

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.677

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17>

Применение макросов языка VBScript при моделировании волноводно-щелевых антенн в САПР Ansys HFSS

В. Г. Кошкидько✉, М. М. Мигалин

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

✉ kvg59@mail.ru

Аннотация

Введение. Современные антенные устройства содержат большое число повторяющихся элементов. При построении моделей таких устройств в системах автоматизированного проектирования (САПР) требуется многократное выполнение одинаковых операций, что может стать рутинной задачей для разработчика. В связи с этим актуальной становится задача автоматизации выполнения этих одинаковых операций при построении моделей антенн с периодическими структурами.

Цель работы. Демонстрация автоматизации построения моделей антенн с периодическими структурами в САПР Ansys HFSS на примере волноводно-щелевых антенных решеток.

Материалы и методы. Для расчета конструктивных параметров антенной решетки использован энергетический метод, а для реализации процесса автоматизации проектирования волноводно-щелевых антенн в САПР Ansys HFSS разработаны макросы на языке Visual Basic Scripting Edition.

Результаты. Для работы с моделями волноводно-щелевых антенн в САПР Ansys HFSS разработаны четыре макроса на языке VBScript: "вырезание" в автоматическом режиме поочередно продольных щелей на широкой стенке прямоугольного волновода по заданным координатам; удаление исходных щелей, созданных с помощью предыдущего макроса; построение ломаной линии, проходящей через центры щелей, с целью контроля реализованного распределения ближнего поля антенны; "вырезание" встречно-наклонных щелей на узкой стенке прямоугольного волновода по заданным координатам. Приведены результаты использования разработанных макросов.

Заключение. Применение разработанных макросов позволяет автоматизировать рутинные операции по созданию и удалению однотипных объектов при создании модели антенны с периодическими структурами в САПР Ansys HFSS. Подробно описанные процедуры создания макросов могут быть распространены на широкий класс задач по исследованию характеристик конструкций, включающих в себя повторяющиеся объекты, такие как фазированные антенные решетки, отражательные решетки, волноводно-щелевые антенны, фрактальные антенны, логопериодические антенны, многослойные линзовые антенны, многозвенные СВЧ-фильтры.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна, моделирование, автоматизация, макрос, VBScript

Для цитирования: Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Применение макросов языка VBScript при моделировании волноводно-щелевых антенн в САПР Ansys HFSS // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.11.2019; принята к публикации после рецензирования 27.12.2019; опубликована онлайн 28.02.2020



Design of a Slotted Waveguide Antenna by Means of VBScript Scripting Language Macros in CAD Ansys HFSS

Vladimir G. Koshkid'ko✉, Mikhail M. Migalin

Southern Federal University, Taganrog, Russia

✉ kvg59@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern antenna devices contain a large number of repeating elements. The process of development of CAD models of such devices requires repeatedly performed operations that is a routine task for an engineer. Therefore, the problem of repeating operations automation arises when constructing antenna models with periodic structures.

Aim. To demonstrate the automation of slotted waveguide antennas design process in CAD Ansys HFSS.

Materials and methods. In order to determine the dimensions of the slotted waveguide antenna the energy method was used. Automation procedure of the design of the slotted waveguide antennas in CAD Ansys HFSS using the Visual Basic Scripting Edition macros was presented.

Results. In order to design and edit slotted waveguide antennas in CAD Ansys HFSS four macros in the VBScript language were established: for slot subtraction from a broad wall of a rectangular waveguide at given coordinates; for removing the original slots created using the previous macro; for drawing a polyline passing through the centers of the slots, in order to verify the antenna's near field realized distribution; for inclined slot subtraction from a narrow wall of a rectangular waveguide at given coordinates. Results of the macros usage were presented.

Conclusion. The above mentioned macros allow one to automate the routine steps during the process of creating and deleting objects while designing an antenna model with periodic structures in CAD Ansys HFSS. Specified procedures for creating macros could be extended to a wide class of tasks related to the studies of characteristics of electromagnetic structures including repeating objects (phased antenna arrays, reflective arrays, slotted waveguide antennas, fractal antennas, log-periodic antennas, multi-layer lens antennas, ladder-type microwave filters).

Keywords: slotted waveguide antenna, CAD modeling, automation, macros, VBScript

For citation: Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design of a Slotted Waveguide Antenna by Means of VBScript Scripting Language Macros in CAD Ansys HFSS. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 29.11.2019; accepted 27.12.2019; published online 28.02.2020

Введение. Для современных телекоммуникационных систем характерно применение устройств, состоящих из большого числа повторяющихся элементов. Среди таких устройств можно выделить фазированные антенные решетки, отражательные решетки, волноводно-щелевые антенны (ВЩА), фрактальные антенны, логопериодические антенны, многослойные линзовые антенны, многозвенные СВЧ-фильтры. При построении моделей таких устройств в системах автоматизированного проектирования (САПР) требуется

многократное создание одинаковых элементов, что может стать рутинной задачей для разработчика.

Однако САПР позволяют автоматизировать как постобработку результатов, так и процесс построения однотипных объектов с помощью макросов [1–5] или обращения к внешним программам, таким как Matlab [6, 7]. Макросы удобны при построении антенн, элементы которых расположены согласно некоторому закону.

Целью настоящей статьи является описание процесса автоматизации построения модели ВЩА в

программном пакете Ansys HFSS с помощью макроса на языке Visual Basic Scripting Edition (VBScript).

Постановка задачи. Требуется построить модель ВЩА в программном пакете Ansys HFSS. Для определенности примем, что проектируемая ВЩА должна иметь, например, такие же параметры, как и в [8–10]:

- диапазон рабочих частот 10.8 ± 0.1 ГГц;
- ширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН) в H -плоскости 1° ;
- уровень боковых лепестков (УБЛ) в H -плоскости -20 дБ;
- максимум ДН направлен перпендикулярно оси ВЩА;
- поляризация вертикальная;
- излучаемая мощность не превышает 5 Вт.

Конструкция ВЩА и расчет геометрических размеров для построения модели. Проектируемая ВЩА (рис. 1) построена на основе горизонтально расположенного прямоугольного волновода стандартного сечения $a \times b = 23 \times 10$ мм с идеально проводящими стенками. На широкой стенке волновода расположены продольные щели, размеры и координаты которых определяются в результате проектирования. С одной стороны волновод возбуждается волноводным портом 2 (рис. 1) с основным типом волны H_{10} , расположенным на расстоянии $\lambda_B/4$ от центра первой щели, а с другой – закорочен идеально проводящей заглушкой 3 (рис. 1), расположенной на расстоянии $\lambda_B/4$ от центра последней щели, где

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - [\lambda/(2a)]^2}}$$

– длина волны в волноводе; λ – длина волны в свободном пространстве.

Ширина щелей принята равной 1 мм, что обеспечило невысокую добротность и достаточную электрическую прочность [11]. Длину ВЩА L определяет z -координата центра последней щели и расстояние $\lambda_B/4$ до короткозамыкателя.

Вертикальная поляризация излучения реализована размещением продольных щелей в шахматном порядке на широкой стенке волновода (рис. 1). Для обеспечения заданного УБЛ выбрано распределение поля $f(z)$ вида "косинус в квадрате на пьедестале" [12].

Для обеспечения максимума излучения перпендикулярно оси антенны ($\theta_{\max} = 90^\circ$) нужно создать условия для синфазного возбуждения щелей (резонансная ВЩА). Поэтому шаг ВЩА выбран равным $d = \lambda_B/2$.

Число щелей N , необходимое для обеспечения заданной ширины ДН в H -плоскости, определяется из приближенной формулы [11]

$$2\theta_{0.5}^H = \frac{57.4\lambda}{Nd}, \quad (1)$$

где $2\theta_{0.5}^H$ – заданная ширина ДН по уровню половинной мощности в H -плоскости.

Выполнив необходимые преобразования, из (1) получим необходимое число щелей $N = 92$.

Согласно энергетическому методу при входной проводимости ВЩА $g_{\text{вх}}$ эквивалентная нормированная проводимость n -й щели для обеспечения распределения поля $f(z)$ определяется как [11]

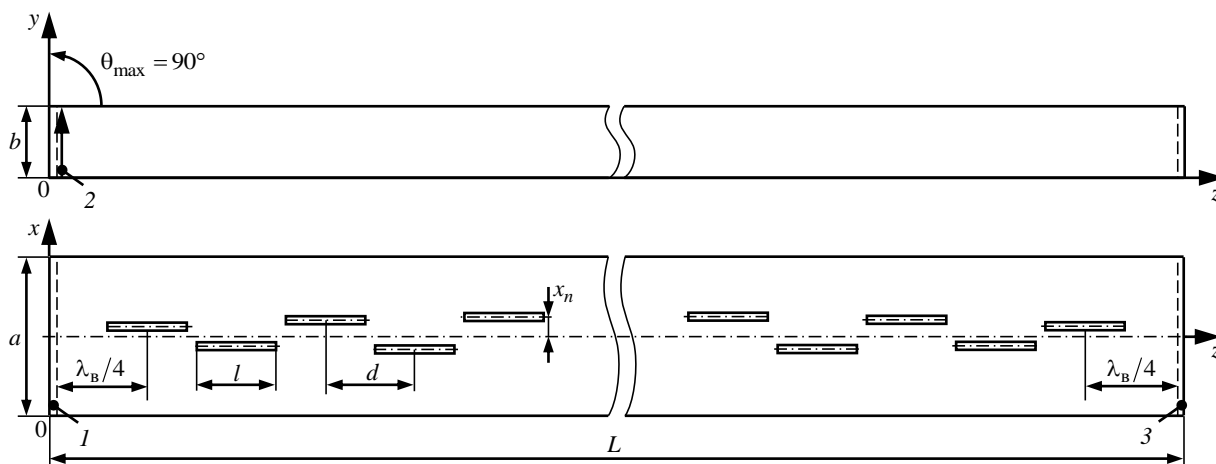


Рис. 1. Модель резонансной волноводно-щелевой антенны: 1, 3 – короткозамыкатели; 2 – порт

Fig. 1. Resonance slotted waveguide antenna model: 1, 3 – short circuits; 2 – port

$$g_n = g_{\text{вх}} \frac{f^2(z_n)}{\sum_{m=1}^N f^2(z_m)}$$

Для обеспечения согласования антенны с питающим волноводом нормированная входная проводимость $g_{\text{вх}}$ должна быть выбрана равной 1 при возбуждении ВЦА с одного из концов и 2 – при возбуждении в центре [13].

С другой стороны, проводимость продольной щели на широкой стенке прямоугольного волновода определяется соотношением [11]

$$g_n = 2.09 \frac{a \lambda_{\text{в}}}{b \lambda} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_{\text{в}}} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi x_n}{a} \right), \quad (2)$$

где x_n – сдвиг от центра n -й щели до средней линии (оси) волновода.

Для построения модели антенны необходимо знать координаты щелей – положения центров z_n вдоль оси z и сдвиг относительно средней линии широкой стенки волновода.

Положение центра n -й щели вдоль оси z , определяемое от короткозамыкателя волновода, рассчитывается как

$$z_n = (2n-1)(\lambda_{\text{в}}/4), \quad n = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Сдвиг n -й щели относительно средней линии широкой стенки волновода рассчитывается по формуле, полученной из (2):

$$x_n = \frac{a}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{g_n}{2.09 \frac{a \lambda_{\text{в}}}{b \lambda} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_{\text{в}}} \right)^2}}. \quad (4)$$

Построение модели резонансной ВЦА в САПР Ansys HFSS. Массивы координат щелей x_n , z_n , необходимые для построения продольных щелей на широкой стенке волновода в определенных координатных точках, формировались в пакете компьютерной алгебры Mathcad согласно (3) и (4). Полученные массивы из Mathcad экспортировались в промежуточные текстовые файлы, а из них – в интегрированный графический редактор ANSYS HFSS 3D Modeler с помощью макроса на языке VBScript.

Серию щелей на широкой стенке волновода можно создать многократным применением встроенной в ANSYS HFSS 3D Modeler операции "Duplicate". Но ввиду того, что щели расположены в шахматном порядке и, кроме того, каждая щель

имеет разное смещение относительно средней линии широкой стенки волновода, пришлось бы корректировать вручную параметры каждой щели. При большом количестве щелей такой способ требует множества рутинных операций, что делает создание модели весьма трудоемким. Кроме того, если делать это вручную, возрастает вероятность ошибок.

Поэтому для автоматизации процесса создания модели ВЦА были разработаны четыре макроса. Применение этих макросов не только значительно сократило временные затраты на создание модели, но и позволило оперативно менять параметры ВЦА при ее оптимизации и настройке в процессе моделирования.

Макрос № 1 позволяет в автоматическом режиме "вырезать" поочередно каждую щель на широкой стенке прямоугольного волновода по заданным координатам.

В начале скрипта объявляются используемые объекты HFSS с помощью ключевого слова Dim:

```
Dim oAnsoftApp
Dim oDesktop
Dim oProject
Dim oDesign
Dim oEditor
Dim oModule
```

Далее объектам присваиваются ссылки на функции для инициализации скрипта и восстанавливается окно САПР:

```
Set oAnsoftApp = _
CreateObject ("Ansoft.Electronics Desktop")
Set oDesktop = oAnsoftApp.GetAppDesktop()
oDesktop.RestoreWindow
Set oProject = _
oDesktop.SetActiveProject ("Project1.5")
Set oDesign = _
oProject.SetActiveDesign ("HFSSDesign1")
```

С помощью функции oProject.ChangeProperty создаются глобальные переменные проекта, которые будут использованы во всех разработанных макросах. Эти переменные размещаются в секции "Project Variables":

```
'$SizeX – размер щели по координате x;
'$SizeY – размер щели по координате y;
'$SizeZ – размер щели по координате z;
'$PosY – положение щели по координате y;
oProject.ChangeProperty _
Array ("NAME:AllTabs", _
Array ("NAME:ProjectVariableTab", _
Array ("NAME:PropServers", "ProjectVariables"), _
Array ("NAME:NewProps", _
```

```
Array("NAME:$SizeX", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", "1mm"), _  
Array("NAME:$SizeY", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", "8mm") _  
Array("NAME:$SizeZ", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", "13.889mm") _  
Array("NAME:$PosX", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", "5mm"))))
```

Затем формируются необходимые операции для инициализации чтения текстовых файлов с массивами координат:

```
Set FSO = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")  
Set xfile = _  
fso.OpenTextFile("E:\SUBARRAYS\VBS\x_89.txt",1)  
Set zfile = _  
fso.OpenTextFile("E:\UBARRAYS\VBS\z_89.txt",1)
```

Для чтения текстовых файлов использован цикл Do...Until, на каждом шаге которого построчно считываются координаты щелей по осям x и z и записываются в строковые переменные XMAS и ZMAS соответственно:

```
k = 0  
XMAS=""  
Do  
xF = (xfile.ReadLine)  
if k=0 then  
XMAS=XMAS&xF  
else  
XMAS=XMAS&" "&xF  
end if  
k = k + 1  
Loop Until xfile.AtEndOfStream  
xfile.Close  
XMAS=XMAS&""]"
```

```
k = 0  
ZMAS=""  
Do  
zF = (zfile.ReadLine)  
if k=0 then  
ZMAS=ZMAS&zF  
else  
ZMAS=ZMAS&" "&zF  
end if  
k = k + 1  
Loop Until zfile.AtEndOfStream  
zfile.Close  
ZMAS=ZMAS&""]"  
NS=k-1
```

После окончания считывания координат щелей в счетчике содержится их количество NS, которое с помощью функции oProject.ChangeProperty присваивается глобальной переменной \$NumSlot, необходимой для использования в других макросах.

Кроме того, с помощью функции oProject.ChangeProperty создаются глобальные переменные \$PosX и \$PosZ. Этим переменным присваиваются значения переменных XMAS и ZMAS, и они помещаются в секцию "Project Variables" в HFSS:

```
'$PosX – положения щелей по координате x  
(массив);  
'$PosZ – положения щелей по координате z  
(массив);  
'$NumSlot – количество щелей;  
oProject.ChangeProperty _  
Array("NAME:AllTabs", _  
Array("NAME:ProjectVariableTab", _  
Array("NAME:PropServers", "ProjectVariables"), _  
Array("NAME:NewProps", _  
Array("NAME:$PosX", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", XMAS), _  
Array("NAME:$PosZ", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", ZMAS), _  
Array("NAME:$NumSlot", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", NS))))
```

После извлечения координат из текстовых файлов необходимо использовать ANSYS HFSS 3D Modeler для построения объектов Slot1, Slot2, Slot3, ... – прямоугольные параллелепипеды из вакуума с заданными размерами по трем координатным осям (глобальные переменные \$SizeX, \$SizeY, \$SizeZ):

```
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")  
for i=0 to NS  
oEditor.CreateBox _  
Array("NAME:BoxParameters", _  
"XPosition:=", "$PosX["&i&"]", _  
"YPosition:=", "$PosY", _  
"ZPosition:=", "$PosZ["&i&"]", _  
"XSize:=", "$SizeX", "YSize:=", "$SizeY", _  
"ZSize:=", "$SizeZ"), _  
Array("NAME:Attributes", "Name:=", "Slot" &i, _  
"Flags:=", "", "Color:=", "(143 175 143)", _  
"Transparency:=", 0, "PartCoordinateSystem:=", _  
"Global", "UDMId:=", "", "MaterialValue:=", _  
"" & Chr(34) & "vacuum" & Chr(34) & "", _  
"SolveInside:=", true, "IsMaterialEditable:=", true)  
next
```

Построенные объекты Slot1, Slot2, Slot3, ... необходимо вырезать из объекта Waveguide (волновод с идеально проводящими стенками, идеально проводящей заглушкой и волноводным портом):

```
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")
for i=0 to NS
oEditor.Subtract _
Array("NAME:Selections", "Blank Parts:=",
"WAVEGUIDE", "Tool Parts:=", "Slot" &i), _
Array("NAME:SubtractParameters", "KeepOriginals:=", false)
```

next

Как видно из текста макроса, аргументами функции oEditor.CreateBox являются не значения геометрических размеров щели, а их идентификаторы, представленные в виде глобальных переменных, что в дальнейшем позволит использовать модули параметризации (Parametrics), оптимизации (Optimetrics), а также позволит выполнить анализ чувствительности антенны к производственным допускам (Sensitivity).

Макрос № 1 позволяет построить многощелевую ВЩА с минимальными временными затратами. Операции по созданию объекта Waveguide, идеально проводящей заглушки и волноводного порта не включены в макрос преднамеренно. Эти компоненты создавались вручную в графическом редакторе ANSYS HFSS 3D Modeler, поскольку их геометрия, размеры и координаты остаются неизменными, а автоматически с помощью макроса создаются многочисленные повторяющиеся объекты. Конечно, в случае необходимости построение указанных объектов может быть добавлено в макрос.

Макрос № 2 удаляет исходные щели, созданные с помощью макроса № 1. Это бывает необходимо в процессе настройки или оптимизации ВЩА при изменении одного из параметров (например, числа щелей, их положения и размеров).

Например, для обеспечения заданной ширины ДН в H -плоскости из (1) было получено необходимое число щелей $N = 92$. Для указанного числа щелей были рассчитаны координаты и построена модель ВЩА. После проведенного моделирования в САПР Ansys HFSS было установлено, что полученная ДН (рис. 2) имеет более узкую ширину, чем задано в техническом задании (ТЗ). Так, на рис. 2 ширина ДН по уровню -3 дБ составляет $d_{92} = 0.98^\circ$.

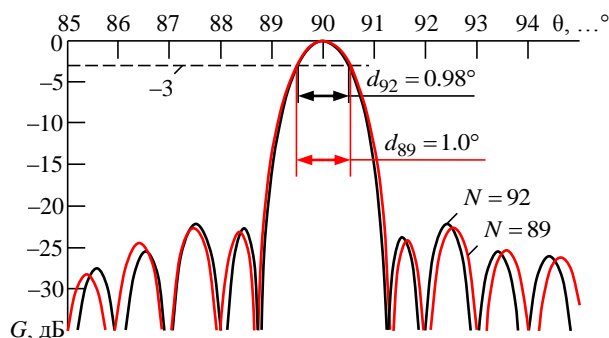


Рис. 2. Диаграмма направленности волноводно-щелевой антенны

Fig. 2. Radiation pattern of the slotted waveguide antenna

Для достижения требуемой ширины ДН в H -плоскости в 1.0° число щелей потребовалось сократить до 89. Для этого необходимо с помощью макроса № 2 удалить ранее построенные 92 щели, а затем вырезать 89 щелей с новыми координатами с помощью макроса № 1.

Рассмотрим макрос для удаления щелей, опустив блоки инициализации и описания переменных, содержание которых аналогично использованным в макросе № 1.

В блок описания переменных добавим два вспомогательных массива:

```
Dim WGD(2), SS()
```

Кроме того, воспользуемся функцией oProject.GetVariableValue для присвоения переменной NS (количество щелей) значения глобальной переменной \$NumSlot, определенной в предыдущем макросе:

```
NS=oProject.GetVariableValue("$NumSlot")
```

Выполним цикл для заполнения вспомогательного массива SS номерами операций по созданию щелей:

```
for i=0 to NS
```

```
Redim Preserve SS(i)
```

```
SS(i)=6+i
```

```
next
```

Для корректного выполнения макроса создадим массив WGD, включающий в себя требуемое описание операций по созданию щелей, а также вызовем функцию oEditor.DeleteOperation, которая удаляет все операции по "вырезанию" щелей из широкой стенки волновода:

```
WGD(0)="NAME:WAVEGUIDE"
```

```
WGD(1)="OperationIndices:="
```

```
WGD(2)=SS
```

```
oEditor.DeleteOperation Array("NAME:Parameters", _
```

```
Array("NAME:PartOperations", WGD), _
```

```
Array("NAME:UDMOperations"))
```

После этого необходимо последовательно удалить прямоугольные параллелепипеды, использованные для построения щелей:

```
DelSlot=""  
for i=0 to NS-1  
DelSlot=DelSlot&"Slot"&i&"",  
next  
DelSlot=DelSlot&"Slot"&i  
oEditor.Delete Array("NAME:Selections", _  
"Selections:=", DelSlot)
```

Важно отметить отсутствие функции определения уникальных номеров операций, связанных с геометрическими объектами в ANSYS HFSS. В связи с этим значения, устанавливаемые в массиве SS, могут отличаться в зависимости от порядка операций, использованных при построении ВЩА.

После этого в HFSS из секции "Project Variables" нужно удалить глобальные переменные, созданные в макросе № 1:

```
oProject.ChangeProperty _  
Array("NAME:AllTabs", _  
Array("NAME:ProjectVariableTab", _  
Array("NAME:PropServers", "ProjectVariables"), _  
Array("NAME:DeletedProps", "$SizeX", "$SizeY", _  
"$SizeZ", "$PosX", "$PosY", "$PosZ", "$NumSlot"))
```

Если этого не сделать, то при повторном запуске макроса № 1 возникнет конфликтная ситуация при попытке создания этих же глобальных переменных, уже имеющих в секции "Project Variables".

На рис. 2 красной линией представлена ДН, полученная после последовательного выполнения операций удаления ранее вырезанных щелей (операция реализована макросом № 2 при $N = 92$) с последующим вырезанием 89 щелей при помощи макроса № 1. Из рисунка видно, что ширина ДН стала $d_{89} = 1^\circ$, что совпадает с требованиями ТЗ.

Для контроля реализованного распределения поля ВЩА в ближней зоне в HFSS предусмотрен его вывод вдоль заданной линии. Можно было бы задать такую линию по продольной оси волновода. Но поскольку все щели в данном случае смещены относительно средней линии широкой стенки волновода, полученное вдоль такой линии распределение ближнего поля ВЩА будет недовольно точным. Для анализа этого поля необходимо построить ломаную линию, проходящую вдоль продольной оси ВЩА и состоящую из отрезков прямых линий, проходящих по центру каждой щели параллельно ее длинной стороне. Такую линию позволяет построить **макрос № 3**.

Блок инициализации макроса № 3 аналогичен соответствующему блоку в макросах № 1 и 2.

Единственное, что нужно добавить в этом блоке – описание необходимых динамических массивов:
dim PolylinePoints(), PolylineSegments()

В этом макросе использованы глобальные переменные проекта, заданные в секции "Project Variables":

'\$dY – положение ломаной линии по координате y;

'\$SizeX – ширина щели (по координате x);

'\$SizeZ – длина щели (по координате z).

Как и в предыдущем макросе, используем функцию oProject.GetVariableValue для присвоения переменной NS (количество щелей) значения глобальной переменной \$NumSlot, заданной в секции "Project Variables":

```
NS=oProject.GetVariableValue("$NumSlot")
```

Формируем массивы координат начала и конца каждого звена ломаной линии для функции oEditor.CreatePolyline:

```
Redim Preserve PolylinePoints(0)  
PolylinePoints(0)="NAME:PolylinePoints"  
for i=0 to NS  
Redim Preserve PolylinePoints(2*i+2)  
PolylinePoints(2*i+1)=Array("NAME:PLPoint", _  
"X:=", "$PosX["&i&"]"&"+"$SizeX/2", "Y:=", "$dY", _  
"Z:=", "$PosZ["&i&"]")  
PolylinePoints(2*i+2)=Array("NAME:PLPoint", _  
"X:=", "$PosX["&i&"]"&"+"$SizeX/2", "Y:=", "$dY", _  
"Z:=", "$PosZ["&i&"]"&"+"$SizeZ")
```

next

Формируем массив звеньев ломаной линии функции oEditor.CreatePolyline:

```
Redim Preserve PolylinePoints(0)  
PolylinePoints(0)="NAME:PolylinePoints"  
for i=0 to NS  
Redim Preserve PolylinePoints(2*i+2)  
PolylinePoints(2*i+1)=Array("NAME:PLPoint", _  
"X:=", "$PosX["&i&"]"&"+"$SizeX/2", "Y:=", "$dY", _  
"Z:=", "$PosZ["&i&"]")  
PolylinePoints(2*i+2)=Array("NAME:PLPoint", _  
"X:=", "$PosX["&i&"]"&"+"$SizeX/2", "Y:=", "$dY", _  
"Z:=", "$PosZ["&i&"]"&"+"$SizeZ")
```

next

Вызываем функцию oEditor.CreatePolyline, аргументами которой являются созданные массивы вершин и звеньев:

```
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")  
oEditor.CreatePolyline _
```

```
Array("NAME:PolylineParameters", _
"IsPolylineCovered:=", true, _
"IsPolylineClosed:=", false, _
PolylinePoints, PolylineSegments, _
Array("NAME:PolylineXSection", _
"XSectionType:=", "None", _
"XSectionOrient:=", "Auto", _
"XSectionWidth:=", "0mm", _
"XSectionTopWidth:=", "0mm", _
"XSectionHeight:=", "0mm", _
"XSectionNumSegments:=", "0", _
"XSectionBendType:=", "Corner")), _
Array("NAME:Attributes", "Name:=", "Polyline2", _
"Flags:=", "", "Color:=", "(132 132 193)", _
"Transparency:=", 0, _
"PartCoordinateSystem:=", "Global", "UDMId:=", "", _
"MaterialValue:=", "" & Chr(34) & "vacuum" & _
Chr(34) & "", "SolveInside:=", true)
```

Результатом выполнения данного макроса является ломаная линия (рис. 3). Прямолинейные отрезки линии проходят над центрами щелей на высоте 1 мм от широкой стенки волновода, что позволяет использовать ее для вывода ближнего поля ВЦА "Near field" (рис. 4).

Макрос № 4 позволяет строить наклонные щели на узкой стенке прямоугольного волновода по заданным углам наклона щелей.

Эквивалентная нормированная проводимость n -й наклонной щели на узкой стенке прямоугольного волновода может быть определена по формуле [11]

$$g_n = \frac{30}{73\pi} \frac{\lambda_B}{\lambda} \frac{\lambda^4}{a^3 b} \left[\frac{\sin \alpha_n \cos \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B} \sin \alpha_n \right)}{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_B} \sin \alpha_n \right)^2} \right]^2, \quad (5)$$

где α_n – угол поворота n -й щели относительно вертикальной оси.

Процедура построения щелей в данном случае аналогична построению щелей с помощью макроса № 1, т. е. сначала в пакете компьютерной алгебры Mathcad координаты щелей z_n , α_n рассчитываются с использованием энергетического метода и выражений (3) и (5), а затем из Mathcad экспортируются в текстовые файлы.

В начале скрипта объявляются используемые объекты HFSS с помощью ключевого слова Dim:

```
Dim oAnsoftApp
Dim oDesktop
Dim oProject
Dim oDesign
Dim oEditor
Dim oModule
```

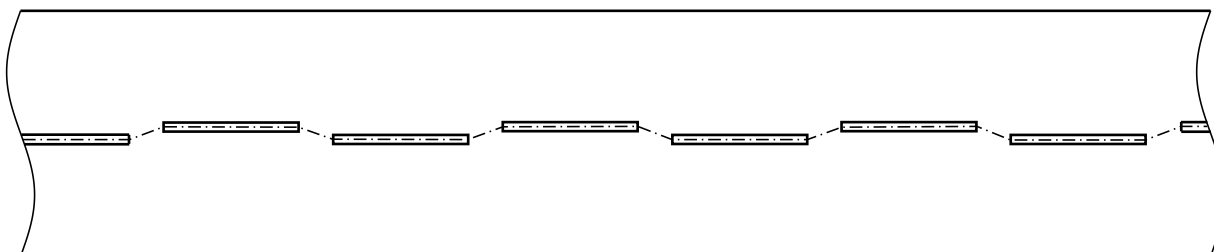


Рис. 3. Ломаная линия над волноводно-щелевой антенной

Fig. 3. Polyline above the slotted waveguide antenna

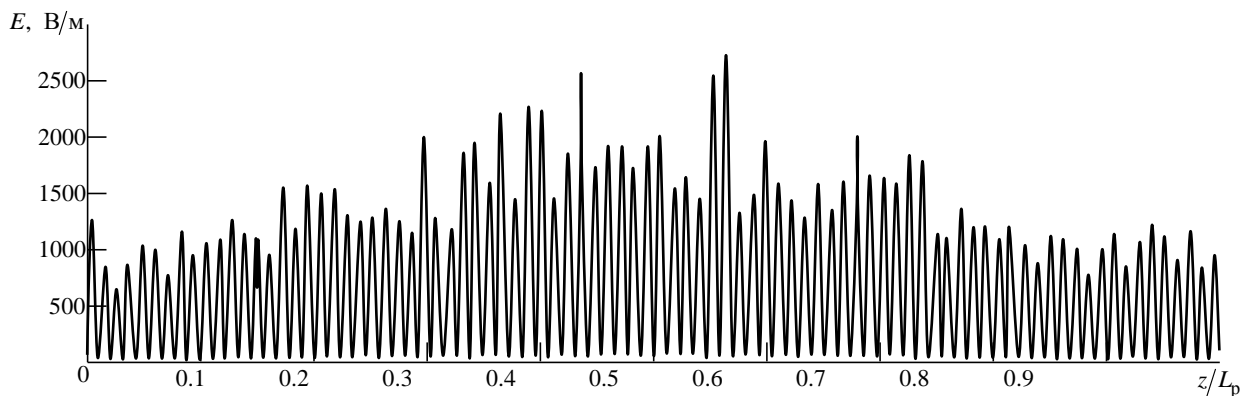


Рис. 4. Распределение поля волноводно-щелевой антенны в ближней зоне

Fig. 4. Near field distribution of the slotted waveguide antenna

Далее объектам присваиваются ссылки на функции для инициализации скрипта и восстановления окна САПР:

```
Set oAnsoftApp = _  
CreateObject("Ansoft.ElectronicsDesktop")  
Set oDesktop = _  
oAnsoftApp.GetAppDesktop()  
oDesktop.RestoreWindow  
Set oProject = _  
oDesktop.SetActiveProject("Project1.5")  
Set oDesign = _  
oProject.SetActiveDesign("HFSSDesign1")
```

С помощью функции `oProject.ChangeProperty` создаем следующие глобальные переменные проекта и помещаем их в секцию "Project Variables" в HFSS:

```
oProject.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", _  
Array("NAME:ProjectVariableTab", _  
Array("NAME:PropServers", "ProjectVariables"), _  
Array("NAME:NewProps", _  
Array("NAME:$SizeX", "PropType:=", _  
"VariableProp", "UserDef:=", true, _  
"Value:=", "1.945mm"), _  
Array("NAME:$SizeY", "PropType:=", _  
"VariableProp", "UserDef:=", true, _  
"Value:=", "1mm"), _  
Array("NAME:$SizeZ", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", "13.889mm") _  
Array("NAME:$PosX", "PropType:=", _  
"VariableProp", "UserDef:=", true, _  
"Value:=", "5mm"), _  
Array("NAME:$PosY", "PropType:=", _  
"VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "11.5mm"))))
```

Далее идет блок макроса для инициализации чтения текстовых файлов с массивами координат:

```
Set FSO = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")  
Set afile = fso.OpenTextFile("a_88=1sub.txt", 1)  
Set zfile = fso.OpenTextFile("z_88=1sub.txt", 1)
```

Считывание текстовых файлов выполняется с помощью цикла `Do...Until`, на каждом шаге которого построчно считываются координаты щелей по оси z и угол поворота щелей α и записываются в строковые переменные `ZMAS` и `AMAS` соответственно:

```
k = 0  
AMAS=""  
Do  
xF = (afile.ReadLine)  
if k=0 then  
AMAS=AMAS&xF
```

```
else  
AMAS=AMAS&" "&xF  
end if  
k = k + 1  
Loop Until afile.AtEndOfStream  
afile.Close  
AMAS=AMAS&"]"  
k = 0  
ZMAS=""  
Do  
zF = (zfile.ReadLine)  
if k=0 then  
ZMAS=ZMAS&zF  
else  
ZMAS=ZMAS&" "&zF  
end if  
k = k + 1  
Loop Until zfile.AtEndOfStream  
zfile.Close  
ZMAS=ZMAS&"]"  
В переменную NS заносится число щелей:  
NS=k-1
```

С помощью функции `oProject.ChangeProperty` создаем глобальные переменные `$PosA`, `$PosZ` и `$NumSlot`, которым присваиваются значения переменных `AMAS`, `ZMAS` и `NS`, и помещаем их в секцию "Project Variables" в HFSS:

```
oProject.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", _  
Array("NAME:ProjectVariableTab", _  
Array("NAME:PropServers", "ProjectVariables"), _  
Array("NAME:NewProps", _  
Array("NAME:$PosA", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", AMAS), _  
Array("NAME:$PosZ", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", ZMAS), _  
Array("NAME:$NumSlot", "PropType:=", "VariableProp", _  
"UserDef:=", true, "Value:=", NS )))
```

После извлечения координат из текстовых файлов необходимо использовать ANSYS HFSS 3D Modeler для построения объектов `Slot1`, `Slot2`, `Slot3`, ... – прямоугольных параллелепипедов из вакуума с заданными размерами по трем координатным осям (глобальные переменные `$SizeX`, `$SizeY`, `$SizeZ`):

```
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")  
for i=0 to NS  
oEditor.CreateBox _  
Array("NAME:BoxParameters", _  
"XPosition:=", "$PosX", "YPosition:=", "$PosY", _
```

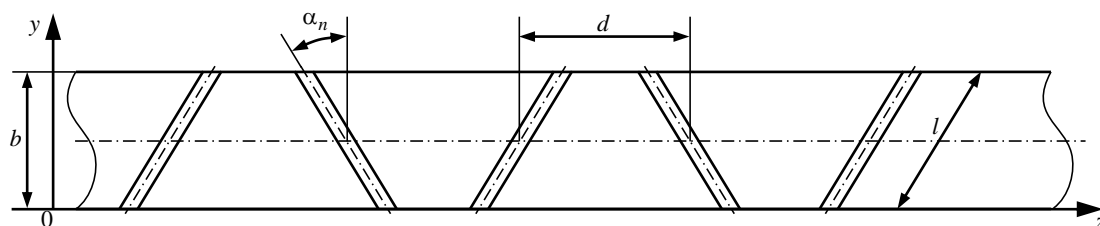


Рис. 5. Модель волноводно-щелевой антенны с встречно-наклонными щелями на узкой стенке волновода

Fig. 5. Slotted waveguide antenna with inclined slots in the narrow wall of the rectangular waveguide

```
"ZPosition:=", "$PosZ["&i&"]", _
"XSize:=", "$SizeX", "YSize:=", "$SizeY", _
"ZSize:=", "$SizeZ"), _
Array("NAME:Attributes", "Name:=", "Slot" &i, _
"Flags:=", "", "Color:=", "(143 175 143)", _
"Transparency:=", 0, "PartCoordinateSystem:=", _
"Global", "UDMId:=", "", "MaterialValue:=", _
", "" & Chr(34) & "vacuum" & Chr(34) & "", _
"SolveInside:=", true, "IsMaterialEditable:=", true)
```

next

Построенные объекты Slot1, Slot2, Slot3, ... необходимо повернуть на заданный угол. Для этого на каждом шаге цикла, формирующего очередную щель, сначала с помощью функции oEditor.SetWCS система координат переключается на глобальную, затем с помощью функции oEditor.CreateRelativeCS создается локальная система координат, начало которой совпадает с центром щели. Далее происходит переключение на созданную локальную систему координат и после этого щель поворачивается на угол, заданный массивом \$PosA. В данном массиве углы заданы в градусах, однако при импорте данных значения углов становятся безразмерными и воспринимаются в ANSYS HFSS 3D Modeler как радианы. В связи с этим необходимо перевести значения элементов массива \$PosA из градусов в радианы:

```
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")
```

for i=0 to NS

```
oEditor.SetWCS Array("NAME:SetWCS Parameter", _
"Working Coordinate System:=", "Global", _
"RegionDepCSOk:=", false)
oEditor.CreateRelativeCS _
Array("NAME:RelativeCSParameters", _
"Mode:=", "Axis/Position", _
"OriginX:=", "$PosX", "OriginY:=", "$PosY+$SizeY/2", _
"OriginZ:=", "$PosZ["&i&"]+$SizeZ/2", _
"XAxisXvec:=", "1", "XAxisYvec:=", "0", _
"XAxisZvec:=", "0", "YAxisXvec:=", "0", _
```

```
"YAxisYvec:=", "1", "YAxisZvec:=", "0"), _
Array("NAME:Attributes", "Name:=", "RelativeCS"&i)
oEditor.SetWCS Array("NAME:SetWCS Parameter", _
"Working Coordinate System:=", "RelativeCS"&i, _
"RegionDepCSOk:=", false)
oEditor.Rotate _
Array("NAME:Selections", "Selections:=", "Slot" &i, _
"NewPartsModelFlag:=", "Model"), _
Array("NAME:RotateParameters", "RotateAxis:=", _
"X", "RotateAngle:=", "3.1415*(90-$PosA["&i&"])/180")
```

next

Теперь необходимо вырезать из объекта Waveguide повернутые щели с помощью функции oEditor.Subtract:

for i=0 to NS

```
oEditor.Subtract _
Array("NAME:Selections", "Blank Parts:=", _
"WAVEGUIDE", "Tool Parts:=", "Slot" &i), _
Array("NAME:SubtractParameters", _
"KeepOriginals:=", false)
```

next

Модель антенны со встречно-наклонными щелями, построенная с использованием макроса № 4, представлена на рис. 5.

Заключение. Таким образом, на примерах показано, что применение описанных макросов позволяет автоматизировать процесс создания модели ВЩА и отказаться от выполнения рутинных операций по созданию и удалению однотипных объектов при работе с моделями в САПР Ansys HFSS.

Для написания кода VBScript и его сопряжения с HFSS требуется значительно меньше усилий по сравнению с построением вручную всех элементов, число которых может достигать десятков, сотен или даже тысяч. Макросы выполняют трудоемкую работу и позволяют разработчику сосредоточиться на вопросах проектирования антенны и осмыслении полученных результатов, а не на построении модели в HFSS.

Список литературы

1. Пластикова А. Н. Автоматизация процесса проектирования антенн и устройств СВЧ в современных программных комплексах электродинамического моделирования. Ч. 1: Логопериодическая вибраторная антенна // Современная электроника. 2012. № 3. С. 64–67. URL: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/d3c/d3cc1553cebbe4a66c7279ef51a41b6c/20120364.pdf> (дата обращения 18.12.2019).
2. Пластикова А. Н. Автоматизация процесса проектирования антенн и устройств СВЧ в современных программных комплексах электродинамического моделирования. Ч. 2: Особенности моделирования ЛПВА в среде CST Microwave Studio // Современная электроника. 2012. № 4. С. 52–56. URL: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/a5d/a5d21ea489e8c7f64f43bcf7ef08eac4/20120452.pdf> (дата обращения 18.12.2019).
3. Пластикова А. Н. Автоматизация процесса проектирования антенн и устройств СВЧ в современных программных комплексах электродинамического моделирования. Ч. 3: Полосно-пропускающий СВЧ-фильтр на сосредоточенных элементах // Современная электроника. 2012. № 6. С. 54–59. URL: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/b30/b30f0a99cee5ca1a9573f671ce8180bc/20120654.pdf> (дата обращения 18.12.2019).
4. Пластикова А. Н. Автоматизация процесса проектирования антенн и устройств СВЧ в современных программных комплексах электродинамического моделирования. Ч. 4: Волноводный фильтр на индуктивных диафрагмах // Современная электроника. 2012. № 7. С. 58–61. URL: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/94f/94f5c572487d45e3e294038efdf7a864/20120758.pdf> (дата обращения 18.12.2019).
5. Tariq S. Automation of reflectarrays in HFSS using visual basic scripting // 2018 Texas Symp. on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCS). Waco, TX, USA, 5–6 Apr. 2018. P. 1–4. doi: 10.1109/WMCaS.2018.8400640
6. EM Parametric Study of Length Matching Elements Exploiting an ANSYS HFSS Matlab-Python Driver / R. J. Sánchez-Mesa, D. M. Cortés-Hernández, J. E. Rayas-Sabnchez, Z. Brito Brito, L. de la Mora-Hernández // 2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conf. (LAMC 2018). Arequipa, Peru, 12–14 Dec. 2018. P. 1–3. doi: 10.1109/LAMC.2018.8699050
7. Электродинамические расчеты в ANSYS HFSS под управлением программы, разработанной в MATLAB / И. А. Кузнецов, А. А. Курушин, А. Н. Грибанов, Г. Ф. Мосейчук, А. И. Синани // Материалы XVI Всерос. молодежной науч.-техн. конф. "Радиолокация и связь – перспективные технологии", Москва, 6 дек. 2018 г. М.: Мир науки, 2018. С. 76–81. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37195428> (дата обращения 18.12.2019).
8. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design and investigation of a linear equidistant slotted waveguide antenna // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 26–30 June 2017. P. 291–294. doi: 10.1109/RSEMW.2017.8103653
9. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Frequency Performance Analysis of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna Consisting of Subarrays // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019. P. 480–483. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792768 (дата обращения 18.12.2019).
10. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Разработка линейной эквидистантной волноводно-щелевой антенной решетки и анализ ее направленных свойств // Антенны. 2018. № 2. С. 15–20. URL: <http://www.radiotec.ru/article/20424> (дата обращения 18.12.2019).
11. Воскресенский Д. И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование антенных решеток / под ред. Д. И. Воскресенского. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
12. Семенихин А. И., Кошкидько В. Г., Климов А. В. Проектирование зеркальных антенн с помощью пакета Mathcad. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. 80 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27002173> (дата обращения 18.12.2019).
13. Volakis J. L. Antenna Engineering Handbook. 4th ed. Columbus, OH, USA: McGraw-Hill Professional, 2007. 1754 p.

Информация об авторах

Кошкидько Владимир Георгиевич – кандидат технических наук (1988), доцент кафедры антенн и радиопередающих устройств (1993) Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (г. Таганрог). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – исследования в области электромагнетизма и прикладной электродинамики (рассеяние электромагнитных волн импедансными структурами; импедансные, щелевые и микрополосковые электродинамические структуры; микрополосковые антенны; антенны с реактивными нагрузками).

Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер., д. 44, г. Таганрог, Ростовская область, 347928, Россия

E-mail: kvg59@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1119-5117>

Мигалин Михаил Михайлович – бакалавр наук по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2018), магистрант кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (г. Таганрог). Автор восьми научных публикаций. Сфера научных интересов – исследование периодических антенных структур, фазированные антенные решетки и анализ диэлектрических свойств материалов.

Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер., д. 44, г. Таганрог, Ростовская область, 347928, Россия

E-mail: migalin.mikhail@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1600-7349>

References

1. Plastikov A. N. Automation of the Design Process of Antennas and Microwave Devices in Modern Software Systems of Electrodynamics Modeling. Pt. 1. Log-Periodic Vibrator Antenna. *Modern Electronics*. 2012, no. 3, pp. 64–67. Available at: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/d3c/d3cc1553cebbe4a66c7279ef51a41b6c/20120364.pdf> (accessed: 18.12.2019). (In Russ.)
2. Plastikov A. N. Automation of the Design Process of Antennas and Microwave Devices in Modern Software Systems of Electrodynamics Modeling. Pt. 2. Features of LPWA modeling in CST Microwave Studio. *Modern Electronics*. 2012, no. 4, pp. 52–56. Available at: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/a5d/a5d21ea489e8c7f64f43bc7ef08eac4/20120452.pdf> (accessed: 18.12.2019). (In Russ.)
3. Plastikov A. N. Automation of the Design Process of Antennas and Microwave Devices in Modern Software Systems of Electrodynamics Modeling. Pt. 3. Bandpass Microwave Filter on Lumped Elements. *Modern Electronics*. 2012, no. 6, pp. 54–59. Available at: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/b30/b30f0a99cee5ca1a9573f671ce8180bc/20120654.pdf> (accessed: 18.12.2019). (In Russ.)
4. Plastikov A. N. Automation of the Design Process of Antennas and Microwave Devices in Modern Software Systems of Electrodynamics Modeling. Pt. 4. Inductive Diaphragm Waveguide Filter. *Modern Electronics*. 2012, no. 7, pp. 58–61. Available at: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/94f/94f5c572487d45e3e294038efdf7a864/20120758.pdf> (accessed: 18.12.2019). (In Russ.)
5. Tariq S. Automation of reflectarrays in HFSS using visual basic scripting. 2018 Texas Symp. on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCS). Waco, TX, USA, 5–6 April 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/WMCaS.2018.8400640
6. Sánchez-Mesa R. J., Cortés-Hernández D. M., Rayas-Sánchez J. E., Brito-Brito Z., de la Mora-Hernández L. EM Parametric Study of Length Matching Elements Exploiting an ANSYS HFSS Matlab-Python Driver. 2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC 2018). Arequipa, Peru, 12–14 December 2018, pp. 1–3. doi: 10.1109/LAMC.2018.8699050
7. Kuznetsov I. A., Kurushin A. A., Gribanov A. N., Moseichuk G. F., Sinani A. I. Electrodynamics Calculations in ANSYS HFSS under the Control of a Program Developed in MATLAB. Radar and Communications are Promising Technologies. XVI All-Russ. Youth Scientific and Technical Conf. 6 December 2018. Moscow, *Mir Nauki*, 2018, pp. 76–81. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37195428> (accessed: 18.12.2019). (In Russ.)
8. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design and Investigation of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna. 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 26–30 June 2017, pp. 291–294. doi: 10.1109/RSEMW.2017.8103653
9. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Frequency Performance Analysis of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna Consisting of Subarrays. 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019, pp. 480–483. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792768
10. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design and Investigation of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna. *Antennas*. 2018, no. 2, pp. 15–20. Available at: <http://www.radiotec.ru/article/20424> (accessed: 18.12.2019). (In Russ.)
11. Voskresenskii D. I. *Ustroistva SVCh i anteny. Proektirovanie antennykh reshetok* [Microwave Devices and Antennas. Antenna Design]. 4th ed. Moscow, *Radio-tekhnika*, 2012, 744 p. (In Russ.)
12. Semenikhin A. I., Koshkid'ko V. G., Klimov A. V. Proektirovanie zerkal'nykh anten s pomoshch'yu paketa Mathcad [Designing Mirror Antennas with Mathcad]. Taganrog, *Izdatel'stvo YuFU*, 2016, 80 p. (In Russ.)
13. Volakis J. L. *Antenna Engineering Handbook*. 4th ed. Columbus, OH, USA, McGraw-Hill Professional, 2007, 1754 p.

Information about the authors

Vladimir G. Koshkid'ko, Cand. Sci. (Eng.) (1988), Associate Professor (1993) of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of Radio Engineering Systems and Control Institute of Southern Federal University, Taganrog, Russia. The author of more than 100 scientific publications. Area expertise: electromagnetics and applied electrodynamics; electromagnetic waves scattering by impedance structures; impedance, slot and microstrip electromagnetic structures; microstrip antennas; reactive loaded antennas.

Address: RESCI SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog 347928, Russia

E-mail: kvg59@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1119-5117>

Mikhail M. Migalin, Bachelor (2018), Undergraduate in Electrical Engineering of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of Radio Engineering Systems and Control Institute of Southern Federal University in Taganrog, Russia. The author of 8 scientific publications. Area expertise: periodic antenna structures, antenna arrays and materials' dielectric properties analysis.

Address: RESCI SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog 347928, Russia

E-mail: migalin.mikhail@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1600-7349>