

**Иманбаева А.К.<sup>1\*</sup>, Темирбаев А.А.<sup>1</sup>, Карибаев Б.А.<sup>1</sup>, Сыздыкова Р.Н.<sup>2</sup>,  
Толегенова А.<sup>1</sup>, Намазбаев Т.А.<sup>1</sup>, Косов Д.Н.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>НИИ экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Казахстан

\*e-mail: akmaral@physics.kz

## **ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ АНТЕНН**

Проектирование радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона имеет свою специфику, которая определяется главным образом её способностью получать высокие радиотехнические характеристики. Для моделирования СВЧ-устройств существует множество программных продуктов, которые предлагают различные подходы компьютерного решения электродинамических задач. Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) СВЧ позволяют вести разработку на различных стадиях разработки принципиальной схемы устройства и, заканчивая моделированием поведения системы, с использованием широкого набора средств моделирования. В данной статье представлен обзор программ электродинамического анализа и проектирования СВЧ устройств, в том числе фрактальных антенн. Для нашей задачи наиболее оптимальным является система High Frequency System Simulator (HFSS) компании Ansoft Corporation. HFSS является передовой в отрасли САПР ВЧ/СВЧ и высокоскоростных цифровых электронных устройств. Проведён анализ по использованию данных программ различными исследователями. Также представлены собственные результаты компьютерного моделирования фрактальных антенн трех различных типов.

Ключевые слова: компьютерные программы, фрактальные антенны, моделирование, FEKO, Microwave Office, HFSS, Microwave Studio.

Imanbayeva A.K.<sup>1\*</sup>, Temirbayev A.A.<sup>1</sup>, Karibayev B.A.<sup>1</sup>, Syzdykova R.N.<sup>2</sup>,  
Tulegenova A.<sup>1</sup>, Namazbayev T.A.<sup>1</sup>, Kossov D.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИИЭП, Al Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: akmaral@physics.kz

### **Software products for high-frequency simulation of fractal antennas**

The design of microwave electronic equipment has its own specifics, which is mainly determined by its ability to receive high radio technical characteristics. In the market, there are many software products for simulation of microwave devices. They offer a variety of approaches for computer solution of electro-dynamics problems. Modern computer-aided design (CAD) systems of UHF allow developing at various stages of the device concept design and, to the simulation of system behavior, using a wide range of modeling tools. This article provides an overview of the electro-dynamics analysis software and design of microwave devices, including fractal antennas. Ansoft Corporation company system High Frequency System Simulator (HFSS) is the most optimal system for our task. HFSS is the most advanced in the industry of RF & microwave and high-speed digital electronic devices. We conducted an analysis on the use of these programs by various researchers. Also presents its own results of computer simulation of fractal antennas of three different types.

**Key words:** computer programs, the fractal antenna simulation FEKO, Microwave Office, HFSS, Microwave Studio.

Иманбаева А.К.<sup>1\*</sup>, Темірбаев Ә.Ә.<sup>1</sup>, Кәрібаев Б.А.<sup>1</sup>, Сыздықова Р.Н.<sup>2</sup>,  
Төлегенова А.<sup>1</sup>, Намазбаев Т.А.<sup>1</sup>, Косов Д.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ЭТФҒЗИ, әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

\*e-mail: akmaral@physics.kz

### Фракталдық антенналарды жоғары жиілікті модельдеуге арналаған программалық өнімдер

АЖЖ диапазонды радиоэлектрондық аппаратураны жобалаудың ерекшеліктері көп, ең алдымен, оның жоғары радиотехникалық сипаттамаларын алуға мүмкіндік беретімен анықталады. АЖЖ құралдарды модельдеуге арналған бірнеше программалық өнімдер бар, олардың барлығы компьютерлік бағдарламалар арқылы электрдинамикалық есептерді шығаруға өзгеше тәсілдерді ұсыныда. Модельдеу тәсілдерінің кең жиынтығын қолдануға арқылы АЖЖ автоматты жобалау заманауи жүйелері радиоқұралдардың принциптік схемасын өңдеу бастапқы қадамынан бастап, жүйенің тәртібін модельдеуге дейін жұмысын қарастыруға мүмкіндік береді. Бұл мақалада электрдинамикалық талдау және АЖЖ құралдарды, соның ішінде фракталдық антенналарды, модельдеу үшін бағдарламаларға шолу жасалған. Біздің есебіне сай, ең тиімдісі болып Ansoft Corporation мекемесінің High Frequency System Simulator (HFSS) жүйесі табылды. HFSS ЖЖ/АЖЖ және жоғары жиілікті сандық электрондық құралдарды жобалау жүйелерінде алдыңғы қатардағы бағдарлама. Осындай бағдарламаларды әртүрлі зерттеушілермен қолдануын саралау өткізілді. Сонымен қатар, үш өзгеше фракталдық антенналардың компьютерлік модельдеудің нәтижелері келтірілген.

**Түйін сөздер:** компьютерлік бағдарлама, фракталдық антенна, модельдеу, FEKO, Microwave Office, HFSS, Microwave Studio.

### Введение

В настоящее время для антенн, используемых в беспроводных средствах связи (GSM/UMTS/WiFi) накладываются определенные условия. Основной проблемой обычных классических антенн является то, что они работают только на одной или двух частотах, ограничивая количество полос, которое оборудование способно поддерживать. Другой проблемой является размер антенны. Из-за очень строгого пространства, например, в сотовых телефонах, установка более одной антенны очень сложно. Для того чтобы разрешить эти проблемы, различные исследователи изучают и предлагают использование так называемых фрактальных антенн, которые более компактны и способны работать в различных диапазонах. Фрактальные антенны – это антенны, которые сконструированы на основе различных геометрических фигур, обладающих свойством самоподобия, то есть составленные из частей, каждая из которых подобна всей фигуре целиком. Благодаря своему свойству самоподобия фрактальные структуры многодиапазонны и широкополосны [1], поэтому их весьма эффективно использовать в антенных решениях. В литературе есть немало исследований, в которых известные фрактальные кривые и множества используются в основе антенных устройств [2-5].

Первенство в теоретических исследованиях возможности применения фрактальных форм для формирования многополосных по частоте антенн приписывают ученому Технологического университета Каталонии К.Пуенте. Коэн запатентовал свое открытие и стал основателем фирмы, занимающейся разработкой и проектированием фрактальных антенн. В настоящее время компания Fractal Antenna Systems, Inc. («Фрактал»), разрабатывает, производит и лицензирует самые компактные и мощные антенны в мире. Эти антенны используются в самых сложных коммерческих, военных и правительственных приложениях.

В настоящее время разработка фрактальных антенн активно ведется по трем направлениям:

- фрактальные антенные решетки,
- широкополосные и многочастотные фрактальные излучатели,
- апертурные фрактальные антенны.

Фрактальная антенная решетка – это решетка, состоящая из самоподобных подрешеток с фрактальными границами, которые покрывают плоскость (или часть плоскости) без перекрывания и промежутков. К таким антеннам относятся решетка Пеано-Госпера, тердрагон, 6-тердрагон, псевдопушинки.

Многообразие видов фрактальных кривых открывает дополнительные конструктивные и электродинамические возможности в проек-

тировании антенн. Но для создания реальных антенных устройств, использующих свойства фракталов необходимо провести их теоретическое исследование и моделирование. Основным содержанием настоящей статьи является обзор программных продуктов с целью выявления наиболее эффективных решений для проведения расчёта, проектирования, электромагнитного моделирования фрактальных антенн и анализ последних работ по компьютерному моделированию антенн с фрактальной структурой.

На первом шаге исследования были отображены системы моделирования для электродинамического анализа антенных устройств и проведения их классификация.

### Классификация компьютерных программ для электродинамического анализа СВЧ устройств

В настоящее время существуют множество различных компьютерных программ проектирования и расчета свойств СВЧ-устройств, в том числе антенн. Их называют специализированными EDA-программами для электромагнитных (EM)-расчетов.

Их условно можно разделить на две группы:

1. программы электродинамического моделирования объемных структур (FEKO, Microwave Office, HFSS, Microwave Studio);

2. программы моделирования тонких проводочных структур (NEC2, NEC4, MININEC).

В основе работы данных программ лежит численное решение уравнений Максвелла в интегральной или дифференциальной форме. Уравнения Максвелла можно решать следующими численными методами: методом моментов (MoM), методом конечных элементов (FEM) и методом конечного интегрирования (FIT). Основополагающий метод решения влияет на эффективность и точность, с которыми могут быть смоделированы антенные устройства.

В программах первой группы используются все три численных метода. Второй группы – только метод MoM. Приведем общую информацию и сводный анализ перечисленных методов, применяемых в данных программах, и представим его в таблице 1. В [6] показано, что наиболее успешное EM-моделирование для антенн малых размеров подходят программы, базирующиеся на FEM и FIT методах. Поэтому подробный анализ проведён только тех программ, которые используют эти методы.

На втором шаге наших исследований был проведен более подробный обзор программных продуктов, относящихся к первому типу. При этом были рассмотрены как их основные функции, назначение, так и результаты моделирования компактных антенн на основе классических фрактальных объектов, приведенных в литературе.

Таблица 1 – Общая информация о программных средах электродинамического анализа СВЧ устройств

Название программы	Назначение	Используемые методы	Производитель и адрес
FEKO	Для численного электромагнитного моделирования, основанная на современных вычислительных технологиях (СЕМ).	Метод моментов. Метод конечных элементов. Методы физической оптики. Методы геометрической оптики. Методы универсальной теории дифракции. Метод конечных разностей во временной области.	Altair Engineering, Inc. <a href="http://www.altair.com/">http://www.altair.com/</a>
Microwave Office	Программное решение для разработки всех видов радиочастотных и СВЧ устройств, начиная от сложных СВЧ сборок и кончая интегральными СВЧ микросхемами.	Метод граничного баланса. Одночастотный и многочастотный метод гармонического баланса. Ряды Вольтерра. Высокоскоростной метод линейного анализа. Высокоскоростной метод шумового анализа.	AWR (Applied Wave Research) Corporation <a href="http://www.awrcorp.com">http://www.awrcorp.com</a>
HFSS	Для расчета S-параметров, создания SPICE-моделей и трехмерного моделирования электромагнитного поля	Метод конечных элементов.	ANSYS Inc, <a href="http://www.ansys.com/">http://www.ansys.com/</a>

Название программы	Назначение	Используемые методы	Производитель и адрес
Microwave Studio	Для численного моделирования высокочастотных устройств и анализа проблем целостности сигналов и электромагнитной совместимости во временной и частотных областях	Метод понижения порядка моделей (MOR). Метод конечных интегралов (FIM). Метод аппроксимации для идеальных граничных условий (PBA). Метод тонких сеток (TST). Метод подсеток (MSS).	Computer Simulation Technology  <a href="https://www.cst.com/">https://www.cst.com/</a>
Numerical Electromagnetic Code 2 NEC2	Для моделирования антенных конструкций, особенно обычных конструкций, таких как для телевидения и радио, на коротких волнах	Метод моментов (MoM) Итерационный метод для расчета токов	Lawrence Livermore National Laboratory <a href="http://www.nec2.org/">http://www.nec2.org/</a>
Numerical Electromagnetic Code 4 NEC4	Для моделирования очень маленьких антенн на сотовые телефоны и WiFi маршрутизаторы	Метод моментов (MoM)	<a href="http://lmsllc.com">http://lmsllc.com</a>
MiniNumerical Electromagnetic Code MININEC	Независимая реализация концепции в NEC. Программа анализа антенны для Windows, Macintosh	Метод моментов (MoM)	<a href="http://www.blackcatsystems.com/software/mininec-antenna-analysis-modeling-software.html">http://www.blackcatsystems.com/software/mininec-antenna-analysis-modeling-software.html</a>

### Программа электродинамического анализа FEKO

Название программы FEKO происходит от немецкой фразы «Feldberechnung bei Körpern mit beliebiger Oberfläche» (Расчет поля с учетом тел произвольных форм). Программа FEKO предназначена для решения широкого круга задач, связанных с проектированием СВЧ устройств и антенн, рассеянием электромагнитных волн на сложных объектах, распространением радиоволн в городских условиях и т.д. [7]. Преимуществом FEKO является то, что он позволяет моделировать антенны с многослойными магнитно-диэлектрическими подложками.

Далее коротко рассмотрим результаты моделирования фрактальных антенн, полученных с помощью данной программы различными исследователями.

В работе [2] с целью создания многодиапазонной антенны рассмотрена антенна на основе салфетки Серпинского. Выполнено его моделирование антенны в пакете электродинамического анализа FEKO. Получены 2-х и 3-мерные диаграммы направленности (ДН) для разных частот. Представленные результаты показывают

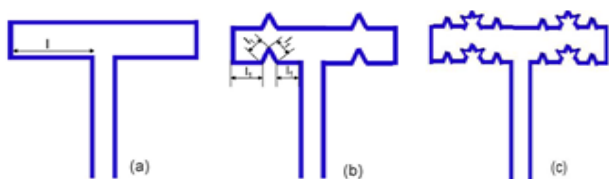
увеличение неравномерности ДН по мере увеличения рабочей частоты.

В работе [3] представлены результаты проектирования фрактальной антенны на основе снежинки Коха в FEKO. Антенна была оптимизирована для работы на нескольких частотах 1,24 ГГц для применения GPS, 1,42 для применений L-диапазона и 2,92 ГГц для приложений S-диапазона.

### Система High Frequency System Simulator (HFSS)

High Frequency System Simulator (HFSS) – продукт компании Ansoft Corporation. Иногда в литературе к аббревиатуре HFSS добавляют название фирмы Ansoft. Ansoft HFSS базируется на FEM-методе, с тетраэдральным разбиением моделируемой структуры, также используется адаптивное генерирование и деление ячеек. Для первоначального разбиения на тетраэдры используются стандартные методы программы, имеющиеся в библиотеке. Так можно представить информацию о поле, с выделенными областями с высокой напряженностью или большими градиентами. Затем разбиение на ячейки

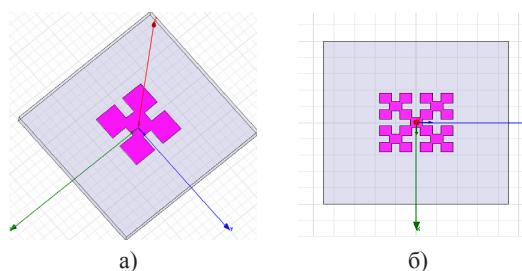
уплотняется только там, где поле претерпевает значительные изменения, так вычисления становятся менее затратными. В работе [4] с помощью Ansoft HFSS смоделирована фрактальная антенна на основе кривой Коха для достижения многополосных свойств. Представлена антенна, способная работать с шестью полосами частот с приемлемой потерей возврата. Предложена следующая конструкция фрактальной щелевой антенны, показанная на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Модель фрактальной антенны на основе кривой Коха нулевой (а), первой (б) и второй (с) итераций

Получены частотные характеристики для исследуемой антенны. Показано, что антенна имеет обратные потери меньше, чем -10 дБ в шести полосах: 2,37 ГГц, 4,00 ГГц, 5,57 ГГц, 6,11 ГГц, 7,27 ГГц и 8,95 ГГц, обратные потери -22,28дВ, -18,43 дБ, -14,85 дБ, -25,05 дБ, -18,43 дБ и -11,88 дБ, соответственно.

В следующей работе [5] предложена фрактальная модель антенны на основе 2-й и 3-й итераций квадрата Серпинского (рисунок 2).



**Рисунок 2** – Компьютерная модель фрактальной антенны на основе квадрата Серпинского (2-ая а) и 3-я б) итерации)

Также в [1, 8] численным моделированием в HFSS исследованы электромагнитные характеристики фрактальных антенн Серпинского 8-ой итерации, Коха 4-ой итерации и антенны на основе двумерного нерегулярной фрактальной структуры (псевдослучайный фрактальный кластер с топологической размерностью, равной 2, и задаваемой фрактальной размерностью). По-

казано, что фрактальные антенны Серпинского и Коха являются многодиапазонными, для обеих антенн наблюдается эффект усечения, связанный с конечным числом фрактальных итераций. Он проявляется в заметном искажении диаграмм направленности и распределений поля на высоких частотах.

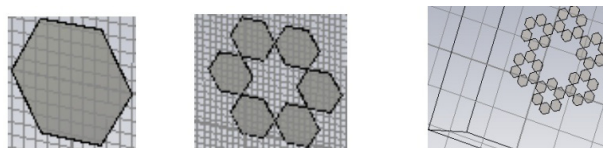
### Система Microwave Studio (CST MWS)

CST Microwave Studio (CST MWS) предназначена для моделирования 3D EM высокочастотных составляющих. В данной программе используются все три численных метода EM моделирования.

Современная версия пакета включает следующие функции моделирования:

- вычислители общего назначения во временной и в частотной областях для моделирования низкочастотных и высокочастотных задач;
- полноволновой вычислитель с использованием интегральных уравнений.

В работе [8] предложена широкополосная фрактальная антенна, имеющая форму гексагональной. Авторами рассмотрены три первые итерации (рисунок 3). Моделирование проведено в Microwave Studio.



**Рисунок 3** – Первые три итерации фрактала гексагональной формы

Показано, что антенны демонстрируют хорошие обратные потери, и многополосные частоты подходят для IEEE Bluetooth / WLAN (2.4-2.484 ГГц), WiMAX (3.4-3.69 ГГц) и WIFI (5.1-5.825 ГГц) приложений беспроводной связи. Сделан вывод о том, 2-ая итерация шестиугольных фрактальных антенн обладает свойством многодиапазонности, т.е. с увеличением числа итераций увеличивается число резонансных частот.

*Вывод.* Таким образом, на рынке существуют немало компьютерных программ специального назначения для моделирования устройств в СВЧ диапазоне. Все эти программы по-своему уникальны и помогают в решении многих задач моделирования. Выбор программ пользователями зависит от большого числа критериев, которые

можно разделить на две группы: базовые возможности и средства их расширения. Нами для электромагнитного анализа фрактальных антенн была выбрана программа HFSS, которая адаптирована именно на моделирование устройств малых размеров, которыми и являются фрактальные антенны. Так, 3-м шагом наших работ, было проведение компьютерного моделирования антенн на основе различных геометрических объектах.

### Численное исследование фрактальных антенн

Мы изучали 3 вида антенн на основе фрактала Коха (2 итерации), изотропного фрактала Минковского (3 итерации) и анизотропного фрактала Жанабаева [9] (3 итерации). Длины всех 3-х

антенн составляют 14,5 см с учетом расстояния между излучателями. Моделирование проведено в программе HFSS 13.0 в диапазоне частот, равным 0,1 – 2,7 ГГц. Были рассчитаны частотные характеристики, т.е. зависимости входных коэффициентов отражения  $S_{11}$  от частоты. Из рисунков 9-5 видно, что с увеличением номера предфракталов резонансные частоты смещаются влево, в сторону области низких частот. За счет этого у антенн появляются новые резонансы в выбранном диапазоне, уменьшаются значения обратных потерь резонансных частот по сравнению с предыдущими, кроме третьей итерации для антенны с анизотропной структурой. Здесь коэффициент отражения  $S_{11}$  для первого резонанса равен  $-12,83\text{дБ}$  (для второй итерации  $S_{11} = -13,18\text{дБ}$ ), но у второго резонанса той же итерации значение  $S_{11}$  меньше, чем у предыдущей.

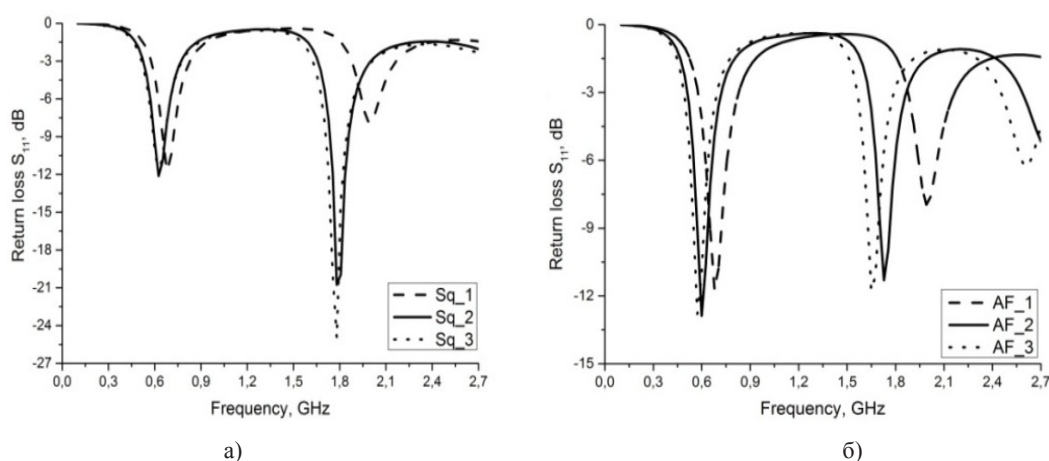


Рисунок 4 – Частотные зависимости входных коэффициентов отражения фрактальной антенны Коха (а) и антенны Жанабаева (б)

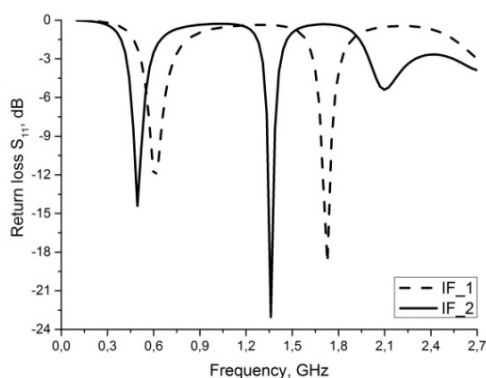


Рисунок 5 – Частотная зависимость коэффициентов отражения антенны Минковского

### Заключение

В данном обзоре представлены основные известные и часто используемые программные комплексы для проведения компьютерного моделирования и расчётов СВЧ устройств, в том числе и антенн.

Все указанные продукты отвечают следующим условиям:

- позволяют осуществлять имитационное моделирование антенных устройств;
- поддерживают в той или иной степени интеграцию визуального и имитационного моделирования;

– широко распространены и пользуются популярностью.

Но наиболее адаптированной для компактных фрактальных антенн по своим возможностям является HFSS. В данной программе нами была проведена серия расчетных исследований электрически малых антенн, различающиеся своей геометрией от традиционных. Показано,

что среди рассматриваемых моделей при одинаковых длинах антенн самое низкое отражение (больше поглощений для приемной антенны) наблюдается у изотропного фрактала Минковского.

*Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК. Грант № 3837/ГФ4.*

#### Литература

- 1 Колесов В.В., Крупенин С.В., Потапов А.А. Разработка фрактальных антенн для сверхширокополосных систем связи // Докл. 8-й Межд. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М.: Изд. РНТО РЭС им. А.С. Попова, 2006. – Т. 1. – С 217-219.
- 2 Савочкин А.А., Нудьга А.А. Исследование многодиапазонных фрактальных антенн // Вестник СевНТУ. Серия: информатика, электроника, связь. – 2011. – Вып. 114. – С. 142-148.
- 3 Dandgavhal S., Kadu M.B., Labade R.P. Design of Microstrip Patch Antenna with Koch Snowflake Geometry for Multiband Applications // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2015. – Vol. 4, Issue 7. – P. 6578-6584.
- 4 Suman L. Design and Simulation of Koch Fractal folded-slot Antenna for Next Generation Mobile Networks // I.J. Adv. Res. in Comp. Sc. & Soft. Eng. – 2013. – V. 3, Is. 8. – P. 237-251.
- 5 Andreeva A. Modeling of fractal antennas // Master Thesis. – Lappeenranta University of Technology, 2014. – 56 p.
- 6 Ванденбош Г., Васильченко А., Схольц И. качественная оценка вычислительных методов электродинамики на примере программных продуктов для высокочастотного моделирования микрополосковых антенн // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 3. – С. 52-56.
- 7 Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов А.А., Давыдов А.Г. О проектировании фрактальных радиосистем // Радиоэлектроника. – 2005. – Т.50, №9. – С. 1070-1076.
- 8 Amanpreet K., Nitin S., Ubai J.S. A Hexagonal multiband fractal antenna using for wireless applications // Inter. J. of Electr. and Computer Science Eng. – 2012. – V.1, N. 4. – P. 2107.
- 9 Темирбаев А.А., Намазбаев Т.А., Иманбаева А.К., Мархабаев М.А., Капурнова С.А. Исследование электродинамических свойств анизотропной фрактальной антенны // Труды Межд. научно-техн. конф. ПИТ 2016. – Самара, 2016. – С. 953-957.

#### References

- 1 V.V. Kolesov, S.V. Krupenin, A.A. Potapov, Dokl. 8-y Mezhd. konf. «Tsifrovaya obrabotka signalov i yeye primeneniye». – М.: Izd. RNTOR RES im.A.S. Popova, 1, S 217-219, (2006). (in russ).
- 2 A.A. Savochkin, A.A. Nud'ga, Vesnik SevNTU. Seriya: informatika, elektronika, svyaz', 114, 142-148, (2011). (in russ).
- 3 S. Dandgavhal, M.B. Kadu, R.P. Labade, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 4(7), 6578-6584, (2015).
- 4 L. Suman, I.J. Adv. Res. in Comp. Sc. & Soft. Eng., 3(8), 237-251, (2013).
- 5 A. Andreeva, Master Thesis, Lappeenranta University of Technology, 56 p., (2014).
- 6 G. Vandebosh, A. Vasil'chenko, I. Skhol'ts, Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti, 3, 52-56, (2008). (in russ).
- 7 YU.V. Gulyayev, S.A. Nikitov, A.A. Potapov, A.G. Davydov, Radioelektronika, 50(9), 1070-1076, (2005). (in russ).
- 8 K. Amanpreet, S. Nitin, J.S. Ubai, Inter. J. of Electr. and Computer Science Eng., 1(4), 2107B (2012).
- 9 A.A. Temirbayev, T.A. Namazbayev, A.K. Imanbayeva, M.A. Markhabayev, S.A. Kapurnova, Trudy Mezhd. nauchno-tekhn. konf. PIT 2016, Samara, 201, 53-957. (in russ).