4 пФ. Размеры 2,2*1,9 мм

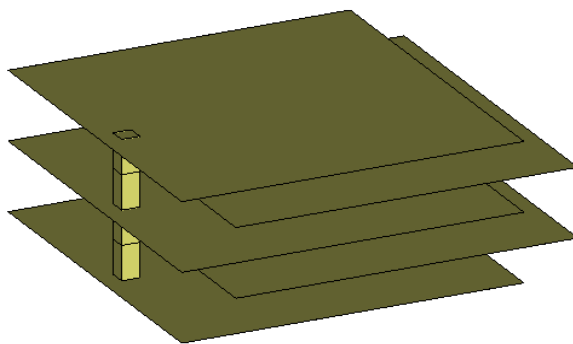


Рис. 21. Ёмкость номиналом 4,12 пФ. Размеры 2,2*2 мм

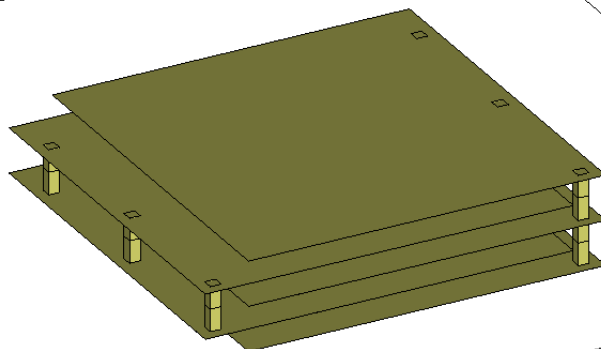


Рис. 22. Ёмкость номиналом 11 пФ. Размеры 3,7*3,4 мм

Далее, из полученных компонентов был собран полосно-пропускающий фильтр по многослойной технологии в среде AWR с помощью системы EMSight. Размеры фильтра 10*10 мм. (рис. 23, 24).

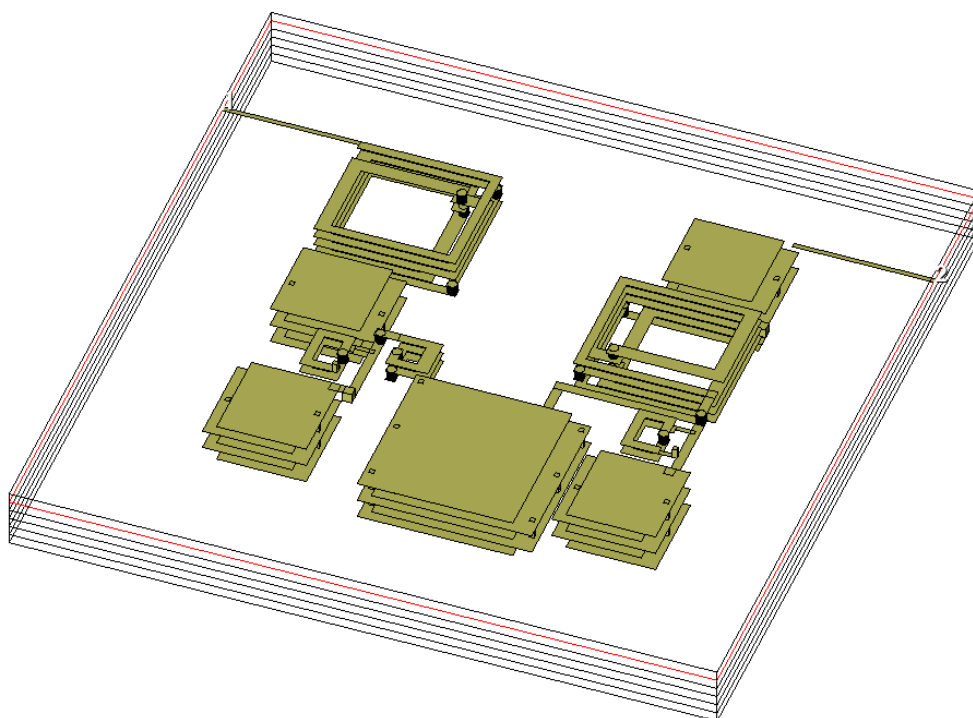


Рис. 23. Трёхмерная модель многослойного фильтра, собранного из отдельных компонентов.

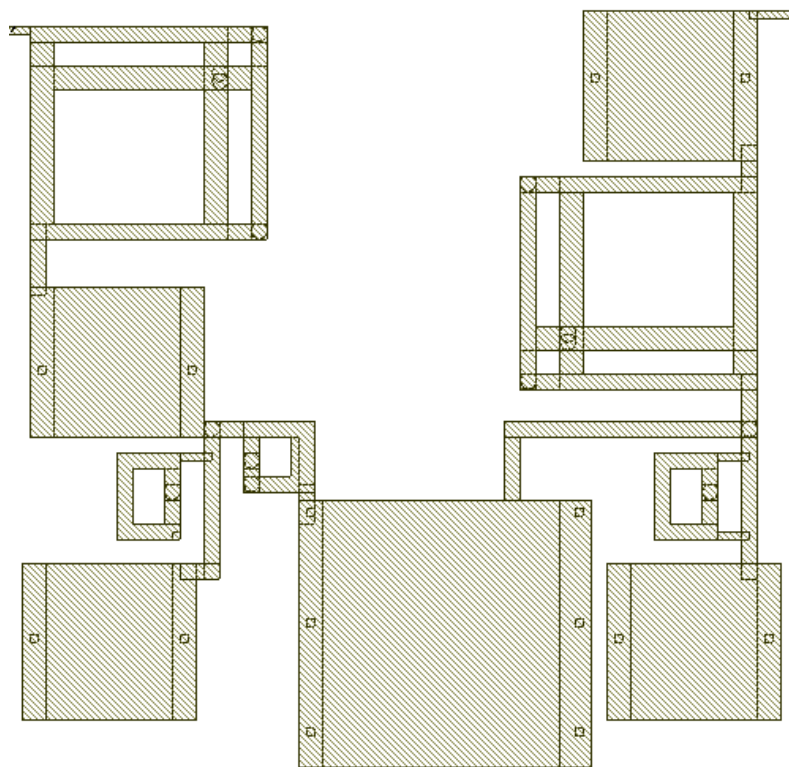


Рис. 24. Вид фильтра в редакторе EMSight.

Амплитудно-частотная характеристика получившегося фильтра изображена на рис. 25.

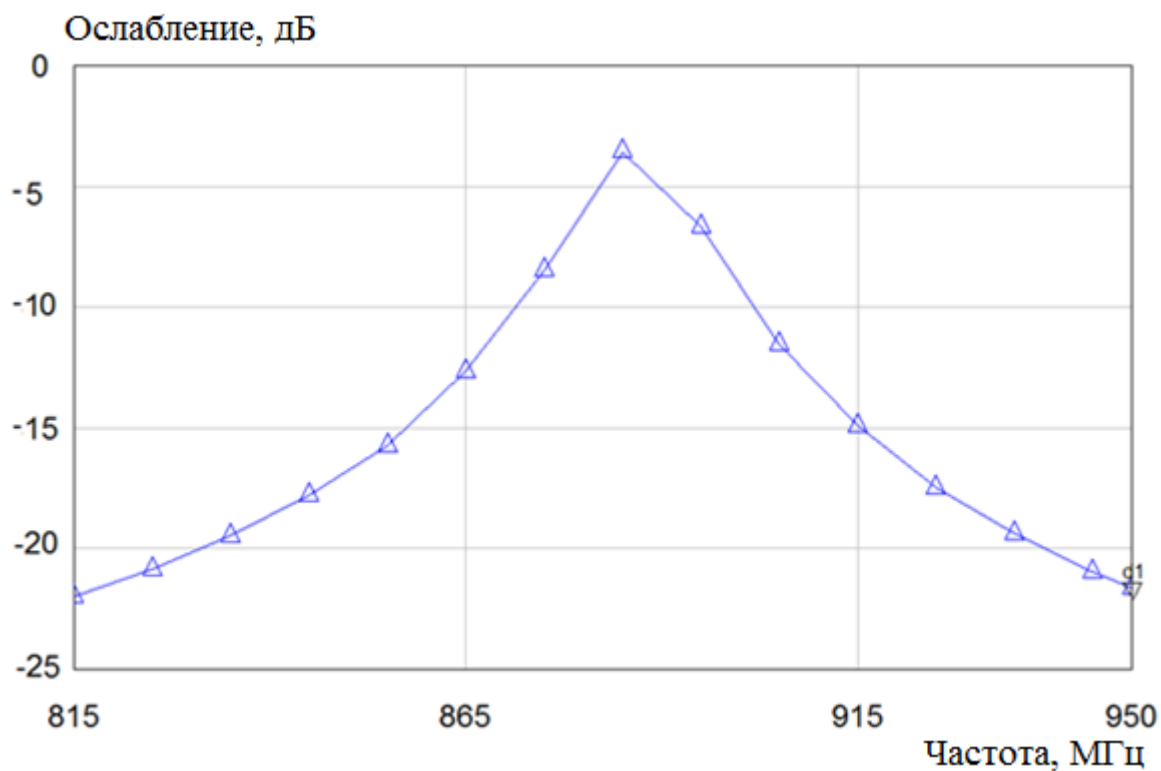


Рис. 25. Амплитудно-частотная характеристика

4.3 Подстройка модели многослойного полосового фильтра

Как можно увидеть из рис.25, при построении этой модели, частота пропускания немного увеличилась. Для того что бы понизить частоту пропускания, я увеличил индуктивность L_3 на $dx = 0.2$ мм. Результаты можно увидеть на рис. 26.

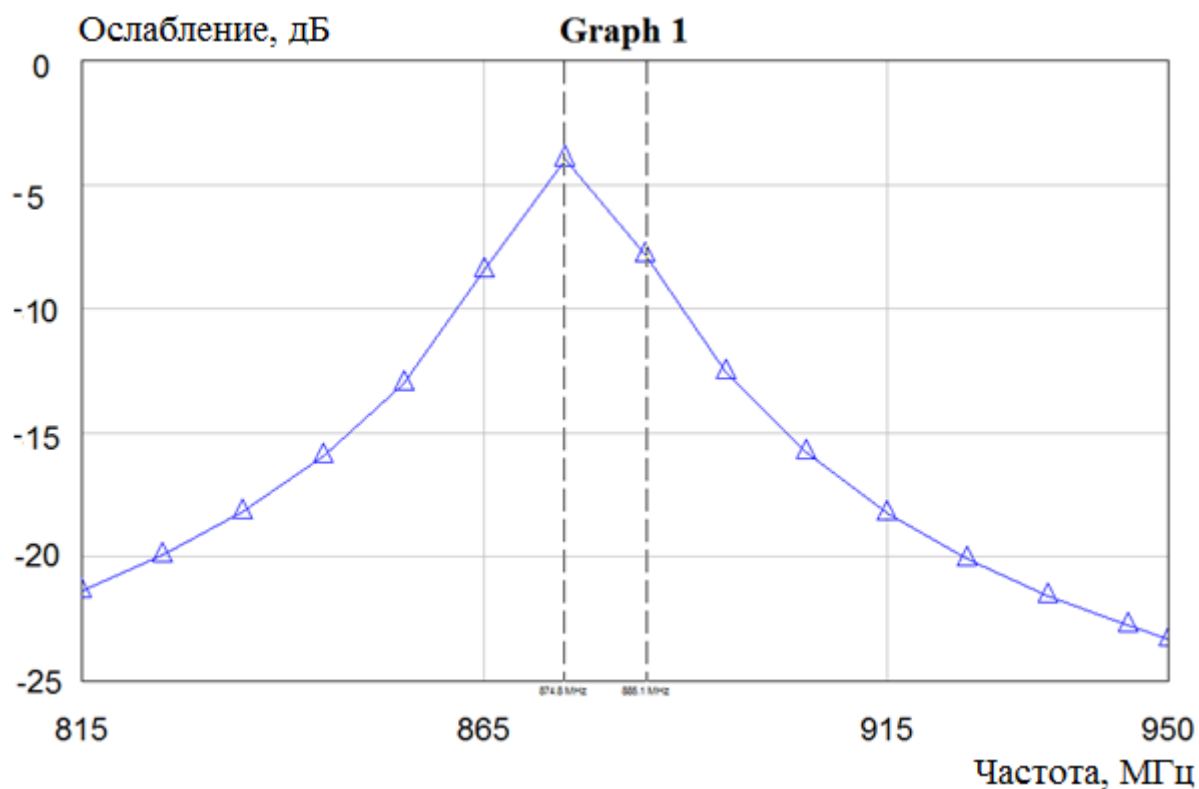


Рис. 26 АЧХ после изменения L3 на $dx=0.2$.

Далее я еще раз увеличил dx (рис. 27). График зависимости частоты пропускания от dx представлен на рис. 28.

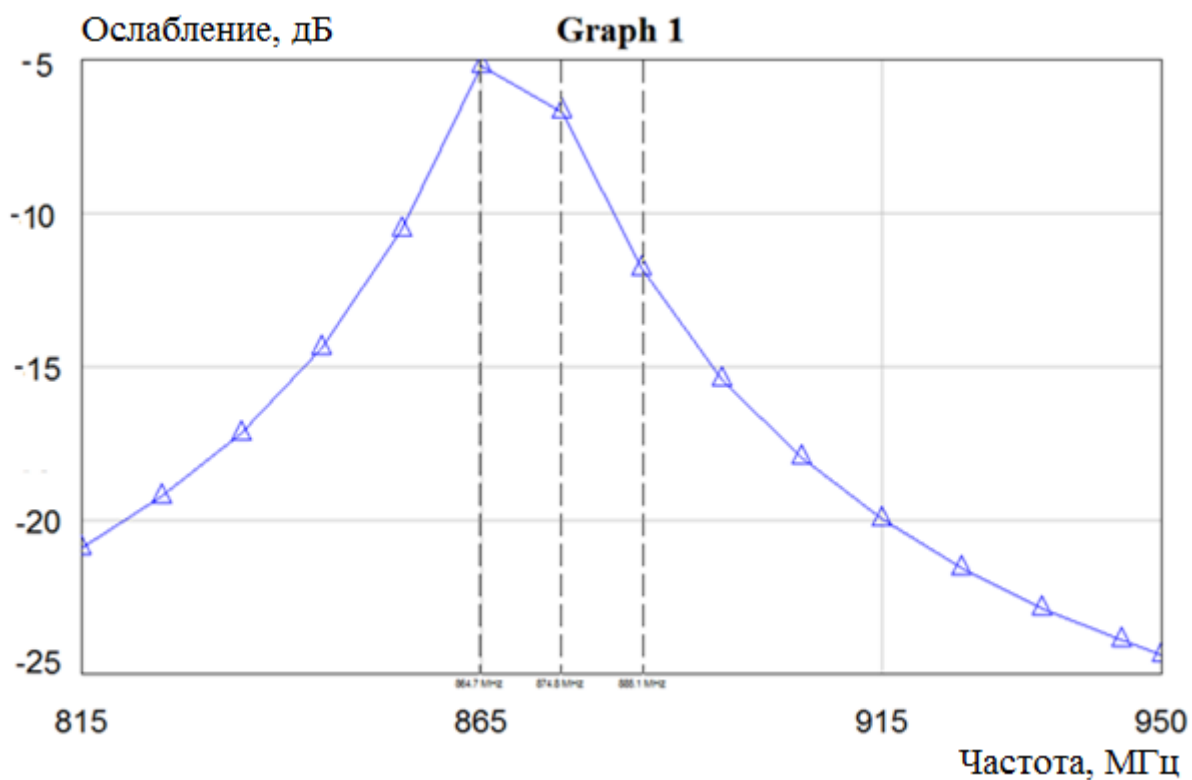


Рис. 27. АЧХ после второго изменения dx .

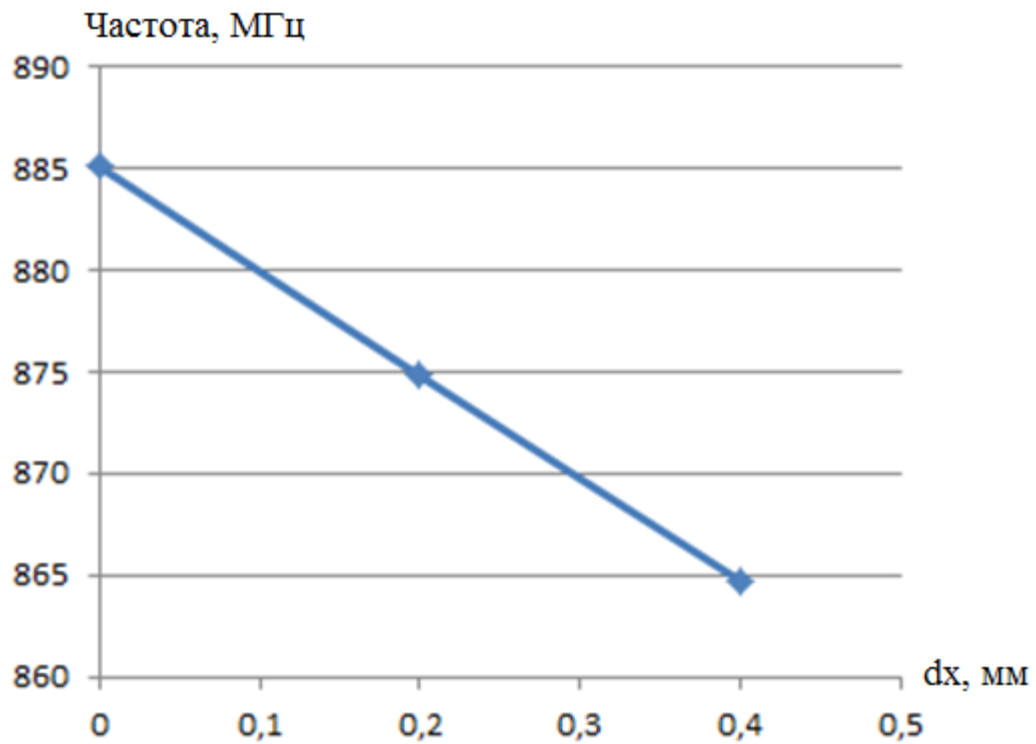


Рис. 28. График зависимости частоты пропускания от dx .

Далее, таким же методом была увеличена индуктивность L_2 на $dx=0.1$ (рис. 29):

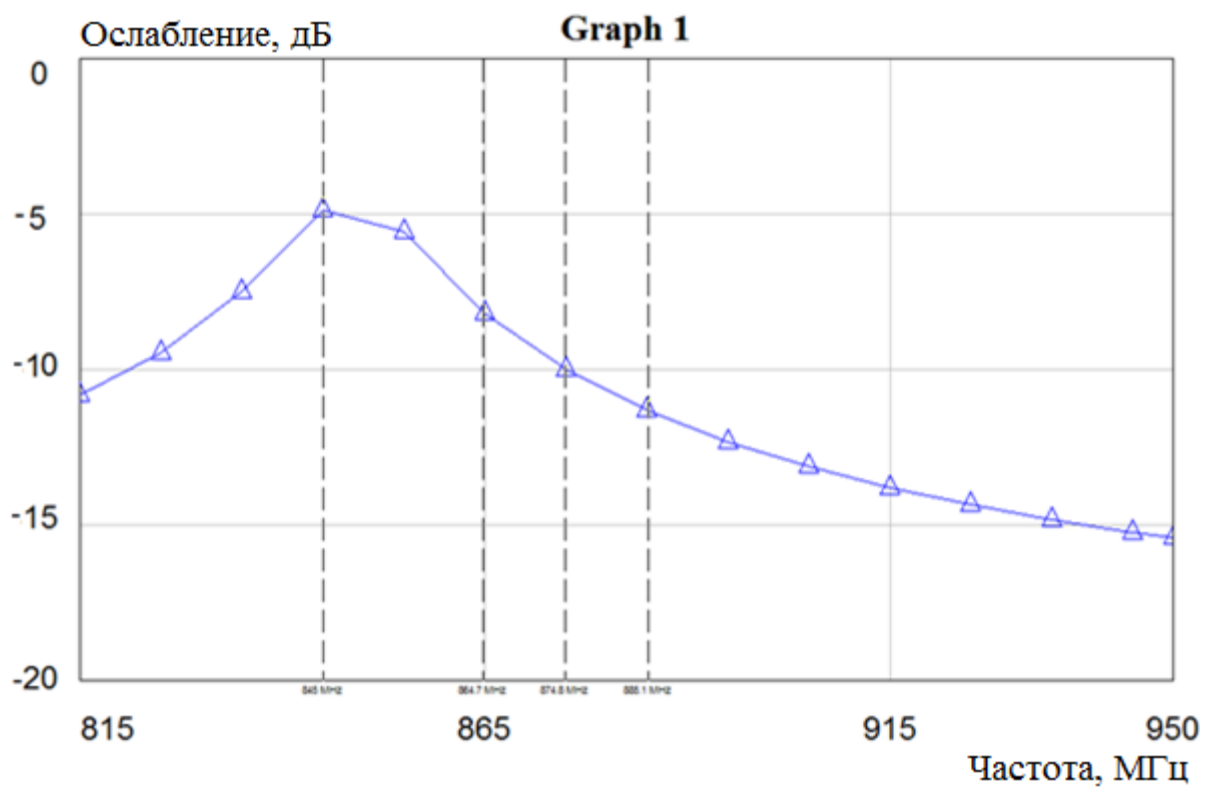


Рис. 29. АЧХ после увеличения индуктивности L_2 на $dx=0.1$.

В дальнейшем я так же увеличивал индуктивность L2 ещё 3 раза (рис. 30.-32). График зависимости частоты от Δx_2 представлен на рис. 33.

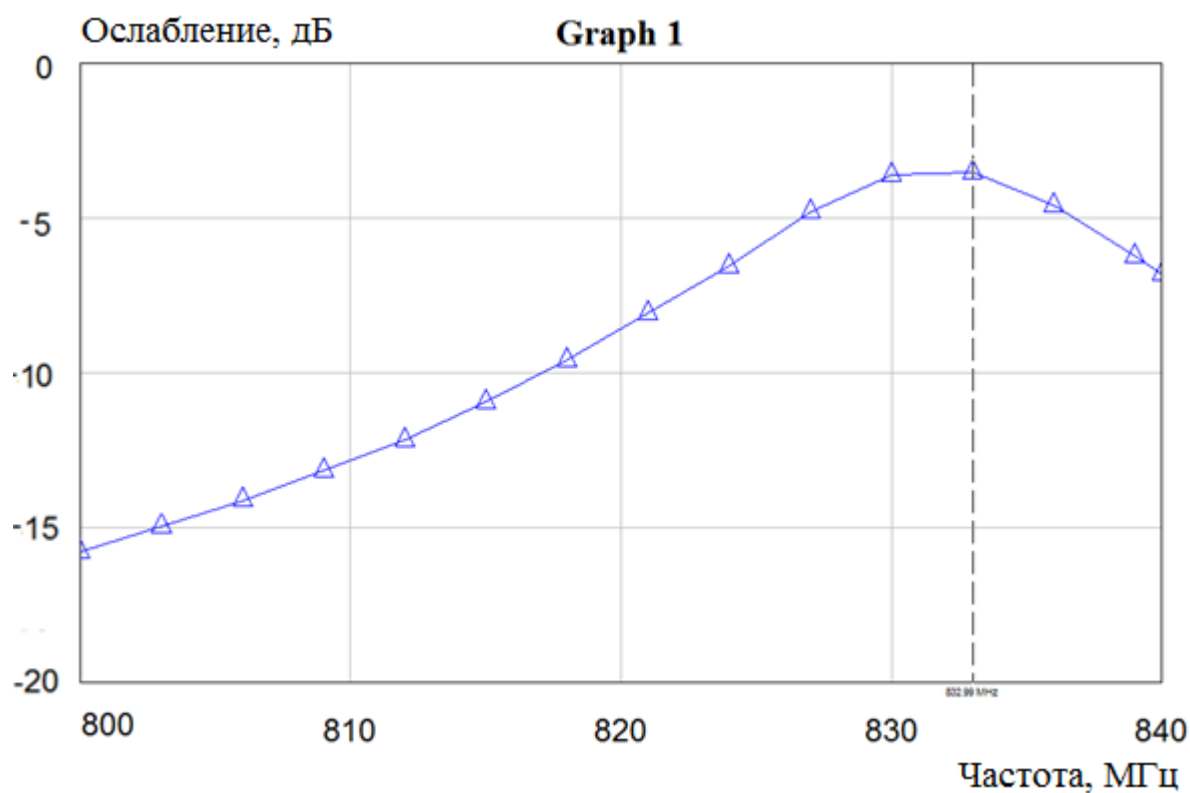


Рис. 30 Дальнейшее увеличение Δx

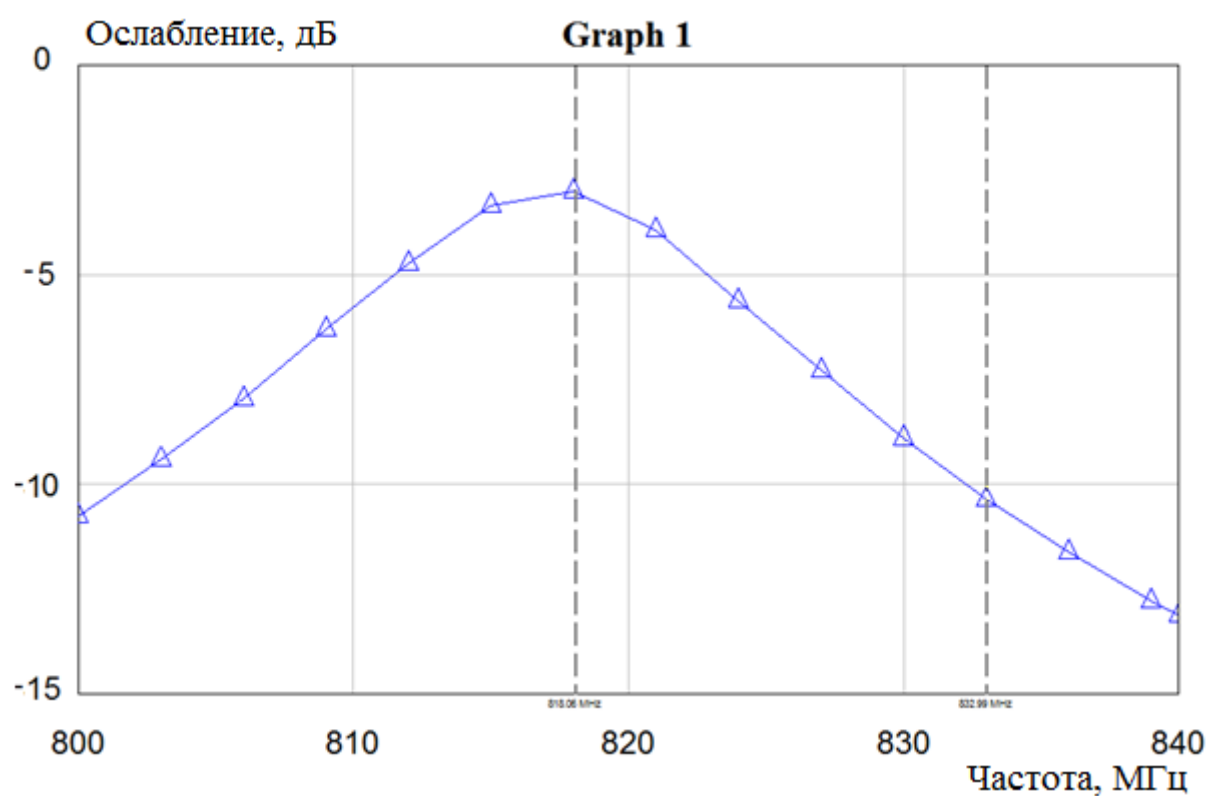


Рис. 31 После третьего увеличения Δx

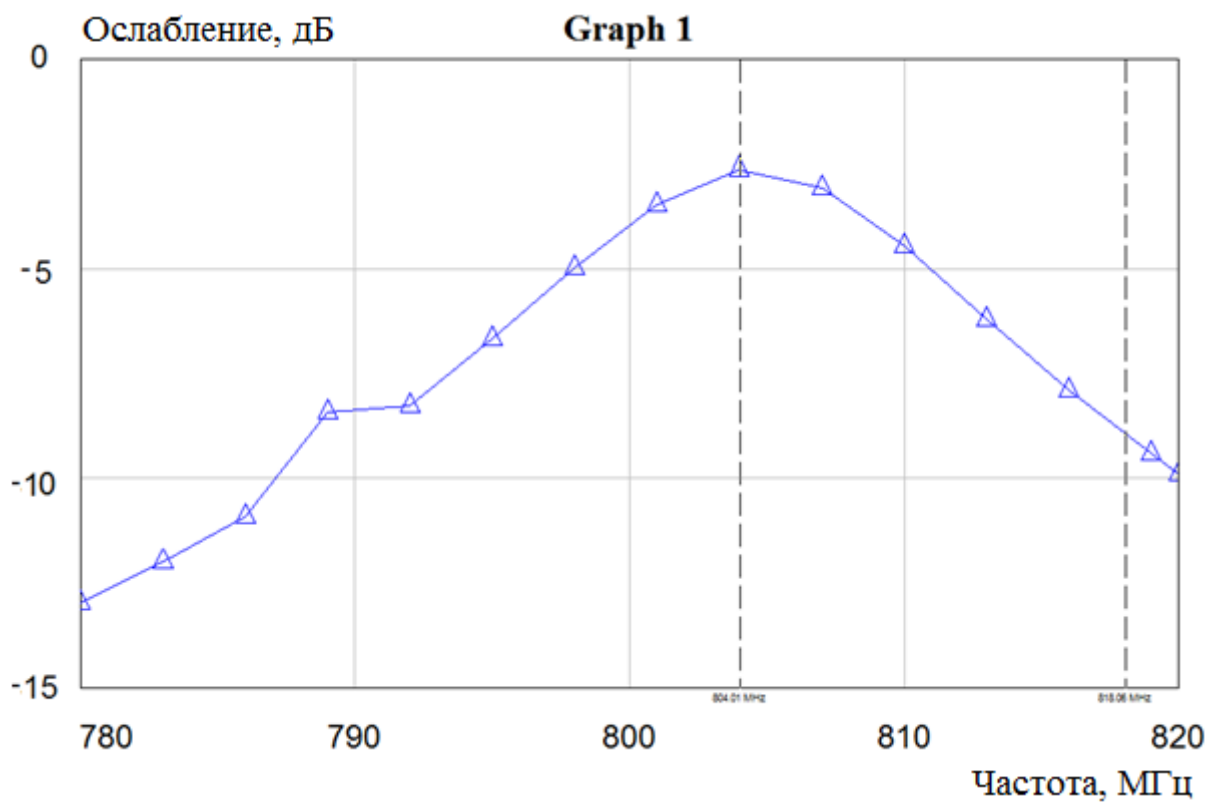


Рис 32 Последнее увеличение dx L2

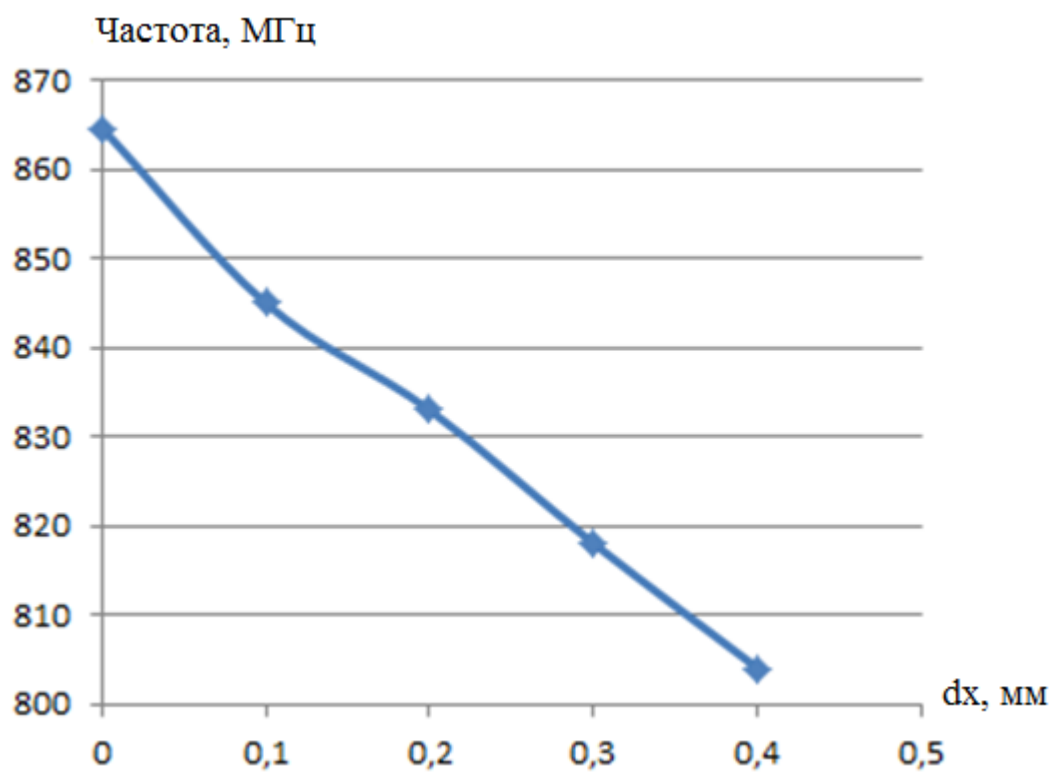


Рис. 33 График зависимости частоты пропускания от dx L2

Далее увеличиваем C2 на $\Delta x = 0.1 \text{ mm}$ (рис. 34-36)

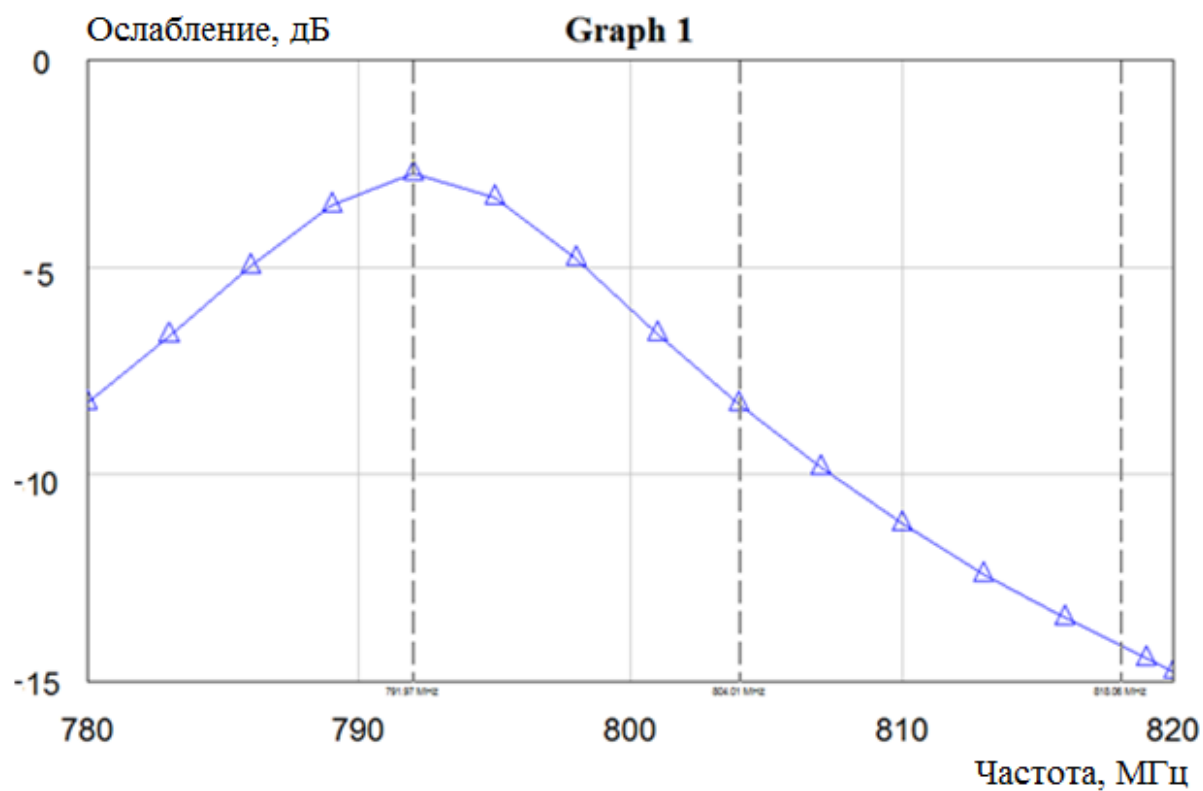


Рис. 34 АЧХ после увеличения ёмкости конденсаторов C2.

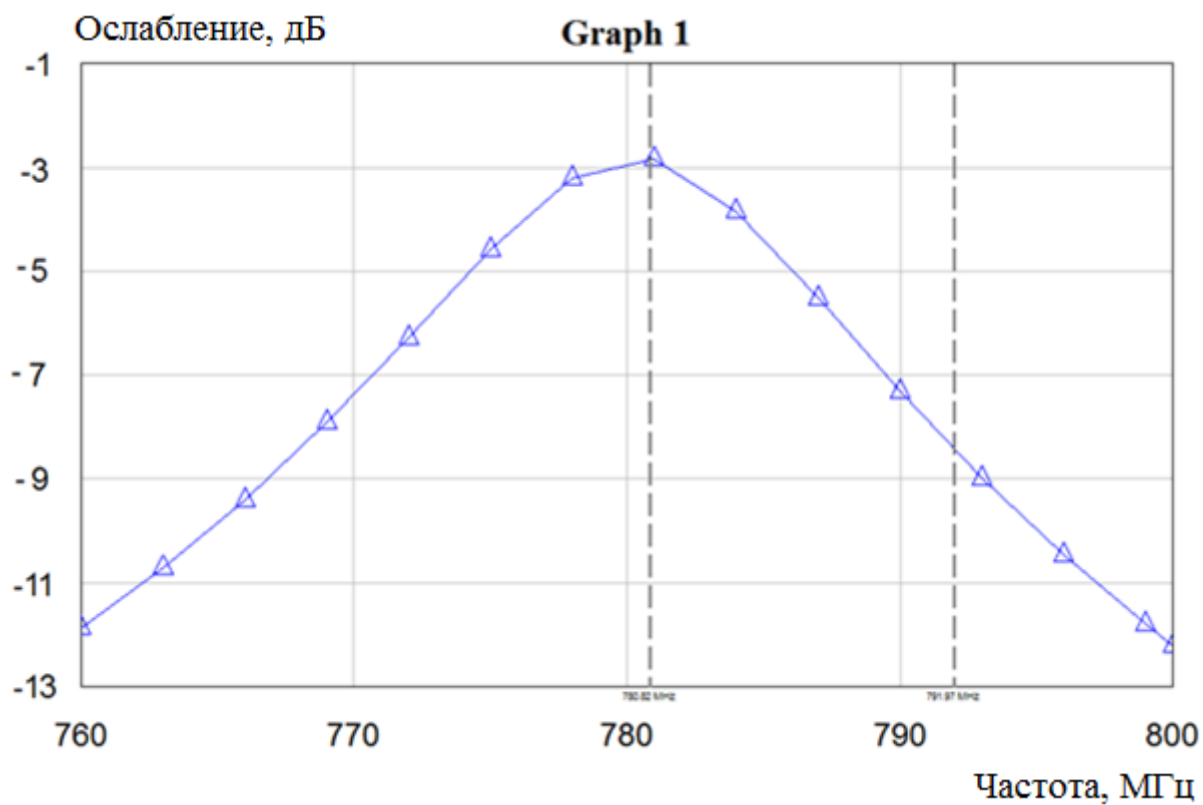


Рис. 35. Дальнейшее увеличение ёмкости C2

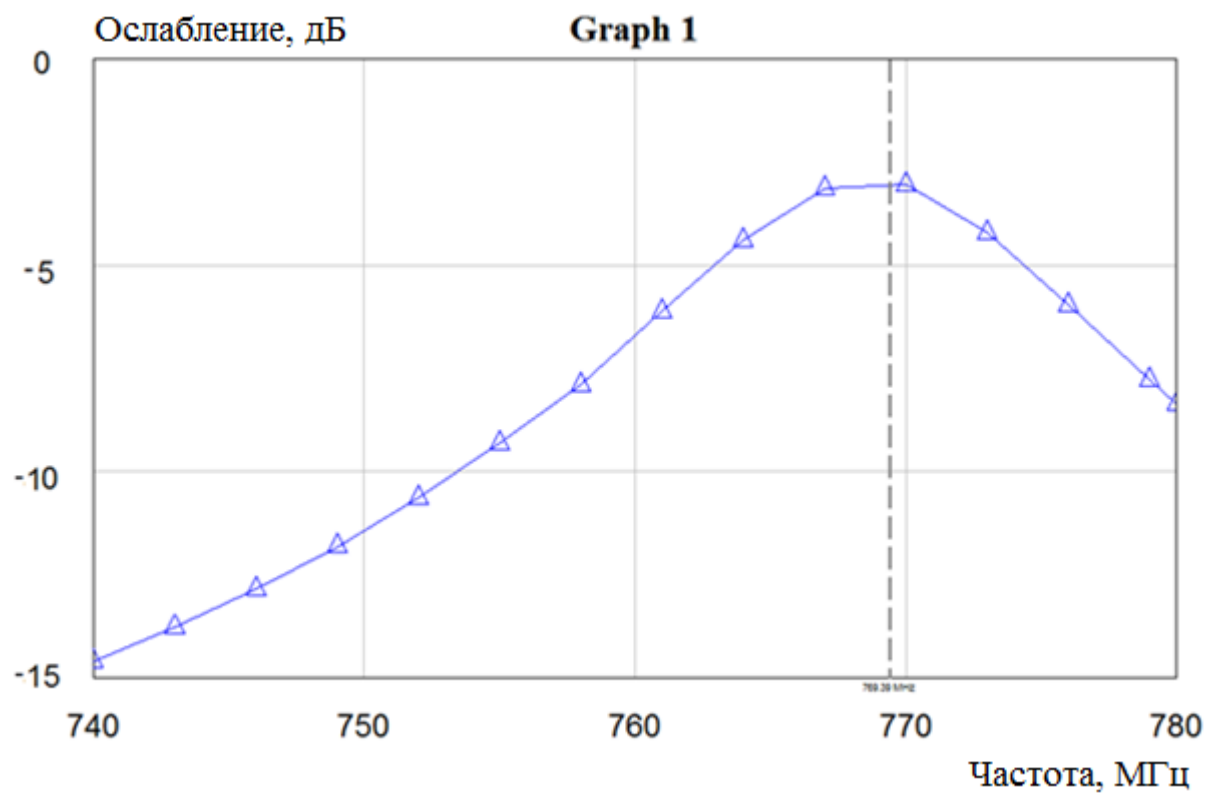


Рис. 36. Последнее увеличение ёмкости C2.

График зависимости частоты от Δx C2 представлен на рис. 37

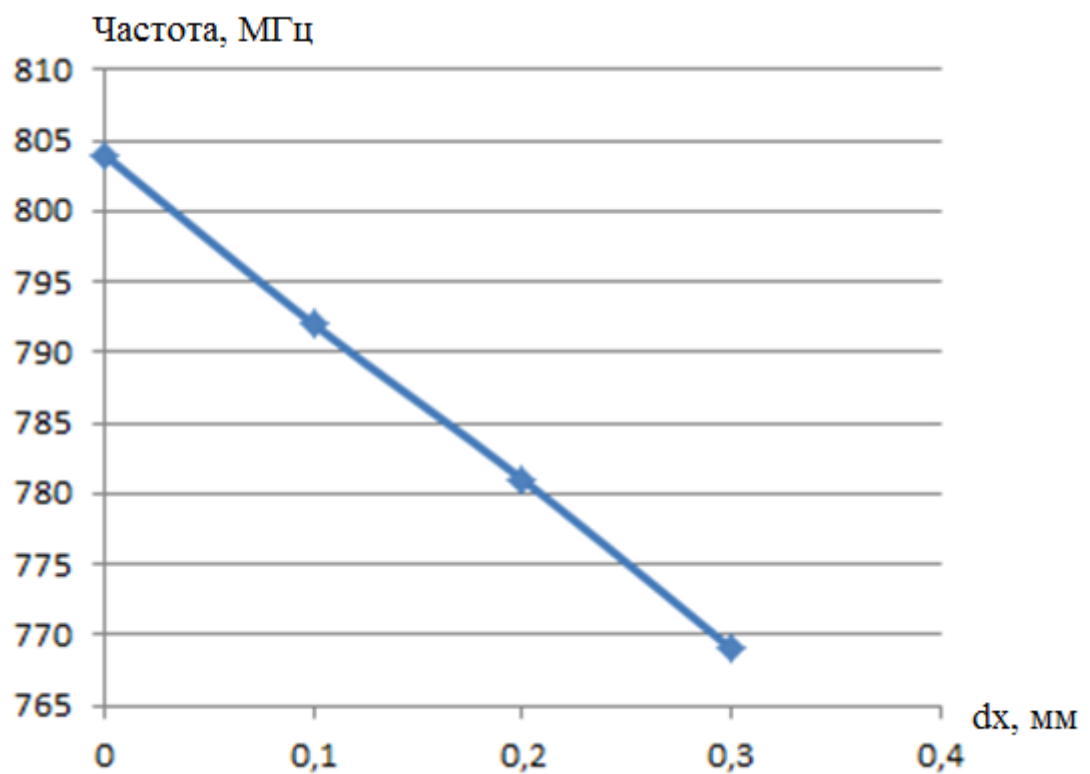


Рис. 37. График зависимости частоты от увеличения конденсатора C2.

Осталось переместить частоту на 2-3 мгц, воспользуемся 1м методом (увеличение L3 на 0,1мм) (Рис. 38)

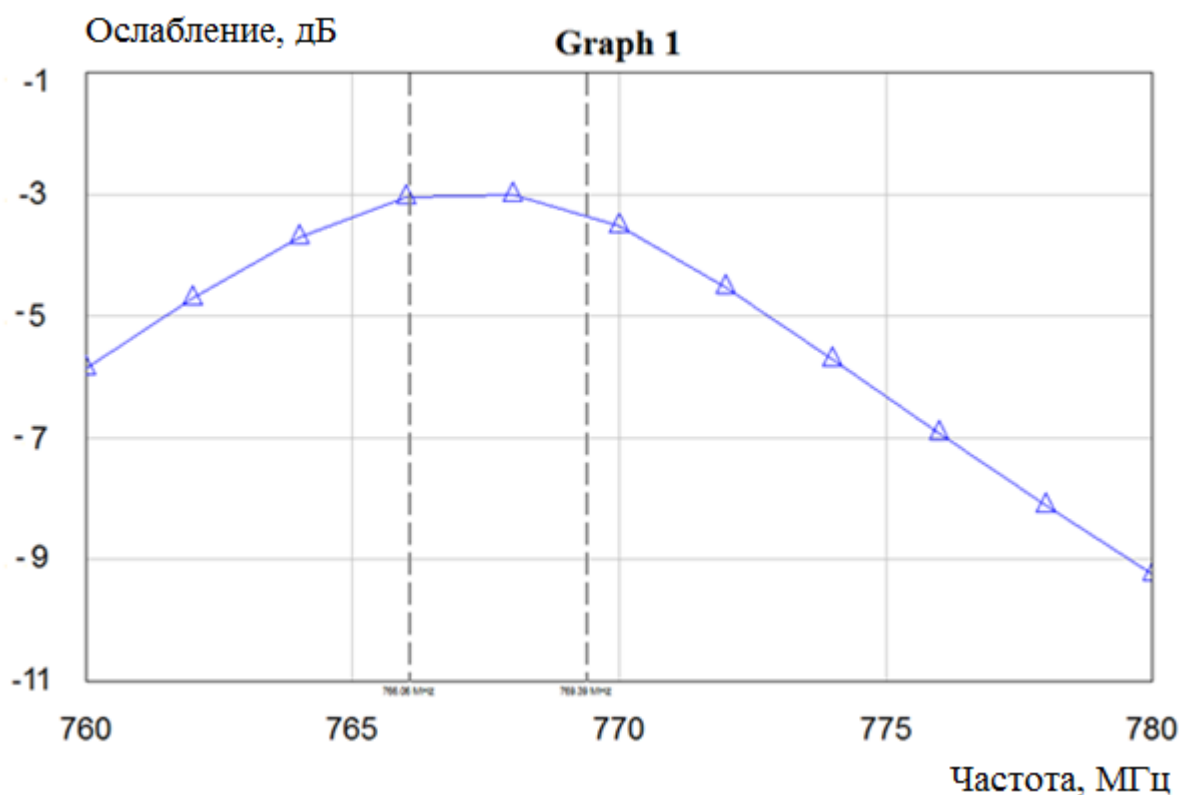


Рис. 38. Изменение АЧХ после увеличения индуктивности L3 на 0.1 мм.

Подстройка модели фильтра закончена, найдена необходимая конфигурация фильтра, при которой частота пропускания соответствует необходимой.

Амплитудно-частотная характеристика фильтра явно проигрывает фильтру на сосредоточенных элементах, однако сама конструкция имеет значительное количество плюсов по сравнению с фильтром на сосредоточенных элементах, и из-за этого этот фильтр будет востребован там, где необходима компактность и высокие требования к условиям эксплуатации, например в армии.

4.4 Учёт производственной погрешности.

Далее, рассмотрим поведение фильтра при изменении толщины керамики. При производстве допустима погрешность толщины керамики между слоями в 2 мкм. При расчёте я учитывал параметр толщины заполнения диэлектриком равной 206 микрометров. Изменение частоты пропускания при изменении толщины заполнения показано на рис. 39.

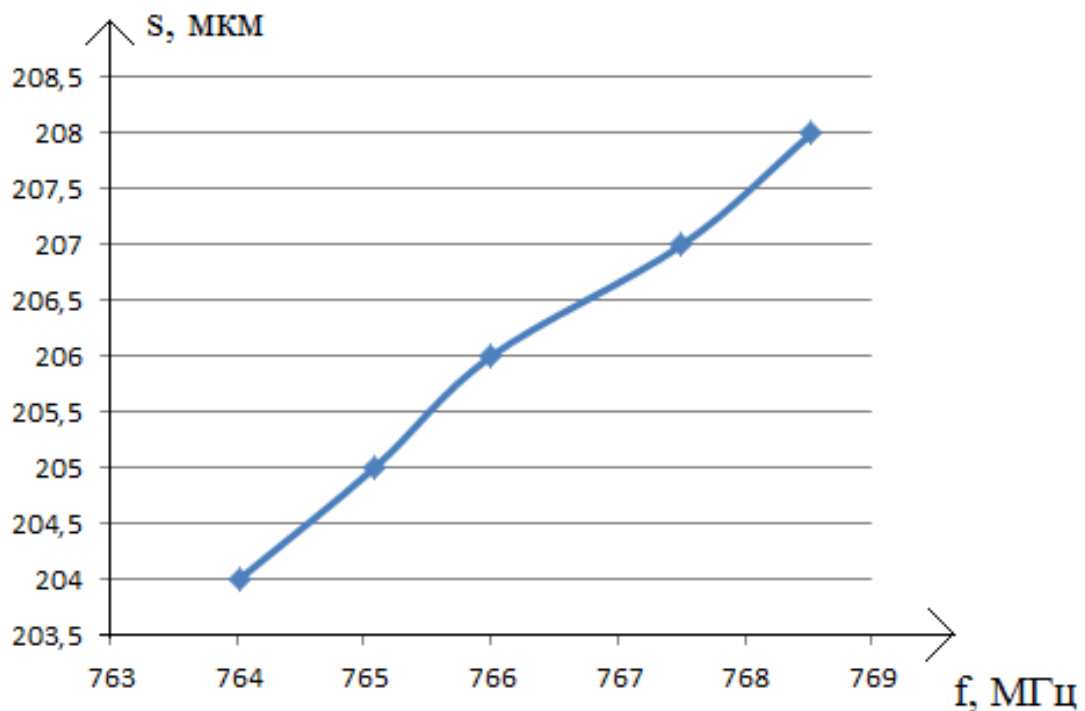


Рис. 39 Изменение частоты пропускания фильтра в пределах производственной погрешности.

Как видно из графика, изменение частоты из-за производственной погрешности вполне вписывается в требования к устройству.

Далее, так же учтём точность выполнения элементов проводящего рисунка. Как видно из таблицы 2, точность выполнения элементов проводящего рисунка составляет ± 30 мкм. Увеличим и уменьшим толщину проводников на эту величину. Для этого необходимо увеличить точность

расчета сетки, вследствие чего значительно увеличилось время расчёта характеристики. Результаты расчётов представлены на рис. 40

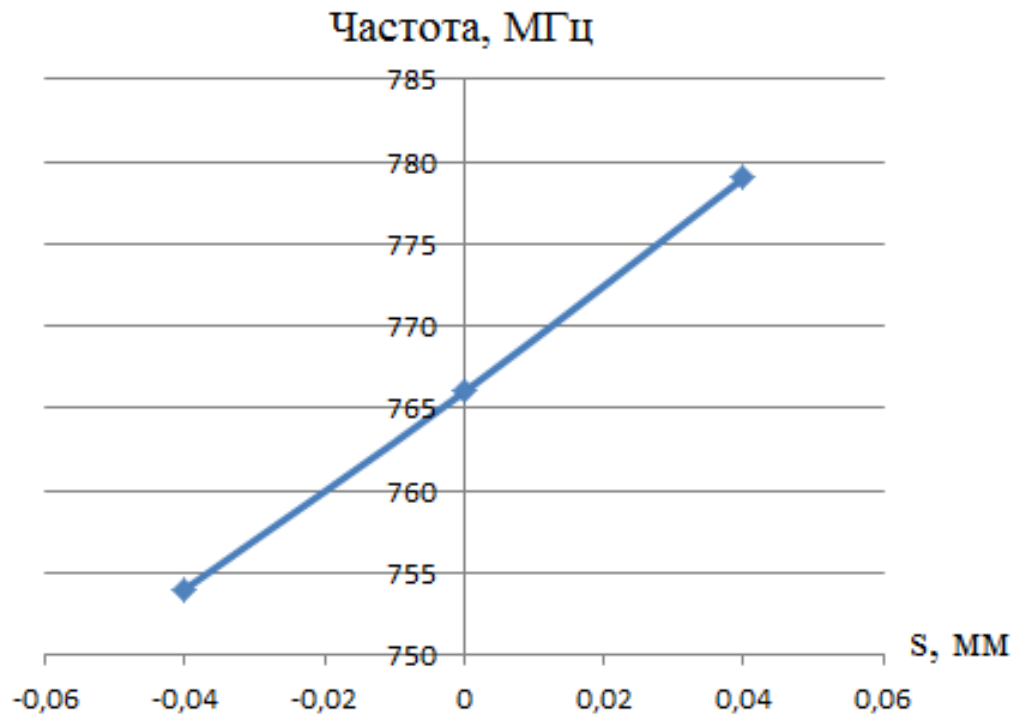


Рис. 40. Зависимость частоты от производственной погрешности нанесения проводящего рисунка.

Как видно из рисунка 40, частота пропускания довольно сильно меняется при максимальной погрешности. В производстве такие фильтры придётся отбраковывать, а в дальнейшем улучшать точность производства.

4.5 Сравнение модели фильтра с аналогами.

Сравним полученный фильтр с аналогами, сделанными по другим технологиям. В качестве примера возьмем полосовой фильтр BPF-A600+, выполненный по технологии поверхностного монтажа (SMT) и заключенный в корпус. Внешний вид и характеристика фильтра приведены на рисунках 41 и 42 соответственно.



Рис. 41. Внешний вид фильтра BPF-A600+.

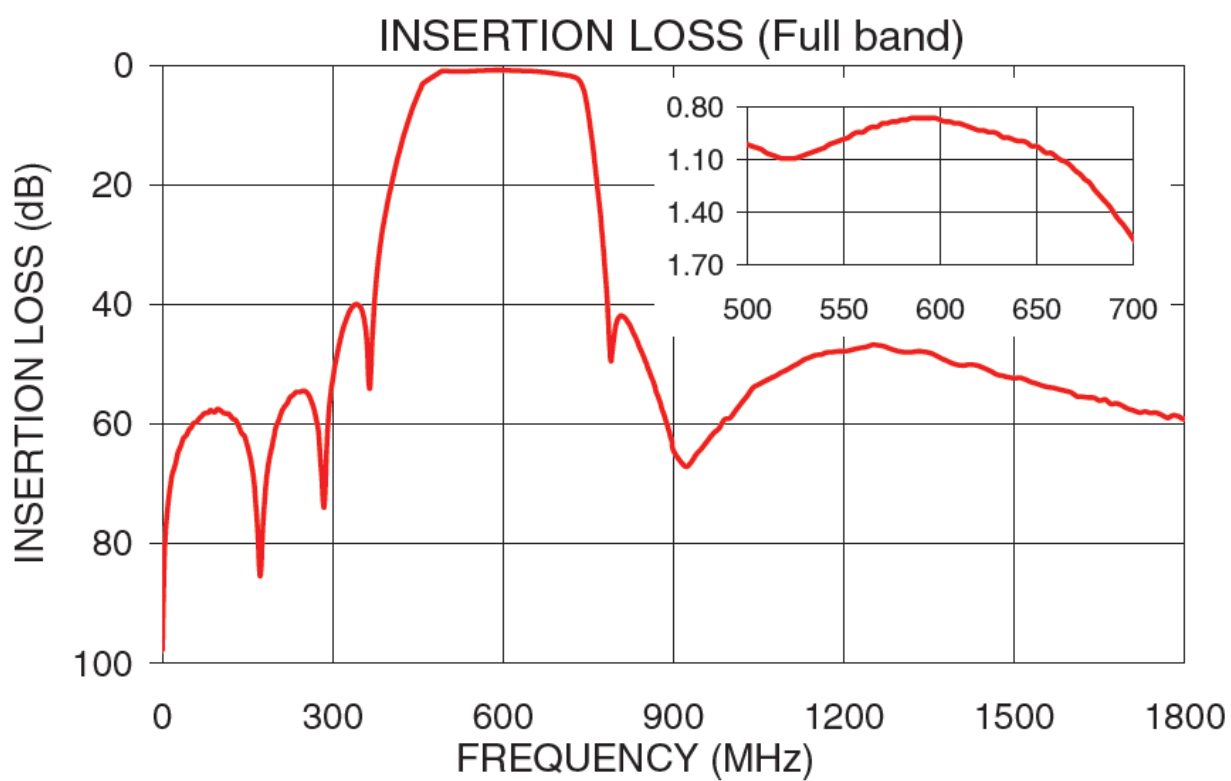


Рис. 42. Характеристика фильтра BPF-A600+.

Размеры фильтра BPF-A600+ составляют 10*35*9 мм, что значительно больше, чем у фильтра, изготовленного по технологии LTCC.

Так же, в преимущества фильтра по технологии LTCC можно отнести экономичность и дешевизну изготовления устройства, герметичность от влаги включая выпадение конденсата внутри электронного устройства при достижении точки росы, устойчивость к нагреву устройства при пожарах или сильных индукционных токах, что важно для военных целей; неизменяемость геометрии устройства при резких перепадах температуры; высокая механическая прочность как для закаленного стекла.

5. ВЫВОД

В данной работе было проведено моделирование фильтра на сосредоточенных элементах, затем на основе модели фильтра на сосредоточенных элементах были созданы элементы: индуктивности и катушки по многослойной технологии. Используя эти элементы, я собрал модель многослойного фильтра по схеме фильтра на сосредоточенных элементах. В дальнейшем я подстраивал элементы фильтра для достижения лучшей характеристики.

Многослойные LTCC фильтры на частотах порядка 10 ГГц будут иметь лучшую характеристику, более приближенную к фильтрам на сосредоточенных элементах, однако даже на частоте 766 МГц характеристика имеет удовлетворительный вид, и учитывая плюсы, перечисленные во введении, фильтр вполне может найти применение в промышленности, особенно военной, где условия эксплуатации фильтра далеки от идеальных.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Грановский В.Г. Радиоэлектроника. - Ростов - на - Дону: Феникс, 2000.
- [2] Основы радиоэлектроники, под ред. Петрухина Г.Д. – М.: Издательство МАИ, 1993.
- [3] Р. Богнер, А. Константи́нидис. Введение в цифровую фильтрацию. – Москва: Мир, 1976.
- [4] Э. Оппенгейм. Применение цифровой обработки сигналов. – Москва: Мир, 1980.
- [5] Manufacturing Design Guidelines for Low Temperature Cofired Ceramic Substrates and Packages.
- [6] Чигиринский С.А. «Особенности и преимущества производства многослойных структур на основе кремния»
- [7] R. Kulke et al.: “LTCC – Multilayer Ceramic for Sensor and Wireless Applications”, 2001.
- [8] Fred D. Barlow, Aicha Elshabini: “Ceramic Interconnect Technology Handbook”, Crc Pr Inc, ISBN: 0849335574, January 2007.
- [9] I. Wolff, R. Kulke, P. Uhlig, T. Mobley: “LTCC for Micro- And Millimeter-Wave Applications: Short Course for IMS: International Microwave Symposium, Honolulu, Hawaii, June 3-8, 2007.
- [10] Сергей Чигиринский. «Особенности и преимущества многослойных структур». – Компоненты и технологии №11, 2009.
- [11] Дмитриев Е.Е. «Основы моделирования в Microwave Office 2009»
- [12] Советская энциклопедия. И. М. Виноградов. 1977—1985.
- [13] Печатные платы — история и современное состояние, <https://hi-news.ru/>, 2012г.

7. ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Обеспечение техники безопасности и охраны труда оператора ЭВМ.

1. Обеспечение безопасности рабочего места:

1.1. Правильный выбор рабочего места – дисплей (монитор) является источником электромагнитного излучения. Рекомендуется устанавливать защитный экран для снижения воздействия электромагнитного излучения от задней части другого дисплея. Недопустимо устраивать рабочие места близко одно от другого. Размещать компьютер необходимо вдали от отопительных приборов и исключать попадания на него прямых солнечных лучей. Недопустимо работать напротив боковой или задней части другого дисплея, если расстояние до него - менее 2 м.

1.2. Расположение оргтехники:

системный блок – помещается на надежную поверхность (крепкий стол, массивная подставка/тумба) – так, чтобы исключать даже случайное его сотрясение;

дисплей необходимо устанавливать на такой высоте, чтобы центр экрана был на 15-20 см ниже уровня глаз. Расстояние от глаз до экрана – не менее 50 см;

клавиатура располагается на расстоянии 15-30 см от края столешницы или на специальной выдвижной доске.

Не рекомендуется установка компьютера (и клавиатуры) на поверхность, которая создает блики и легко «собирает» статическое электричество (оргстекло, полированная и покрытая лаком доска).

Необходимо следить, чтобы бумаги, какие-либо предметы не закрывали вентиляционные отверстия работающих аппаратов.

1.3. Рабочая мебель:

кресло – ширина и глубина сиденья не менее 40см.; спинка: высота опорной поверхности 30 ± 2 см; ширина не менее 38 см.; подлокотники: длина не менее 25 см; ширина 5-7 см., высота над сиденьем $23+3$ см.;

стол – размеры рабочей поверхности (столешницы): длина – 80-120 см; ширина – 80-100 см.; высота (расстояние от пола до рабочей поверхности) 68-85 см; оптимальная высота 72,5 см.;

подставки – для рук: опорная планка для запястья («подзапястник») - плоская или изогнутая пластина из мягкого материала; помещается перед клавиатурой. Для ног: ширина не менее 30 см; длина (глубина) не менее 40 см.

1.4. Помещение:

площадь одного рабочего места с компьютером - не менее 6 м²;

освещение должно быть естественным и искусственным. Рекомендуется работать в помещении, где окна выходят на север или северо-восток. Местное освещение не должно создавать блики на поверхности экрана дисплея. Недопустим яркий нерассеянный верхний свет (с потолка). Сдерживать поток избыточного света от окон следует с помощью жалюзи (или тканевых штор);

чистота обязательна при работе за компьютером. Влажную уборку помещения следует проводить ежедневно. Недопустима запыленность воздуха, пола, рабочей поверхности стола и техники. Помещение должно быть оборудовано системами вентиляции, кондиционирования и отопления. Запрещается работа на компьютере в подвальных помещениях.

1.5. Микроклимат

температура воздуха - от 21 до 25°C (в холодное время года); от 23 до 25°C (в теплое время года);

влажность воздуха (относительная) - от 40 до 60%. Недопустимы резкие перепады температуры и влажность воздуха более 75%;

ионизация воздуха – образующиеся в помещении положительно заряженные ионы очень вредны для здоровья, вызывают быстрое утомление, головную боль, учащение пульса и дыхания (из-за недостаточного поступления кислорода в кровь). Специальные устройства - аэроионизаторы - нормализуют аэроионный режим, увеличивая концентрацию легких

отрицательно заряженных ионов (воздух становится живительным, как в горах или на море). Перед включением аэроионизатора следует очистить воздух от пыли и аэрозолей. В больших помещениях используют аэроионизаторы типа люстры Чижевского, в небольшой комнате (15-20 м²) достаточно установить переносной аэроионизатор {некоторые модифицированные аппараты позволяют и очищать, и ионизировать воздух}.

Необходимо в начале работы включать общее питание, периферийные устройства, системный блок, в конце работы наоборот – выключать системный блок, периферийные устройства, общее питание.

Не обязательно выключать компьютер на время небольших перерывов в работе.

Перед подсоединением/отсоединением устройств ввода-вывода требуется полностью отключать эту технику и компьютер от электросети.

При появлении запаха гари или при обнаружении повреждения изоляции, обрыва провода следует немедленно отключить устройства (лучше - общее электропитание) и сообщить о неисправности руководителю.

Прикасаться к задней панели работающего системного блока (процессора) запрещается.

Недопустимо попадание влаги на системный блок, дисплей, клавиатуру и другие устройства (лучше не ставить рядом чашку с чаем или кофе, стакан с соком).

При интенсивной работе резко возрастает напряженность электрического поля на клавиатуре и «мышь». От трения рук о них через 0,5-1 час работы электростатический потенциал достигает 10-20 кВ/м, что оказывает на организм вредное воздействие. Работать с «мышью» нужно на специальном коврике. Необходимо несколько раз в течение рабочей смены (лучше ежечасно) смачивать руки водой, чтобы снимать электростатические заряды, а по завершении работы вымыть с мылом руки и лицо, ежедневно протирать влажной салфеткой экран дисплея, клавиатуру, «мышь» - убирать

статическое электричество, регулярно проводить влажную антистатическую обработку помещения.

2.1 Рабочая поза

Правильная рабочая поза позволяет избегать перенапряжения мышц, способствует лучшему кровотоку и дыханию. Следует сидеть прямо (не сутулясь) и опираться спиной о спинку кресла. Прогибать спину в поясничном отделе нужно не назад, а, наоборот, немного вперед.

Недопустимо работать, развалившись в кресле. Такая поза вызывает быстрое утомление, снижение работоспособности.

Чтобы не травмировать позвоночник, важно:

избегать резких движений;

поднимаясь/сидясь, держать голову и торс прямо.

Необходимо найти такое положение головы, при котором меньше напрягаются мышцы шеи. Рекомендуемый угол наклона головы - до 20°. В этом случае значительно снижается нагрузка на шейные позвонки и на глаза.

2.2 Положение рук и ног

Во время работы за компьютером необходимо расслабить руки, держать предплечья параллельно полу, на подлокотниках кресла, кисти рук - на уровне локтей или немного ниже, запястья - на опорной планке. Тогда пальцы получают наибольшую свободу передвижения.

Не следует высоко поднимать запястья и выгибать кисти - это может стать причиной боли в руках и онемения пальцев. Можно надевать легкие перчатки без пальцев, Если стынут руки.

Колени должны располагаться на уровне бедер или немного ниже. При таком положении ног не возникает напряжение мышц.

Нельзя скрещивать ноги, класть ногу на ногу - это нарушает циркуляцию крови из-за сдавливания сосудов. Лучше держать обе стопы на подставке или на полу. Необходимо сохранять прямой угол (90°) в области локтевых, тазобедренных, коленных и голеностопных суставов.

2.3 Дыхание и расслабление мышц

Во время работы за компьютером необходимо:

дышать ритмично, свободно, глубоко, чтобы обеспечить кислородом все части тела;

держат в расслабленном состоянии плечи и руки - в руках не будет напряжения, если плечи опущены;

чаще моргать и смотреть вдаль. Моргание способствует не только увлажнению и очищению поверхности глаз, но и расслаблению лицевых, лобных мышц (без сдвигания бровей). Малая подвижность и длительное напряжение глазных мышц могут стать причиной нарушения аккомодации.

При ощущении усталости какой-либо части тела необходимо сделать глубокий вдох и сильно напрячь уставшую часть тела, после чего задержать дыхание на 3-5 секунды и на выдохе расслабиться; можно повторить.

При ощущении усталости глаз нужно в течение 2-3 мин окинуть взглядом комнату, устремлять взгляд на разные предметы, смотреть вдаль (в окно).

Если резко возникло общее утомление, появилось дрожание изображения на экране дисплея (покачивание, подергивание, рябь), следует сообщить об этом руководителю.

2.4 Вредные факторы при работе с ЭВМ:

- Негативное влияние на зрение – зрительная система человека приспособлена для восприятия объектов в отраженном свете (картин природы, рисунков, печатных текстов и т.д.), а не для работы с дисплеем. Изображение на дисплее принципиально отличается от привычных глазу объектов наблюдения – оно светится, состоит из дискретных точек; оно мерцает, т.е. эти точки с определенной частотой зажигаются и гаснут; цветное компьютерное изображение не соответствует естественным цветам. При работе за компьютером часами у глаз не бывает необходимых фаз расслабления, глаза напрягаются, их работоспособность снижается.

- Микротравма – это постепенный износ организма в результате ежедневных нагрузок. Большинство нарушений в организме происходит из-за накапливающихся микротравм.

- Заболевания, вызванные повторяющимися нагрузками: повторяющиеся действия приводят к накоплению продуктов распада в мышцах. Эти продукты и вызывают болезненные ощущения

- Неудобное сидячее положение, что приводит к неправильной осанке, сутулости.

- Умственное перенапряжение.
- Эмоциональные перегрузки.
- Монотонность труда.