

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра дискретной математики и  
информационных технологий

**Разработка алгоритмов построения в автоматическом режиме  
графических моделей резонаторных замедляющих систем ЛБВ в  
программе 3D моделирования Blender**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 271 группы  
направления 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника»  
факультета компьютерных наук и информационных технологий  
Борониной Виктории Владиславовны

Научный руководитель

к. ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.Н. Савин

Заведующий кафедрой

к. ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Л.Б. Тяпаев

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование и моделирование электродинамических характеристик (ЭДХ) сложных волноведущих структур различного типа (однородных, периодических, почти периодических, в том числе с различными заполняющими средами), широко используемых в радиофизике, вакуумной и твердотельной электронике сверхвысоких частот, представляет одно из важных направлений в современной радиофизике и электродинамике [1].

В последние годы в вакуумной СВЧ электронике интенсивное развитие получили работы по созданию ламп бегущей волны (ЛБВ) О-типа терагерцового частотного диапазона. Одной из проблем при создании усилителя в коротковолновом диапазоне длин волн с повышенной мощностью и шириной полосы, а также с относительной простотой изготовления, является разработка его волноведущей системы.

В связи с этим актуальной становится задача анализа, а главное оптимизации ЭДХ замедляющих систем (ЗС) миллиметрового диапазона длин волн и оценка возможностей их использования в более коротковолновом диапазоне.

Как известно в ЛБВ коротковолнового диапазона широко применяются ЗС типа петляющий волновод (классический петляющий волновод (ПВ), связанные прямоугольные резонаторы, встречно-штыревые), а также ЗС резонаторного типа (гребёнка-квадрат (ГК), кольцо на встречных металлических опорах (КН) и традиционная цепочка связанных резонаторов (ЦСР)). Одним из путей реализации повышенных требований, предъявляемых к ЛБВ в современных радиотехнических системах коротковолнового диапазона длин волн, является поиск новых модификаций ЗС с оптимальными ЭДХ в соответствии с их функциональным назначением и заданными выходными параметрами прибора [2].

При разработке различных СВЧ устройств первым этапом является математическое моделирование с использованием специализированных программных средств (ANSYS [3], freefem ++ [4]). Например, в статье [2]

приведены различные виды волноведущих систем мощных ЛБВО, применяемых в выходных каскадах систем передачи информации и радиолокационных системах. Эти волноведущие системы имеют различные граничные условия и требуют постоянной оптимизации, изменения и подстройки.

Исследования ЭДХ ЗС коротковолнового диапазона различного типа представлены в работах авторов [11-13]. Изучение характеристик проводилось не только при изменении основных размеров систем, но и при модификации формы и размеров ЗС, не связанных с областью пространства взаимодействия.

Одним из этапов является построение графической модели. Этот процесс, как правило, осуществляется с применением специализированных программных средств и является достаточно трудоемким. При этом все время приходится менять конструкцию и размеры, что значительно увеличивает время разработки. С другой стороны, средства 3D моделирования дают возможность автоматизировать процесс построения моделей с использованием скриптов.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка скриптов на языке Python [5] для свободно распространяемой программы 3D моделирования Blender [6], обеспечивающих в автоматизированном режиме построение замедляющих систем различных типов.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- Освоить разработку модели в программе 3D моделирования Blender;
- Изучить технологию применения скриптов на языке Python для оптимизации процесса построения моделей в программе 3D моделирования Blender;
- Изучить основные структуры волноведущих систем мощных приборов СВЧ с дискретным взаимодействием по литературным источникам;
- Разработать алгоритм построения графической модели ЗС типа гребенка-квадрат (ГК);

- Разработать алгоритм построения ЗС типа петляющий волновод (ПВ) различных типов;
- Разработать скрипт на языке Python, автоматизирующий процесс построения ЗС, указанных выше типов и обеспечить передачу полученных моделей в свободно распространяемую программу freefem++.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Первая глава «Программа 3D моделирования Blender», вторая глава «Замедляющая система типа петляющий волновод», глава три «Замедляющая система типа гребенка-квадрат» и глава четыре «Набор исполняемых библиотек freefem++».

## Основное содержание работы

1. Blender - это бесплатный набор для создания 3D-контента с открытым исходным кодом. Он поддерживает полноту 3D-моделирования, текстурирования, риггинга, анимации, рендеринга, компоновки и отслеживания движения, а также редактирования видео и создания игр [6].

Программа 3D моделирования Blender оснащена мощным (и достаточно хорошо документированным) Python API, что открывает множество возможностей:

- создание параметрических объектов, отвечающих размерам реального мира, посредством алгоритмов;
- использование математических формул;
- создание собственных функций как для изменения объектов, так и с целью получения новых средств моделирования;
- добавление пунктов меню на любой из доступных панелей для быстрого вызова собственных функций;
- автоматизация процесса проектирования модели (целиком или начиная с определенной стадии);

Возможность использования скриптов для построения моделей является ключевой и достигается посредством использования встроенных "Text Editor" и "Python console". Большинство функций программы 3D моделирования Blender доступны к вызову в виде инструкций на языке Python. Для получения строки инструкций, соответствующей необходимой функции, достаточно осуществить нажатие правой кнопкой мыши на название необходимой функции и выбрать пункт "Copy Python Command" и ознакомиться с параметрами функции в мануале [8].

2. Замедляющая система - устройство, формирующее и канализирующее электромагнитные волны с фазовой скоростью  $v$ , меньшей скорости света  $c$  в вакууме (замедленные волны) и обеспечивающее их длительное, синхронное взаимодействие с потоками заряженных частиц. Виды рассматриваемых

замедляющих систем (ЗС) типа петляющий волновод (ПВ) представлены на рисунке 1.

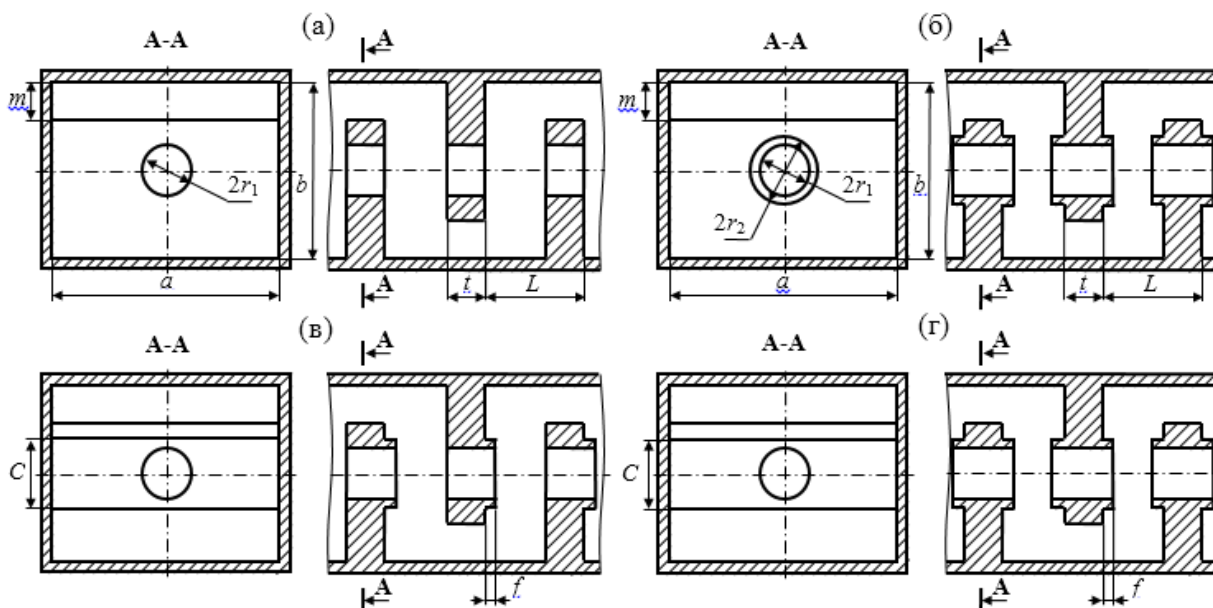


Рисунок 1 – Продольный и поперечный разрезы классического ПВ (а), ПВ с трубками дрейфа (б), ПВ с односторонними (в) и двусторонними прямоугольными накладками (г)

При построении ЗС типа ПВ были использованы следующие размеры и обозначения:

- $a = 56 \text{ mm}$  - ширина поперечного сечения;
- $b = 43.8 \text{ mm}$  - высота;
- $t = 4.3 \text{ mm}$  - толщина диафрагмы;
- $r_1 = 10 \text{ mm}$  - радиус пролетного канала;
- $\text{NofSeg\_r1} = 36$  - число сегментов на боковой поверхности трубки дрейфа и пролетного канала;
- $L = 14.3 \text{ mm}$  - период;
- $m = 10 \text{ mm}$  - ширина щели связи.

Для корректного моделирования цилиндрических отверстий в набор параметров введены переменные  $\text{NofSeg}$ , определяющие число сегментов на боковой поверхности цилиндров.

Для проведения различных параметрических исследований, подстройки,

оптимизации, статистического анализа и т.д. в программе 3D-моделирования Blender есть возможность задавать параметры модели в виде переменных. Поэтому при построении графических моделей здесь и далее параметры вводятся в виде блока изменяемых переменных на языке Python[6].

Алгоритм построения классической ЗС ПВ в программе 3D моделирования Blender:

- Очистка сцены (опционально) при помощи функции `clear()`;
- Создание волновода;
- Изменение размера волновода в соответствии с установленными параметрами при помощи функции;
- Выдавливание щелей связи в цикле (с обеих сторон) при помощи набора команд;
- Создание цилиндра для пролетного канала;
- Применение функции `modifier` для создания пролетного канала при помощи цилиндра из пункта выше;
- Дублирование полученной модели согласно значению переменной  $N_c$ ;
- Объединение  $N_c$  частей в один меш при помощи функции `modifier`.

Результат работы алгоритма представлен на рисунке 2. Результат импорта полученной модели в `freefem++` представлен на рисунке 3.

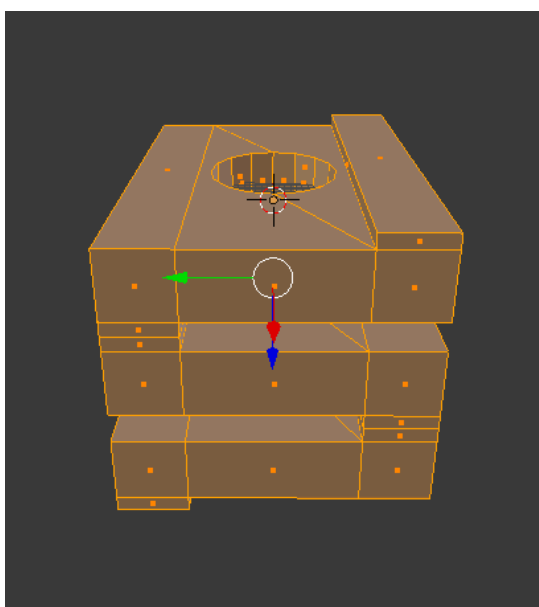


Рисунок 2 – ЗС ПВ в режиме редактирования граней с параметром  $N_c = 3$

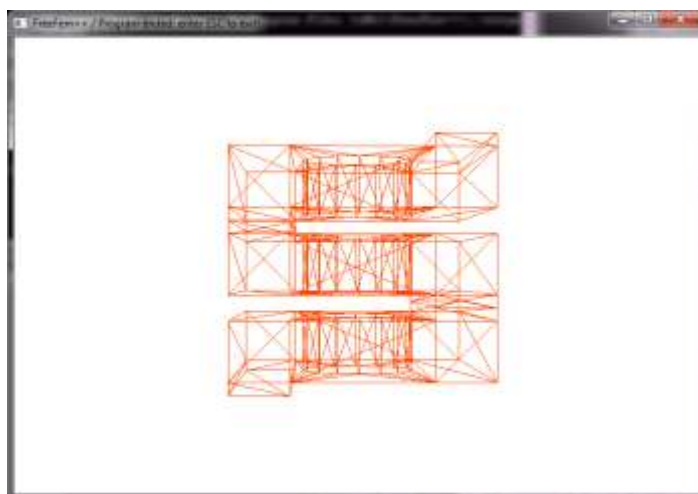


Рисунок 3 – Разработанная модель после импорта в freefem ++

3. ЗС типа ГК, заявленная А. Карпом в 1979 г., представляла наибольший интерес из всех исследуемых систем приборов миллиметрового диапазона. ЗС имеет высокую механическую прочность и термическую стойкость, а также отличается технологичностью изготовления и сборки. ЗС ГК имеет малые потери, большую ширину полосы пропускания.

В ГК сочетаются электродинамические свойства двух систем: ЦСР и штыревой (лестничной). Для ЗС такого типа (с большой шириной полосы пропускания) характерна ДХ с небольшим изменением замедления фазовой скорости и коротковолновой границей, расположенной в области допустимого синхронизма с электронным пучком. ГК имеет две щели связи в виде усечённых сегментов, форма и размеры которых при постоянном диаметре резонатора зависят от ширины гребёнок [2]. Рассматриваемая в работе ЗС ГК представлена на рисунке 4.

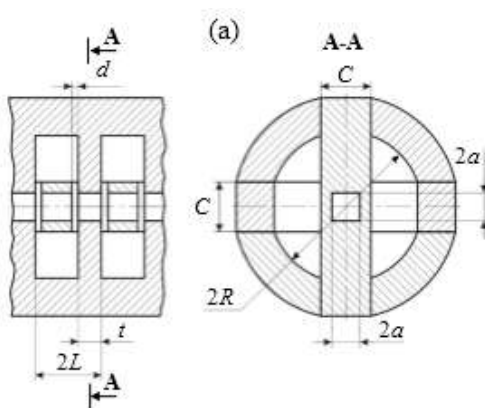


Рисунок 4 – Продольный и поперечный разрезы классической ЗС типа ГК



При построении ЗС типа ГК были использованы следующие размеры и обозначения:

- $a = 5 \text{ mm}$  - ширина трубки дрейфа;
- $t = 10 \text{ mm}$  - толщина диафрагмы;
- $r1 = 51.3 \text{ mm}$  - радиус пролетного канала;
- $r2 = 65 \text{ mm}$  - радиус волновода;
- $L = 14 \text{ mm}$  - период звеньев;

Алгоритм построения модели классической ЗС ГК в программе 3D моделирования Blender начинается с вызова функции `SS_GC()`, принимающей в качестве параметров значения по умолчанию, которые можно изменить вручную при помощи встроенных полей.

- Очистка сцены (опционально) при помощи функции `clear()`;
- Создание заготовки;
- Изменение имени заготовки;
- Изменение размера заготовки в соответствии с установленными параметрами;
- Экструдирование для создания необходимого по ширине числа граней в цикле (с обеих сторон) при помощи набора команд;
- Создание отверстия для трубки дрейфа при помощи набора команд;
- Отражение заготовки по оси X;
- Установка центра масс объекта в необходимую позицию;
- Выдавливание отверстия для трубки дрейфа в соответствии с величиной  $2*L-d$ ;
- Создание цилиндров волновода и пролетного канала;
- Применение функции `modifier` для создания пролетного канала при помощи цилиндра из пункта выше;
- Объединение созданной ранее заготовки с волноводом;
- Дублирование полученной модели согласно значению переменной  $Nc$ ;
- Объединение  $Nc$  частей в один меш.

Построенная посредством вызова пункта меню «SS GC mesh» модель представлена на рисунке 5. Результат сохранен в формате \*.ply, конвертирован при помощи созданного скрипт-шаблона convert.py, а затем импортирован в freefem++ для возможности проведения расчетов в дальнейшем. Результат импорта представлен на рисунке 6.

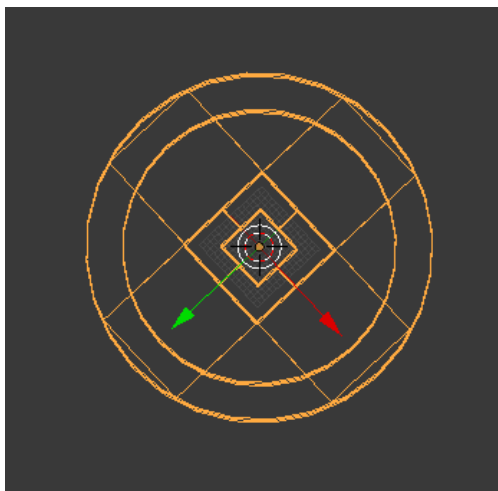


Рисунок 5 – ЗС типа ГК в программе 3D моделирования Blender с параметром  $N_c = 2$

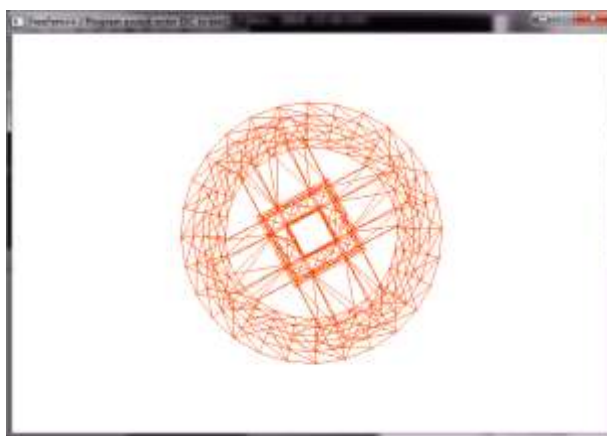


Рисунок 6 – Разработанная модель после импорта в freefem++

4. Freefem++ – это программа, предназначенная для решения математических задач на основе метода конечных элементов. Она может быть использована как в среде Windows, так и в среде Linux.

В процессе написания выпускной квалификационной работы были разработаны алгоритмы построения моделей ЗС. Результаты экспортированы в формат .ply [10].

Для преобразования к формату \*.mesh, удобному для чтения набору

исполняемых библиотек freefem++ был написан соответствующий код на языке Python, представленный в приложении Ж магистерской квалификационной работы. Использование программы 3D моделирования Blender в качестве графической оболочки предполагает не только использование готовых моделей в формате \*.mesh для осуществления необходимых расчетов при помощи набора исполняемых библиотек freefem++, но также возможность получения результатов в окне вызывающей программы, например, построения распределения электрического поля.

В ходе работы был составлен скрипт-шаблон, позволяющий передать и отобразить распределение электрического поля прямоугольного резонатора, полученного при помощи набора исполняемых библиотек freefem++ в программе 3D моделирования Blender. Для формирования распределения поля был использован написанный ранее код, представленный в приложении З магистерской квалификационной работы. Значения поля были экспортированы в файл, а затем обработаны при помощи кода, представленного в приложении И магистерской квалификационной работы.

На рисунке 7 представлено распределение электрического поля прямоугольного резонатора в freefem++. На рисунке 8 – результат работы алгоритма, обрабатывающего экспортированные значения поля.

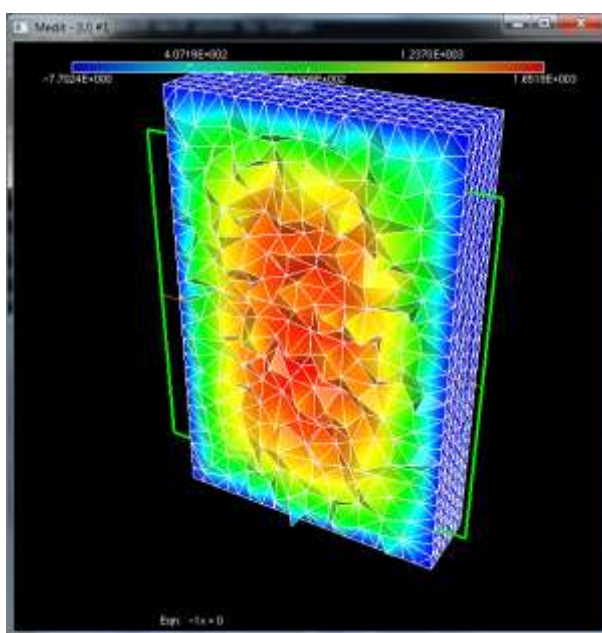


Рисунок 7 – Распределение электрического поля в freefem++

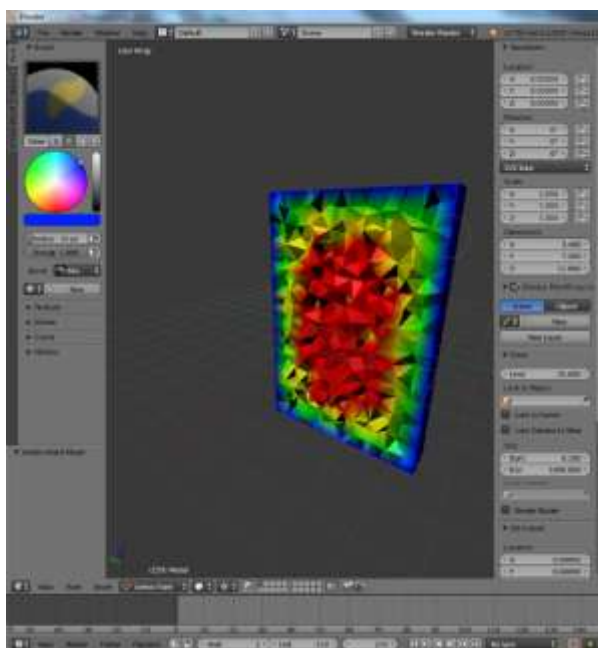


Рисунок 8 – Распределение электрического поля в программе 3D моделирования Blender

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие результаты:

- изучены различные виды замедляющих систем: петляющий волновод, цепочка связанных резонаторов с повернутыми на 180 градусов фасолевидными щелями связи, гребенка-квадрат;
- моделирование замедляющих систем в программе 3D-моделирования Blender;
- разработаны скрипт-шаблоны на языке Python для автоматизации процесса проектирования замедляющих систем типа петляющий волновод в программе 3D-моделирования Blender, позволяющий быстро изменять размеры и параметры устройств;
- скрипты доведены до уровня плагинов, добавляющих в меню программы 3D-моделирования Blender соответствующих пунктов Add - Mesh - SS type \* mesh.

Указанные выше результаты являются одним из этапов разработки программного комплекса, осуществляющего моделирование, расчет и оптимизацию волноведущих систем мощных приборов СВЧ, и предназначенного для работы на параллельной вычислительной системе.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Григорьев А.Д., Янкевич В.Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ: Численные методы расчета и проектирования. М: Радио и связь, 1984, 248 с.
- 2 Накрап И.А., Савин А.Н. Класс миллиметровых замедляющих систем в сравнении с традиционной цепочкой связанных резонаторов. Радиотехника и электроника, 2014, том 59, №8, 809-817 с.
- 3 ANSYS official page [Электронный ресурс] URL: <https://www.ansys.com> (дата обращения: 28.04.2018)
- 4 Программа численного решения дифференциальных уравнений в частных производных [Электронный ресурс] URL: <http://www.freefem.org/ff++/ftp/freefem++doc> (дата обращения: 23.04.2018)
- 5 Python 3.6 documentation [Электронный ресурс] URL: <https://docs.python.org/3/> (дата обращения: 05.04.2017)
- 6 Программа 3D-моделирования Blender [Электронный ресурс] URL: <https://www.blender.org/> (дата обращения: 08.04.2017)
- 7 OpenGL - The Industry Standart for High Perfomance Graphics [Электронный ресурс] URL: [\href{https://www.opengl.org/}](https://www.opengl.org/) {<https://www.opengl.org/>} (дата обращения: 14.11.2017)
- 8 Blender documentation contents [Электронный ресурс] URL: <https://docs.blender.org/api/2.79/> (дата обращения: 03.11.2017)
- 9 Freefem++ documentation [Электронный ресурс] URL: <http://www.freefem.org/ff++/ftp/freefem++doc.pdf> (дата обращения: 16.12.2017)
- 10 Polygon File Format - Wiki [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/PLY> (дата обращения: 06.05.2017)
- 11 Накрап И.А., Савин А.Н. Экспериментальное исследование электродинамических характеристик замедляющей системы типа петляющий волновод различных модификаций// Материалы 23 междун.

- Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо-2013)». Севастополь, Украина, 9-13 сентября 2013 г. Севастополь: «Вебер». 2013. С. 203–204.
- 12 Накрап И.А., Савин А.Н. Оптимизация электродинамических характеристик замедляющей системы «гребёнка–квадрат»// Материалы 22 междуна. Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо-2012)». Севастополь, Украина, 10-14 сентября 2012 г. Севастополь: «Вебер». 2012. С. 187–188.
- 13 Накрап И.А., Савин А.Н., Вахлаева К.П. Оптимизация формы экрана замедляющей системы типа колец на встречных металлических опорах для повышения сопротивления связи// Материалы 20 междуна. Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо-2010)». Севастополь, Украина, 13-17 сентября 2010 г. Севастополь: «Вебер». 2010. С. 255–256.
- 14 Данилова В.В. Разработка плагина для программы 3D моделирования Blender, реализующего графическую модель волноведущей системы мощной лампы бегущей волны [Электронный ресурс] URL: [http://elibrary.sgu.ru/VKR/2016/09-03-01\\\_008.pdf](http://elibrary.sgu.ru/VKR/2016/09-03-01\_008.pdf) (дата обращения: 8.08.17)