

УДК 621.372

Фурманова Н. И.<sup>1</sup>, Фарафонов А. Ю.<sup>2</sup>, Романенко С. Н.<sup>3</sup>, Шинкаренко Э. Н.<sup>4</sup>, Мищенко М. В.<sup>5</sup><sup>1, 5</sup>Ассистент Запорожского национального технического университета<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета<sup>3</sup>Канд. физ.-мат. наук, доцент Запорожского национального технического университета<sup>4</sup>Ст. преподаватель Запорожского национального технического университета

## СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФИЛЬТРОВ С ОТВЕРСТИЯМИ В ЭКРАНЕ

Проведен сравнительный анализ программ проектирования Microwave Office и HFSS на примерах моделирования микрополосковых полосно-пропускающего фильтра и фильтра нижних частот с отверстиями в экране. Представлены результаты численного моделирования фильтров в сравнении с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** микрополосковый фильтр, Microwave Office, HFSS, моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия продолжается интенсивное развитие систем автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В современной РЭА можно, как правило, выделить две основные части: аналоговая СВЧ часть и часть цифровой обработки. При этом, одновременно с цифровой, возрастает и роль СВЧ составляющей, что обусловлено ростом количества систем, функционирующих в микроволновом диапазоне: мобильная связь, навигация, спутниковое телевидение, телекоммуникационные системы, системы специального назначения и т.д. Кроме того, с расширением функциональных возможностей современной РЭА, усложняются алгоритмы и возрастают требования к точности обработки сигналов, что, в свою очередь, накладывает более жесткие требования на адекватность и точность математических моделей, используемых в САПР. Важной характеристикой САПР является также наличие дружественного графического интерфейса, обеспечивающего пользователя необходимым набором функций для корректного описания модели устройства и последующего анализа результатов расчета.

Отмеченные особенности характерны, в частности, для САПР Microwave Office [2] и HFSS (High Frequency System Simulator) [3], которые используются при решении широкого круга задач в диапазоне СВЧ. Каждая из упомянутых систем имеет свои преимущества и недостатки. Так, САПР Microwave Office ориентирована на анализ схем и устройств на основе многослойных диэлектрических структур. Система сочетает электродинамический анализ устройства (модуль EM Sight) с его представлением в виде набора базовых элементов (модуль Schematic). Кроме того, Microwave Office содержит также практически полный набор инструментов, характерных для низкочастотной САПР, таких, как нелинейный анализ схемы, ее оптимизация, анализ чувствительности, статистический анализ. Вместе с тем, данная система не является в полной мере системой трехмерного электродинамического моделирования; она относится к так называемым 2,5-мерным системам.

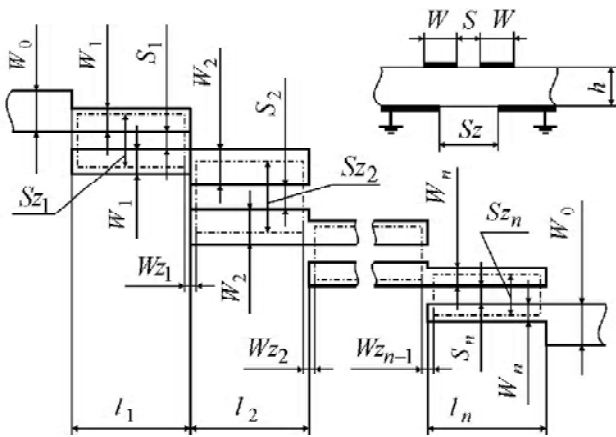
Большой универсальностью при электродинамическом моделировании трехмерных задач обладает система HFSS, которая вычисляет многомодовые  $S$ -параметры и электромагнитные поля в трехмерных пассивных структурах произвольной формы. HFSS использует для решения уравнений электродинамики метод конечных элементов, включающий адаптивное генерирование и деление ячеек. Решения для электромагнитного поля, найденные из уравнений Максвелла, позволяют с хорошей точностью определить все характеристики СВЧ устройства с учетом возникновения и преобразования одних типов волн в другие, потерь в материалах и на излучение, и т.д. HFSS предоставляет возможности моделирования антенн, делителей мощности, схем коммутации, волноводных элементов, фильтров СВЧ и трехмерных неоднородностей, описание которых сводится к созданию чертежа структуры, точному заданию материала, идентификации портов и требуемых характеристик. В результате расчета находятся поля внутри и вне структур, а также многомодовые  $S$ -параметры. В то же время система HFSS более трудна в освоении и, как правило, требует больших вычислительных ресурсов.

В данной работе проводится сравнительный анализ систем Microwave Office 6.51 и HFSS 9.2 при моделировании микрополосковых фильтров, рассмотренных в работах [4], [5], [6].

### 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ

Топология полосно-пропускающего фильтра (ППФ) в общем виде представлена на рис. 1. При моделировании использовались следующие параметры: длина каждого участка связанных линий составляет 15,93 мм, ширина полоска – 0,732 мм, расстояние между полосками – 0,361 мм, ширина щели в экранирующем слое – 1,78 мм; значения эффективных диэлектрических проницаемостей одинаковы для четного и нечетного режимов и равны 5,54.

На рис. 2 показан вид моделируемой конструкции ППФ в двух системах, а на рис. 3 показана конструкция фильтра низких частот (ФНЧ) на микрополосковых линиях, рассмотренного в [6].



**Рис. 1.** Топология фильтра на связанных линиях со щелью в экранирующем слое:

$W_i$  – ширина связанных линий фильтра;  $S_i$  – зазоры между связанными линиями;  $l_i$  – длина участков фильтра;  $Sz_i$  – ширина щели в экранирующем слое;  $Wz_i$  – ширина металлизированных участков между соседними отверстиями,  $h$  – толщина диэлектрической подложки

В качестве портов при моделировании в HFSS использовались волновые порты (Wave port) в виде вертикальных боковых плоскостей, показанных на рис. 2, б и 3, б более темным цветом.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При расчетах центральная частота ППФ составляла  $f_0 = 2$  ГГц, полоса пропускания 20 %, порядок  $N=2$ . Для двух идентичных участков фильтра значения волновых сопротивлений четного и нечетного режимов принимались  $Z_{0e} = 77,67$  Ом и  $Z_{0o} = 38,04$  Ом, соответственно. Модель фильтра, построенная в системе HFSS, была разбита на 1476 ячеек в форме тетраэдра, а модель этого же фильтра, выполненная в Microwave Office – на 1342 ячейки прямоугольной формы. При этом время расчета в

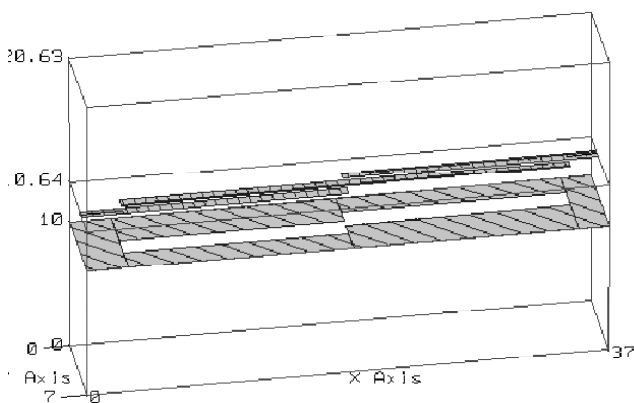
системе HFSS составило около 15 минут, а в Microwave Office – порядка 2 часов при одинаковом количестве точек на частотной оси.

На рис. 4 показаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) анализируемого полосно-пропускающего фильтра. Анализ данных показал, что система HFSS дает более точный результат в полосе пропускания фильтра, однако имеет значительные расхождения с экспериментальными значениями в полосе заграждения. Система Microwave Office дает результат, близкий к значениям в эксперименте во всей частотной области. Ширина полосы пропускания по уровню  $-3$  дБ в системе HFSS отличается от экспериментальных результатов на 8 % и на 17 % в Microwave Office. При моделировании в HFSS, путем изменения длины участков связанных линий в конструкции фильтра можно добиться смещения пиков на АЧХ в полосе заграждения, однако при этом центральная частота фильтра также будет смещаться по отношению к экспериментальному значению.

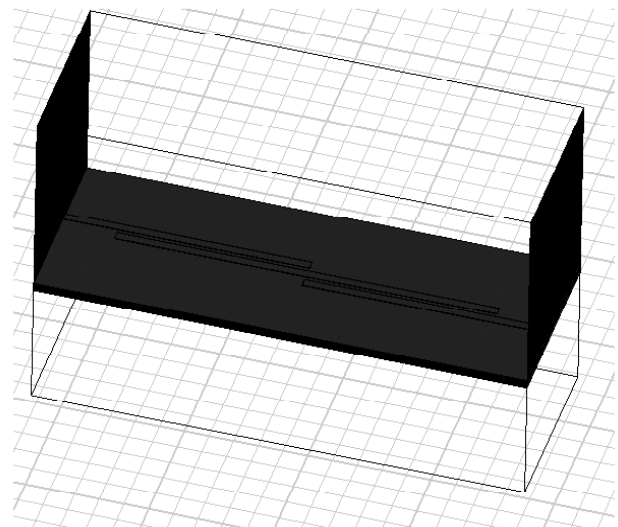
Кроме ППФ было проведено сравнение систем проектирования на примере моделирования фильтра нижних частот на микрополосковых линиях с отверстием в экранирующем слое в виде гантели [6]. При этом модель фильтра в HFSS содержала 1362 ячейки в форме тетраэдра, а в Microwave Office – 1424 прямоугольных ячейки. В качестве портов при моделировании в HFSS также использовались волновые порты.

Расчетное время в системе HFSS составило 25 минут, в Microwave Office – около 2,5 часов. Результаты расчетов в сравнении с экспериментом приведены на рис. 5.

Анализ данных показал, что максимальное отклонение АЧХ по уровню  $(-20)$  дБ от экспериментальных значений в HFSS не превышает 6 %, а в системе Microwave Office отличие составляет не более 2 %. В то же время, HFSS точнее, чем Microwave Office, описывает АЧХ во всем анализируемом частотном диапазоне.

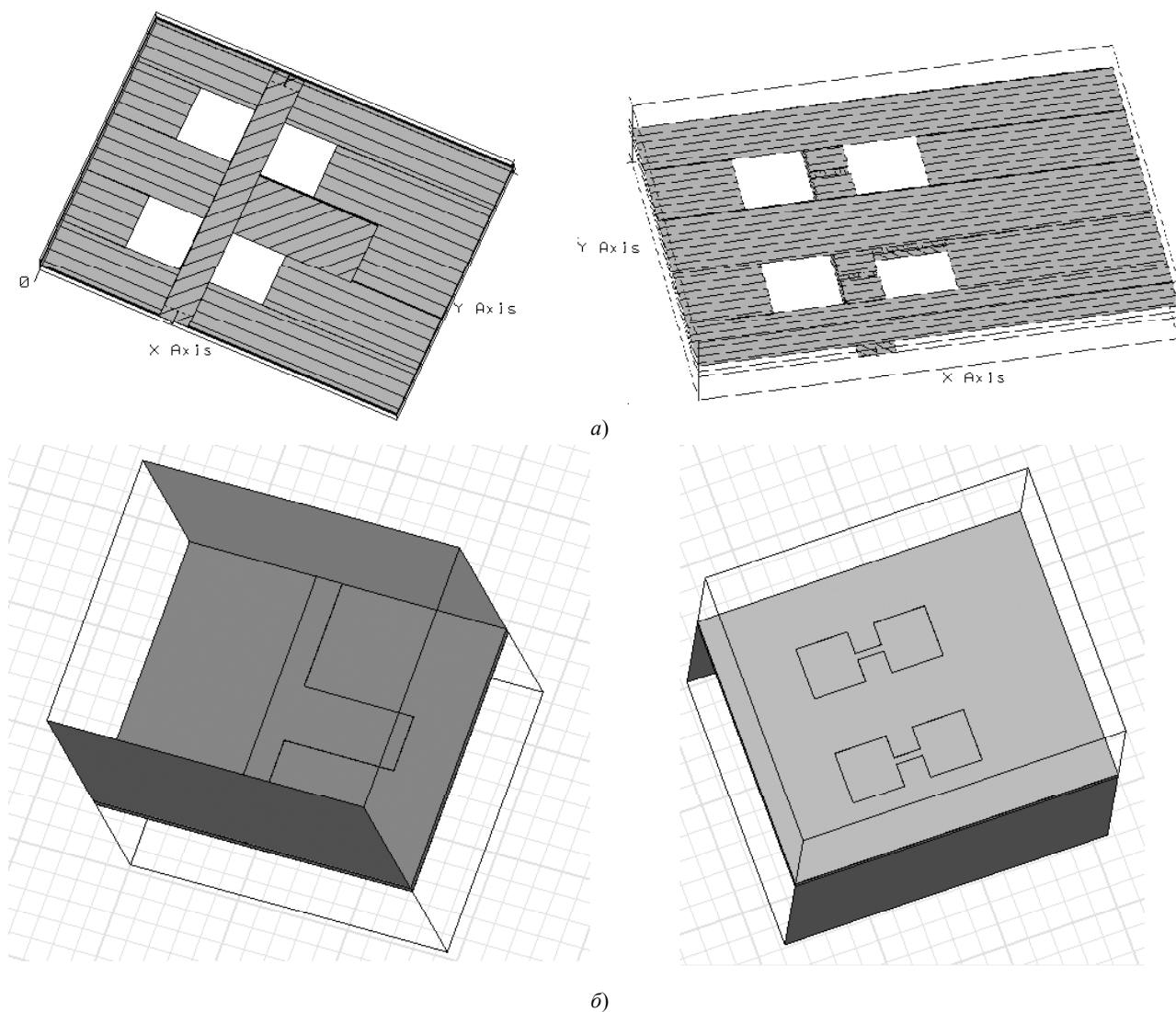


а)

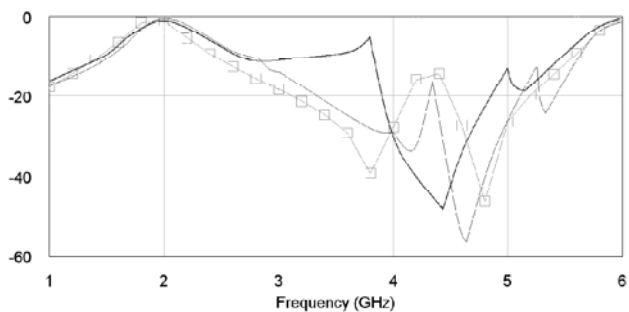


б)

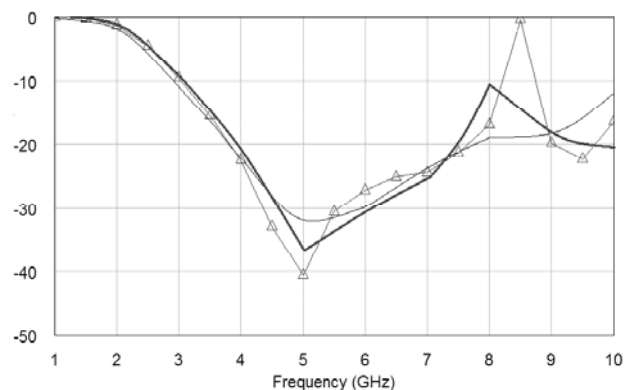
**Рис. 2.** Вид моделируемой конструкции ППФ на микрополосковых линиях со щелью в экране: а) в системе Microwave Office; б) в системе HFSS



**Рис. 3.** Вид моделируемой конструкции ФНЧ на микрополосковых линиях с отверстием в экране в виде гантели:  
 а) в системе Microwave Office сверху и снизу;  
 б) в системе HFSS сверху и снизу, соответственно



**Рис. 4.** Сравнение АЧХ ППФ, полученных в HFSS (толстая линия), Microwave Office (тонкая линия с метками в виде квадратов) и в эксперименте (тонкая линия)



**Рис. 5.** Сравнение АЧХ ФНЧ, полученных в HFSS (толстая линия), Microwave Office (тонкая линия с метками в виде треугольников) и в эксперименте (тонкая линия)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в работе сравнительный анализ САПР Microwave Office и HFSS на примерах моделирования микрополосковых фильтров со щелями в экране показал, что к достоинствам системы Microwave Office следует отнести интуитивный дружественный интерфейс и простоту освоения, наличие обширной библиотеки элементов, что упрощает работу конструктора и ускоряет процесс создания моделей. Однако, Microwave Office имеет и свои недостатки, в частности, использование прямоугольной сетки для черчения объекта, размеры ячеек которой одинаковы для всех слоев. При этом привязка топологии проводников к сетке может негативно повлиять на точность результатов моделирования. Кроме того, время проведения анализа модели может значительно превышать аналогичный показатель в системе HFSS.

Главными преимуществами системы HFSS при моделировании вышеуказанных фильтров является высокая скорость расчетов при достаточной точности полученных результатов, что подтверждается сравнением с экспериментом. Использование для разбиения ячеек в форме тетраэдров позволяет более точно описывать трехмерные конструкции. К недостаткам этой САПР следует отнести трудность и длительность освоения, а также сложность задания портов.

Таким образом, систему Microwave Office целесообразнее использовать при менее точном первоначальном моделировании, а для получения более точных результатов, при наличии экспериментальных данных по заданию портов для заданного типа корпуса, предпочтительнее система HFSS.

Направление дальнейших работ связано с изучением и анализом многослойных микрополосковых частично экранированных структур.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банков, С.Е. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР / С. Е. Банков, А. А. Курушин. – М. : ИРЭ АН, 2008. – 600 с
2. Разевиг, В. Д. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. / В. Д. Разевиг, Ю. В. Потапов, А.А. Курушин. – М. : Солон-Пресс, 2003. – 600 с.
3. Банков, С. Е. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS / С. Е. Банков, А. А. Курушин, В. Д. Разевиг 2-е изд. – М. : Солон-Пресс, 2004. – 240 с.
4. Velazquez-Ahumada, M. del Castillo. Parallel coupled microstrip filters with ground-plane aperture for spurious band suppression and enhanced coupling / M. del Castillo Velazquez-Ahumada, J. Martel, F. Medina // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2004. – vol. 52, № 3. – P. 1082–1086.
5. Фарафонов, А. Ю. Синтез микрополосковых полосовых фильтров на связанных линиях с отверстиями в экране / А. Ю. Фарафонов, А. Ю. Воропай, Л. М. Карпуков, С. Н. Романенко // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2008. – № 2. – С. 35–42.
6. Ahn, D. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure / D. Ahn, J.-S. Park, C.-S. Kim, J. Kim, Y. Qian, T. Itoh. // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2001. – vol. 49, № 1. – P. 86–93.

Стаття надійшла до редакції 29.03.2012.  
Після доробки 25.06.2012.

Фурманова Н. І., Фарафонов О. Ю., Романенко С. М., Шинкаренко Е. М., Міщенко М. В.

ПОРІВНЯННЯ ПРОГРАМ ПРОЕКТУВАННЯ НА ПРИКЛАДАХ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ ФІЛЬТРІВ З ОТВІРАМИ В ЕКРАНІ

Проведено порівняльний аналіз програм проектування Microwave Office і HFSS на прикладах моделювання мікросмужкових смужкового фільтра і фільтра нижніх частот з отворами в екрані. Представлені результати чисельного моделювання фільтрів в порівнянні з експериментальними даними.

**Ключові слова:** мікросмужковий фільтр, Microwave Office, HFSS, моделювання.

Furmanova N. I., Farafonov O. Yu., Romanenko S. M., Shynkarenko E. N., Mishchenko M. V.

COMPARISON OF DESIGN SOFTWARE BASED ON MODELING OF MICROSTRIP FILTERS WITH SLOTTED SCREEN

A comparative analysis of design programs Microwave Office and HFSS on examples of microstrip filters with slots in the ground plane was performed. The results of numerical modeling of the filters in comparison with experimental data are presented.

Microwave Office's advantages are an intuitive user-friendly interface and ease of development, the availability of extensive elements library which simplifies and speeds up the design process. However Microwave Office has some disadvantages: using of rectangular grid for drawing the object and time of the analysis models. The main advantages of HFSS are a high speed calculation with sufficient accuracy of the results in comparison with experiment. Using tetrahedral shape cells allows to more accurately describe the three-dimensional structures. The disadvantages of this CAD are difficulty of development and complexity of specifying ports. Thus, the system Microwave Office is better to use during the initial modeling. For more accurate results, if data about ports' dimension are given, system HFSS is preferable.

**Key words:** microstrip filter, slotted ground plane, Microwave Office, HFSS, EM-simulation.

## REFERENCES

1. Bankov S. Ye., Kurushin A. A. E'lectrodinamika i tekhnika SVCH dlia polzovatelej SAPR. Moscow, IRE' AN, 2008, 600 p.
2. Razevig V. D., Potapov Yu. V., Kurushin A. A. Proyektirovaniye SVCH ustrojstv s pomoshchyu Microwave Office. Moscow, Solon-Press, 2003, 600 p.
3. Bankov S. Ye., Kurushin A. A., Razevig V. D. Analiz i optimizatsiya SVCH struktur s pomoshchyu HFSS. Moscow, Solon-Press, 2004, 240 p.
4. M. del Castillo Velazquez-Ahumada, J. Martel, F. Medina. Parallel coupled microstrip filters with ground-plane aperture for spurious band suppression and enhanced coupling. // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2004. – vol. 52, № 3. – P. 1082–1086.
5. Farafonov A. Yu., Voropaj A. Yu., Karpukov L. M., Romanenko S. N. Sintez mikroposkovy'h polosovy'h filtrov na sviazanny'h liniyah s otverstiyami v ekrane. *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2008, vol. 2, pp. 35–42.
6. Ahn D., Park J.-S., Kim C.-S., Kim J., Qian Y., Itoh T. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2001. – vol. 49, № 1. – P. 86–93.