



Научная статья

УДК 621.372.542.29

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188274>

EDN: <https://www.elibrary.ru/QTUUJL>

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ ГАНТЕЛЕОБРАЗНОГО ДЕФЕКТА СЛОЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

И.А. Баранников[✉]^{ID}, Е.А. Ищенко^{ID}, Д.К. Проскурин^{ID}, Ю.Г. Пастернак^{ID},
С.М. Федоров^{ID}

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

✉ ia.barannikov@yandex.ru

Цитирование: Баранников И.А., Ищенко Е.А., Проскурин Д.К., Пастернак Ю.Г., Федоров С.М. Методика расчета фильтра нижних частот на основе гантелеобразного дефекта слоя заземления печатной платы // Труды МАИ: электрон. журнал. № 148. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188274>

Аннотация. В статье рассматривается методика расчета микрополоскового фильтра нижних частот, основанного на использовании преднамеренного гантелеобразного дефекта. Она основывается на расчетных формулах, полученных посредством регрессионного анализа и описывающих соотношения между геометрией дефекта, параметрами подложки и частотами полюса затухания и среза. Предлагаемая методика позволяет значительно сократить время проектирования подобных фильтров за счет упрощенных расчетов и сокращения времени выбора оптимальных размеров геометрии структуры. Частотные пределы применимости методики лежат от 1.33 ГГц до 12.1 ГГц для полюса затухания и от 0.64 ГГц до 6.87 ГГц для среза. Точность методики подтверждается статистическими характеристиками полученных формул: для полюса затухания коэффициент детерминации составил 0.975, а среднее квадратическое отклонение – 0.0686; для частоты среза те же характеристики

равны 0.961 и 0.0376 соответственно. В работе приводится пример расчета конструкции фильтра на частоту 6 ГГц.

Ключевые слова: фильтр нижних частот; структуры преднамеренных дефектов заземления печатных плат; гантелеобразный дефект; регрессионный анализ.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания "молодежная лаборатория" № FZGM-2024-0003.

METHODOLOGY FOR CALCULATING A LOW-PASS FILTER BASED ON DUMBBELL-SHAPED DEFECTED GROUND STRUCTURE

I.A. Barannikov[✉], E.A. Ischenko, D.K. Proskurin, Yu.G. Pasternak,
S.M. Fedorov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

✉ ia.barannikov@yandex.ru

Citation: Barannikov I.A., Ischenko E.A., Proskurin D.K., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M. Methodology for calculating a low-pass filter based on dumbbell-shaped defected ground structure // Trudy MAI. 2025. No. 148. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188274>

Abstract. Filtering unwanted frequencies is an important task in electronic devices designed to operate in the microwave range. Lumped-element filters are the most commonly used. They are simple to design but require assembly during manufacturing and impose specific requirements on the components used. An alternative is to use distributed-element filters. These are based on microstrip structures and are significantly more complex to design, as well as larger in size than lumped-element circuits. A relatively recent approach to filter design involves the use of defected ground structures, located beneath the microstrip line. Their main advantage is much smaller size, but they are also complex to design and can generate unwanted radiation at certain frequencies. The article considers the calculation methodology of a microstrip low-pass filter based on dumbbell-shaped defected ground structures, which allows to significantly reduce the design time of such filters due to simplified calculations and a reduction in the time of selecting the optimal dimensions of the structure geometry. It is based on the empirical calculation formulas obtained by means of regression analysis

on the basis of modeling data of structures with various parameters and describing the relationships between the defect geometry, the substrate parameters and the attenuation pole and cutoff frequencies. The calculation accuracy of this technique is confirmed by the statistical characteristics of the obtained formulas: for the attenuation pole, the determination coefficient was 0.975, and the standard deviation was 0.0686; for the cutoff frequency, the same characteristics are 0.961 and 0.0376, respectively. The frequency limits of applicability of the technique lie from 1.33 GHz to 12.1 GHz for the attenuation pole and from 0.64 GHz to 6.87 GHz for the cutoff. The relationship between the obtained formulas and the capacitance and inductance values of the equivalent circuit is also presented, allowing for a quick evaluation of the filter's performance. Finally, an example of calculating a 6 GHz filter design using the proposed method is presented to confirm its efficiency. The presented method can be applied to designing filters for various components of microwave electronic devices with dimensional constraints.

Keywords: low-pass filter; defected ground structures; dumbbell-shaped defect; regression analysis.

Funding: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "youth laboratory" No. FZGM-2024-0003.

Введение

Задача фильтрации нежелательных частот является важной в радиоэлектронных устройствах, предназначенных для работы в СВЧ диапазоне. Существует несколько подходов к разработке фильтров для таких устройств [1, 2]. Наиболее просты в использовании фильтры на сосредоточенных элементах [3]. Они просты в проектировании, однако требуют монтажа при производстве и предъявляют определенные требования к используемым в них элементам. Альтернативой этому является использование фильтров на схемах с распределенными параметрами. Обычно они выполняются на основе микрополосковых структур и значительно сложнее в проектировании, а также

обладают большими габаритами по сравнению со схемами на сосредоточенных элементах [1,4].

Относительно недавним новым подходом к проектированию фильтров является использование структур преднамеренных дефектов на слое заземления печатной платы, расположенных под микрополосковой линией. Их основным преимуществом перед традиционными микрополосковыми фильтрами являются гораздо меньшие габариты. Однако они так же сложны в проектировании и, помимо этого, могут создавать нежелательное излучение на определенных частотах. Первые конструкции структур дефектов заземления (СДЗ) были представлены в виде различных периодических структур, размещенных под микрополосковой линией [5]. В дальнейшем они свелись к одиночным структурам [6], имеющим различную геометрию. Среди них круглые гантели [7], спирали [8], U-образные [9], V-образные [9], H-образные [10], T-образные [11], E-образные [12], крестовые [13], концентрические кольца [14], искаженные F [15]. Так же рассматривались структуры на основе разделенных круговых резонаторов (Split Ring Resonators) [16, 17] и фракталов [18].

Так же было предпринято несколько попыток разработать методику расчета СДЗ, т.к. процесс их проектирования состоит в основном в подборе размеров, которые дадут требуемые параметры фильтра, что весьма затратно по времени и вычислительным мощностям. Впервые в работе [6] была предложена эквивалентная схема для разработанного фильтра нижних частот, однако четкой взаимосвязи между ее параметрами и размерами СДЗ установлено не было. В дальнейшем в работе [19] была рассмотрена значительно модифицированная эквивалентная P_i -цепь, которая все так же не давала зависимостей для связи между размерами структуры и параметрами цепи. Наиболее близкое объяснение характеристик фильтра в зависимости от размеров геометрии гантелеобразных СДЗ было дано авторами работы [20], которые предложили квазистатическую модель, дающую возможность расчета СДЗ и ее полную эквивалентную схему. Однако такая модель все еще является достаточно сложной и не позволяет учесть многих факторов, таких как толщина подложки и ее диэлектрическая проницаемость.

Целью данной работы является рассмотрение методики расчета гантелеобразных СДЗ, основанной на эмпирических формулах и установление их связи с параметрами простейшей эквивалентной цепи гантелеобразной СДЗ, которая была представлена авторами работы [6].

Описание методики расчета

Для получения обозначенных зависимостей был проведен регрессионный анализ, основанный на методе нелинейных наименьших квадратов. В качестве вычислительного метода использовался метод Левенберга-Марквардта [21, 22]. Помимо этого, для устранения проблемы излишней подстройки регрессионных моделей применялась десятикратная кросс-валидация.

Для сбора данных о характеристиках гантелеобразной СДЗ использовалось электродинамическое моделирование. Внешний вид структуры и ее основные параметры представлены на рисунке 1.

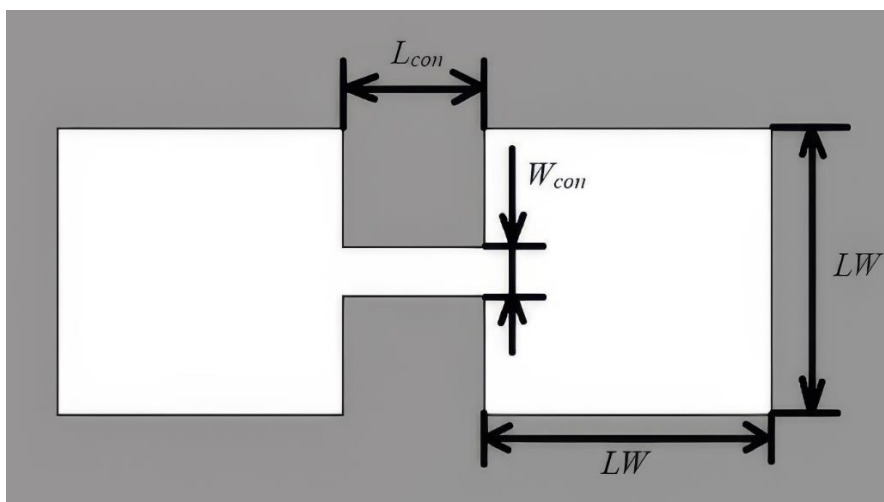


Рисунок 1 – Внешний вид гантелеобразной СДЗ

При этом на представленном рисунке LW – длина стороны квадрата гантели (мм), L_{con} – длина соединяющей части между квадратами, W_{con} – ширина соединяющей части между квадратами. Помимо этого, также влияют на характеристики фильтра будут T_{sub} – толщина подложки и ϵ_r – диэлектрическая проницаемость подложки. Для рассмотрения и получения конечной формульной зависимости был получен набор данных из 3150 измерений. При этом Диэлектрическая проницаемость подложки ϵ_r , сторона квадрата LW и длина

соединительной щели L_{con} менялись от 2 до 12 с шагом 2. Ширина щели W_{con} от 1 мм до 4 мм с шагом 0.5 мм и толщина подложки изменялась от 1 мм до 3 мм с шагом 1.

Далее были получены две зависимости, описывающие основные характеристики фильтра нижних частот, основанного на данной конструкции: для частоты полюса затухания F_{min} и для частоты среза F_{cut} .

Также стоит отметить, что часть данных при проведении анализ для частоты среза пришлось исключить из-за слишком больших искажений в характеристиках фильтра (пример внешнего вида $S_{2,1}$ приведен на рисунке 2). Условия выбора данных остались теми же, за исключением того, что из выборки были исключены значения частоты при E_r равной 12 и толщине подложки, равной 2 и 3 мм.

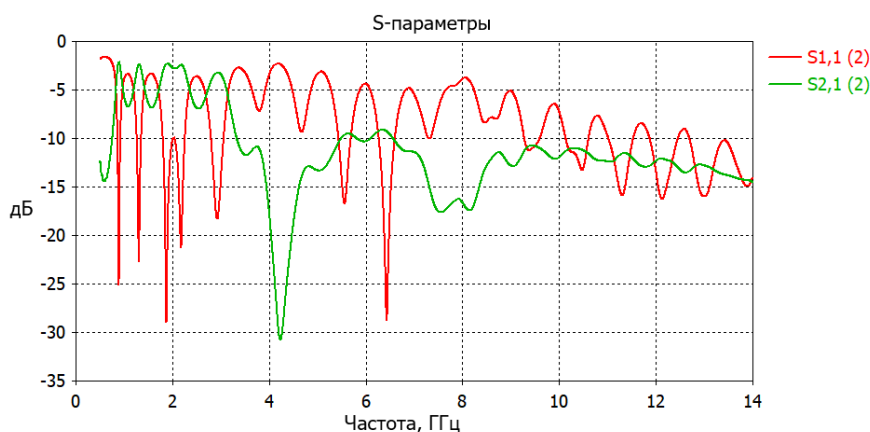


Рисунок 2 - Искажения параметров фильтра при увеличенной толщине подложки при ее диэлектрической проницаемости 12

Таким образом для частоты среза набор данных регрессионного анализа составлял 2800 точек. Исходя из него можно обозначить границы применимости предлагаемой далее расчетной формулы. Геометрически она ограничена значениями LW и L_{con} в пределах от 2 до 12 мм, W_{con} от 1 до 4 мм, толщина подложки от 1 до 3 мм, а ее диэлектрическая проницаемость от 2 до 10. При этом частоты полюса затухания и среза определены в диапазонах от 1.33 ГГц до 12.1 ГГц и от 0.64 ГГц до 6.87 ГГц.

Регрессионная модель для частоты полюса затухания

Общий вид модели в результате подбора получил следующий вид:

$$F_{\min} = \frac{1}{a_1 \cdot LW + a_2 \cdot L_{\text{con}} + a_3 \cdot W_{\text{con}} + a_4 \cdot T_{\text{sub}} + a_5 \cdot E_r} - 1.4 \quad (1)$$

Далее был проведен регрессионный анализ на основании данной формулы. В результате был получен набор из 10 моделей (по кратности кросс-валидации). Их средние значения среднего квадратического отклонения и коэффициента детерминации равны 0.0686 и 0.972 соответственно. Значения же для каждой модели приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Статистические характеристики моделей

Номер модели	Среднее квадратическое отклонение	R ²
1	0.0488	0.975
2	0.0706	0.971
3	0.0944	0.961
4	0.0841	0.970
5	0.0529	0.976
6	0.0685	0.973
7	0.055	0.979
8	0.0774	0.971
9	0.0734	0.971
10	0.0615	0.973
Обобщенные параметры	0.0686	0.972

На основании приведенных данных, наиболее подходящей является модель под номером 1.

Далее будут рассмотрены ее подробные статистические характеристики для чего в первую очередь приводится гистограмма остатков модели на рисунке 3.

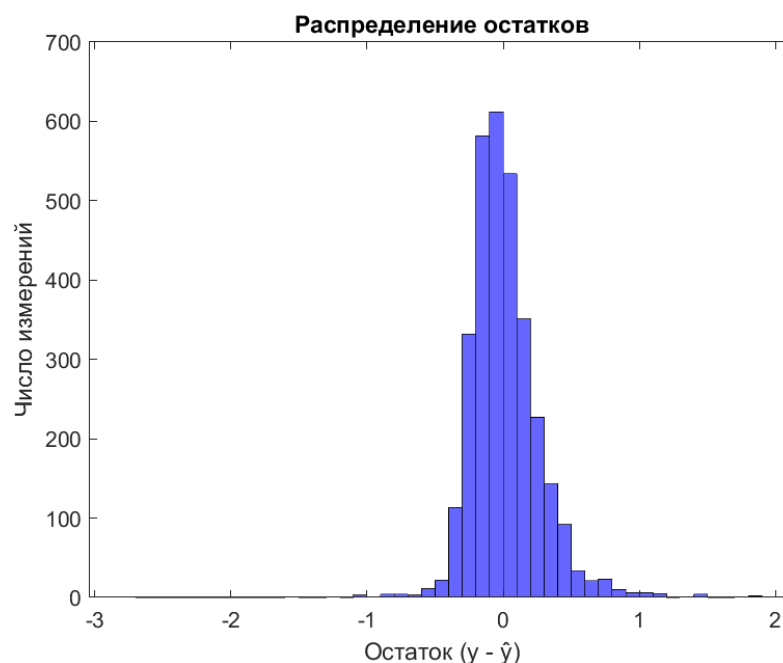


Рисунок 3 – Гистограмма остатков модели

Представленная гистограмма демонстрирует что отклонение основной части остатков не превышает 0.5 по модулю. Так же выбранная модель не имеет постоянной ошибки, а колоколообразная форма с острым пиком в нуле демонстрирует высокую точность модели на рассмотренном наборе данных. Далее на рисунке 4. Приводится график распределений расстояний Кука, по которым можно увидеть величину влияния отдельных измерений на всю модель. По приведенному графику можно сказать, что полученная модель является устойчивой (нет высоких всплесков) и ее результаты надежны (величины расстояний не превышают 1 и лежат около нуля).

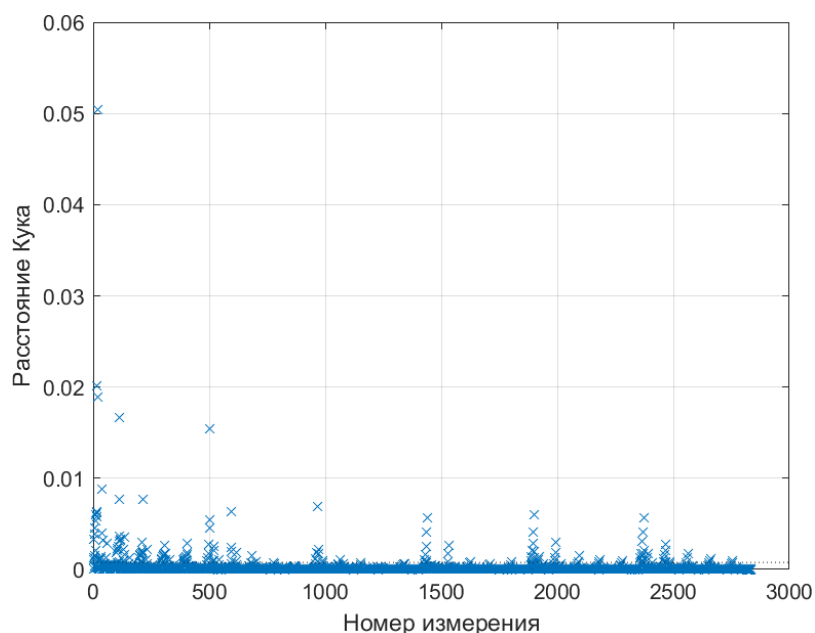


Рисунок 4 – Расстояние Кука

Далее остаются статистические оценки самих числовых коэффициентов представленной модели. Их значения и основные статистические оценки сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов и их статистические оценки

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение
a ₁	0.014795	5.2279e-05	283.003	0
a ₂	0.007251	4.3427e-05	166.97	0
a ₃	-0.012839	9.8473e-05	-130.38	0
a ₄	0.010822	0.00014	76.095	0
a ₅	0.006949	3.9412e-05	176.322	0

По значениям стандартных ошибок, представленным в таблице, видно, что численные значения коэффициентов не будут сильно меняться от итерации к итерации, при этом все они являются статистически значимыми исходя из p-значений, а t-статистика указывает, что все коэффициенты, кроме связанного с шириной соединительной щели, увеличивают частоту полюса затухания.

Далее приводится конечная формула, включающая полученные коэффициенты:

$$F_{\min} = 1 / (0.014795 \cdot LW + 0.007251 \cdot L_{\text{con}} - 0.012839 \cdot W_{\text{con}} + 0.010822 \cdot T_{\text{sub}} + 0.006949 \cdot E_r) - 1.4 \quad (2)$$

Регрессионная модель для частоты среза

Аналогичным образом была задана общая форма модели для частоты среза:

$$F_{\text{cut}} = \frac{1}{a_1 \cdot LW + a_2 \cdot L_{\text{con}} + a_3 \cdot W_{\text{con}} + a_4 \cdot E_r + a_5 \cdot T_{\text{sub}}} - 0.7 \quad (3)$$

Аналогичным образом был проведен регрессионный анализ и получены 10 моделей. Их характеристики сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Статистические характеристики моделей СДЗ “простая гантель” для зависимости F_{cut}

Номер модели	Среднее квадратическое отклонение	R^2
1	0.04954	0.950
2	0.03827	0.959
3	0.03439	0.963
4	0.02979	0.969
5	0.02868	0.966
6	0.03834	0.955
7	0.04408	0.959
8	0.03671	0.961
9	0.03769	0.965
10	0.03858	0.966
Обобщенные параметры	0.0376	0.961

Из данных таблицы видно, что среднее значение по всем моделям для среднего квадратического отклонения имеет весьма низкое значение 0.0376, а коэффициент детерминации высок и составил 0.961. Наилучшей моделью будет пятая, ее коэффициент детерминации составил 0.966, а среднее квадратическое отклонение - 0.02868. Далее для нее приводятся гистограмма остатков и распределение расстояний Кука (рис. 5 и 6).

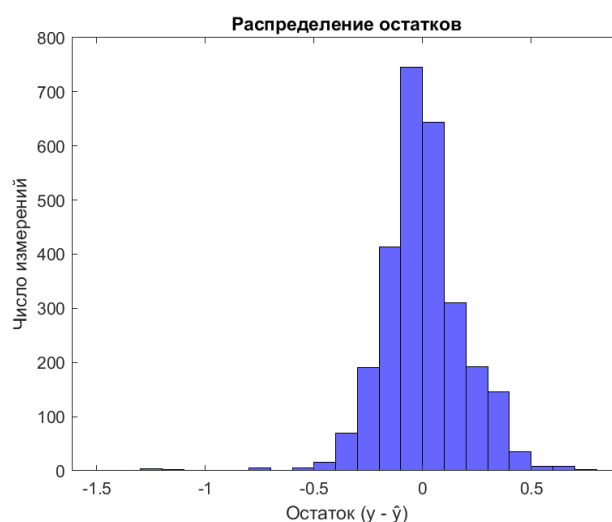


Рисунок 5 – Гистограмма остатков окончательной модели зависимости F_{cut} для “простой гантели”

Гистограмма остатков модели показывает, что основная часть отклонений от значений моделирования лежат в пределах 0.1 по модулю. При этом

гистограмма обладает нормальным распределением и не имеет постоянной ошибки, что показывает высокую точность значений формулы.

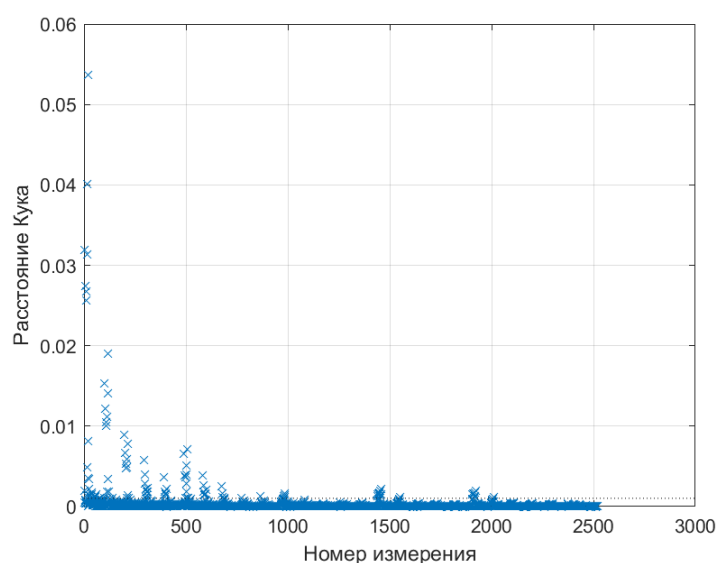


Рисунок 6 – Распределение расстояний Кука для окончательной модели зависимости F_{cut} для “простой гантели”

Исходя из данных о распределениях расстояний Кука для модели, можно отметить ее высокую устойчивость и надежность. Как и при рассмотрении модели для полюса затухания, у расстояний Кука нет резких выбросов, и отсутствуют значения, близкие к 1. Далее представлены значения числовых коэффициентов модели и их статистики. Они сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов и их статистические оценки для модели зависимости F_{cut} для “простой гантели”

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение
a1	0.03195	0.00014	222.38	0
a2	0.01035	0.00011	97.41	0
a3	-0.00385	0.00027	-14.40	3.1924e-45
a4	0.02327	0.00013	175.65	0
a5	-0.02922	0.00031	-93.42	0

Стандартные ошибки показывают высокую уверенность в полученных значениях, которые не будут сильно меняться между итерациями. При этом p-значения очень малы и демонстрируют высокую значимость каждого коэффициента. А исходя из t-статистики можно заключить, что к уменьшению

частоты среза приводит увеличение ширины соединительной щели и толщины подложки. Далее приводится окончательный вид модели, включающий полученные коэффициенты:

$$F_{cut} = 1 / (0.03195 \cdot LW + 0.01035 \cdot L_{con} - 0.00385 \cdot W_{con} + 0.02327 \cdot E_r - 0.02922 \cdot T_{sub}) - 0.7 \quad (4)$$

Связь полученных зависимостей с эквивалентной LC-цепью

Теперь, воспользовавшись моделью эквивалентной схемы, представленной авторами работы [6], будет получена связь между размерами СДЗ и параметрами схемы. Общий вид схемы приводится на рис. 7.

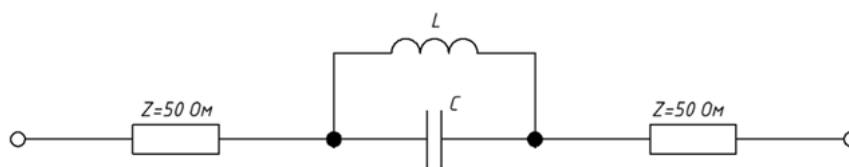


Рисунок 7 – Эквивалентная схема гантелеобразной СДЗ

Далее приводятся основные расчетные выражения, представленные авторами для данной схемы:

$$C = \frac{5F_{cut}}{\pi(F_{min}^2 - F_{cut}^2)} \text{ пФ}, \quad (5)$$

$$L = \frac{250}{(\pi F_{min})^2 C} \text{ нГн}. \quad (6)$$

где f_0 и f_c – частоты полюса затухания и среза, выраженные в ГГц. Следовательно, обладая данными о характеристиках фильтра на гантелеобразных СДЗ. Тогда можно учесть полученные формулы (2) и (4) и связать их со значениями формул (5) и (6).

Введем следующие замены:

$$A = a_1 \cdot LW + a_2 \cdot L_{con} + a_3 \cdot W_{con} + a_4 \cdot T_{sub} + a_5 \cdot E_r, \quad (7)$$

$$B = b_1 \cdot LW + b_2 \cdot L_{con} + b_3 \cdot W_{con} + b_4 \cdot E_r + b_5 \cdot T_{sub}. \quad (8)$$

Здесь A – набор переменных и их коэффициентов из формулы (2), а B – набор из формулы (4). Тогда, сделав подстановки в (5) и (6), можно получить

$$C = \frac{5 \left(\frac{1}{B} - 1.4 \right)}{\pi \left(\left(\frac{1}{A} - 1.4 \right)^2 - \left(\frac{1}{B} - 0.7 \right)^2 \right)} = \frac{\frac{5-4B}{B}}{\pi \frac{(B+A-2.1A \cdot B)(B-A-0.7A \cdot B)}{(A \cdot B)^2}}, \quad (9)$$

$$L = \frac{250}{\left(\pi \left(\frac{1}{A} - 1.4 \right) \right)^2 C}. \quad (10)$$

Данные формулы позволяют найти значения емкости и индуктивности эквивалентной цепи и получить упрощенные характеристики гантелеобразной СЗД в упрощенном виде, не прибегая к электродинамическому моделированию.

Теперь следует провести проверку приведенных формул на примере конструкции фильтра. Подложкой выбран диэлектрик FR-4 с диэлектрической проницаемостью 4.4 и толщиной 1 мм. Ширина микрополосковой линии с сопротивлением в 50 Ом для такой подложки будет составлять 1.8 мм. Для удобства размеры щели примем эквивалентными ширине подложки, т.е. $L_{con} = W_{con} = 1.8$ мм. Целевой частотой среза для фильтра будет являться 2.5 ГГц, а частота полюса затухания должна быть на 6 ГГц. Из соотношений (2) и (4) $LW = 7$ мм, тогда $F_{min} = 6.0125$ ГГц и $F_{cut} = 2.5414$. А по формулам (9) и (10) можно получить $C = 0.1362$ пФ и $L = 5.1437$ нГн. Сначала проведем электромагнитное моделирование структуры. Внешний вид модели приведен на рисунке 8.

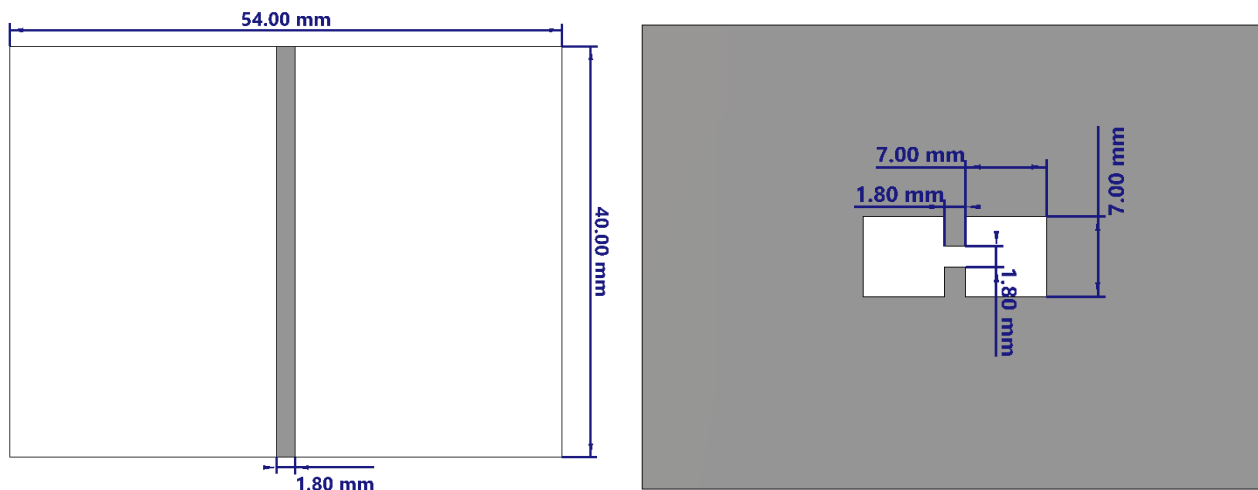


Рисунок 8 – Внешний вид фильтра сверху и снизу

Также была составлена эквивалентная схема с рассчитанными значениями L и C . Она приведена на рисунке 9.

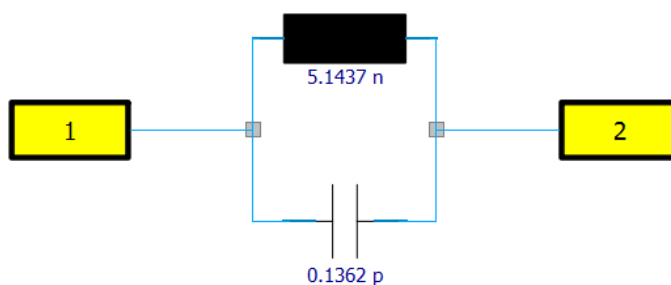


Рисунок 9 – Эквивалентная схема фильтра на основе СДЗ “простая гантель”

Затем было проведено моделирование СДЗ и ее эквивалентной схемы. Полученные в результате характеристики представлены на рисунке 10.

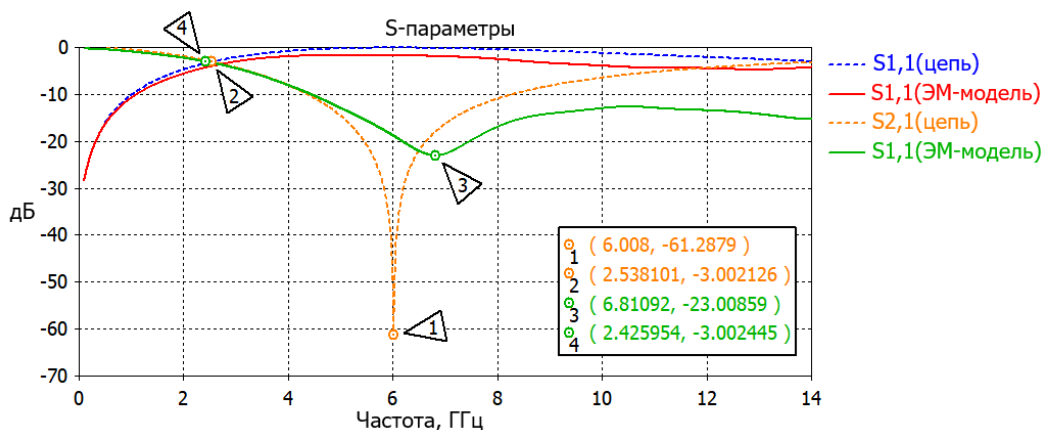


Рисунок 10 – S-параметры модели СДЗ и эквивалентной цепи

Представленные графики демонстрируют, что частота среза, рассчитанная для СДЗ, оказалась весьма близка к полученной в результате моделирования (разница составляет около 100 МГц). Однако значения частот полюса затухания имеет отклонение в 800 МГц. Также есть небольшие расхождения в величине возвратных потерь, которые можно объяснить отсутствием сопротивления для учета потерь, вызванных резонансным поведением щели и ее излучением на некоторых частотах.

Таким образом, на основании представленных формул можно вывести следующую методику расчета фильтров нижних частот на основе гантелеобразных СДЗ:

1. Выбор частот среза и полюса затухания F_{cut} и F_{min} ;
2. Выбор материала подложки;
3. Выбор размеров соединительной щели (можно выбрать исходя из соответствия размерам микрополосковой линии);
4. Расчет стороны квадрата гантели LW ;
5. Внесение поправок в размеры щели при необходимости снижения размеров стороны квадрата LW ;
6. Расчет параметров эквивалентной цепи и ее моделирование при отсутствии возможности проведения полноценного электромагнитного моделирования структуры.

Заключение

Авторами статьи разработана методика расчета фильтров нижних частот на основе СДЗ. При этом методика является достаточно точной, что подтверждено ее статистическими параметрами, применимой в широком диапазоне значений геометрических размеров структуры, и значительно ускоряет процесс разработки фильтров на основе гантелеобразной СДЗ. Это позволяет избавиться от основного недостатка такого типа фильтров, а именно – сложность проектирования.

Помимо этого, была также получена связь геометрии гантелеобразной СДЗ с простой эквивалентной схемой, что ускоряет процесс моделирования, позволяя

быстро рассчитать характеристики фильтра, а не проводить электродинамическое моделирование всей конструкции. Данная методика может применяться для проектирования фильтров для различных узлов радиоэлектронных устройств СВЧ-диапазона, требующих компактности габаритов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Койгеров, А. С. Пассивные полосовые фильтры для современных систем связи СВЧ-диапазона / А. С. Койгеров, П. А. Туральчук, М. М. Деркач, С. С. Андрейчев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 71-88. – DOI 10.18469/1810-3189.2024.27.1.71-88. – EDN UXFJLT.
2. Буренко, Е. А. Проектирование активных частотно- избирательных фильтров / Е. А. Буренко, С. В. Нестеров // Труды МАИ. – 2018. – № 101. – С. 26. – EDN YLMTML.
3. Бабунько, С. А. О построении электрических схем полосовых фильтров на SMD-элементах / С. А. Бабунько, Ю. Г. Белов, Л. В. Когтева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 28-35. – EDN ONZGZV.
4. Петров, И. А. Фильтры СВЧ с использованием широкополосных согласующих структур / И. А. Петров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 51-56. – EDN NTNOUNF.
5. C. S. Kim, J. S. Park, D. Ahn, J. B. Lim. A novel 1-D periodic defected ground structure for planar circuits // IEEE Microw. Guid. Wave Lett. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2000. Vol. 10, № 4. P. 131–133. DOI: 10.1109/75.846922
6. D. Ahn, J.-S. Park, C.-S. Kim, J. Kim, Y. Qian, T. Itoh. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure // IEEE Trans. Microwave Theory

Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2001. Vol. 49, № 1. P. 86–93. DOI: 10.1109/22.899965.

7. A. B. Abdel-Rahman, A. K. Verma, A. Boutejdar, A. S. Omar. Control of Bandstop Response of Hi–Lo Microstrip Low-Pass Filter Using Slot in Ground Plane // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2004. Vol. 52, № 3. P. 1008–1013. DOI: 10.1109/TMTT.2004.823587.

8. C. S. Kim, J. S. Lim, S. Nam , K. Y. Kang, D. Ahn. Equivalent circuit modelling of spiral defected ground structure for microstrip line // Electron. Lett. Institution of Engineering and Technology (IET), 2002. Vol. 38, № 19. P. 1109–1110. DOI: 10.1049/el:20020742.

9. D. J. Woo, T. K. Lee, J. W. Lee, C. S. Pyo, W. K. Choi. Novel U-slot and V-slot DGSs for bandstop filter with improved Q factor // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2006. Vol. 54, № 6. P. 2840–2847. DOI: 10.1109/TMTT.2006.875450.

10. M. K. Mandal, S. Sanyal. A novel defected ground structure for planar circuits // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2006. Vol. 16, № 2. P. 93–95. DOI: 10.1109/LMWC.2005.863192.

11. X. Wang, B. Wang, H. Zhang, K. J. Chen. A Tunable Bandstop Resonator Based on a Compact Slotted Ground Structure // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2007. Vol. 55, № 9. P. 1912–1918. DOI: 10.1109/TMTT.2007.904045.

12. S. Y. Huang, Y. H. Lee, A Compact E-Shaped Patterned Ground Structure and Its Applications to Tunable Bandstop Resonator // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009. Vol. 57, № 3. P. 657–666. DOI: 10.1109/TMTT.2009.2013313.

13. H. J. Chen, T. H. Huang, C. S. Chang, L. S. Chen, N. F. Wang, Y. H. Wang, M. P. Houn, A novel cross-shape DGS applied to design ultra-wide stopband low-pass filters // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2006. Vol. 16, № 5. P. 252–254. DOI: 10.1109/LMWC.2006.873594.

15. A. K. Arya, A. Patnaik, and M. V. Kartikeyan. Microstrip Patch Antenna with Skew-F Shaped DGS for Dual Band Operation // PIER M. The Electromagnetics Academy, 2011. Vol. 19. P. 147–160. DOI: 10.2528/PIERM11052305
16. S. N. Burokur, M. Latrach, S. Toutain. A novel type of microstrip coupler utilizing a slot split-ring resonators defected ground plane // Microw. Opt. Technol. Lett. Wiley, 2005. Vol. 48, № 1. P. 138–141. DOI: 10.1002/mop.21287
17. Z. Z. Hou. Novel wideband filter with a transmission zero based on split-ring resonator DGS // Micro & Optical Tech Letters. Wiley, 2008. Vol. 50, № 6. P. 1691–1693. DOI: 10.1002/mop.23452
18. H. W. Liu, Z. F. Li, X. W. Sun. A novel fractal defected ground structure and its application to the low-pass filter // Micro & Optical Tech Letters. Wiley, 2003. Vol. 39, № 6. P. 453–456. DOI: 10.1002/mop.11246
19. J.S. Park, J.H. Kim, J.H. Lee, S.H. Kim, S.H. Myung. A novel equivalent circuit and modeling method for defected ground structure and its application to optimization of a DGS lowpass filter // 2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.02CH37278). IEEE. P. 417–420. DOI: 10.1109/MWSYM.2002.1011644
20. N. C. Karmakar, S. M. Roy, I. Balbin. Quasi-static modeling of defected ground structure // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2006. Vol. 54, № 5. P. 2160–2168. DOI: 10.1109/TMTT.2006.873633
21. Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares // Quart. Appl. Math. American Mathematical Society (AMS), 1944. Vol. 2, № 2. P. 164–168. DOI: 10.1090/qam/10666
22. Marquardt D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. Society for Industrial & Applied Mathematics (SIAM), 1963. Vol. 11, № 2. P. 431–441.

References

1. A. S. Kojgerov, P. A. Tural'chuk, M. M. Derkach, S. S. Andrejchev. Passive bandpass filters for modern microwave communication systems. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy*. 2024. Vol. 27, № 1, p. 71-88. DOI: 10.18469/1810-3189.2024.27.1.71-88.

2. E. A. Burenko, S. V. Nesterov. Design of active frequency-selective filters. *Trudy MAI*. 2018. № 101, p. 26.
3. S. A. Babun'ko, Ju. G. Belov, L. V. Kogteva. About building of the circuitry bandpass filters at SMD-elements. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy*. 2011. Vol. 14. № 4. p. 28-35.
4. I. A. Petrov. Microwave filters with use broadband matching structures. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy*. 2011. Vol. 14, № 1. p. 51-56.
5. C. S. Kim, J. S. Park, D. Ahn, J. B. Lim. A novel 1-D periodic defected ground structure for planar circuits. *IEEE Microw. Guid. Wave Lett. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2000. Vol. 10, № 4. P. 131–133. DOI: 10.1109/75.846922
6. D. Ahn, J.-S. Park, C.-S. Kim, J. Kim, Y. Qian, T. Itoh. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2001. Vol. 49, № 1. P. 86–93. DOI: 10.1109/22.899965.
7. A. B. Abdel-Rahman, A. K. Verma, A. Boutejdar, A. S. Omar. Control of Bandstop Response of Hi–Lo Microstrip Low-Pass Filter Using Slot in Ground Plane. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2004. Vol. 52, № 3. P. 1008–1013. DOI: 10.1109/TMTT.2004.823587.
8. C. S. Kim, J. S. Lim, S. Nam , K. Y. Kang, D. Ahn. Equivalent circuit modelling of spiral defected ground structure for microstrip line. *Electron. Lett. Institution of Engineering and Technology (IET)*. 2002. Vol. 38, № 19. P. 1109–1110. DOI: 10.1049/el:20020742.
9. D. J. Woo, T. K. Lee, J. W. Lee, C. S. Pyo, W. K. Choi. Novel U-slot and V-slot DGSs for bandstop filter with improved Q factor. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2006. Vol. 54, № 6. P. 2840–2847. DOI: 10.1109/TMTT.2006.875450.
10. M. K. Mandal, S. Sanyal. A novel defected ground structure for planar circuits. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2006. Vol. 16, № 2. P. 93–95. DOI: 10.1109/LMWC.2005.863192.
11. X. Wang, B. Wang, H. Zhang, K. J. Chen. A Tunable Bandstop Resonator Based on a Compact Slotted Ground Structure. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute*

of *Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2007. Vol. 55, № 9. P. 1912–1918. DOI: 10.1109/TMTT.2007.904045.

12. S. Y. Huang, Y. H. Lee, A Compact E-Shaped Patterned Ground Structure and Its Applications to Tunable Bandstop Resonator. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2009. Vol. 57, № 3. P. 657–666. DOI: 10.1109/TMTT.2009.2013313.

13. H. J. Chen, T. H. Huang, C. S. Chang, L. S. Chen, N. F. Wang, Y. H. Wang, M. P. Hong. A novel cross-shape DGS applied to design ultra-wide stopband low-pass filters. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2006. Vol. 16, № 5. P. 252–254. DOI: 10.1109/LMWC.2006.873594.

15. A. K. Arya, A. Patnaik, and M. V. Kartikeyan. Microstrip Patch Antenna with Skew-F Shaped DGS for Dual Band Operation. *PIER M. The Electromagnetics Academy*. 2011. Vol. 19. P. 147–160. DOI: 10.2528/PIERM11052305

16. S. N. Burokur, M. Latrach, S. Toutain. A novel type of microstrip coupler utilizing a slot split-ring resonators defected ground plane. *Microw. Opt. Technol. Lett. Wiley*. 2005. Vol. 48, № 1. P. 138–141. DOI: 10.1002/mop.21287

17. Z. Z. Hou. Novel wideband filter with a transmission zero based on split-ring resonator DGS. *Micro & Optical Tech Letters. Wiley*. 2008. Vol. 50, № 6. P. 1691–1693. DOI: 10.1002/mop.23452

18. H. W. Liu, Z. F. Li, X. W. Sun. A novel fractal defected ground structure and its application to the low-pass filter. *Micro & Optical Tech Letters. Wiley*. 2003. Vol. 39, № 6. P. 453–456. DOI: 10.1002/mop.11246

19. J.S. Park, J.H. Kim, J.H. Lee, S.H. Kim, S.H. Myung. A novel equivalent circuit and modeling method for defected ground structure and its application to optimization of a DGS lowpass filter. *2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.02CH37278)*. IEEE. P. 417–420. DOI: 10.1109/MWSYM.2002.1011644

20. N. C. Karmakar, S. M. Roy, I. Balbin. Quasi-static modeling of defected ground structure. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2006. Vol. 54, № 5. P. 2160–2168. DOI: 10.1109/TMTT.2006.873633

21. Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quart. Appl. Math. American Mathematical Society (AMS)*. 1944. Vol. 2, № 2. P. 164–168. DOI: 10.1090/qam/10666

22. Marquardt D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. Society for Industrial & Applied Mathematics (SIAM)*. 1963. Vol. 11, № 2. P. 431–441.

Информация об авторах

Илья Андреевич Баранников, ассистент кафедры РЭУС, ВГТУ, г. Воронеж, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>; RSCI SPIN: 3365-8542; e-mail: ia.barannikov@yandex.ru

Евгений Алексеевич Ищенко, ассистент кафедры РЭУС, ВГТУ, г. Воронеж, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>; RSCI SPIN: 4717-9881; e-mail: kursk1998@yandex.ru

Дмитрий Константинович Проскурин, доктор технических наук, доцент, ректор, ВГТУ, г. Воронеж, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0569-6737>; RSCI SPIN: 6031-4315; e-mail: rector@cchgeu.ru

Юрий Геннадьевич Пастернак, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры РЭУС, ВГТУ, г. Воронеж, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2031-5531>; RSCI SPIN: 6388-4739; e-mail: pasternakyg@mail.ru

Сергей Михайлович Федоров, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры РЭУС, ВГТУ, г. Воронеж, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>; RSCI SPIN: 4428-8790; e-mail: zar36@yandex.ru

Information about the authors

Ilya A. Barannikov, assistant, department of Radioelectronic Devices and Systems, VSTU, Voronezh, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>, RSCI SPIN: 3365-8542; e-mail: ia.barannikov@yandex.ru

Evgeniy A. Ishchenko, assistant, department of Radioelectronic Devices and Systems, VSTU, Voronezh, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>, RSCI SPIN: 4717-9881; e-mail: kursk1998@yandex.ru

Dmitry K. Proskurin, doctor of technical sciences, associate professor, rector, VSTU, Voronezh, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0569-6737>; RSCI SPIN: 6031-4315; e-mail: rector@cchgeu.ru

Yuriy G. Pasternak, doctor of technical sciences, professor, department of Radioelectronic Devices and Systems, VSTU, Voronezh, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2031-5531>; RSCI SPIN: 6388-4739; e-mail: pasternakyg@mail.ru

Sergey M. Fedorov, doctor of technical sciences, associate professor, department of Radioelectronic Devices and Systems, VSTU, Voronezh, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>; RSCI SPIN: 4428-8790; e-mail: zar36@yandex.ru

Получено 17 февраля 2026 ● Принято к публикации 01 июня 2026 ● Опубликовано 25 июня 2026
Received 17 February 2026 ● Accepted 01 June 2026 ● Published 25 June 2026
