

dissertation. – Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005. – 259 p.

2. Ромащенко М.А. Эквивалентная модель силового контура AC/DC-преобразователя для схемотехнического анализа кондуктивных помех / М.А. Ромащенко, А.В. Гудков // Доклады ТУСУР. – 2025. – Т. 28, № 2. – С. 62–69.

3. Anslow R. How to get the best results using LTspice for EMC simulation. – Part 1, November 2021 / R. Anslow, S. Le Bras [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/how-to-get-the-best-results-using-ltspice-part-1.html> (дата обращения: 28.06.2025).

УДК 621.396

РАЗРАБОТКА КВАЗИНЕОТРАЖАЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ ФНЧ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

М.Е. Юнеман, студент ПИШ;

И.А. Иванцов, аспирант каф. СВЧиКР

Научный руководитель Е. Жечев, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, tyuneman@bkk.ru

Разработаны и исследованы квази-неотражающие звенья фильтра нижних частот (ФНЧ). Для этого выполнено их предварительное схемотехническое моделирование, трассировка на диэлектрической подложке из материала «Поликор», полноволновое моделирование и измерения на зондовой станции.

Ключевые слова: ФНЧ, поликор, СВЧ, частотные характеристики.

Стремительное развитие радиоэлектронных средств требует создания эффективных фильтров, способных обеспечить высокую избирательность и минимальные потери. Интегральная реализация таких фильтров обладает рядом преимуществ, среди которых можно выделить их компактность, надежность и возможность массового производства, что актуально в условиях растущего рынка электронных компонентов.

Фильтры неотражающего типа относятся к распространенному классу. Их ключевой особенностью является поглощение энергии в полосе заграждения и способность не отражать эту энергию обратно в источник [1].

Для разработки опытных образцов монолитных фильтров выбрана технология на основе материала «Поликор» (оксид алюминия Al_2O_3). Её преимуществом является сравнительно низкая стоимость запуска в сравнении с технологиями на основе арсенида (GaAs) или нитрида галлия (GaN).

Для исследования выбраны звенья фильтра нижних частот (ФНЧ). Звенья имеют П-образную форму и состоят из семи элементов. При этом элементы $C1$, $L1$, $C2$ образуют отражающую цепь, а элементы $R1$, $R2$, $R3$, $C3$ – поглощающую. За счет добавления поглощающей цепи в полосах пропускания и заграждения обеспечивается неотражающая характеристика.

Выполнено предварительное схемотехническое моделирование звеньев. Принципиальная схема показана на рис. 1, а [2], а номиналы элементов – в таблице. Номиналы элементов выбраны в соответствии с ограничениями используемой технологии: доступны только встречно-штыревые конденсаторы с относительно низкой ёмкостью.

На рис. 1, б, в представлены частотные характеристики, полученные в результате предварительного схемотехнического моделирования ФНЧ1 и ФНЧ2.

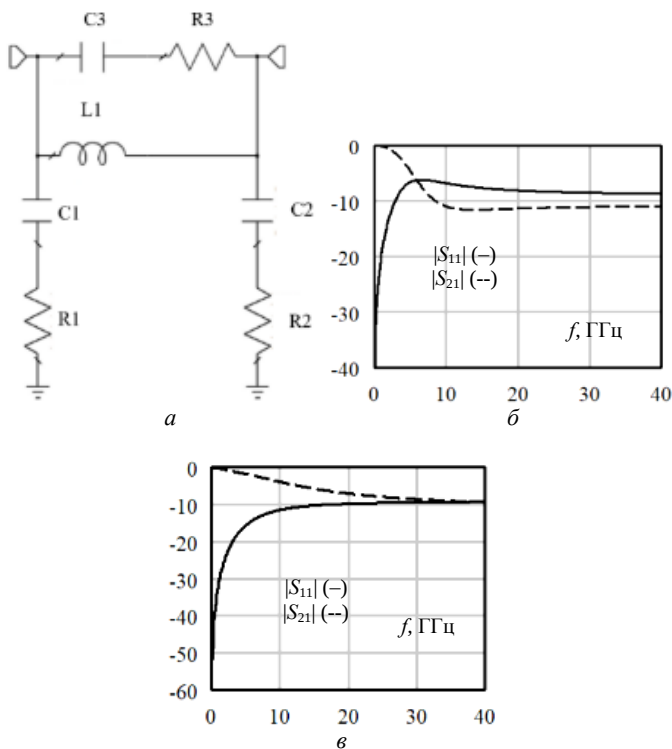


Рис. 1. Принципиальная схема звеньев (а) и частотные зависимости S -параметров ФНЧ1 (б) и ФНЧ2 (в), полученные в результате моделирования

Номиналы элементов ФНЧ1 и ФНЧ2

	ФНЧ1	ФНЧ2
$L1$, нГн	2,346	0,7591
$C1$, пФ	0,1667	0,232
$R1$, Ом	239	227,9
$C2$, пФ	0,1325	0,232
$R2$, Ом	209,4	237,6
$C3$, пФ	0,1325	0,232
$R3$, Ом	149,8	149,5

Схема трассировки фильтров показана на рис. 2. Фильтры выполнены из встречно-штыревых конденсаторов, пленочных резисторов и спиральных квадратных катушек индуктивности, реализованных по двухуровневой схеме. Основная спираль катушки реализована на верхнем слое металлизации, в ее центре расположено переходное металлизированное отверстие, обеспечивающее переход на нижний слой металлизации. На нижнем слое сформирован мост, который связан со вторым переходным отверстием, расположенным вне основной спирали. Размеры ФНЧ1 составили $1224,5 \times 830$ мкм², а ФНЧ2 – $1214,5 \times 1167$ мкм².

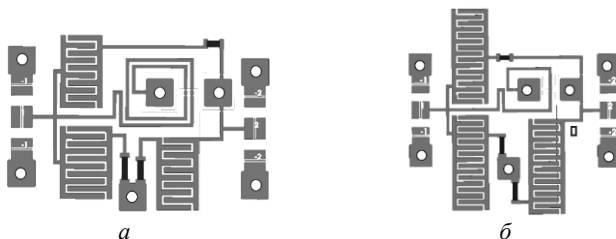


Рис. 2. Трассировка звеньев ФНЧ1(*а*) и ФНЧ2(*б*)

Выполнены полноволновое моделирование и зондовые измерения макетов фильтров. Моделирование выполнено с помощью 2.5D метода моментов. Эксперимент выполнен на базе измерительной установки (рис. 3, *а*), состоящей из зондовой станции, векторного анализатора цепей (ВАЦ) и персонального компьютера (ПК). На рис. 3, *б, в* показаны вычисленные и измеренные частотные зависимости S -параметров для ФНЧ1 и ФНЧ2.

Для ФНЧ1 частота среза по уровню –3 дБ по результатам моделирования составила 4,827 ГГц, а по результатам эксперимента – 4,294 ГГц. Возвратные потери в широком диапазоне частот от 10 до 18 ГГц по результатам моделирования составили не менее 5 дБ, а по результатам эксперимента – 4 дБ. Для ФНЧ2 частота среза по уровню

–3 дБ по результатам моделирования составила 7,835 ГГц, а по результатам эксперимента – 8,047 ГГц. Возвратные потери в диапазоне частот от 10 до 18 ГГц по результатам моделирования составили не менее 1 дБ, а по результатам эксперимента – 8 дБ.

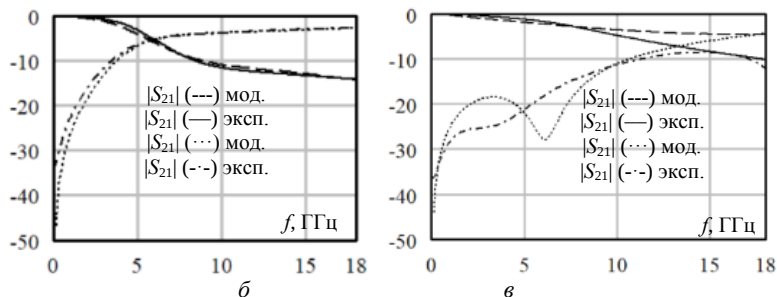
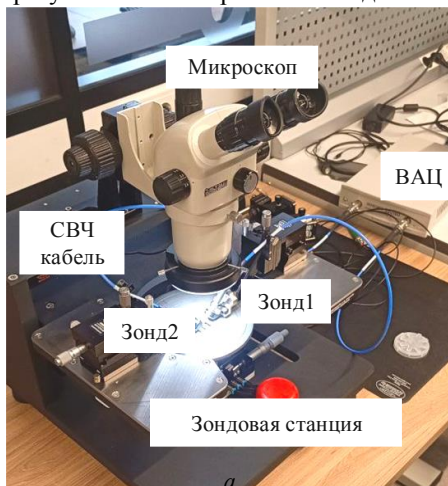


Рис. 3. Измерительная установка (а) и частотные зависимости S -параметров, полученные при моделировании и измерениях для ФНЧ1 (б) и ФНЧ2 (в)

Разработаны и изготовлены квазиотражающие звенья ФНЧ в интегральном исполнении на диэлектрической подложке. Выполнены их полноволновое моделирование и зондовые измерения. Результаты моделирования и эксперимента согласуются. Низкие возвратные потери вызваны ограничениями технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Design and Analysis of Passive-Integrated Absorptive Flat-Group-Delay RF Bandpass Filters in GaAs Technology for Digital Communications /

N. Iranpour, L. Yang, R. Gomez-Garcia, X. Zhu // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2025. – P. 2639–2652.

2. Morgan M. Reflectionless filter structures / M. Morgan, T. Boyd // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2015. – Vol. 63. No. 4. – P. 1263–1271.

УДК 621.396.67

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕННЫХ ЭКРАНОВ ИЗ КУБИЧЕСКОЙ ПРОВОДНОЙ СЕТКИ

К.С. Лукас, аспирант

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, cangasamuel01@yandex.ru

Выполнено моделирование экранов из кубической проводной сетки (ПС). Получены разреженные экраны с помощью аппроксимации оптимальной токовой сеткой с допуском удаления элементов сетки (ДУЭС) 1, 2, 3%. Приведены уменьшения массы и вычислительные затраты для разреженных экранов. Представлены частотные зависимости эффективности экранирования электрического и магнитного полей для исходного и разреженных экранов в диапазоне частот (10–1000 МГц).

Ключевые слова: проводная сетка, разреженный экран, аппроксимация оптимальной токовой сеткой, эффективность экранирования.

Использование экранов из проводной сетки (ПС) для защиты радиоэлектронных устройств (РЭУ) от электромагнитных помех расширяется благодаря их легкости и гибкости [1, 2]. Помимо этого, ПС также дает прозрачность для видимости защищаемых объектов и хорошую циркуляцию воздуха, что способствует охлаждению РЭУ. Экраны из ПС экранируют почти, как и сплошная конструкция [3, 4], поэтому часто их применяют в тех областях, где важны сочетание характеристик и оптимизация массы. Между тем в ПС есть много проводов с малыми токами, которые почти не влияют на характеристики [5].

Недавно представлено создание разреженных антенн [6] и рассеивателей [7] на основе аппроксимации оптимальной токовой сеткой (АОТС), позволяющей контролировать их массу путем исключения проводов с малым током, сохраняя при этом радиотехнические характеристики. АОТС показала хорошую эффективность в создании разреженных антенн и рассеивателей, поскольку удалось не только значительно уменьшить массу, но и обеспечить контроль характеристик структур. Кроме того, благодаря АОТС впервые созданы разреженные