

УДК 621.396.67(075.8)

ББК 32.845

К443

*Печатается по решению кафедры антенн и радиопередающих устройств  
Института радиотехнических систем и управления  
Южного федерального университета  
(протокол № 9 от 21 января 2021 г.)*

**Рецензенты:**

доктор технических наук, заведующий кафедрой антенн  
и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем  
и управления Южного федерального университета *Ю. В. Юханов*  
кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник  
научно-конструкторского бюро вычислительных систем  
*С. Г. Грищенко*

**Кисель, Н. Н.**

К443 Основы компьютерного моделирования антенн и СВЧ-устройств в  
программе HFSS ANSYS : учебное пособие / Н. Н. Кисель, К. В. Марков ;  
Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Изда-  
тельство Южного федерального университета, 2021. – 166 с.

ISBN 978-5-9275-3974-1

Учебное пособие представляет собой описание работы в среде раз-  
работки HFSS, приведены сведения об особенностях численных методов  
моделирования задач. Описаны методы оптимизации, параметрического  
анализа, анализа чувствительности характеристики к изменению параметров  
проекта, а также статистического анализа. Рассмотрено создание и управле-  
ние библиотеками в HFSS, включая SPICE-библиотеки, IBIS-библиотеки и  
библиотеки Definition Libraries. Описано взаимодействие HFSS с другими  
программами. Приведены сведения об организации распределенных вы-  
числений. Приведены примеры проектирования. Пособие предназначено  
для студентов, обучающихся по направлениям 11.03.01, 11.03.02, 11.04.01,  
11.04.02, 11.05.01, при изучении учебных курсов «Автоматизированное  
проектирование РЭА и СВЧ-устройств», «Основы компьютерного модели-  
рования», «САПР СВЧ».

УДК 621.396.67(075.8)

ББК 32.845

ISBN 978-5-9275-3974-1

© Южный федеральный университет, 2021

© Кисель Н. Н., Марков К. В., 2021

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1. ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ HFSS .....	8
2. ИНТЕРФЕЙС ПРОГРАММЫ HFSS .....	13
2.1. Рабочая область.....	13
2.2. Запуск HFSS .....	13
2.3. Основные установки проекта .....	14
2.3.1. Выбор решения .....	16
2.3.2. Типы возбуждения структуры .....	17
2.3.3. Автоматическое определение области для моделирования антенн .....	18
2.3.4. Установки HFSS для трехмерного моделирования .....	21
2.3.5. Конвертирование двумерной модели в трехмерную .....	22
2.3.6. Открытие, закрытие и переименование проекта, загрузка проекта с сервера .....	23
2.4. Менеджер проектов Project manager .....	24
2.4.1. Проверка правильности (валидности) проекта .....	24
2.4.2. Общие установки проекта пользователем .....	25
2.4.3. Установки ускорителя .....	26
2.4.4. Установки компонентов библиотеки .....	30
2.4.5. Установки для решения методом интегральных уравнений .....	31
2.4.6. Построение модели .....	32
2.4.7. Опции рисования. Различные типы объектов рисования ...	32
2.4.8. Параметры моделирования .....	34
2.4.9. Параметры выполнения операций .....	34
2.5. Переменные проекта .....	37
2.5.1. Работа с переменными: добавление, редактирование, удаление переменных, переменные оптимизации и чувствительности .....	38
2.5.2. Настройка выбранных переменных проекта .....	39
2.5.3. Установка единиц измерения .....	40
2.6. Работа в HFSS .....	41

Содержание

2.6.1. Определение свойств материалов, добавление, копирование и удаление материалов .....	41
2.6.2. Работа с библиотекой материалов .....	42
2.6.3. 3D-компоненты моделей .....	43
2.6.4. Создание 3D-компонента из существующих моделей .....	44
2.6.5. Компоненты граничных поверхностей .....	47
2.6.6. Компоненты источников возбуждения .....	48
2.6.7. Компоненты меширования и дискретизации .....	48
2.6.8. Компоненты выбора системы координат .....	49
2.6.9. Просмотр свойств компонентов .....	49
2.6.10. Дерево операций .....	50
2.6.11. Редактирование объекта .....	51
2.6.12. История редактирования объекта .....	52
2.6.13. Копирование и вставка объектов, копирование изображения .....	52
2.6.14. Операции с объектом: удаление, деление, передвижение, вращение, масштабирование .....	53
2.6.15. Параметры просмотра 3D-модели .....	54
2.7. Набор инструментов .....	56
2.7.1. Набор инструментов для моделирования антенн .....	56
2.7.2. Набор инструментов для моделирования кабелей .....	62
2.7.3. Набор инструментов для моделирования конечной антенной решетки .....	63
2.8. Установка границ в HFSS и HFSS-IE .....	65
2.8.1. Идеальные электрические, магнитные и импедансные условия .....	67
2.8.2. Границы для задач излучения Radiation .....	68
2.8.3. Назначение границ для периодических структур .....	68
2.8.4. Назначение границ типа PML .....	70
2.8.5. Граничные поверхности с конечной проводимостью .....	72
2.8.6. Симметрия границ .....	73
2.8.7. Симметрия границ, установка границ типа Slave, Master, Lumped RLC .....	74
2.8.8. Установка анизотропных границ .....	75
2.8.9. Установка полубесконечных границ .....	75

Содержание

2.8.10. Установка бесконечного экрана .....	76
2.8.11. Модификация и настройка граничных условий .....	77
2.9. Источники возбуждения .....	77
2.9.1. Типы портов .....	77
2.9.2. Порт Флоке .....	83
2.10. Расчет полей в дальней зоне и ближней зонах .....	85
2.10.1. Расчет полей в ближней зоне .....	85
2.10.2. Расчет полей в дальней зоне .....	86
2.11. Меширование в HFSS .....	87
2.11.1. Виды элементов дискретизации .....	87
2.11.2. Адаптивное меширование .....	88
2.11.3. Требования к размеру элементов меширования .....	88
2.11.4. Меширование криволинейных поверхностей .....	89
2.11.5. Примеры меширования различных моделей .....	90
<b>3. ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ</b>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ .....</b>	<b>91</b>
3.1. Методы моделирования в HFSS .....	91
3.2. Методы решения во временной области .....	95
3.2.1. Основные установки для решения во временной области ...	96
3.2.2. Активное и пассивное возбуждение в HFSS Transient .....	99
3.2.3. Возбуждение во временной области .....	100
3.2.4. Выбор типа отчета в переходном процессе HFSS .....	102
3.3. Метод HFSS-IE интегральных уравнений .....	104
3.3.1. Установки метода HFSS-IE (типы возбуждений) .....	105
3.3.2. Общие установки решения HFSS-IE .....	106
3.4. Оптимизация .....	108
3.4.1. Установка параметров для оптимизации .....	109
3.4.2. Синхронизация изменения переменной .....	111
3.4.3. Выбор метода оптимизации .....	112
3.4.4. Оптимизатор MATLAB и его установка .....	116
3.4.5. Установка для градиентного метода .....	117
3.4.6. Установка метода оптимизации Pattern Search .....	118
3.4.7. Выбор вида целевой функции .....	119
3.4.8. Размер шага .....	121

Содержание

---

3.4.9. Точность расчета целевой функции .....	122
3.4.10. Модификация начальной величины переменной .....	122
3.4.11. Параметрический анализ до оптимизации .....	123
3.4.12. Анализ чувствительности характеристики к параметрам проекта .....	123
3.4.13. Использование <i>Design of Experiments</i> .....	125
3.4.14. Статистический анализ .....	127
4. ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ .....	129
4.1. Расчет характеристик волноводно-щелевой антенны .....	129
4.2. Анализ ЭПР беспилотного летающего аппарата X-45 .....	134
4.3. Антенная решетка на основе элементов Вивальди .....	139
4.4. Моделирование частотного фильтра .....	142
5. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ .....	145
5.1. Настройка параллельных вычислений .....	145
5.2. Количество задач и ядер .....	149
5.3. Переключатель локальной машины .....	149
5.4. Уровни распределения .....	153
5.5. Распределение задач .....	157
5.6. Рекомендации по настройке параллельных вычислений .....	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	164
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	165