

## Анализ чувствительности характеристик фильтров на круглых волноводах к погрешности производства

© Д.С. Губский, В.В. Земляков, С.В. Крутиев, Д.В. Лонкина

Южный федеральный университет,  
344006 Ростов-на-Дону, Россия  
e-mail: ds@sfedu.ru

Поступило в Редакцию 29 апреля 2025 г.  
В окончательной редакции 22 июня 2025 г.  
Принято к публикации 24 июня 2025 г.

Исследованы электродинамические свойства фильтров на круглых волноводах с резонансными диафрагмами сложной формы поперечного сечения. Проведен анализ зависимости характеристик полосно-пропускающих фильтров от геометрических размеров центральной диафрагмы и их незначительном отклонении от оптимальных значений. Определено их влияние на амплитудно-частотную характеристику устройства.

**Ключевые слова:** полосно-пропускающий фильтр, круглый волновод, резонансная диафрагма, допуски при изготовлении.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61770.220-25

### Введение

Круглые волноводы с неоднородностями сложного поперечного сечения обладают определенными селективными свойствами [1]. Это делает их широко используемыми в СВЧ технике [2–4] и определяет актуальность решения задачи об изучении их электродинамических характеристик, которая и была успешно решена в [1].

При создании новых СВЧ устройств используются не только численно-аналитические методы, но и различные пакеты компьютерного моделирования, роль которых очень высока при проведении оптимизации электродинамических характеристик проектируемых селективных СВЧ устройств. Однако известно, что успех многопараметрической оптимизации, требующей больших трудоемких компьютерных вычислений, зависит от начального приближения. Чем более точно получится создать прототип фильтра и задать его размеры, тем эффективнее будет применение различных пакетов автоматизированного проектирования.

Также известно, что характеристики СВЧ устройства зависят от точности его изготовления. А погрешность воспроизведения конструкции СВЧ устройства влияет на его фактические электродинамические параметры.

Погрешности геометрии, заключающиеся в разбросе размеров резонансных диафрагм при изготовлении, приводят к изменению электрических параметров устройства, поэтому сложная геометрия используемых резонансных диафрагм [5] накладывает жесткие допуски на их изготовление.

Это все делает актуальным изучение влияния точности изготовления СВЧ устройств на их параметры. А при разработке новых устройств следует проводить исследования, определяющие требования к изготовлению основных компонент (например, резонансных диафрагм сложной формы поперечного сечения). Это

особо важно для СВЧ устройств, предназначенных для серийного производства. Поэтому при конструировании различных устройств требуется определить не только оптимальные производственные допуски, но и изучить их влияние на основные электродинамические характеристики изделия.

В настоящей работе продолжено изучение электродинамических характеристик полосно-пропускающих фильтров, созданных на базе круглого волновода с радиальными неоднородностями сложного поперечного сечения [5], и сделан акцент на изучение их электродинамических характеристик при незначительном изменении геометрических размеров диафрагм.

### 1. Постановка задачи

Для достижения поставленных целей проведем электродинамическое исследование характеристик фильтра при незначительном отклонении его размеров от оптимальных. Для этого создадим сам фильтр и исследуем его электродинамические характеристики.

В настоящей работе будем использовать модель фильтра, проектирование которого было проведено по ранее апробированной методике [6,7] и выполнялось в два этапа [1]:

- исследование электродинамических характеристик резонансных диафрагм [5,8] (выбор вида неоднородности, изучение зависимости S-параметров и оценка их добротности в зависимости от геометрических размеров);
- создание трехмерной модели фильтра-прототипа (определение его характеристик, требуемого числа звеньев, геометрических размеров резонаторов) и проведение оптимизации ее параметров с помощью пакета CST STUDIO.

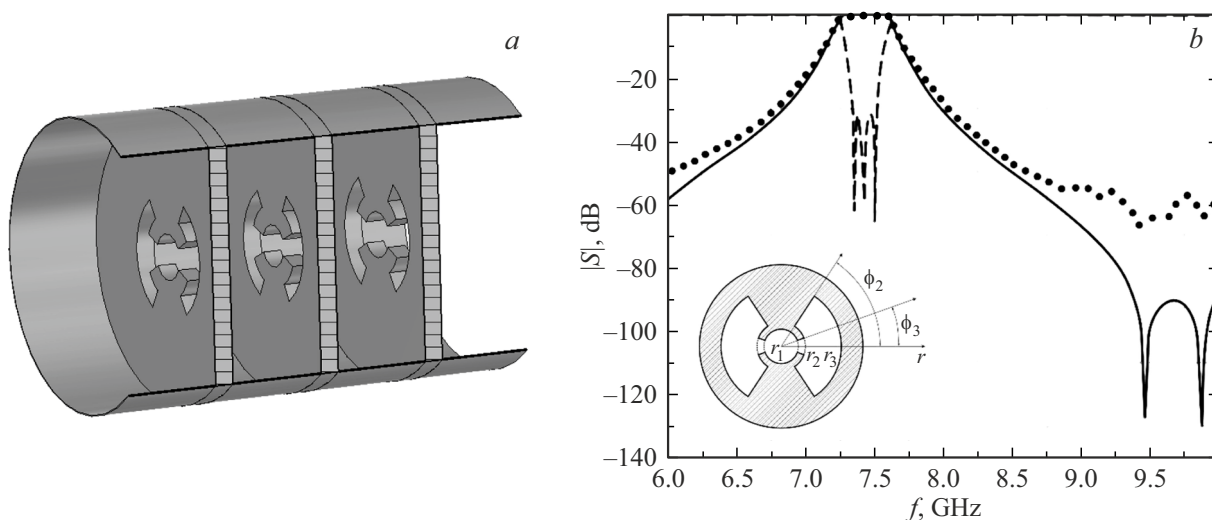


Рис. 1. Модель синтезированного полосно-пропускающего фильтра третьего порядка: его топология (а) и АЧХ (b).

Знание геометрических размеров, оказывающих существенное влияние на резонансную частоту и добротность одиночной диафрагмы [1,5] сложного поперечного сечения, позволяет рассчитать прототип фильтра, определить его геометрические размеры, провести его синтез и многопараметрическую оптимизацию.

Далее решаемая задача сводится к исследованию зависимости характеристик фильтра (его S-параметров) при незначительном изменении геометрических размеров (при их отклонении от оптимальных значений).

## 2. Влияние отклонения геометрических размеров фильтра от оптимальных на его характеристики

Необходимо отметить, что сложный профиль резонансных диафрагм требует высокой точности их изготовления. Для изучения влияния допустимых отклонений геометрических размеров неоднородностей от оптимальных используем созданные модели спроектированных фильтров третьего и пятого порядков.

На рис. 1 показана топология фильтра третьего порядка и его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). У данного фильтра неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания (7.22–7.62 GHz) достигала  $\sim 0.7$  dB при коэффициенте отражения не хуже  $-33$  dB. При этом его продольный размер чуть больше 26 mm. Проведенное сравнение (рис. 1, b, на врезке приведено поперечное сечение резонансной диафрагмы) результатов расчета (сплошная линия —  $|S_{21}|$ , пунктирная —  $|S_{11}|$ ) с экспериментальными данными (маркеры —  $|S_{21}|$ , усредненные значения по двум измерениям с помощью Agilent Technologies E8363B PNA Network Analyzer и Микран Р4М-18) подтвердило высокую точность и достоверность полученных данных. Результаты

Геометрические размеры исследуемых фильтров

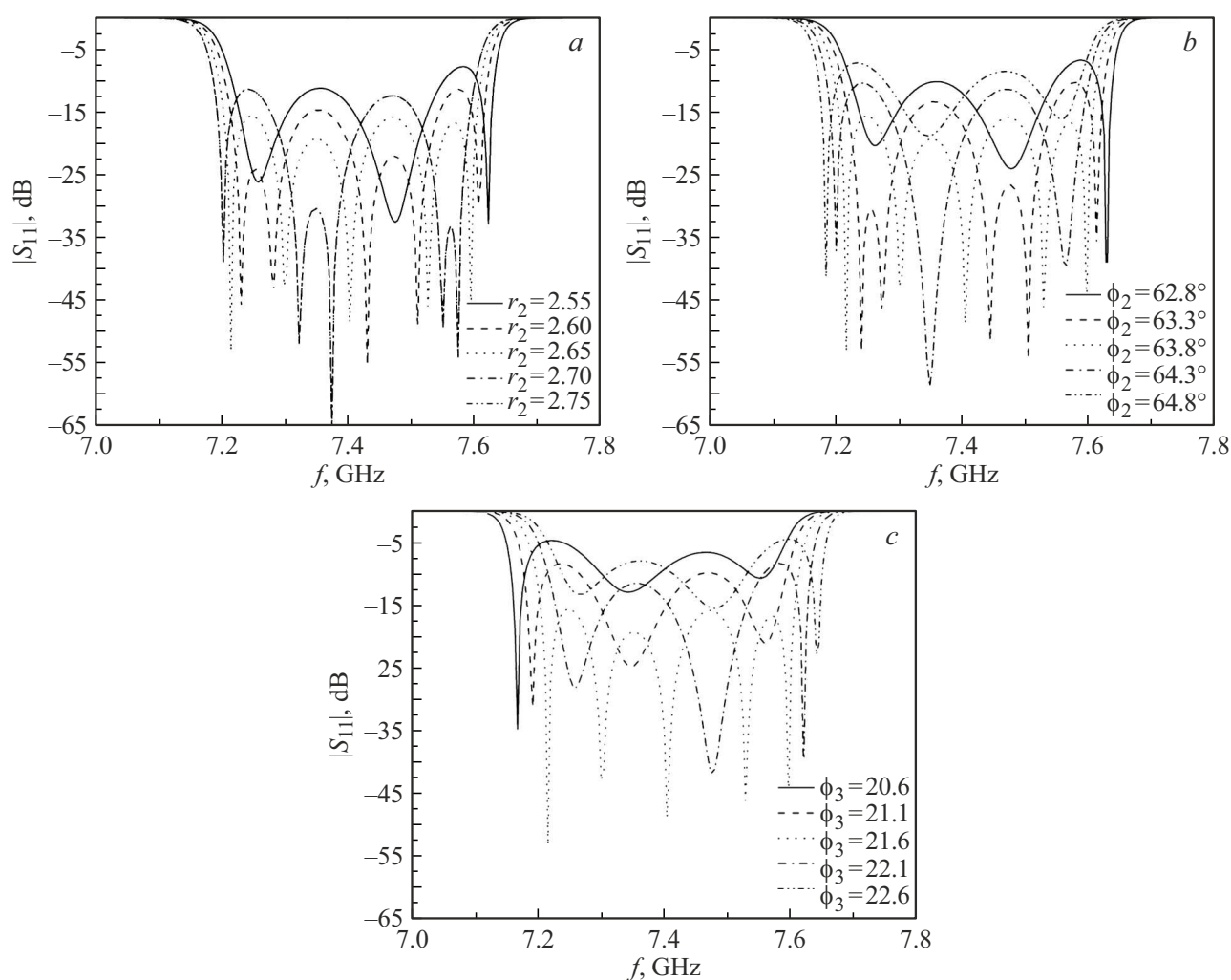
Размеры диафрагм	$\phi_2, ^\circ$	$\phi_3, ^\circ$	$r_1, \text{ mm}$	$r_2, \text{ mm}$	$r_3, \text{ mm}$
Оптимальные размеры фильтра третьего порядка					
Первая и третья	57.56	26.92	2.37	4.33	6.47
Вторая	61.19	23.04	2.16	4.24	6.06
Расстояние между диафрагмами: $l_{12} = l_{23} = 10.17 \text{ mm}$					
Оптимальные размеры фильтра пятого порядка					
Первая и пятая	58.26	27.26	2.28	3.69	6.47
Вторая и четвертая	61.28	23.34	2.08	4.11	6.06
Третья	63.8	21.69	1.55	2.65	5.61

Расстояние между диафрагмами:  $l_{12} = l_{45} = 7.92 \text{ mm}$ ,  
 $l_{23} = l_{34} = 8.91 \text{ mm}$

приведены для фильтра с размерами из таблицы. В работе [1] были приведены сравнения с экспериментальными данными для фильтра пятого порядка.

Рассмотрим зависимость АЧХ полосно-пропускающего фильтра при незначительном отклонении геометрических размеров диафрагмы от оптимальных (см. таблицу).

Так, на рис. 2, а показана зависимость модуля коэффициента отражения при изменении внешнего радиуса кольцевого сегмента  $r_2$ . Видно, что оптимальное значение  $|S_{11}|$  достигается при  $r_2 = 2.65 \text{ mm}$ , а его незначительное изменение влияет на добротность резонатора, но не приводит к существенным изменениям характеристики фильтра в полосе рабочих частот. Следует отметить, что в отличие от изменения угла радиального ребра и угла кольцевого сегмента изменение внешнего радиуса кольцевого сегмента менее всего влияет на АЧХ фильтра.



**Рис. 2.** Зависимость модуля коэффициента отражения от частоты и размеров диафрагмы (пояснения в тексте).

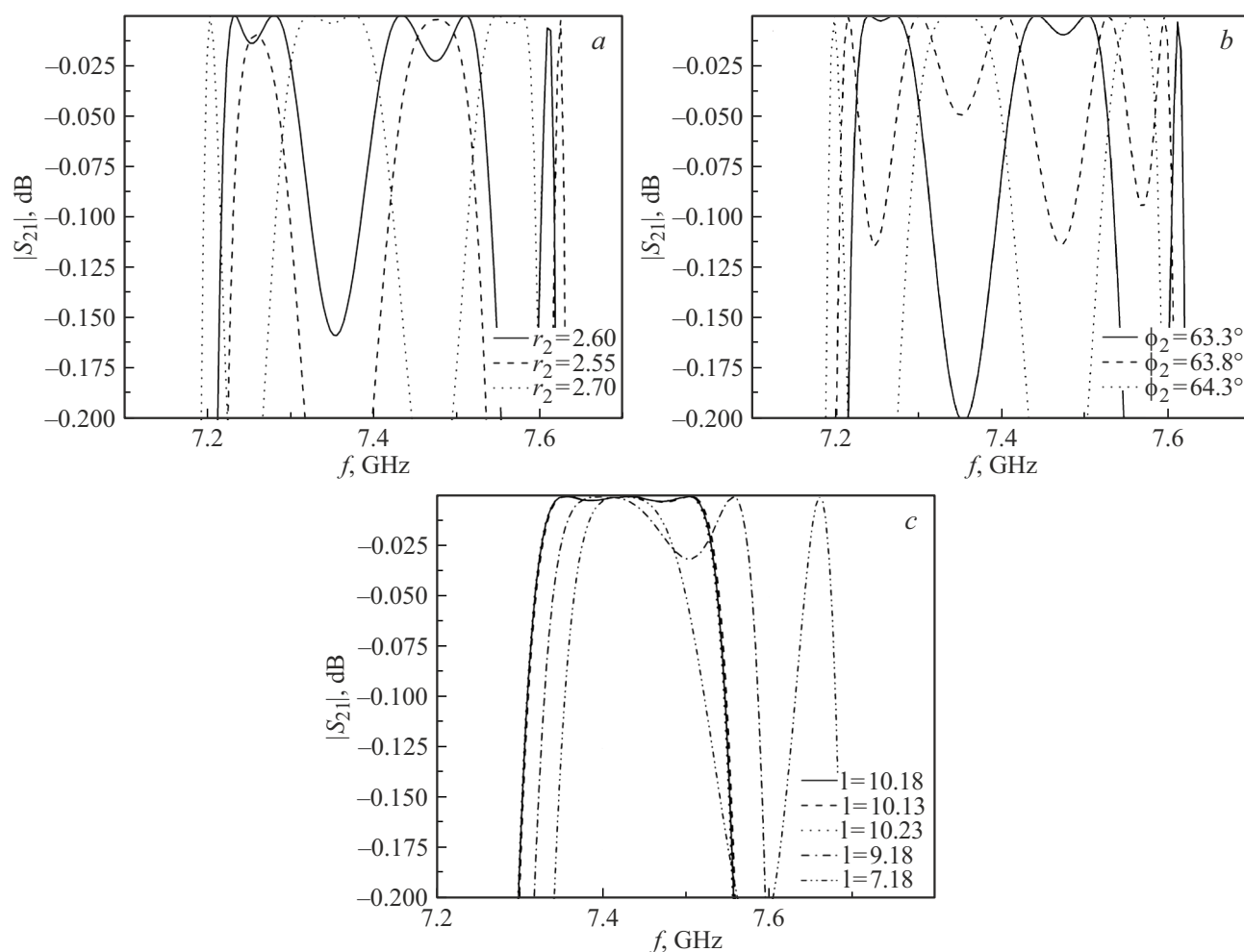
Рассмотрим влияние размера радиального гребня  $\phi_2$  на АЧХ фильтра при его отклонении от оптимального размера равного  $63.8^\circ$ . При этом остальные размеры волноводной структуры зафиксированы и выбраны оптимальными. Так, на рис. 2, *b* представлена зависимость модуля коэффициента отражения полосно-пропускающего фильтра пятого порядка при незначительном изменении угла радиального гребня  $\phi_2$ . Как видно на рис. 2, *b* при  $\phi = 63.8^\circ$ , модуль коэффициента отражения равен примерно — 20 dB, что соответствует оптимальной характеристике фильтра. Даже при незначительном изменении угла (в пределах одного градуса) характеристика фильтра начинает „разваливаться“, так как это приводит к резкому и значительному изменению резонансной частоты и, как следствие, добротности третьей диафрагмы [5]. При уменьшении значения угла наблюдается смещение АЧХ в область высоких частот, а при увеличении угла — аналогичное смещение в противоположном направлении.

На рис. 2, *c* представлена зависимость характеристики фильтра при изменении угла радиального кольцевого

сегмента  $\phi_3$ . На рисунке видно, что оптимальная характеристика фильтра достигается при  $\phi_3 = 21.6^\circ$ . При уменьшении значения угла АЧХ фильтра смещается влево, а при увеличении угла — в область более высоких частот. Это объясняется существенным изменением добротности резонансной диафрагмы, что сказывается на электродинамических характеристиках фильтра.

Рассмотрим кратко влияние незначительных ( $\sim 2\%–3\%$ ) изменений геометрических размеров на модуль коэффициента передачи для фильтра пятого порядка. Так, на рис. 3, *a* приведена зависимость  $|S_{21}|$  от частоты при изменении радиуса  $r_2$ . Стоит отметить, что изменение радиуса на 0.1 mm существенно искажает характеристику фильтра, а ошибки при изготовлении на 0.05 mm можно считать допустимыми. Отклонение размеров угла радиального гребня  $\phi_2$  более существенно сказывается на АЧХ устройства. Так, его изменение всего на  $0.5^\circ$  приводит к сдвигу центральной частоты (рис. 3, *b*).

На рис. 3, *c* показана зависимость  $|S_{21}|$  от частоты при изменении расстояния ( $l$ ) между диафрагмами для филь-



**Рис. 3.** Зависимость модуля коэффициента прохождения от частоты и размеров диафрагмы (пояснения в тексте).

тра третьего порядка. Оптимальная АЧХ фильтра достигается при расстоянии между диафрагмами 10.188 мм. Расчеты показали, что при изменении расстояния между диафрагмами на 0.05–0.1 мм изменение  $|S_{21}|$  незначительно. Но отклонение размеров от оптимальных приблизительно на 1 мм уже является критичным.

Проведенные расчеты для полосно-пропускающего фильтра третьего порядка показали аналогичную зависимость электродинамических характеристик от размеров среднего резонатора.

## Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что при изготовлении фильтров следует контролировать азимутальные размеры неоднородности, как оказывающие существенное влияние на АЧХ устройства. При этом допускается отклонение на  $\pm 0.5^\circ$ . Радиальные размеры допускают отклонение  $\sim 2\%–3\%$ , в нашем случае это порядка 0.05 мм. Расстояние между диафрагмами менее всего влияет на АЧХ устройства и допускает отклонение

до 1 мм от оптимального размера. Также необходимо отметить, что сложная геометрия резонансных диафрагм и их количество ужесточают требования по допуску при изготовлении и сборке селективных устройств СВЧ.

Полученные в работе результаты могут быть использованы не только при проектировании и изготовлении СВЧ фильтров, но и при разработке различных виртуальных лабораторных работ [9].

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета („Приоритет-2030“).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Д.В. Лонкина, В.В. Земляков, Д.С. Губский, С.В. Крутиев, Г.Ф. Заргано. ЖТФ, **93** (12), 1701 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56798.f223-23 [D.V. Lonkina, V.V. Zemlyakov, D.S. Gubsky, S.V. Krutiev, G.F. Zargano. Tech. Phys., **68** (12), 1577 (2023).]
- [2] S. Ekici, E. Yazgan. Microwave Opt. Technol. Lett., **64**, 1707 (2022). DOI: 10.1002/mop.33356
- [3] D.V. Lonkina, D.S. Gubskii, V.V. Zemlyakov. J. Commun. Technol. Electron., **65** (9), 967 (2020). DOI: 10.1134/S1064226920090053
- [4] S. Ekici, E. Yazgan. Electromagnetics, 2021 **41** (1), 1 (2021). DOI: 10.1080/02726343.2021.1864577
- [5] D.V. Lonkina, V.V. Zemlyakov, D.S. Gubsky, G.F. Zargano, S.V. Krytiev. Radiophys. Quant. Electron., **64** (5), 357 (2021). DOI: 10.1007/s11141-022-10138-7
- [6] V.V. Zemlyakov, M. Tyaglov, V. Shevchenko. J. Electromagnetic Waves and Appl., **34** (2), 224 (2020). DOI: 10.1080/09205071.2019.1697379
- [7] D.S. Gubsky, V.V. Zemlyakov, D.V. Lonkina. J. Commun. Technol. Electron., **64** (1), 20 (2019). DOI: 10.1134/S1064226920090053
- [8] D.S. Gubsky, V.V. Zemlyakov, D.V. Lonkina. Radiophysics and Quantum Electronics, **61** (5), 362 (2018). DOI: 10.1007/s11141-018-9897-0.
- [9] D.S. Gubsky, V.V. Zemlyakov, I.V. Mamay, G.P. 9-th International Conference on Antenna Theory and Techniques. (ICATT 2013) (Odessa, Ukraine, 2013), p. 163. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650712