

На правах рукописи

Газизов Тимур Тальгатович

**Алгоритмическое и программное обеспечение
для моделирования проводных антенн
с сосредоточенными нагрузками**

Специальность 05.13.18
Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2008

Работа выполнена в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники

Научный руководитель: канд. техн. наук, старший научный сотрудник
Коваленок Всеволод Иванович

Официальные оппоненты: д-р физико-математических наук, профессор
Поляков Виктор Владимирович;

д-р физико-математических наук, профессор
Бондарчук Сергей Сергеевич

Ведущая организация: Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики (г.
Новосибирск)

Защита состоится 21 ноября 2008 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.005.04 в ГОУ ВПО «Алтайский государственный университет» под адресу: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного университета по адресу: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

Автореферат разослан «__» октября 2008 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
д-р физико-математических наук
профессор



С.А. Безносюк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время большое внимание уделяется решению задач прикладной электродинамики. К таким задачам относятся проектирование антенн и антенных решеток, синтез плоских многослойных поглотителей, разработка частотно-селективных поверхностей, синтез многослойных диэлектрических структур, анализ электростатического и магнитостатического оборудования, разработка различных электромагнитных устройств. Среди этих задач особое место занимает проектирование антенн, основой которого является компьютерное моделирование. При этом исследование методов улучшения характеристик проводных антенн, в частности увеличения рабочего диапазона частот, актуально. Часто необходимо усовершенствовать характеристики антенны, не изменяя её геометрических размеров. Как правило, в этом случае используется дополнительная согласующая цепь. Также используется включение сосредоточенных нагрузок в структуру исследуемой антенны. Так, включение последовательных и параллельных контуров в качестве сосредоточенных нагрузок вдоль проводных антенн, при жестких ограничениях на размеры антенн, позволяет улучшить их характеристики, минимизировать коэффициент стоячей волны (КСВ). Большой вклад в исследование этого вопроса внесли Овсяников В.В., Harrington R.F., Mautz J.R. и др. Между тем, ряд задач по оптимизации параметров проводных антенн не решен. В данной работе предлагается оптимизировать параметры сосредоточенных нагрузок и структуры проводных антенн для улучшения их характеристик с помощью генетических алгоритмов (ГА). Ч. Дарвина, ГА сегодня получили наибольшее распространение среди эволюционных алгоритмов. На их основе осуществляются: оптимизация профилей балок в строительстве, обработка рентгеновских изображений в медицине, оптимизация работы нефтяных трубопроводов и т.д. Для решения различных задач электродинамики ГА использовали Бовбель Е.И., Кухарчик П.Д., Тишков Д.В., Чермошенцев С.Ф., Johnson J.M., Rahmat-Samii Y., Haupt R.L. и др. Применение данных алгоритмов позволяет улучшить параметры исследуемых устройств, уменьшить вычислительные затраты, а также получить принципиально новые, патентоспособные структуры. Использование таких алгоритмов в составе программного комплекса для оптимизации сосредоточенных нагрузок позволит улучшить характеристики проводных антенн при их моделировании.

Цель работы: разработка алгоритмического и программного обеспечения для моделирования проводных антенн с улучшенными характеристиками за счет оптимизации сосредоточенных нагрузок.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Предложить алгоритмы оптимизации параметров и мест включения сосредоточенных нагрузок при моделировании антенн.
2. Разработать программное обеспечение для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками и их оптимизации.

3. Выполнить моделирование модифицированных вибраторных антенн с сосредоточенными нагрузками.

4. Создать новые антенные структуры с улучшенными характеристиками.

В работе использовались: теория антенн, глобальные методы оптимизации, объектно-ориентированное программирование.

Достоверность результатов подтверждается сравнением теоретических результатов с опубликованными данными, математическим моделированием и экспериментом.

Научная новизна

1. Представлена и обоснована классификация глобальных методов оптимизации по принципам и явлениям, лежащим в их основе.

2. Предложена методология снижения КСВ антенны за счет оптимизации генетическими алгоритмами параметров и мест включения сосредоточенных нагрузок в виде параллельных *RLC* фильтров, не меняя структуры и геометрических размеров антенны.

3. Впервые выполнено моделирование широкодиапазонной модифицированной вибраторной антенны с оптимизацией сосредоточенных нагрузок.

Практическая значимость

1. Предложенная методология позволила создать широкодиапазонную антенну с $КСВ < 3,5$ в диапазоне частот от 1,5 до 30 МГц.

2. Создано алгоритмическое и программное обеспечение для моделирования новых антенных структур с улучшенными характеристиками на основе оптимизации генетическими алгоритмами.

3. Результаты исследования широко внедрены в практику и используются в учебном процессе.

Использование результатов исследований

1. Программная реализация электродинамической модели для вычисления токов в проводных структурах с нагрузками в составе комплексной оптимизации генетическими алгоритмами применена в НИР "Исследование научно-технических принципов и изыскание инженерно-технических решений по созданию широкодиапазонных быстроразворачиваемых антенн ДКМВ диапазона". (Отчёт по НИР, тема "Крюшон-Т", хоз. договор 1402, Томск, 2003).

2. Программная реализация оптимизации генетическими алгоритмами использована при выполнении проекта «Разработка системы компьютерного моделирования электромагнитной совместимости». (Заключительный отчет ВТК-15 по мероприятию 3.1.3а инновационной программы ТУСУР, 2006.).

3. Выполненный автором анализ преднамеренных электромагнитных воздействий, методов и средств защиты от их деструктивного воздействия использован при разработке национального стандарта в СПбФ ФГУП «НТЦ «Атлас». Модуль генетических алгоритмов в составе системы компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков внедрен в учебный процесс студентов для выполнения курсовой работы. Разработанные учебно-методические пособия («Использование DHTML диалогов в системе TALGAT», «Оптимизация генетическими алгоритмами») используются в

групповом проектном обучении, курсах лекций и лабораторных работах. Программная реализация оптимизации генетическими алгоритмами использована в новой лабораторной работе.

Апробация результатов

Результаты исследований использованы при выполнении грантов:

1. «Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков с графическим интерфейсом пользователя» – конкурс грантов ТУСУР, 2003 г.

2. «Автоматизированное проектирование оптимальных широкополосных антенн с сосредоточенными нагрузками» – конкурс грантов ТУСУР, 2005 г.

3. «Исследование новых модальных явлений в структурах многопроводных линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением» – конкурс грантов РФФИ 2006 г., проект 06-08-0124.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР» 2003, 2004 и 2008 г. (Томск); Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности» 2004, 2005, 2008 г. (Томск-Красноярск); Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» 2004 и 2005 г. (Томск); Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения» 2003, 2004, 2008 г. (Казань); Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» 2004 г. (Красноярск); Научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства» 2008 г. (Томск); Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии 2005, 2007 г. (Санкт-Петербург); Международной конференции EUROEM 2008 (Лозанна, Швейцария).

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 23 научные работы, в т.ч. 3 статьи в журналах из перечня ВАК; 1 свидетельство об отраслевой регистрации разработки; 1 патент. Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список литературы из 109 наименований и 8 приложений. Объём диссертации составляет 144 стр., в том числе 69 рис. и 11 табл.

Личный вклад. Все результаты получены автором лично или при его участии.

Положения, выносимые на защиту

1. Классификация и сравнение методов глобальной оптимизации обосновывают использование генетических алгоритмов для моделирования антенн с сосредоточенными нагрузками.

2. Разработанное программное обеспечение позволяет моделировать широкий класс проводных антенн с сосредоточенными нагрузками.

3. Использование предложенной методологии позволяет существенно снизить коэффициент стоячей волны модифицированных вибраторных антенн.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе (проектирование проводных антенн с сосредоточенными нагрузками) представлено общее состояние задачи проектирования антенн и рассмотрены основные подходы к проблеме моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками. В данной работе анализ проводных антенн осуществляется методом моментов. Проводная структура сначала делится на сегменты, а сосредоточенные нагрузки полагаются расположенными в этих сегментах. В методе моментов исследуемое интегральное уравнение, описывающее искомое поле проводной антенны, раскладывается по полной системе базисных ортогональных функций с последующим сведением задачи к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с N неизвестными, которые обычно представляют собой коэффициенты некоторого разложения тока. Представим основные этапы анализа проводных антенн с помощью Максвелловских интегральных уравнений структуры для электрического поля

$$E = -j\omega A - \nabla\phi, \text{ где } A = \mu \iint_s J_s \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS; \quad \phi = \frac{1}{\varepsilon} \iint_s \sigma_s \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS, \text{ где } \sigma_s = \frac{-1}{j\omega} \nabla_s \cdot J_s,$$

где ω – частота; μ – магнитная проницаемость; J_s – плотность электрического тока; k – волновое число; R – расстояние от точки источника на оси до точки поля на поверхности провода; S – анализируемая поверхность провода; ε – диэлектрическая проницаемость; σ_s – плотность заряда; ∇ – оператор Гамильтона.

2. Разбиение структуры на N сегментов.

3. Сведение методом моментов интегральных уравнений структуры (с учетом граничных условий на поверхности проводника) к СЛАУ $Z \cdot I = V$.

4. Вычисление элементов матрицы Z СЛАУ размером $N \times N$.

5. Формирование вектора воздействий V размером N .

6. Решение СЛАУ (определение вектора токов I).

7. Вычисление требуемых характеристик из вектора токов (диаграмма направленности, коэффициент усиления, КСВ и т.д.)

Проектирование антенн – сложный процесс. Особый этап проектирования – улучшение характеристик антенны. Главной задачей является сбалансированное улучшение нужных характеристик при неизменном или незначительном ухудшении других или не очень важных. Из характеристик антенн отдельное место занимает КСВ – отношение амплитуды максимумов к амплитуде минимумов в стоячей волне, характеризующее степень согласования антенны и фидера. Поэтому часто КСВ является основной характеристикой, по которой оценивают работу антенны, и стараются улучшить данную характеристику в первую очередь.

Особую роль среди различных типов антенн занимают вибраторные антенны. Проводные антенны вибраторного типа являются быстроразворачиваемыми, простыми в изготовлении и отличаются малой парусностью. Эти достоинства делают быстроразворачиваемые антенны

вибраторного типа хорошим кандидатом для обеспечения резервной скрытной радиосвязи для специальных и военных целей. Такое резервирование становится особенно актуальным в свете угрозы электромагнитного терроризма, реальность которой активно исследуется во всем мире.

Частотный диапазон обычных симметричных вибраторов ограничен как по входному сопротивлению, так и по диаграмме направленности из-за резкой частотной зависимости распределения тока вдоль антенны. Одним из способов достижения широкополосности вибраторных антенн является включение резистивных нагрузок. Известно, что амплитуда тока плавно снижается к концам антенны. Наличие сосредоточенных нагрузок позволяет изменять фазу между точками возбуждения и нагрузками по линейному закону, что способствует расширению рабочей полосы частот антенны. Однако существенными недостатками включения таких нагрузок являются большие габариты и низкий коэффициент полезного действия (КПД) 40–50% антенны. Для получения экспоненциально спадающего к концам антенны распределения тока предложено включить в разрыв проводников антенны через равные интервалы емкостные нагрузки, что существенно увеличивает КПД, благодаря малым потерям. Включение индуктивных нагрузок в разрывах ветвей антенны позволяет укоротить длину вибратора. Включение таких нагрузок не в центр симметричного вибратора, а на некотором расстоянии от него позволяет повысить активное сопротивление антенны. Этот эффект, как правило, используется для согласования антенн с подводимым фидером, имеющим волновое сопротивление, например, 50 Ом. В данной работе предлагается использовать преимущества включения всех перечисленных нагрузок, путем включения в структуру вибраторной антенны сосредоточенных RLC нагрузок.

Нагрузка, включенная в структуру антенны, представляет собой колебательный контур, настроенный на резонансную частоту. Простейшая нагрузка (фильтр) представляет собой параллельный LC контур (рассмотрим идеальный случай, когда $R=\infty$), с резонансной частотой: $f=1/2\pi\sqrt{LC}$. Включение одного или нескольких таких фильтров позволяет управлять электромагнитными характеристиками антенны (рис. 1). Входное сопротивление ненагруженного четвертьволнового вибратора, с резонансной частотой f_0 , длиной l , гораздо выше на второй резонансной частоте $2\cdot f_0$. Если LC нагрузку (настроенную на частоту $2\cdot f_0$) разместить в середину вибратора, распределение тока на f_0 будет нарушено из-за низкого сопротивления нагрузки. Однако на $2\cdot f_0$ токи в верхней части антенны будут нулевыми, и она будет излучать, как четвертьволновый вибратор длиной $l/2$, даже на этой частоте. Использование одной нагрузки позволяет создать двухдиапазонную антенну, которую можно рассматривать как комбинацию двух четвертьволновых вибраторов разной длины. Для ненагруженного вибратора распределение тока (серая область) и диаграмма направленности обычного вибратора. Для нагруженного случая показан вибратор с нагрузкой, который имеет одинаковые значения входного сопротивления ($R_{вх}$) и коэффициента усиления (G_{max}) для двух частот.

Включение одного или нескольких фильтров в структуру антенны позволяет осуществить динамический контроль (в соответствии с частотами) распределения тока, и, соответственно, входного импеданса, диаграммы направленности и усиления. Нагрузки, в основном, используются для увеличения широкополосности антенны, либо для создания многодиапазонных антенн. Наибольшее распространение получили сосредоточенные нагрузки в виде параллельных RLC контуров, так как они представляют собой полосозапирающий фильтр и имеют бесконечное сопротивление на резонансной частоте, что позволяет контролировать рабочую длину антенны.



Рисунок 1 – Особенности нагруженных антенн: *a* – четвертьволновый вибратор длиной l без нагрузки на резонансных частотах f_0 и $2 \cdot f_0$; *б* – четвертьволновый вибратор с нагрузкой ($l/2$ – место включения нагрузки) на резонансных частотах f_0 и $2 \cdot f_0$.

В общем случае, проектирование широкополосных антенн с сосредоточенными нагрузками является задачей нелинейной оптимизации. Для решения такой задачи необходим эффективный метод глобальной оптимизации, который позволит определить геометрию будущей антенны, расположение сосредоточенных нагрузок и их параметры так, чтобы полученная антенна соответствовала техническому заданию.

Таким образом, необходимо решить следующие задачи.

1. Предложить алгоритмы оптимизации параметров и мест включения сосредоточенных нагрузок: представить классификацию методов оптимизации; произвести сравнение методов глобальной оптимизации; выделить недостатки и преимущества выбранного алгоритма.

2. Разработать программное обеспечение для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками и их оптимизации. Произвести тестирование программного обеспечения.

3. Выполнить моделирование модифицированных вибраторных антенн с сосредоточенными нагрузками. Сравнить результаты, получаемые с помощью разработанной системы, с результатами, получаемыми аналогами.

4. Создать новые антенные структуры с улучшенными характеристиками: сформулировать методологию уменьшения КСВ при моделировании антенн с сосредоточенными нагрузками; использовать разработанное программное обеспечение для тестирования предложенной методологии на примере модифицированных вибраторных антенн.

Результатом решения поставленных задач должна быть реализация алгоритмов моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками и их оптимизации в виде программного обеспечения.

Во второй главе (классификация и анализ методов глобальной оптимизации) обосновано использование ГА на основе предложенной классификации и сравнения методов глобальной оптимизации. Различают глобальные и локальные методы оптимизации. Приведем классификацию глобальных методов оптимизации по явлениям и процессам, лежащим в их основе (рис. 2).



Рисунок 2 – Методы глобальной оптимизации

В работе проведен анализ методов глобальной оптимизации, а также обзор российских и зарубежных публикаций, проанализирована пригодность использования таких методов к различным типам сложных задач оптимизации: «королевских дорог», оптимизации графа, размещения (на примере

проектирования цепей), заполнения «рюкзака», предсказания банковского курса валют, составления расписания. Сделан вывод: ГА при настройке показывают лучшие (примерно на 10–15%) результаты и, даже с параметрами по умолчанию, позволяют добиться приемлемой точности.

Сформирована общая таблица ранжирования применения описанных методов к конкретным задачам, и рассчитан условный средний ранг для каждого метода. При этом автором рассматривались результаты применения методов оптимизации к различным задачам, и каждый метод получил условное место (первое место: метод является наилучшим относительно остальных, последнее место: метод справился с задачей хуже или не справился вообще). Последний столбец представляет собой средний ранг применения к различным задачам каждого метода (табл. 1).

Таблица 1 – Ранжирование методов глобальной оптимизации

Задача→ Метод	Функция royal road	Функция bump	Опт. графа	Размещение элементов цепи	Заполнение рюкзака	Предсказание банковского курса	Составление расписания	Среднее
ГА	1	1	2	1	1	2	2	1,4
Имитация отжига	4	4	3	2	4	4	3	3,4
Эволюц. програм.	3	2						2,5
Эволюц. стратегии	2	3						2,5
Детермин. методы			1		5			3
Поиск с запретом					2	3	1	2
Нейронные сети					3	1		2

Из таблицы видно, что ГА применяются с наибольшим успехом, причем в очень широком круге задач. Преимущества применения ГА, относительно других методов глобальной оптимизации: простота использования; слабая зависимость эффективности использования от настроек оптимизатора для многих задач; универсальность при оптимизации сложных многопараметрических функций; независимость от исследуемой проблемы, благодаря работе с закодированными параметрами; успешность использования для широкого круга задач; применимость для неформализуемых задач, когда целевая функция нечетко сформулирована или вообще отсутствует.

Выводы, сделанные выше, позволяют использовать ГА как универсальный инструмент для оптимизации сложных задач, при этом результаты, полученные за счет использования ГА, будут не хуже, а скорее всего лучше, чем результаты, полученные другими методами, при тех же временных затратах. Поэтому решение задачи оптимизации новой, ещё неисследованной, проблемы стоит начать именно с применения ГА.

В третьей главе (программное обеспечение для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками) представлены структура, функции и интерфейс алгоритмического и программного обеспечения для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками, которое входит в состав программного комплекса «Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков TALGAT». Цель разработки – дать пользователю удобный инструмент моделирования проводных антенн, возможность быстрого и легкого ввода сосредоточенных нагрузок, использования ГА для структурной и параметрической оптимизации антенн. Структурная схема разработанного про-

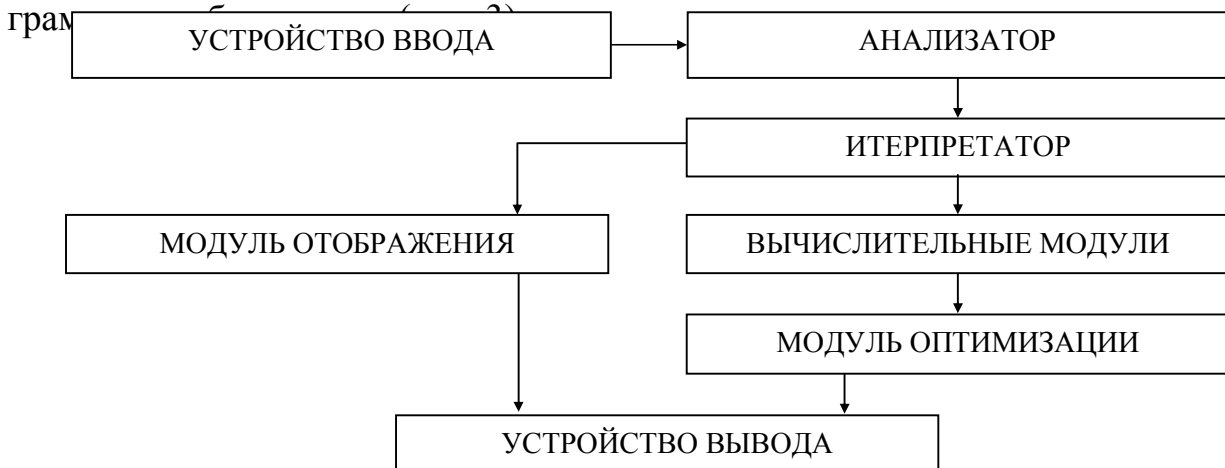


Рисунок 3 – Структурная схема программного обеспечения для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками

Реализация ГА в разработанной системе (рис. 4). В неё входят: интерпретатор – реализованный в ядре системы интерпретатор скриптового языка; клиент системы – любой клиент системы; алгоритм анализа – динамически загружаемый вычислительный модуль системы, содержащий программы для анализа определенного класса структур проводников и диэлектриков; ГА – модуль системы, содержащий библиотеку компонентов ГА GA¹¹

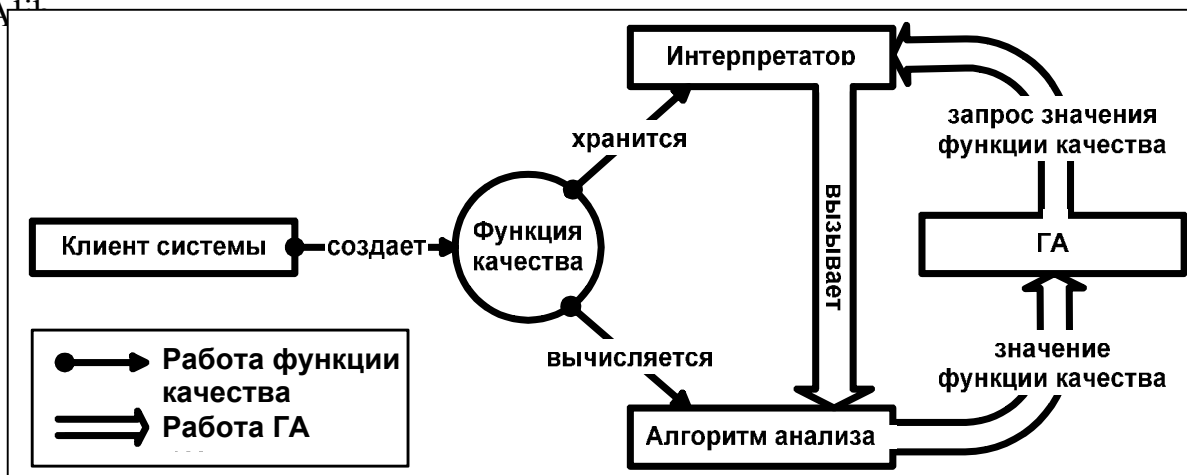


Рисунок 4 – Пояснение работы ГА в программном обеспечении для моделирования проводных антенн с нагрузками

Создано алгоритмическое обеспечение, включающее следующие алгоритмы: поиска экстремума функции; формирования отображения антенны с нагрузками; учета сосредоточенной нагрузки в структуре антенны; настройки и запуска ГА; работы системы моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками (рис. 5).



Рисунок 5 – Алгоритм работы программного обеспечения для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками

На созданное программное и алгоритмическое обеспечение для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками получено свидетельство о регистрации в отраслевом фонде алгоритмов и программ Федерального агентства по образованию.

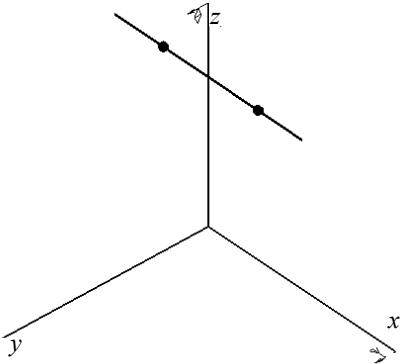


Рисунок 6 – Общий вид структуры «диполь» с двумя нагрузками

Проводилось сравнение результатов, полученных в программных системах TALGAT и 4NEC2, для нескольких структур различной сложности (рис. 6, 8). Приведены примеры сравнения КСВ в диапазоне частот от 50 до 300 МГц для структуры «диполь» с двумя нагрузками (рис. 6) в виде параллельного и последовательного контуров ($R=10$ Ом, $L=100$ мкГн, $C=100$ пФ) (рис. 7). Хорошее совпадение результатов говорит о корректности программной реализации учёта последовательных и параллельных нагрузок при моделировании проводных антенн в системе TALGAT.

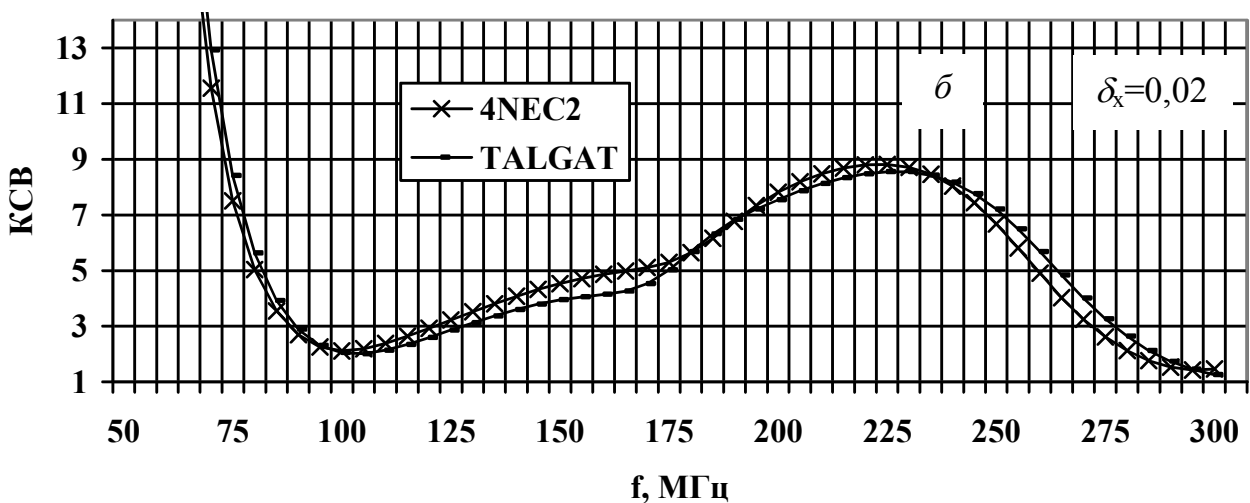
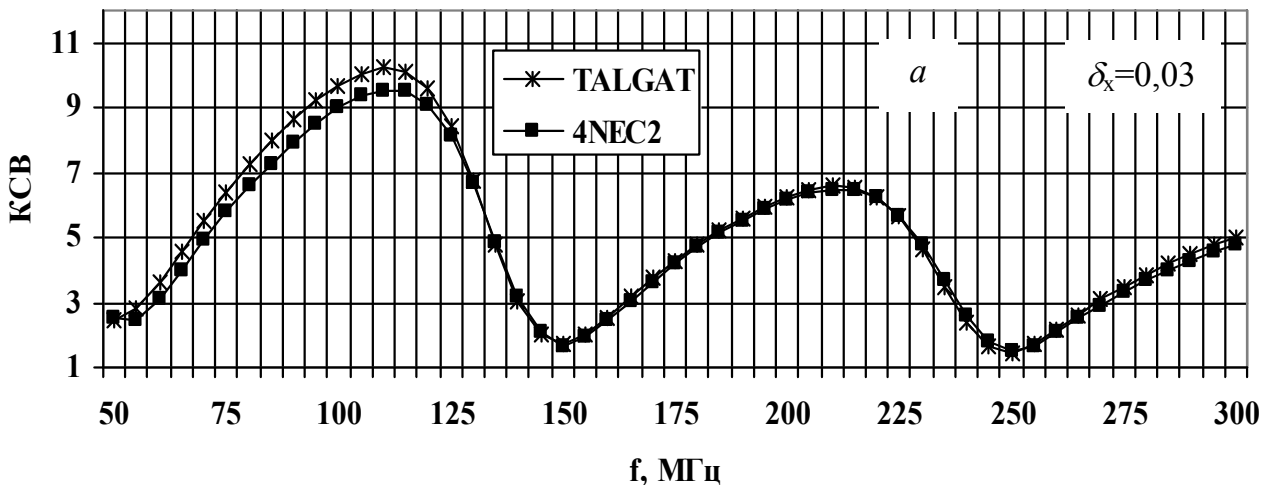


Рисунок 7 – Частотная зависимость КСВ структуры «диполь» в программных системах TALGAT и 4NEC2 с двумя нагрузками в виде:
a – последовательного контура; *б* – параллельного контура

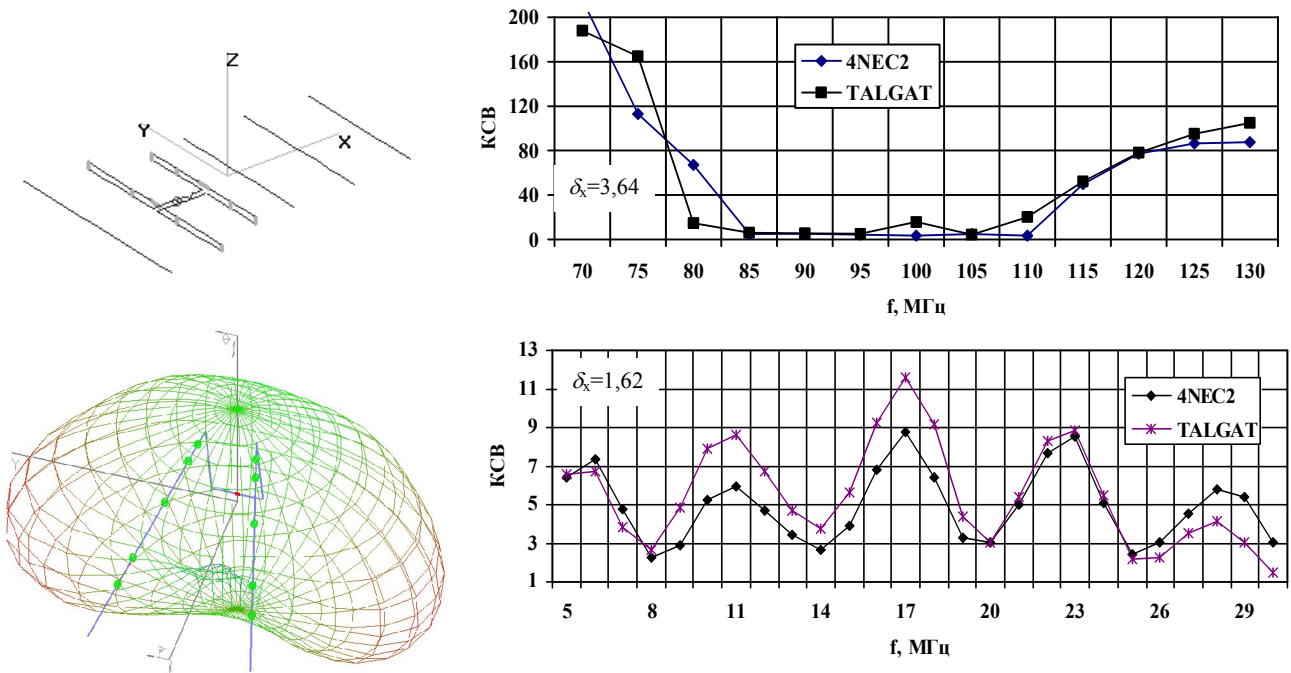


Рисунок 8 – Сравнение результатов моделирования в программных системах TALGAT и 4NEC2 для антенны сложной формы и антенны с 10 нагрузками

В четвертой главе (оптимизация сосредоточенных нагрузок при моделировании проводных антенн) представлены результаты моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками для решения задачи снижения КСВ. Анализ существующих подходов к проектированию антенн и опыт автора по их практической реализации позволил сформулировать методологию снижения КСВ антенны за счет оптимизации на основе ГА параметров и мест включения сосредоточенных нагрузок, состоящую из следующих этапов.

1. Эмпирический этап. Анализ необходимых требований технического задания, учет особенностей геометрии и условий работы будущей антенны, исследование наиболее близких аналогов. Предварительный выбор параметров антенны из эмпирических, интуитивных и аналитических соображений.

2. Оптимизация с помощью ГА: параметрическая, структурная, структурно-параметрическая.

3. Экспериментальная доводка. Этот этап обусловлен объективными причинами некорректности моделирования: методы являются приближенными, модели являются неточными, возможны отличия исходных параметров от реальных, которые трудно учесть.

Используя данную методологию, автором выполнено моделирование широкополосной антенной системы для работы в декаметровом диапазоне. Решена задача создания широкополосной антенны с КСВ < 5 в диапазоне частот от 1,5 до 30 МГц, при сохранении исходных размеров и геометрии антенны, за счет включения нагрузок в структуру антенны. Был произведен теоретический расчет структуры будущей антенны в системе 4NEC2: смоделирована геометрия, оптимизированы параметры и расположение фильтров в антенне. По результатам расчетов была построена реальная антенна и измерен её КСВ. Представлены расчетный КСВ исходной антенны без

нагрузок (рис. 9), расчетный и экспериментальный КСВ антенны с нагрузками (рис. 10). Как видно, КСВ $< 3,5$ от 1,5 до 30 МГц, что соответствует техническому заданию. Разработанная антенна была испытана в сеансах связи на диапазонах 1,8; 3,5; 7; 14; 21; 28 МГц в полевых условиях. Сделан вывод, что включение и оптимизация нагрузок позволяют значительно расширить диапазон частот при заданном КСВ. Сходство расчетных и экспериментальных данных удовлетворительно. Таким образом, оптимизация расположения и параметров нагрузок позволяет значительно снизить КСВ антенны, не меняя её структуры и геометрических размеров. В результате этого экспериментального исследования получена и запатентована конструкция комбинированной четырехпроводной антенны.

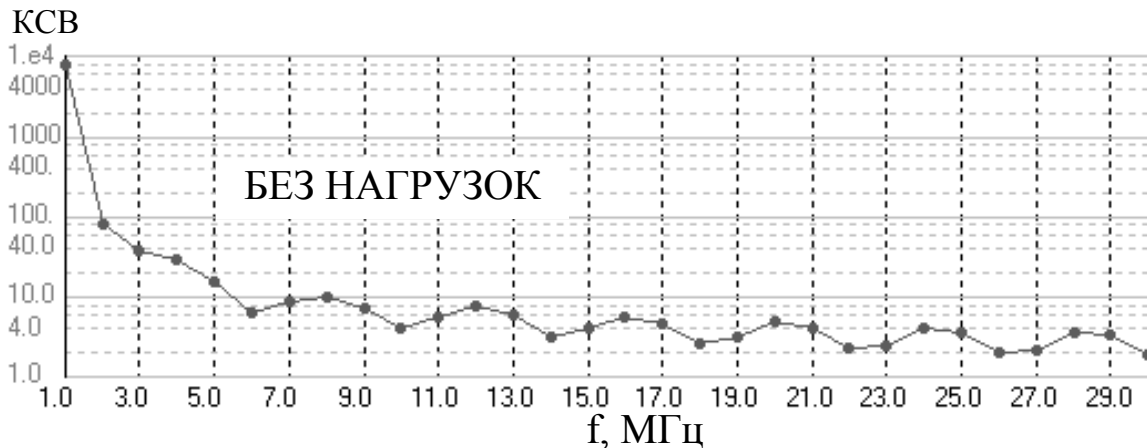


Рисунок 9 – Частотная зависимость КСВ исходной антенны без нагрузок при моделировании

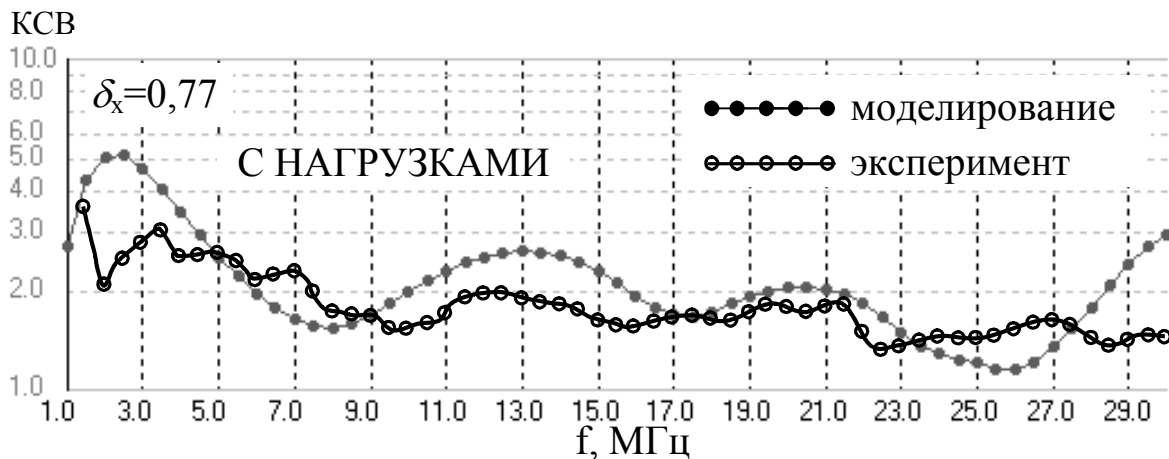


Рисунок 10 – Частотные зависимости КСВ антенны с оптимизированными нагрузками при моделировании и эксперименте

Главной отличительной особенностью разработанного алгоритмического и программного обеспечения является возможность структурной оптимизации на основе ГА. Представим структурную оптимизацию широкодиапазонной быстроразворачиваемой модифицированной вибраторной антенны. Минимизируем КСВ в диапазоне частот от 3 до 30 МГц. Моделировалось наличие либо присутствие фильтров в структуре антенны. Параметры ГА: 10 особей, 10 поколений, коэффициент мутации 0,06,

коэффициент кроссовера 0,6. Результат оптимизации выглядит следующим образом (рис. 11).

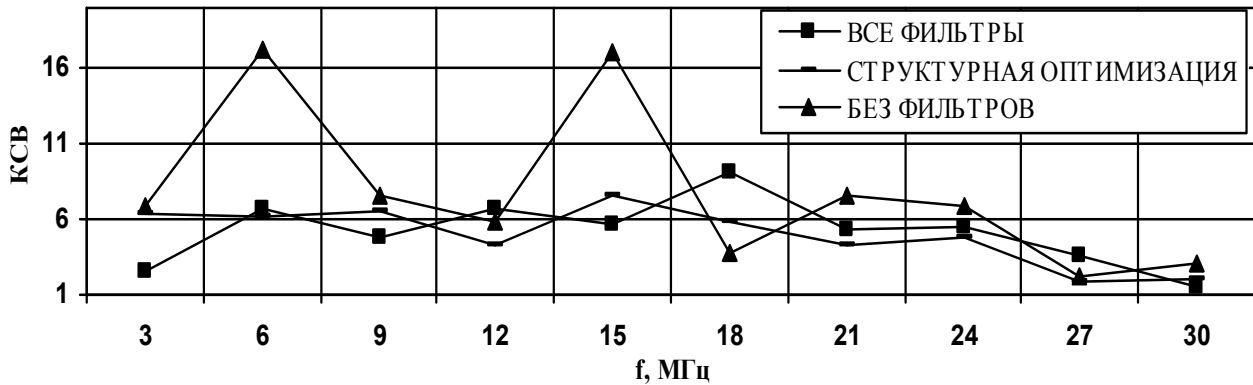


Рисунок 11 – Частотная зависимость КСВ антенны: без нагрузок; с 10 нагрузками до структурной оптимизации; с 3 нагрузками после структурной оптимизации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, в соответствии с поставленной целью, была решена актуальная научно-техническая задача – создано алгоритмическое и программное обеспечение для моделирования проводных антенн с улучшенными характеристиками за счет оптимизации сосредоточенных нагрузок. Предложена и апробирована методология снижения КСВ на примере различных модифицированных вибраторных антенн.

В ходе работы рассмотрены: назначение антенн, их классификация, основные задачи проектирования антенн. Проанализирована возможность увеличения рабочего частотного диапазона проводных антенн за счет включения сосредоточенных нагрузок. Представлены основные методики учета сосредоточенных нагрузок в структуре антенны при расчете распределения тока. Сделаны выводы о необходимости использования инструмента оптимизации, относящегося к глобальным методам, для улучшения КСВ за счет оптимизации мест включения и параметров полюсов антенны. В результате получены следующие результаты:

1. Представлены различные классификации методов оптимизации: общая; по явлениям и принципам, лежащим в основе глобальных методов; с точки зрения вычислительной математики. Выполнен обзор и сравнение методов эволюционных вычислений, как наиболее пригодных методов глобальной оптимизации проводных антенн с сосредоточенными нагрузками. Сравнены результаты применения 7 различных методов оптимизации для 7 типов сложных задач. Представлены преимущества и недостатки ГА. Обоснован выбор и использование ГА для моделирования антенн с сосредоточенными нагрузками на основе предложенной классификации и сравнения методов глобальной оптимизации.

2. Разработано алгоритмическое обеспечение, включающее следующие алгоритмы: поиска экстремума функции, формирования отображения антенны с нагрузками, учета сосредоточенной нагрузки в структуре антенны, настройки

и запуска ГА, работы системы моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками.

3. Создано программное обеспечение для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками. Определены требования к программному обеспечению. В соответствии с требованиями созданы структура и информационное обеспечение. Исследованы возможности библиотеки GAlib и изучена возможность программной реализации ГА с помощью средств GAlib. Реализовано графическое отображение исследуемой проводной антенны с нагрузками и её характеристик. Представлен интерфейс ПО на базе использования DHTML диалогов. Проведено тестирование программного обеспечения для моделирования проводных антенн с нагрузками, показавшее корректность программной реализации. Созданное ПО зарегистрировано в отраслевом фонде алгоритмов и программ Федерального

агентства по интеллектуальной собственности. Применение ГА на основе программного обеспечения для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками позволяет создать новые антенные структуры с улучшенными характеристиками (на примере снижения КСВ). Впервые предложена методология снижения КСВ антенн за счет включения сосредоточенных нагрузок. Представлена параметрическая и структурная оптимизация антенн при моделировании проводных антенн с нагрузками. Установлено, что оптимизация расположения и параметров нагрузок позволяет значительно улучшить КСВ антенны, не меняя её структуры и геометрических размеров. Разработанная методология позволила создать широкодиапазонную антенну с $КСВ < 3,5$ в диапазоне частот от 1,5 до 30 МГц. Антенна изготовлена и испытана в сеансах связи на диапазонах 1,8; 3,5; 7; 14; 21; 28 МГц в полевых условиях. В результате запатентована конструкция комбинированной четырехпроводной антенны.

Результаты диссертации внедрены на предприятиях ФГНУ ГНТЦ «Наука», г. Москва; филиал ФГУП «НТЦ «Атлас», г. Санкт-Петербург, а также использованы в инновационной программе и учебном процессе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, о чем свидетельствуют прилагаемые акты о внедрении.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

(Жирным шрифтом отмечены работы, опубликованные в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России)

1. **Газизов, Т.Т.** Исследование точности решения СЛАУ методом Гаусса // Научная сессия ТУСУР – 2003 : материалы региональной научно-технической конференции. – Томск, 2003. – Ч. 1. – С. 95–98.

2. **Газизов, Т.Т.** Точность решения СЛАУ методом Гаусса // XI Туполевские чтения : материалы международной молодежной научной конференции. – Казань, 2003. – С. 98.

3. **Газизов, Т.Т.** Параметрическая оптимизация антенны генетическими алгоритмами // Научная сессия ТУСУР – 2004 : материалы региональной научно-технической конференции. – Томск, 2004. – Ч. 1. – С. 108–110.

4. **Газизов, Т.Т., Газизов, Т.Р.** Параметрическая оптимизация генетическими алгоритмами в программных системах электромагнитного моделирования для решения задач безопасности // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. – Томск, 2004. – С. 110–112.

5. **Газизов, Т.Т.** Использование генетического алгоритма при оптимизации антенн / Т.Р. Газизов, Т.Т. Газизов // Современные проблемы радиоэлектроники : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Красноярск, 2004. – С. 296–298.

6. **Газизов, Т.Т.** Параметрическая оптимизация антенны генетическими алгоритмами // XII Туполевские чтения : материалы Международной молодежной научной конференции. – Казань, 2004. – С. 153–154.

7. Малютин, Н.Д. Широкодиапазонные приемопередающие комбинированные антенны: принципы построения, решение внутренней задачи / Н.Д. Малютин, Л.Я. Серебренников, Г.Г. Гошин, А.П. Рыбин, А.Г. Лоцилов, Т.Р. Газизов, **Т.Т. Газизов**, А.О. Мелкозеров, Э.В. Семенов, А.В. Семенов // Электронные средства и системы управления : материалы Международной научно-практической конференции. – Томск, 2004. – С. 107–111.

8. Рыбин, А.П. Экспериментальные характеристики комбинированных широкополосных антенн ДКМВ-диапазона / А.П. Рыбин, Н.Д. Малютин, В.В. Бабатьев, **Т.Т. Газизов** // Электронные средства и системы управления : материалы Международной научно-практической конференции. – Томск, 2004. – С. 88–90.

9. **Газизов, Т.Т.** Электродинамическое моделирование произвольных проводных структур / Т.Т. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Томск, 2005. – С. 47–51.

10. **Газизов, Т.Т.** Улучшение КСВ антенны включением полосозапирающих фильтров / Т.Т. Газизов, Т.Р. Газизов // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Томск, 2005. – С. 51–54.

11. **Газизов, Т.Т.** Автоматизированное проектирование оптимальных антенн с сосредоточенными нагрузками / Т.Т. Газизов, А.О. Мелкозеров // Электронные средства и системы управления : материалы Международной научно-практической конференции. – Томск, 2005. – С. 149–152.

12. **Газизов, Т.Р.** Компьютерное моделирование сложных структур проводников при проектировании телевизионно-вычислительных систем / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, № 11. – С. 64–67. **Газизов, Т.Р.** Комплексная оптимизация генетическими алгоритмами для обеспечения ЭМС / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, **Т.Т. Газизов** // Материалы VI Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 160–164.

14. Газизов, Т.Р. Возможности применения новых модальных явлений в целях электромагнитного терроризма и для защиты от него / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, **Т.Т. Газизов**, С.П. Куксенко, Е.П. Горин, И.Г. Бевзенко // Труды VII Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 266–269
 Газизов, Т.Р. Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков TALGAT / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, **Т.Т. Газизов**, С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, И.С. Костарев // Компьютерные учебные программы и инновации. – М: ГОСКООРЦЕНТР, МФЮА, РУИ, 2007. – № 10.– С. 89–90.

16. Урбанович, П.В. Анализ генераторов шума для нейтрализации побочных электромагнитных излучений и наводок / П.В. Урбанович, Т.Т. Газизов, А.А. Шелупанов // Безопасность информационных технологий. – 2007. – №4. – С. 81–82.

17. Газизов, Т.Т. Использование генетических алгоритмов для проектирования антенн // Электронные и электромеханические системы и устройства : материалы научно-технической конференции молодых специалистов. – Томск: ОАО "НПЦ "Полюс", 2008. – С. 174–175.

18. Газизов, Т.Т. Классификация методов глобальной оптимизации в задачах проектирования // Научная сессия ТУСУР – 2008 : материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2008. – Ч. 1. – С. 60–63.

19. Газизов, Т.Т. Сравнение методов глобальной оптимизации // XVI Туполевские чтения : материалы Международной молодежной научной конференции. – Казань, 2008. – С. 219–221.

20. Газизов, Т.Т. Классификация методов глобальной оптимизации для решения задач безопасности // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2008. – №2(18).– Ч. 1. – С. 130–131.

21. **Gazizov, T.T. Broadband antenna SWR improvement using parallel RLC loads / T.R. Gazizov, T.T. Gazizov // Book of abstracts EUROEM 2008. – Switzerland, Lausanne, 21–25 July 2008. – P. 240.**

22. Патент РФ на полезную модель №66613. Малютин Н.Д., Газизов Т.Т., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Р., Лоцилов А.Г., Семенов Э.В., Рыбин А.П. Широкополосная антенная система для работы в декаметровом диапазоне. Заявка №2007114313. Приоритет полезной модели 16 апреля 2007 г.

23. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки N 8376 от 24.05.2007 г. «Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков TALGAT» (Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Костарев И.С.), зарегистрированной в Отраслевом фонде алгоритмов и программ Госкоорцентра Минобрнауки РФ с присвоением номера государственной регистрации - рег. номер ВНТИЦ 50200701103.