

УДК 621.385.69

**СУММАТОР СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА НА
ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТАХ ДЛЯ МОЩНОГО
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЕРЕДАТЧИКА****Платошин Владимир Олегович,**студент МГТУ им. Н.Э. Баумана г. Москва
platoshinvo@student.bmstu.ru**Андреев Владимир Викторович,**д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана г. Москва
vladimir_andreev@bmstu.ru**Аннотация**

В статье представлены результаты моделирования и исследования влияния номиналов пассивных компонентов на амплитудно-частотную характеристику полосовых фильтров сверхвысококачастотного сигнала. Осуществлен подбор номиналов компонентов для изготовления широкополосного сверхвысококачастотного сумматора для работы в диапазоне частот 650-1150 МГц и описана работа данного устройства в составе согласованного антенно-фидерного тракта мощного сверхвысококачастотного передатчика. Приведены наиболее значимые преимущества использования пассивных компонентов в сверхвысококачастотных фильтрах.

Ключевые слова: полосовой фильтр, смесители сигналов, СВЧ-диапазон, моделирование, пассивные элементы, амплитудно-частотные характеристики.

**PASSIVE COMPONENT UHF SIGNAL COMBINER FOR HIGH POWER UHF
TRANSMITTER****Platoshin Vladimir Olegovich,**student of the KF Bauman Moscow State Technical University Kaluga
platoshinvo@student.bmstu.ru**Andreev Vladimir Viktorovich,**Professor at the Bauman Moscow State Technical University of Kaluga
vladimir_andreev@bmstu.ru**ABSTRACT**

The article presents the results of work on modeling and investigating the effect of passive component ratings on the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of bandpass filters of an ultrahigh-frequency signal. The selection of component ratings for the manufacture of

a broadband UHF frequency adder for operation in the frequency range of 650-1150 MHz has been carried out and the operation of this device as part of a coordinated antenna-feeder path of a powerful UHF transmitter is described. The most significant advantages of using passive components in ultrahigh-frequency filters are given.

Keywords: bandpass filter, signal mixers, microwave range, modeling, passive elements, amplitude-frequency characteristics.

Введение

Разработка мощных сверхвысокочастотных (СВЧ) передатчиков является актуальной задачей в связи с их широким применением в спутниковой связи, радиолокации и телекоммуникациях [1, 2]. Одной из основных проблем при разработке мощных сверхвысокочастотных передатчиков является создание согласованного антенно-фидерного тракта. Однако создание таких устройств сопряжено с рядом проблем, включая высокие тепловые нагрузки, нелинейные эффекты в элементах схемы и сложности обеспечения стабильности параметров при высокой мощности [3]. Эти проблемы требуют комплексного подхода к проектированию и использованию современных технологий [4].

Для повышения надежности мощного сверхвысокочастотного передатчика при его разработке обычно используется высоконадежная элементная база, способная работать в различных критических режимах [5]. В качестве такой базы могут выступать пассивные компоненты, такие как конденсаторы, индуктивности и резисторы [6]. Материалы с низкими диэлектрическими потерями, такие как керамика и ферриты, позволяют минимизировать потери энергии на высоких частотах [7]. Современные технологии производства, включая тонкопленочные и толстопленочные методы, обеспечивают высокую точность параметров компонентов [8]. Однако важно учитывать правильное согласование пассивных элементов для предотвращения паразитных резонансов и потерь [9].

Таким образом при создании мощных сверхвысокочастотных передатчиков особое внимание следует уделять разработке согласованного антенно-фидерного тракта. Несогласованность в тракте приводит к потерям мощности, стоячим волнам и перегреву элементов [10]. Оптимизация тракта, обеспечивающая минимальные потери и максимальную передачу энергии, является критически важной задачей. Это требует тщательного моделирования, расчета и применения современных методов тестирования.

В данной работе проведена разработка и выполнено исследование сумматора сверхвысокочастотного сигнала, ширина полосы которого лежит в пределах 650-1150 МГц. Данный сумматор предназначен для фильтрации и объединения трех сверхвысокочастотных сигналов и их дальнейшей передачи по общему кабелю от трех источников к излучающей антенне. Он должен обеспечивать высокую надежность и иметь невысокую стоимость. Разработанный сумматор представляет собой три фильтра на пассивных элементах, каждый из которых имеет свой вход и предназначен для работы в диапазонах 600-800 МГц, 800-1000 МГц, 1000-1200 МГц для получения необходимой полосы пропускания на каждой ветке. Затем сигналы с каждой ветки фильтра суммируются и подаются на общий выход для дальнейшей передачи в излучающую антенну. В результате на выходе гарантированно осуществляется фильтрация сигнала в диапазоне 650-1150 МГц.

Для фильтрации сигналов в каждом требуемом диапазоне используются пассивные фильтры пятого порядка. Конструкция фильтров на пассивных компонентах выбрана с учетом входных данных, требующих обеспечить работу устройства с тремя источниками

сигнала разных диапазонов и высокую надежность устройства, а также экономической целесообразности. Фильтры на пассивных компонентах дешевле и надежнее их аналогов, построенных на активных компонентах. Фильтры пятого порядка имеют более высокие коэффициенты затухания и передачи, что делает их более предпочтительным для работы в заданных условиях, так как повышается его избирательность и уменьшаются вносимые потери.

Для моделирования и осуществления анализа использована среда Multisim [11].

К основным характеристикам сверхвысокочастотных фильтров относятся амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ) [2]. Для построения анализа данных характеристик использован инструмент AC Analysis в среде NI Multisim. Схема фильтра пятого порядка, построенная для анализа влияния номиналов компонентов на АЧХ фильтра представлена на рисунке 1.

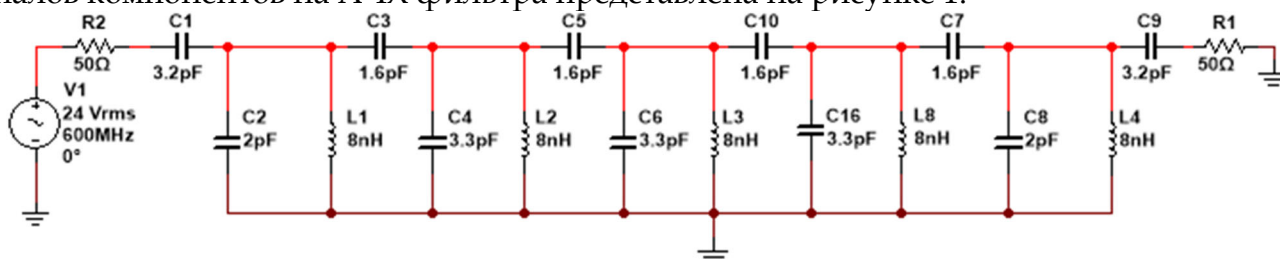


Рис. 1. Схема полосового фильтра 5-го порядка для анализа влияния номиналов компонентов на его АЧХ.

Анализ заключается в поочередном уменьшении и увеличении номиналов компонентов и сравнении характеристик, полученных с использованием инструмента AC Analysis. Ширина полосы пропускания определяется по уровню ослабления -3 дБ.

АЧХ и ФЧХ представленного фильтра пятого порядка приведена на рисунке 2.

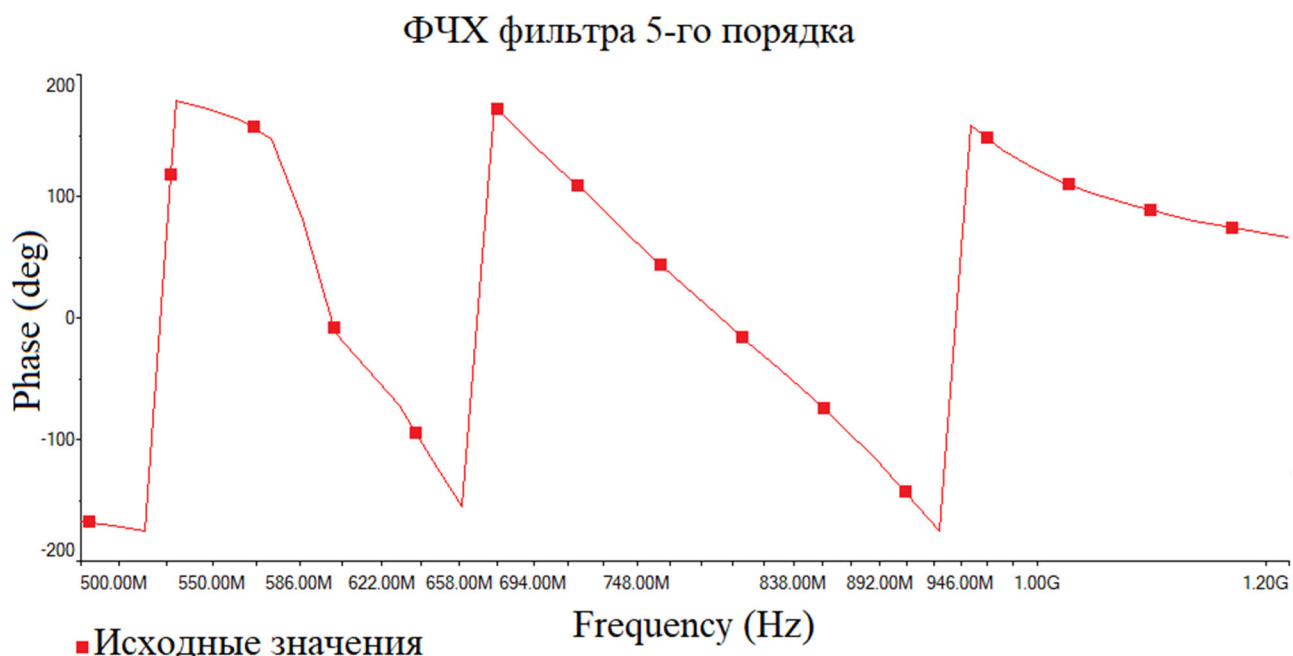
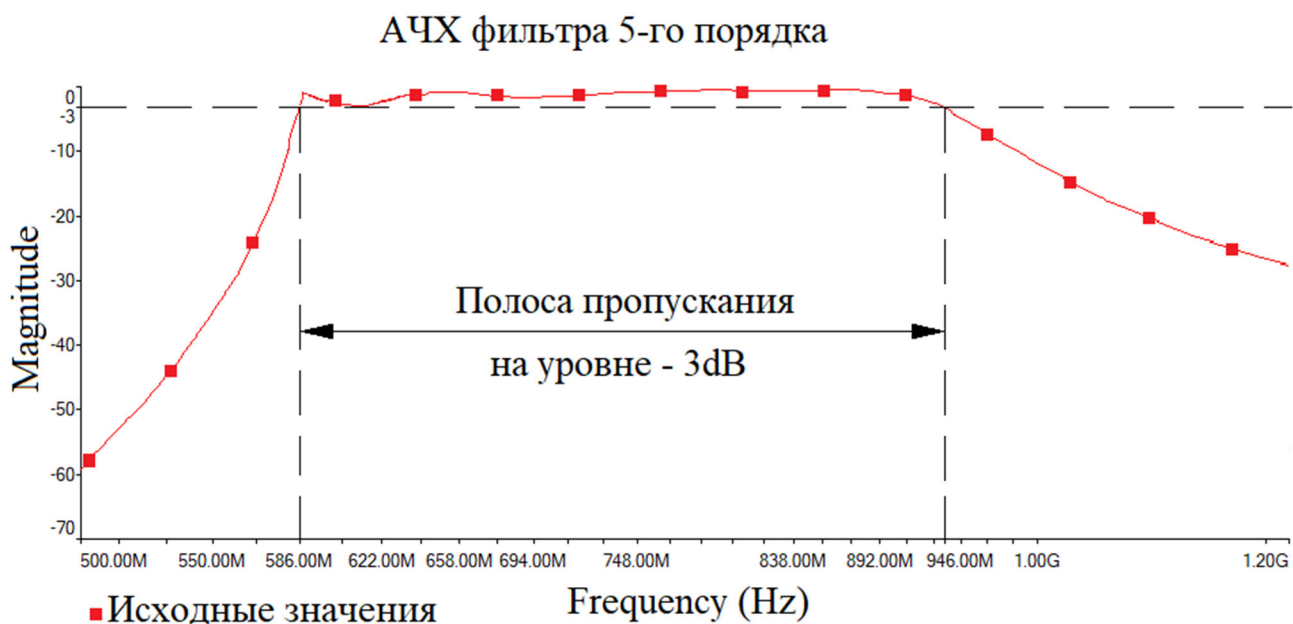


Рис.2. АЧХ и ФЧХ фильтра 5-го порядка

Наибольший интерес для анализа представляет изменение АЧХ фильтра пятого порядка, происходящие при изменении значений различных номиналов компонентов.

Увеличение или уменьшение номиналов компонентов L1, L2, L3, L4, L8 в соответствии с таблицей 1 приводит к смещению полосы пропускания фильтра влево или вправо соответственно. Полученные АЧХ представлены на рисунке 3.

Таблица 1

Обозначение компонента	Начальное значение номинала	Увеличенное значение номинала	Уменьшенное значение номинала
L1, L2, L3, L4, L8	8 нГн	14 нГн	5 нГн

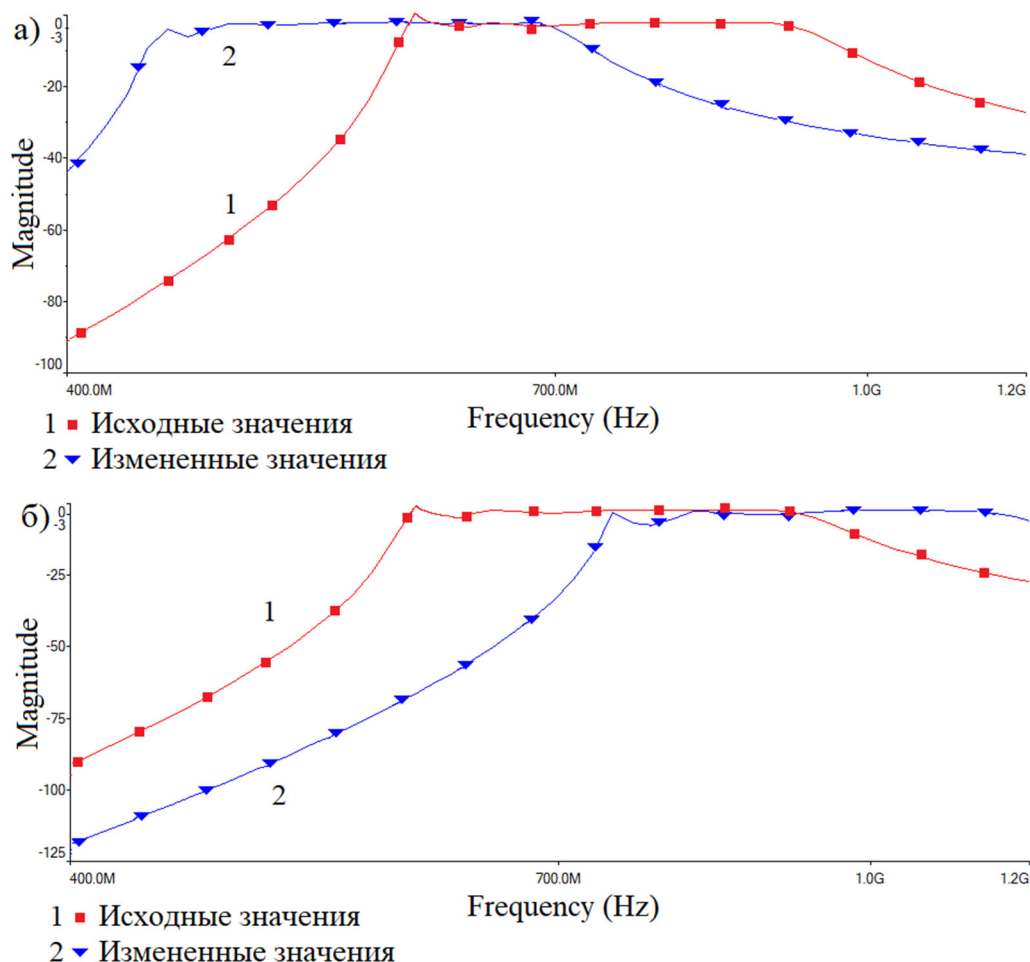


Рис.3. АЧХ LC-фильтра 5-го порядка с увеличенными (а) и уменьшенными (б) номиналами индуктивностей L5, L6, L7, L9, L10 в сравнении с начальными значениями номиналов

Увеличение или уменьшение номиналов компонентов C1, C9 влияют на согласование фильтра, что выражается в искривлении полосы пропускания и ее нестабильности в случае неправильного подбора номиналов. Также на согласование оказывают влияние номиналы конденсаторов C2, C8. Изменение АЧХ фильтра при изменении номиналов компонентов представлено на рисунке 4

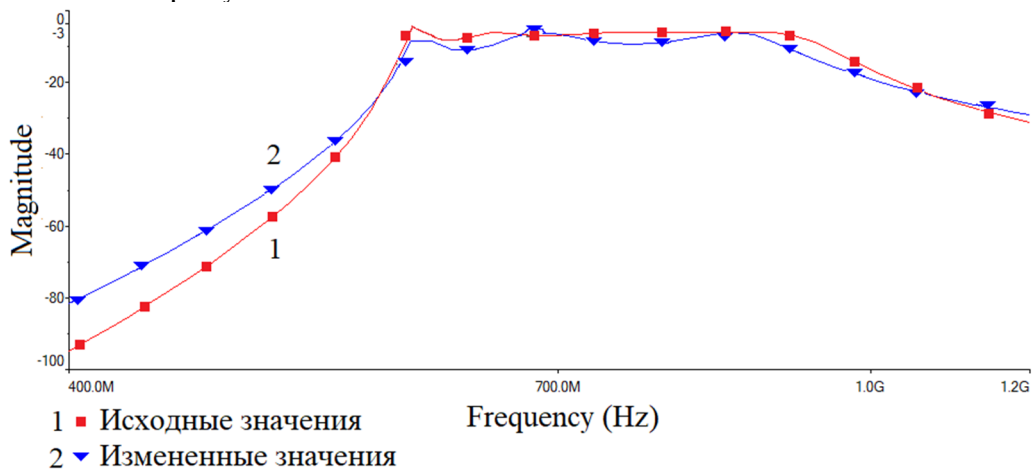


Рис.4. АЧХ LC-фильтра 5-го порядка с измененными номиналами конденсаторов C1, C9 в сравнении с начальными значениями номиналов

Как видно из рисунка 4, изменение номиналов данных конденсаторов привело к рассогласованию фильтра.

Номиналы конденсаторов С3, С5, С7, С10 влияют на ширину полосы пропускания. При увеличении номиналов данных конденсаторов ширина полосы пропускания увеличивается, при уменьшении – уменьшается. При этом наблюдается рассогласование фильтра и ухудшение крутизны спада АЧХ как при уменьшении, так и при увеличении указанных номиналов. АЧХ при изменении номиналов указанных компонентов в соответствии с таблицей 2 представлены на рисунке 5.

Таблица 2

Обозначение компонента	Начальное значение номинала	Увеличенное значение номинала	Уменьшенное значение номинала
С3, С5, С7, С10	1,6 пФ	4 пФ	0,5 пФ

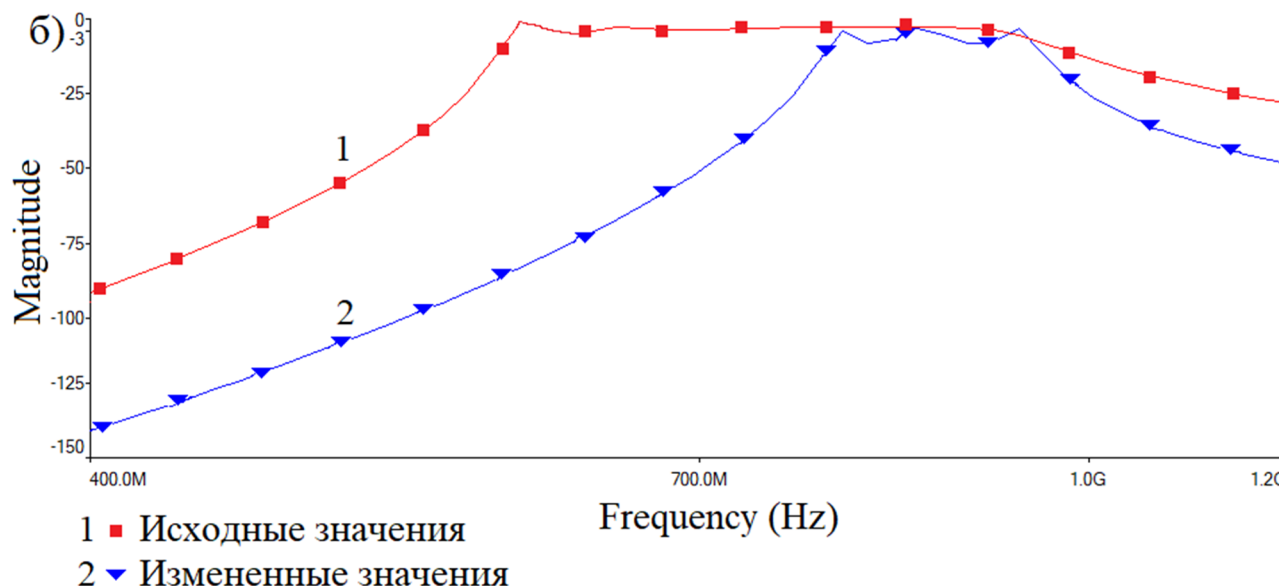
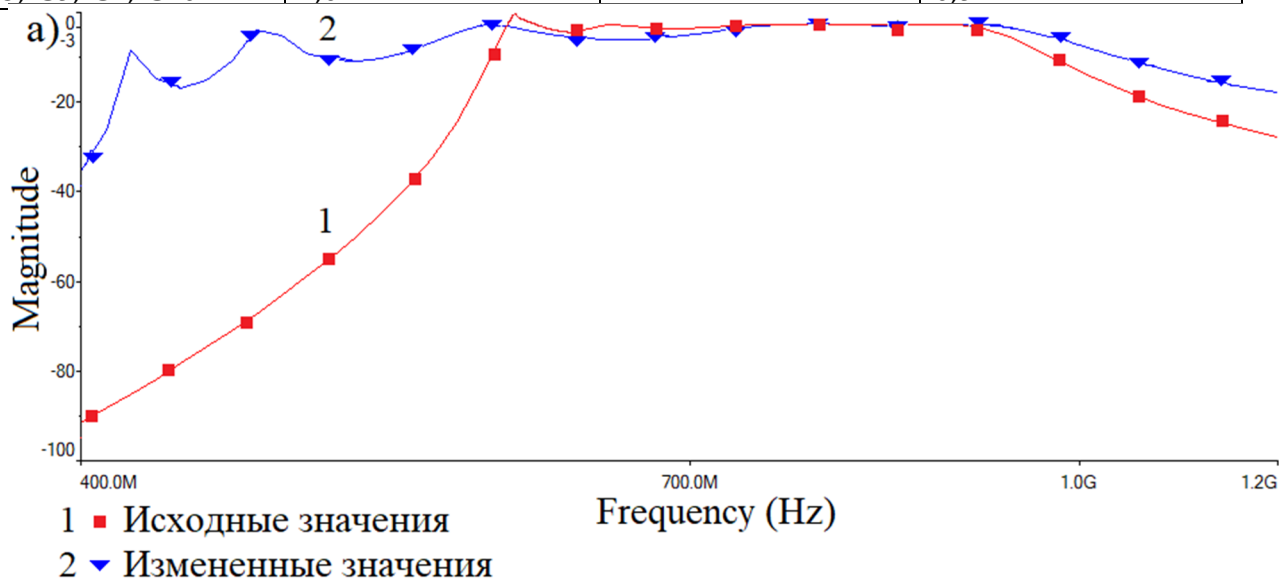


Рис.5. АЧХ LC-фильтра 5-го порядка с увеличенными (а) и уменьшенными (б) номиналами индуктивностей С3, С5, С7, С10 в сравнении с начальными значениями номиналов

Изменение номиналов конденсаторов С4, С6, С16 приводит к смещению характеристик при увеличении влево, а при уменьшении – право. Также наблюдается рассогласование фильтра при значительном изменении номиналов. Результаты сравнения представлены в таблице 3 и на рисунке 6.

Таблица 3

Обозначение компонента	Начальное значение номинала	Увеличенное значение номинала	Уменьшенное значение номинала
C4, C6, C16	3,3 пФ	5 пФ	1,5 пФ

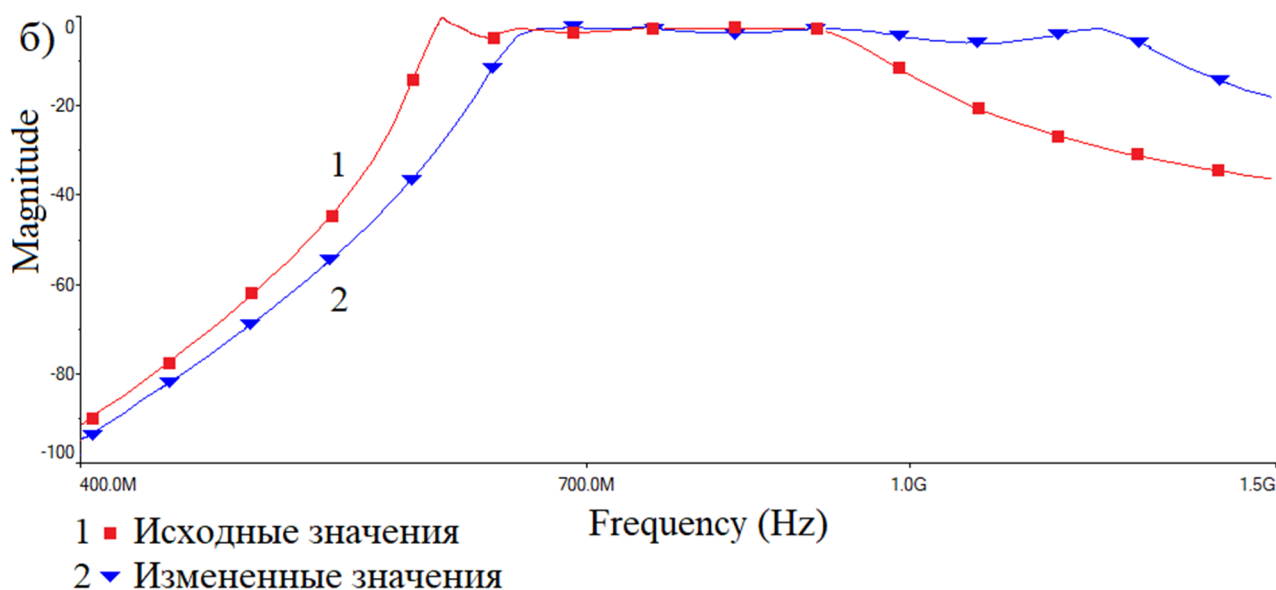
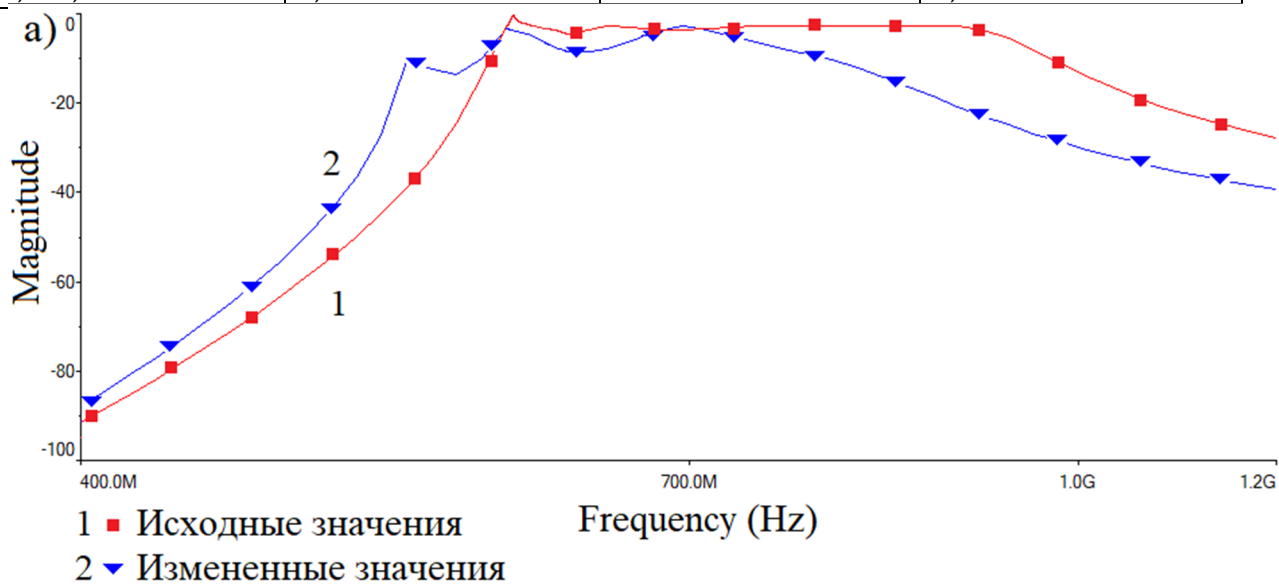


Рис.6. АЧХ LC-фильтра 5-го порядка с увеличенными (а) и уменьшенными (б) номиналами индуктивностей C3, C5, C7, C10 в сравнении с начальными значениями номиналов

Экспериментально установлено, что изменение номиналов остальных компонентов не оказывают значительного влияния на характеристики фильтра.

В соответствии с проведенным анализом выявлены закономерности влияния компонентов фильтра на его характеристики и разработан широкополосный полосовой сумматор. Для согласования на вход и выход фильтров подключены нагрузки 50 Ом. Для симуляции сигналов в диапазонах 600-800 МГц, 800-1000 МГц, 1000-1200 МГц использованы источники AC_POWER. При последующей сборке устройства настройка на диапазон каждого фильтра осуществляется перемещением "холодного" конца катушек вправо-влево относительно заданного маркировкой на плате. Схема электрическая принципиальная разработанного устройства представлена на рисунке 7.

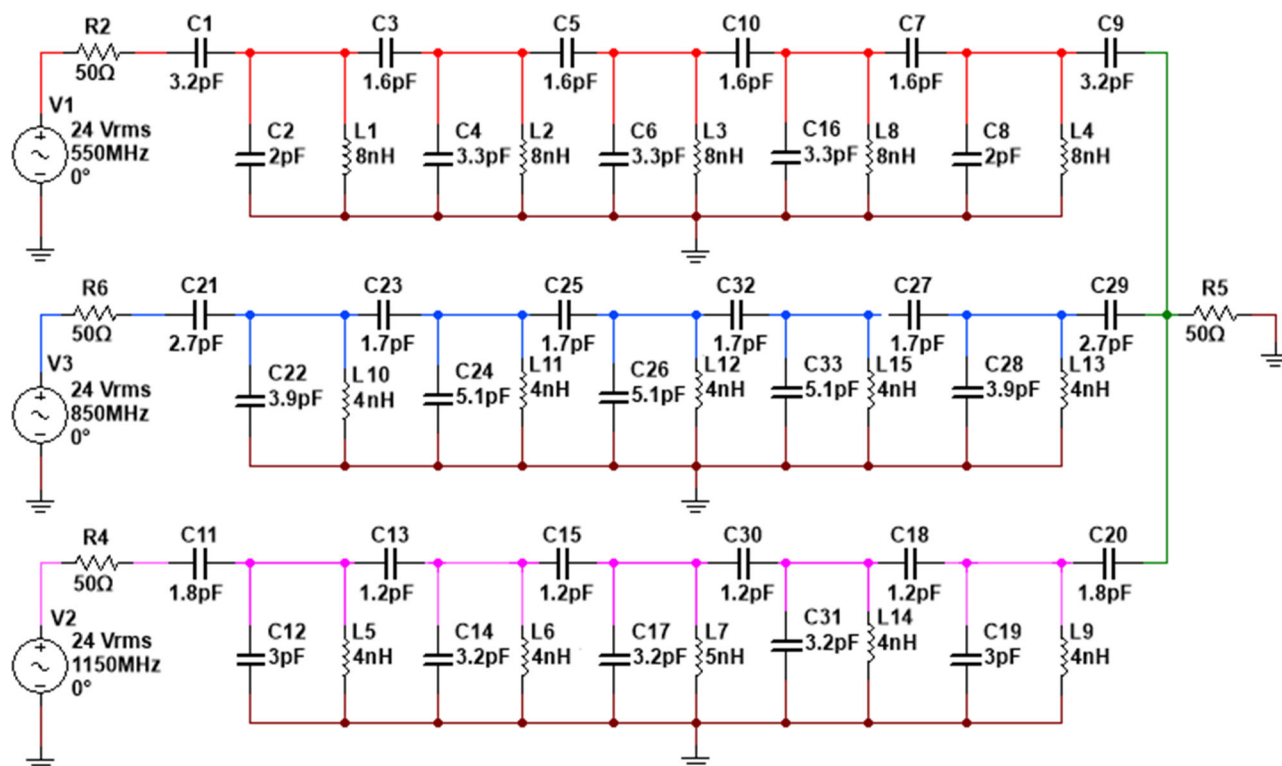


Рис.7. Схема электрическая принципиальная пассивного сумматора сверхвысокочастотного сигнала в диапазоне частот 650-1150 МГц в среде NI Multisim

Номиналы пассивных элементов подобраны с целью получения наиболее оптимальной полосы пропускания и угла спада амплитудно-частотных характеристик каждой фильтрующей ветки сумматора. Подобранные номиналы представлены в таблице 4.

Таблица 4

Первый фильтр 600-800 МГц		Второй фильтр 800-1000 МГц		Третий фильтр 1000-1200 МГц	
C1	3,2 пФ	C21	2,7 пФ	C11	1,8 пФ
C2	2 пФ	C22	3,9 пФ	C12	3 пФ
C3	1,6 пФ	C23	1,7 пФ	C13	1,2 пФ
C4	3,3 пФ	C24	5,1 пФ	C14	3,2 пФ
C5	1,6 пФ	C25	1,7 пФ	C15	1,2 пФ
C6	3,3 пФ	C26	5,1 пФ	C17	3,2 пФ
C7	1,6 пФ	C27	1,7 пФ	C18	1,2 пФ
C8	2 пФ	C28	3,9 пФ	C19	3 пФ
C9	3,2 пФ	C29	2,7 пФ	C20	1,8 пФ
C10	1,6 пФ	C32	1,7 пФ	C30	1,2 пФ
C16	3,3 пФ	C33	5,1 пФ	C31	3,2 пФ
L1	8 нГн	L10	4 нГн	L5	4 нГн
L2	8 нГн	L11	4 нГн	L6	4 нГн
L3	8 нГн	L12	4 нГн	L7	5 нГн
L4	8 нГн	L13	4 нГн	L9	4 нГн
L8	8 нГн	L15	4 нГн	L14	4 нГн

АЧХ каждого фильтра сумматора представлены на рисунке 8.

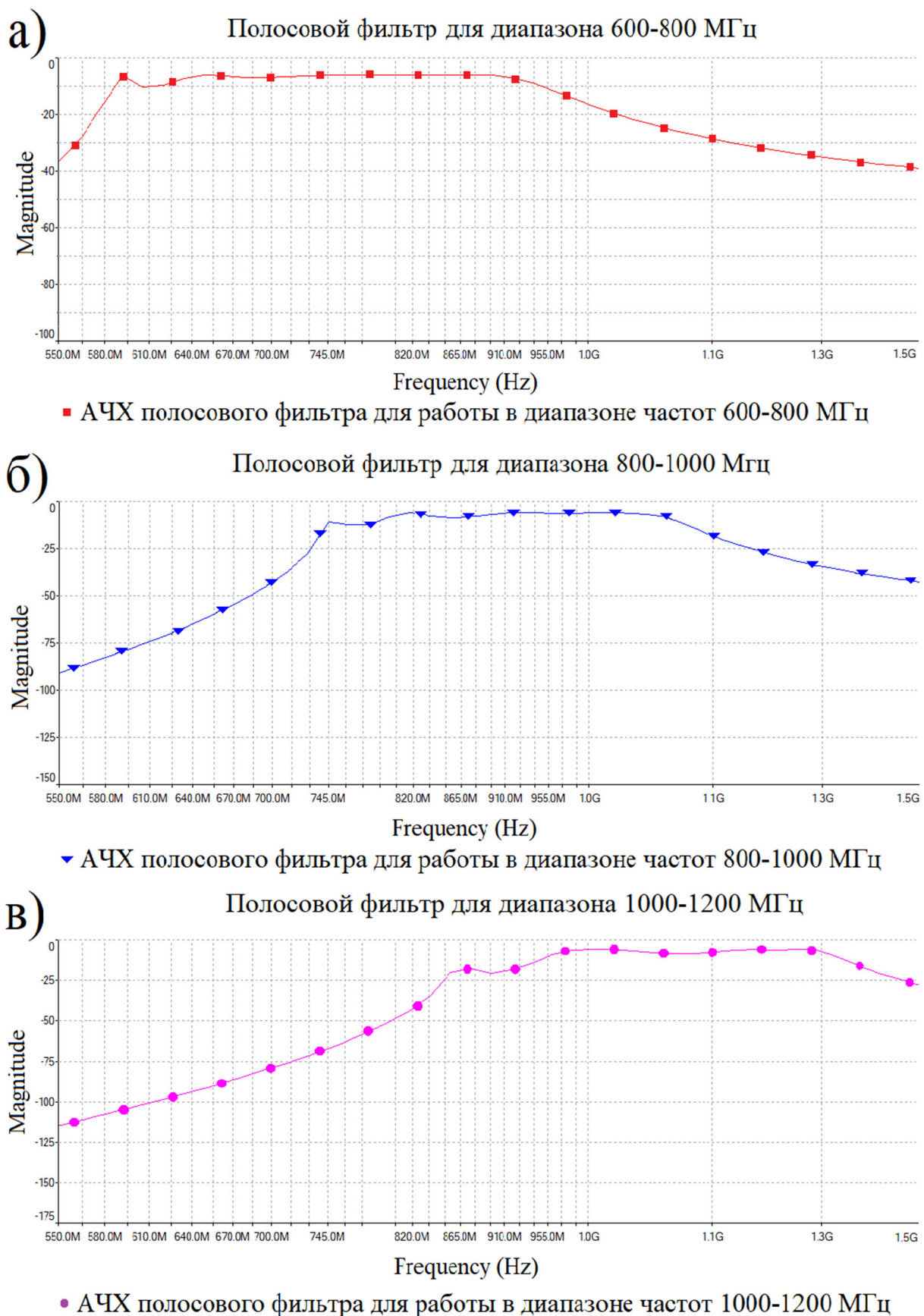
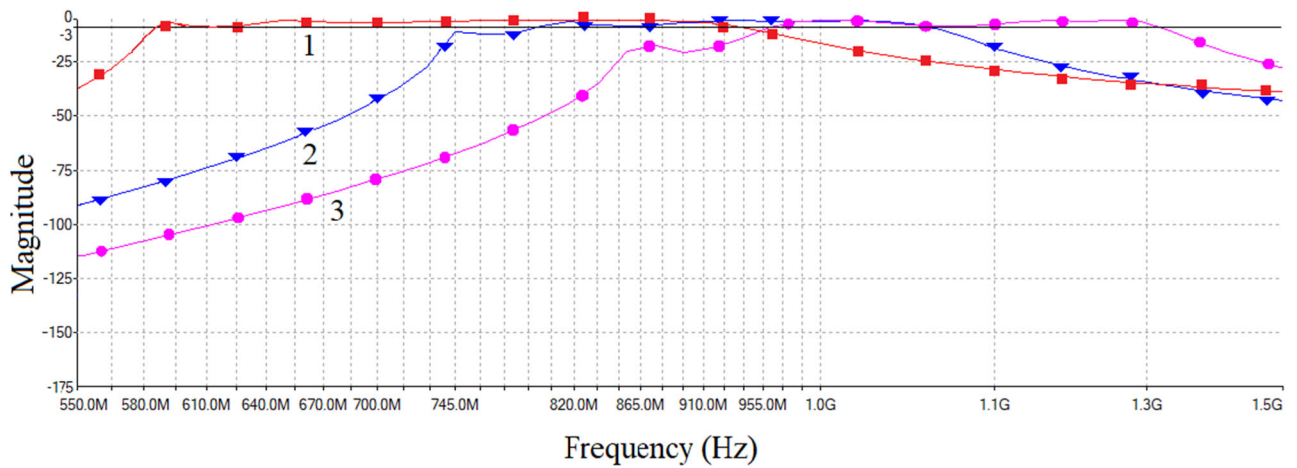


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики полосовых фильтров пятого порядка для диапазонов частот 600-800 МГц (а), 800-1000 МГц (б), 1000-1200 МГц (в)

При суммировании сигналов каждой ветки полосы пропускания фильтров накладываются друг на друга, что приводит к образованию широкой полосы пропускания

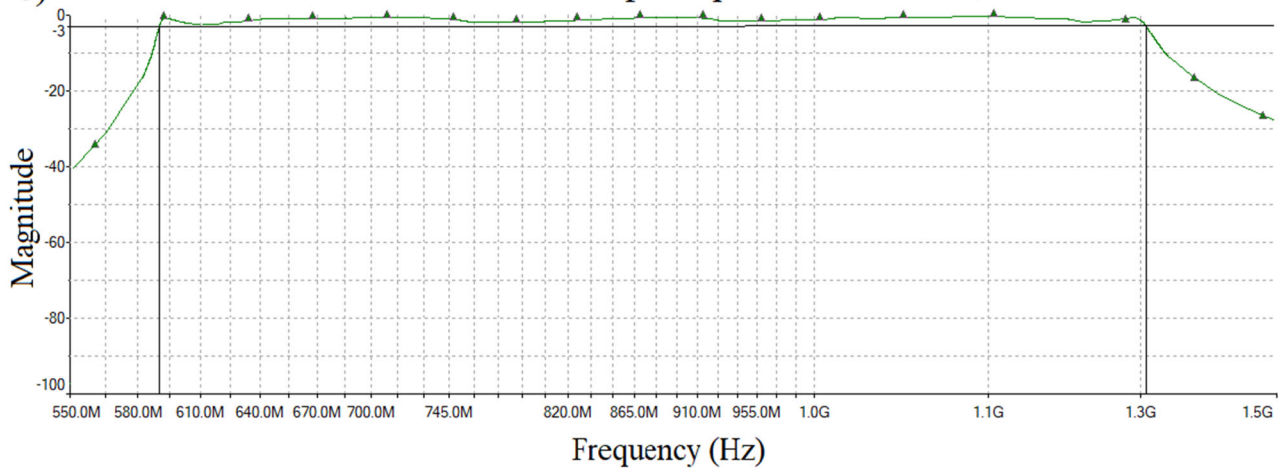
в необходимом диапазоне. АЧХ и ФЧХ сумматора представлены на рисунке 9 и 10 соответственно.

а) АЧХ полосовых фильтров 600-800 МГц, 800-1000 МГц, 1000-1200 МГц



- 1 ■ АЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 600-800 МГц
- 2 ▼ АЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 800-1000 МГц
- 3 ● АЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 1000-1200 МГц

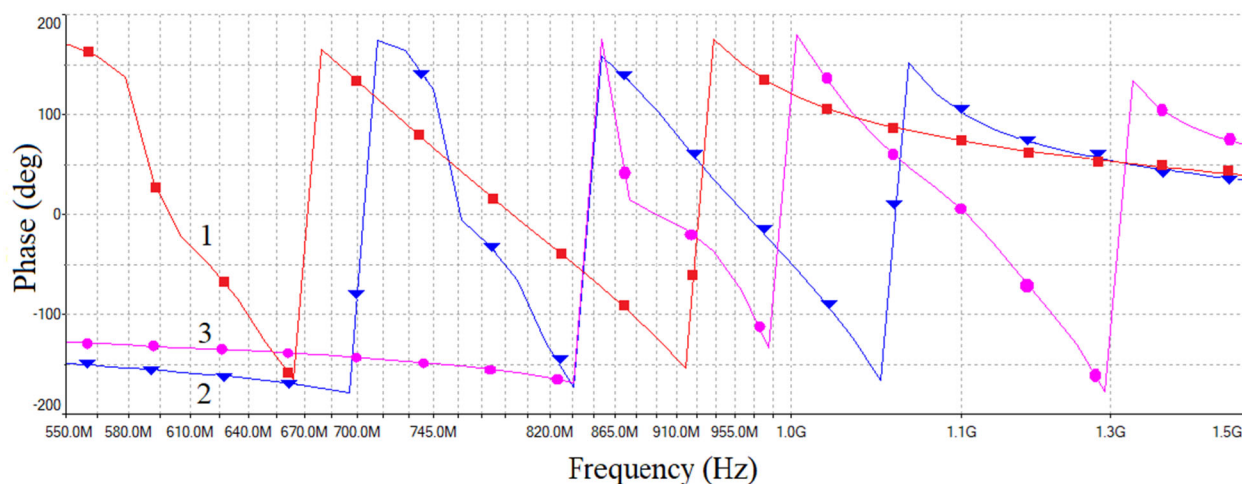
б) АЧХ полосового фильтра 600-1200 МГц



- ▲ АЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 600-1200 МГц

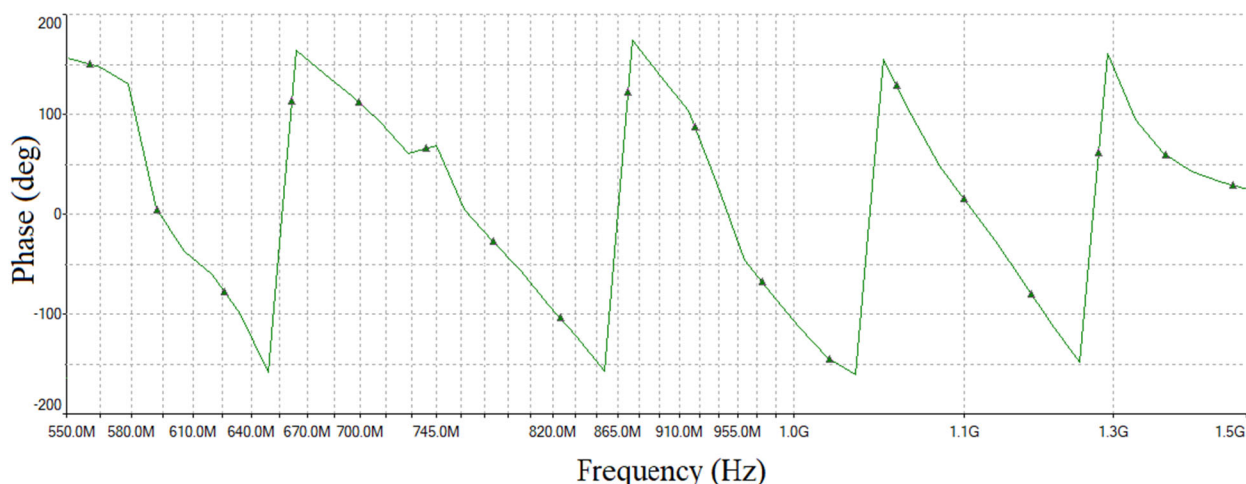
Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики СВЧ-сумматора в диапазоне частот 650-1150 МГц до суммирования сигналов на выходе (а) и после суммирования на выходе (б)

а) ФЧХ полосовых фильтров 600-800 МГц, 800-1000 МГц, 1000-1200 МГц



- 1 ■ ФЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 600-800 МГц
 2 ▼ ФЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 800-1000 МГц
 3 ● ФЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 1000-1200 МГц

б) ФЧХ полосового фильтра 600-1200 МГц



- ▲ ФЧХ полосового фильтра для работы в диапазоне частот 600-1200 МГц

Рис. 10. Фазо-частотные характеристики СВЧ-сумматора в диапазоне частот 650-1150 МГц до суммирования сигналов на выходе (а) и после суммирования на выходе (б)

Выводы

Таким образом, было спроектировано устройство, удовлетворяется всем заданным требованиям. По результатам моделирования, представленный сумматор обладает требуемой шириной полосы пропускания по уровню -3дБ. Он имеет низкую стоимость и высокую надежность благодаря использованию пассивных компонентов, удобную подстройку каждой фильтрующей ветки при сборке для достижения работы в необходимой полосе пропускания. Приведены основные преимущества использования пассивных компонентов в конструкции сверхвысокочастотных фильтров.

Список литературы:

1. Андреев Д.В., Андреев В.В., Кононова М., Попов А.И. Методика инжекции электронов в сильном поле для тестирования диэлектриков затвора МДП-устройств

- на уровне подложек // Технологии, 2024, Том 12, С.102(1-10)
<https://doi.org/10.3390/technologies12070102>
2. Эндрюс Д. Квадратурные гибриды с сосредоточенными элементами// Artech House - 2006 - 231 стр.
 3. Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Исследование зарядовой деградации МДП-структур в сильном электрическом поле методом управляемой токовой нагрузки // Российская микроэлектроника. 2000. Том 29. № 2. с. 97-103. <https://doi.org/10.1007/BF02773241>
 4. Кузнецов В.В., Андреев В.В. Импульсная установка линии передачи для контроля надежности полупроводниковых приборов при электростатическом разряде // Приборы и экспериментальная техника, 2024, т. 67, № 2, с. 268-273. <https://doi.org/10.1134/S0020441224700453>
 5. Драч В. Е., Кондрашов П. В., Саввин М. А. Анализ конструкции фильтра для подавления помех с помощью компьютерного моделирования. Электромагнитные волны и электронные системы. - 2021. - Т. 26, № 1. - С. 71-79.
 6. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., Столяров А.А. Модификация тонких оксидных пленок МОП-структуры инжекцией и облучением в сильном поле // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. 2016. Том 110. С. 012041(1-6). DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012041
 7. Абрамов А.Н. т др. Смесители СВЧ с фазовым подавлением зеркального канала в гибридно-интегральном исполнении/ А.Н. Абрамов, А.С. Астахов, В.П. Камишкерцев, Д.А. Усанов// Москва: ЦНИИ «Электроника» - 1989. - Серия 1. Электроника СВЧ. Выпуск 5. - 50 с.
 8. Щелкунов Г.П., Симановский М. Передвижные таможенные комплексы. Новые средства рентгеноскопии. - Электроника: НТБ, 1999, №6, с.32-34.
 9. Щелкунов Г.П. Группа новых СВЧ-приборов для генерации рентгеновского излучения и их применение. - Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника, 2007, вып.1, с.93-97
 10. Фомичев К., Юдин Л. Электромагнитное оружие (перспективы применения в информационной борьбе). - Электроника: НТБ, 1999, вып.6, с.40-45
 11. В. П. Дьяконов MATLAB 6.5 SP 1/7 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. Москва. Изд-во СОЛОН-Пресс, 2009.

References:

1. Andreev D.V., Andreev V.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of High-Field Electron Injection for Wafer-Level Testing of Gate Dielectrics of MIS Devices// Technologies, 2024, Vol.12, P.102(1-10) <https://doi.org/10.3390/technologies12070102>
2. Andrews D. Lumped Element Quadrature Hybrids// Artech House - 2006 - 231p
3. Andreev V.V., Baryshev V.G., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Shakhnov V.A. The investigation into charge degradation of MIS structures under strong electric field by a method of controlled current load // Russian Microelectronics. 2000. Vol. 29. № 2. С. 97-103. <https://doi.org/10.1007/BF02773241>

4. Kuznetsov V.V., Andreev V.V. Transmission Line Pulse Setup for Electrostatic Discharge Robustness Testing of the Semiconductor Devices // Instruments and Experimental Techniques, 2024, Vol. 67, No. 2, pp. 268–273. <https://doi.org/10.1134/S0020441224700453>
5. Drach V. E., Kondrashov P. V., Savvin M. A. Analysis of the filter design for interference suppression using computer modeling. Electromagnetic waves and electronic systems. - 2021. - Vol. 26, No. 1. - pp. 71-79.
6. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modification of thin oxide films of MOS structure by high-field injection and irradiation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 110. P. 012041(1-6). DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012041
7. Abramov A.N. et al. Microwave mixers with phase suppression of the mirror channel in hybrid-integral design/ A.N. Abramov, A.S. Astakhov, V.P. Kamishkertsev, D.A. Usanov// Moscow: Central Research Institute of Electronics - 1989. – Series 1. Microwave electronics. Issue 5. - 50 p.
8. Shchelkunov G.P., Simanovsky M. Mobile customs complexes. New means of fluoroscopy. – Electronics: NTB, 1999, No. 6, pp.32-34.
9. Shchelkunov G.P. A group of new microwave devices for X-ray generation and their application. – Electronic equipment. Ser.1. Microwave technology, 2007, issue 1, pp.93-97
10. Fomichev K., Yudin L. Electromagnetic weapons (prospects of application in information warfare). – Electronics: NTB, 1999, issue 6, pp.40-45
11. V. P. Dyakonov MATLAB 6.5 SP 1/7 + Simulink 5/6. Signal processing and filter design. Moscow. SOLON Press Publishing House, 2009.