

3. Комнатнов М.Е. Предварительный анализ причин аномальной работы автогенератора Пирса / М.Е. Комнатнов, М.И. Почуев // Научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «ИСС». – 2014. – С. 90–92.

4. Заболоцкий А.М. Индуктивность цепи земля–питание в печатных платах бортовой аппаратуры космических аппаратов / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. – № 11. – С. 11–15.

5. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров // Доклады ТУСУР. – 2015. – Т. 36, № 4. – С. 45–50.

УДК 621.396.677

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ НА ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ**

*Д.М. Мочалов, студент каф. ТУ; Д.В. Клюкин, ассистент каф. ТУ  
Научный руководитель С.П. Куксенко, д.т.н., проф. каф. ТУ  
г. Томск, ТУСУР, dm\_mochalov@tu.tusur.ru*

Выполнена оценка влияния качества расчетной сетки на параметры и характеристики прямоугольной спиральной антенны при моделировании методом моментов. Сетки построены с помощью программных библиотек CGAL и GMSH. Показано, что качество расчетной сетки оказывает значительное влияние на расчет входного импеданса, однако слабо сказывается на коэффициенте усиления антенны.

**Ключевые слова:** прямоугольная спиральная антенна, метод моментов, расчетная сетка.

В настоящее время для моделирования антенн широкое распространение получил метод моментов [1–4]. Согласно методу, проводящие поверхности проектируемой антенны заменяются эквивалентными поверхностными электрическими токами, после чего решается задача возбуждения электромагнитного поля этими токами для заданных граничных условий. Для аппроксимации криволинейных границ поверхностей геометрических моделей антенн часто используется их представление в виде треугольной полигональной сетки, а для описания тока в ячейках сетки – базисные функции RWG [5]. При этом одним из основных факторов, влияющих на точность вычисления, является качество расчетной сетки. Также для выполнения точного моделирования генераторы расчетных сеток должны предоставлять воз-

возможность контроля длин ребер элементов. Цель работы – оценка влияния качества расчетной сетки на характеристики и параметры планарной прямоугольной спиральной антенны при моделировании методом моментов.

Для оценки качества расчетных сеток выбраны коэффициент  $\tau$ , определяющий качество сетки по расхождению между длинами ребер входящих в нее треугольников [7–8], и коэффициент  $\gamma$ , являющийся мерой отклонения элемента сетки от равностороннего треугольника [6–7]. При этом чем больше значение  $\tau$ , а также минимальное  $\gamma_{\min}$  и среднее  $\bar{\gamma}$  значения, тем более качественной является расчетная сетка.

Оценка проводилась на основе модели планарной прямоугольной спиральной антенны со следующими параметрами:  $W = 3,19$  мм,  $L = 104,9$  мм,  $g = 1,59$  мм, число витков  $N = 4$  (рис. 1, а). Для дискретизации модели использовались библиотеки CGAL (см. рис. 1, б) [9] и GMSH (см. рис. 1, в) [10].

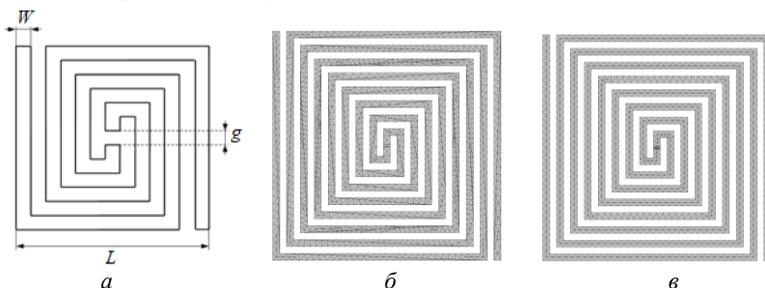


Рис. 1. Модель планарной прямоугольной спиральной антенны (а) и расчетные сетки, полученные в CGAL (б) и GMSH (в)

Моделирование проводилось на частоте 5 ГГц при шаге дискретизации  $\lambda/20$ . В табл. 1 приведены значения критериев качества расчетных сеток.

Таблица 1

Значение критериев качества			
Библиотека	$\tau$	$\gamma_{\min}$	$\bar{\gamma}$
CGAL	77,9021	0,0055	0,6350
GMSH	81,5144	0,3853	0,8800

Из табл. 1 видно, что значения коэффициентов  $\tau$ ,  $\gamma_{\min}$  и  $\bar{\gamma}$  расчетной сетки GMSH больше, чем CGAL, что сигнализирует о более высоком качестве сетки GMSH. В табл. 2 сведены вычисленные значения входного импеданса антенны в сравнении с САПР EMPro [11]

(отклонения указаны в скобках). Исходя из результатов, видно, что использование расчетной сетки GMSH позволяет получить наиболее точное значение входного импеданса.

Таблица 2

**Значение входного импеданса планарной  
прямоугольной спиральной антенны**

GMSH	CGAL	EMPro
168,09+j84,37 (11,6%)	20,87-j584,06 (246,9%)	143,6+j88,1

На рис. 2 приведены вычисленные диаграммы коэффициентов усиления (КУ) [2] в сравнении с аналогичными результатами из EMPro. Отклонение КУ, полученных при использовании расчетной сетки GMSH, от результатов EMPro, не превышает 0,21. При использовании сетки CGAL отклонение составляет 0,337.

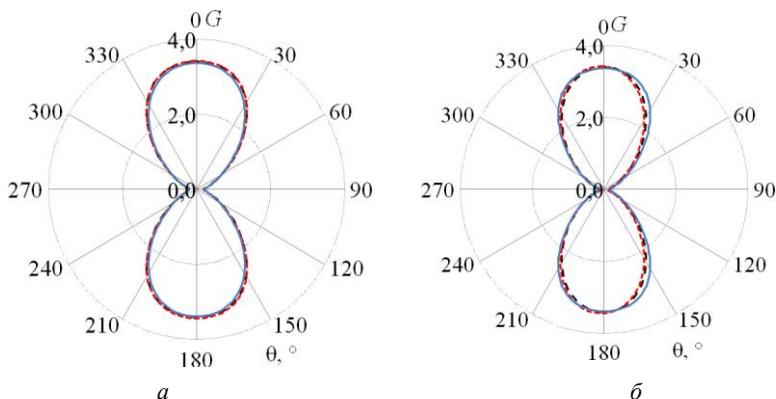


Рис. 2. КУ планарной прямоугольной спиральной антенны в плоскостях  $\varphi = 0^\circ$  (a) и  $\varphi = 90^\circ$  (б): GMSH (—), CGAL (---), EMPro (—)

Таким образом, выполнена оценка влияния качества расчетной сетки на параметры и характеристики планарной прямоугольной спиральной антенны при моделировании методом моментов. Моделирование показало, что отклонение входного импеданса при использовании GMSH от EMPro составило 11,6, а CGAL – 246,9. Отклонение КУ не превышает 0,2 и 0,337 соответственно. В результате качество расчетной сетки может оказать значительное влияние на расчет входного импеданса и незначительное – на КУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. – М.: Физматлит, 2012. – 432 с.
2. Makarov S.N. Antenna and EM Modeling with MATLAB. – Princeton University Press, 2002. – 273 p.
3. Квасников А.А. Система компьютерного моделирования антенн методом моментов / А.А. Квасников, А.В. Демаков, А.А. Иванов, Д.В. Клюкин, М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 1. – С. 49–66.
4. Gibson W.C. The method of moments in electromagnetics. – Chapman and Hall/CRC, 2021.
5. Rao S. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape / S. Rao, D. Wilton, A. Glisson // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1982. – Vol. 30. – PP. 409–418.
6. Makarov S.N. Low-frequency electromagnetic modeling for electrical and biological systems using MATLAB / S.N. Makarov, G.M. Noetscher, A. Nazarian. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. – 598 p.
7. Мочалов Д.М. Оценка качества расчетной сетки при моделировании антенн методом моментов / Д.М. Мочалов, Д.В. Клюкин // Электронные средства и системы управления: матер. докладов XVIII Междунар. науч.-практ. конф. – 2022. – № 1. – С. 282–285.
8. Frey P.J. Mesh generation: application to finite elements / P.J. Frey, P.L. George. – London: John Wiley & Sons, Inc, 2007. – 848 p.
9. CGAL. Официальный сайт The Computational Geometry Algorithms Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.graphics.rwth-aachen.de/software/openmesh/intro/> (дата обращения: 10.01.2023).
10. GMSH. Официальный сайт GMSH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gmsh.info/> (дата обращения: 11.01.2023).
11. EMPro. Официальный сайт EMPro – программа электромагнитного анализа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.orcada.ru/> (дата обращения: 15.01.2023).

УДК 519.612

### АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

*С.А. Сальников, студент каф. ТУ;*

*Д.В. Клюкин, ассистент каф. ТУ*

*Научный руководитель С.П. Куксенко, д.т.н., проф. каф. ТУ  
г. Томск, ТУСУР, salnikovs802@gmail.com*

Разработан алгоритм расчета погонной емкости линии передачи методом конечных разностей. Алгоритм отражает различные подходы к вычислению распределения потенциалов и погонной ёмкости.

**Ключевые слова:** линия передачи, моделирование, метод конечных разностей, погонная ёмкость.