

Министерство образования и науки Российской Федерации
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Т.Т. Газизов

Синтез оптимальных проводных антенн

Томск
Издательство ТУСУРа
2013

УДК 621.396.677.4
ББК 32.845
Г137

Рецензент

Бондарчук С.С., доктор физико-математических наук,
профессор Томского государственного
педагогического университета

**Издание осуществлено в рамках реализации
Программы стратегического развития ТУСУРа
на 2012–2016 гг. и постановления Правительства РФ
от 09.04.2010 № 218, договор от 12.02.2013 № 02.G25.31.0042**

Газизов Т.Т.

Г137 Синтез оптимальных проводных антенн : моногр. / Т.Т. Газизов. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 120 с.

ISBN 978-5-86889-637-8

Представлен теоретический и практический материал, посвященный синтезу оптимальных проводных антенн. Подробно рассмотрены методы глобальной оптимизации и обоснован выбор генетических алгоритмов для решения задачи оптимизации параметров сосредоточенных нагрузок и структуры проводных антенн с целью улучшения их характеристик.

Для научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области радиосвязи, проектирования антенн, радиолокации, а также студентов старших курсов радиотехнических факультетов и аспирантов.

УДК 621.396.677.4
ББК 32.845

ISBN 978-5-86889-637-8

© Газизов Т.Т., 2013
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2013

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется решению задач прикладной электродинамики. К ним, например, относится 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 их компьютерное моделирование. При этом весьма актуально исследование методов улучшения характеристик антенн, в частности увеличения рабочего диапазона частот проводных антенн, что подтверждается, например, разработками Омского научно-исследовательского института приборостроения. Часто требуется усовершенствовать характеристики антенны, не изменяя ее 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 характеристики антенн, 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 таких антенн не решен. В данной работе предлагается оптимизировать параметры сосредоточенных нагрузок и структуры проводных антенн для улучшения их характеристик с помощью генетических алгоритмов (ГА).

Основанные на теории Ч. Дарвина, ГА сегодня получили наибольшее распространение из всех эволюционных алгоритмов. На их основе осуществляется оптимизация профилей балок в

строительстве, обработка рентгеновских изображений в медицине, оптимизация работы нефтяных трубопроводов и т.д. Для решения различных задач электродинамики ГА использовали Чермошенцев С.Ф., Бовбель Е.И., Кухарчик П.Д., Тишков Д.В., 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 улучшает характеристики проводных антенн при их моделировании.

Основная цель данной монографии познакомить читателя с основами автоматизированного синтеза проводных антенн. При этом особое внимание уделяется этапу моделирования на примере синтеза оптимальных проводных антенных структур за счет оптимизации генетическими алгоритмами. Материал монографии выстроен следующим образом. В разделе 1 рассмотрены основные положения теории антенн, приведены главные определения, акцентировано внимание на роли оптимизации антенн на этапе проектирования. В разделе 2 подробно описаны глобальные методы оптимизации, проведено их сравнение и обоснован выбор генетических алгоритмов. Раздел 3 посвящен задаче создания алгоритмического и программного обеспечения для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками. В разделе 4 приводится методология оптимизации проводных антенн генетическими алгоритмами и результаты ее апробации в ходе экспериментальных исследований.

Представленные результаты выполнены автором в ходе десятилетней научной работы на кафедре телевидения и управления Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Автор выражает признательность за настойчивость и достойный пример Газизову Т.Р., за помощь в работе Мелкозерову А.О., Замотринскому В.А., за поддержку жене Полине и дочери Алисе. Автор благодарит ректорат ТУСУРа и лично проректора по науке Шелупанова А.А. за помощь в издании этой монографии.

*Т.Т. Газизов
Июль 2013 года*

1. Проектирование проводных антенн с сосредоточенными нагрузками

1.1. Назначение антенн и их классификация

Антенной называется радиотехническое устройство, предназначенное для излучения или приема электромагнитных волн. Антенна является одним из важнейших элементов любой радиотехнической системы, связанной с излучением или приемом радиоволн. К таким системам относят: системы радиосвязи, радиовещания, телевидения, радиоуправления, радиорелейной связи, радиолокации, радиоастрономии, радионавигации и др. Общая схема линии радиосвязи представлена на рис. 1.1 [1].

В конструктивном отношении антенна может представлять собой провода, металлические поверхности, диэлектрики, магнито-диэлектрики. Электромагнитные колебания высокой частоты, модулированные полезным сигналом, преобразуются передающей антенной в электромагнитные волны, которые излучаются в пространство. Обычно электромагнитные колебания подводят от передатчика к антенне не непосредственно, а с помощью фидера.

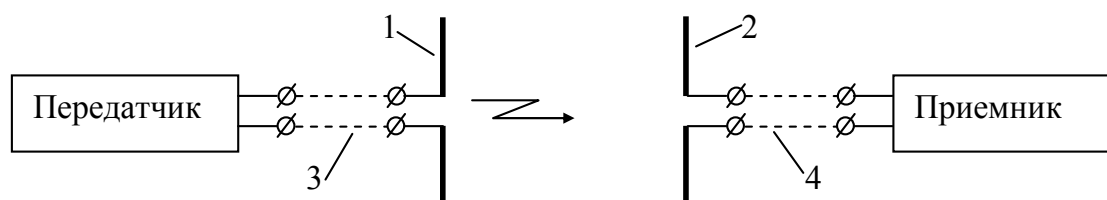


Рис. 1.1. Схема линии радиосвязи: 1 – передающая антенна; 2 – приемная антенна; 3 – передающий фидер; 4 – приемный фидер

Рассмотрим классификацию антенн по способу формирования излучаемого поля. Выделяют четыре класса антенн.

Излучатели небольших размеров ($l \leq \lambda$, где λ — длина волны) для диапазона частот 10 кГц–1 ГГц. К числу антенн этого класса относятся одиночные вибраторные и щелевые излучатели, полосковые и микрополосковые антенны, рамочные антенны, а также частотно-независимые излучатели.

Антенны бегущей волны размерами от λ до 100λ для диапазона частот 3 МГц–10 ГГц. К ним относятся спиральные, диэлектрические и другие антенны.

Антенные решетки размерами от λ до 100λ и более для диапазона частот 3 МГц–30 ГГц. Это антенны, состоящие из большого числа отдельных излучателей. Независимая регулировка фаз (а иногда и амплитуд) возбуждения каждого элемента антенной решетки обеспечивает возможность электрического управления диаграммой направленности. Применяются линейные, плоские, кольцевые, выпуклые и конформные (совпадающие с формой объекта установки) антенные решетки. На основе антенных решеток выполняют антенные системы с обработкой сигнала, в том числе адаптивные к изменяющейся помеховой обстановке [2].

Важной характеристикой любой антенны является рабочий диапазон частот. В зависимости от ширины рабочего диапазона антенны условно разбивают на следующие классы:

- *узкополосные (настроенные)*, относительная рабочая полоса которых менее 10 % номинальной частоты;
- *широкополосные* с рабочей полосой частот 10–50 %;
- *диапазонные*, коэффициент перекрытия частот которых (f_{\max}/f_{\min}) составляет примерно 2–5;
- *частотно-независимые* (сверхширокополосные) с коэффициентом перекрытия, теоретически не зависящим от частоты (практически у таких антенн $f_{\max}/f_{\min} > 5$).

1.2. Основные задачи проектирования антенн

Основными задачами теории антенн являются анализ и синтез [3]. Задача анализа состоит в определении электромагнитного поля в любой точке окружающего антенну пространства (в том числе и на самой антенне). Источниками поля являются токи и заряды, распределенные по антенне. Закон этого распределения (зависи-

мость амплитуды и фазы тока от координаты точки на поверхности антенны) обычно неизвестен. Задача анализа при заданной приложенной к антенне электродвижущей силе (ЭДС), или сторонней ЭДС, может быть решена строго, исходя из следующих условий: искомое поле должно удовлетворять уравнениям Максвелла, граничным условиям на поверхности раздела при переходе из одной среды в другую (воздух–металл, воздух–диэлектрик и т.д.); должно выполняться условие излучения. Последнее означает, что на большом расстоянии от антенны поле должно представлять бегущую волну, амплитуда которой с увеличением расстояния r убывает как $1/r$. Строгое решение данной задачи встречается обычно большие математические трудности: антенны в основном имеют сложные конфигурации; поверхности, на которых заданы граничные условия, как правило, не совпадают с координатными поверхностями ортогональных систем координат [4]. В связи с этим строгое решение задачи анализа получено только для некоторых частных случаев.

Задача анализа состоит из двух частей: внутренней и внешней. Внутренняя задача заключается в определении распределения возбуждающего тока по самой антенне или распределения поля на произвольно выбранной замкнутой поверхности S , ограничивающей объем V , в котором находятся источники поля. Эта задача решается приближенными методами, выбираемыми в зависимости от конкретных данных антенны. Например, часто задаются синусоидальным распределением тока вдоль линейных вибраторов, исходя из некоторой аналогии между вибратором и разомкнутой на конце длинной двухпроводной линией. Примером антенны с синусоидальным распределением тока является симметричный вибратор, используемый в диапазонах дециметровых, метровых и дециметровых волн. Эта антенна представляет собой цилиндрический провод, длина которого соизмерима с длиной волны (часто длина провода составляет половину длины волны). Между двумя половинами этого провода («плечами») включается источник ЭДС. Для проводочных антенн, например вибраторного типа, поле рассчитывается путем мысленного разбиения антенны на ряд элементарных электрических вибраторов.

В тех случаях, когда распределение тока по антенне либо неизвестно, либо является слишком сложным, внешнее поле целесообразно находить заданием векторов напряженности электрического

и магнитного поля на замкнутой поверхности S , охватывающей источники (при этом часто используют методы геометрической оптики). Этот способ широко применяется при анализе апертурных антенн (рупорных, линзовых, параболических и др.) [5]. Если известны тангенциальные составляющие векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} на поверхности S , то эти составляющие на основании известного из электродинамики принципа эквивалентности могут быть заменены фиктивными эквивалентными поверхностными электрическими и магнитными токами. Разбивая поверхность S на элементарные площадки dS и рассматривая каждую площадку как элемент Гюйгенса, находят полное поле во внешней области V_s , суммируя поля, созданные отдельными элементами. Такой метод решения внешней задачи называется приближением Гюйгенса – Кирхгофа [6–8]. Таким образом, излучающая система (пространство, заполненное токами, возбуждающими электромагнитные волны) представляет собой не только реальные электрические токи, текущие по металлическим поверхностям, но и эквивалентные электрические и магнитные токи, распределенные на замкнутых поверхностях, окружающих антенну, а также поляризационные электрические и магнитные токи в объемах, занимаемых диэлектриками и магнито-диэлектриками.

Задача синтеза антенн состоит в определении размеров и формы антенны и нахождении распределения источников поля на ней по заданным требованиям к электрическим характеристикам антенны (в основном по диаграмме направленности) [9]. Эта задача возникает в связи с тем, что в ряде случаев характеристики антенны, получающиеся при известном распределении тока на ней, не отвечают предъявляемым требованиям и необходим поиск оптимальных параметров. Определение оптимальных значений параметров элементов технической системы известной структуры является задачей параметрического синтеза или параметрической оптимизации. Именно с такой задачей чаще всего приходится сталкиваться разработчикам проводных антенных структур, особенно когда необходимо улучшить ту или иную характеристику антенны.

1.3. Использование сосредоточенных нагрузок в проводных антеннах

На основе проводных антенн разработано много антенных структур, таких как диполь, симметричный вибратор, Яги-антенна, логопериодическая, спиральная и другие [10, 11]. Конструкторский подход к проектированию антенн, используемый инженерами, в основном приводил к относительно простым структурам. Как правило, инженер находил уже существующую структуру с желаемыми электромагнитными характеристиками. Если для такой структуры имелось аналитическое выражение, которое отражало ее характеристики, инженер использовал его, чтобы определить оптимальные параметры. Когда аналитическое выражение отсутствовало, работали с соответствующими уравнениями, чтобы определить начальные гипотезы о нужных направлениях и параметрах и, используя электромагнитное моделирование, определить характеристики. Если результат был неудовлетворителен, приходилось заново конструировать антенну, ориентируясь на интуицию, опыт, подходящие уравнения либо эмпирическое исследование, чтобы определить, какие параметры необходимо изменить для улучшения характеристик антенны. Такой метод проектирования привел к созданию множества различных видов антенн, но он является затратным, а если существует множество неизвестных, предсказать получение наилучших результатов весьма сложно. Кроме того, такой метод проектирования зависит от интуиции конкретного разработчика. Часто для моделей антенн, полученных данным способом, характерна симметрия и весьма простая для понимания и анализа структура. Однако конфигурации, созданные не интуитивным путем, часто работают не хуже, а иногда и лучше, чем структуры, полученные за счет интуиции разработчика [12].

Проводные антенны с возможностью увеличения широкополосности широко применяются в телекоммуникациях. Особо интересны проводные антенны, нагруженные резонансными колебательными контурами, которые позволяют расширить полосу рабочих частот [13, 14]. Главной функцией таких нагрузок является изменение распределения тока в проводах так, чтобы характеристики антенны изменялись в ходе работы. Обычно пытаются задать такое количество нагрузок, которое улучшит КСВ и характеристику усиления за счет уменьшения рассогласования входного импеданса

при изменении частоты и заставит антенну излучать в нужном направлении, например в горизонтальной плоскости. Хотя включение нагрузок в структуру антенны позволяет улучшить ее широкополосность, это улучшение ограничено производительностью ненагруженной антенны. Сложно настроить антенну на частоты, для которых ее электрическая длина гораздо меньше, чем $\lambda/4$, а входной импеданс является в основном мнимым числом с малой действительной частью. На таких частотах производительность антенны не может быть улучшена за счет нагрузок и снижение КСВ достигается за счет соответствующей настройки согласующей цепи.

Нагрузка, включенная в структуру антенны, представляет собой колебательный контур, который настроен 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. На рис. 1.2 [15] показана основная идея использования нагруженных антенн. Входное сопротивление ненагруженного четвертьволнового вибратора с резонансной частотой f_0 длиной l гораздо выше на второй резонансной частоте $2f_0$. Если LC -нагрузку (настроенную на частоту $2f_0$) разместить в середине вибратора, распределение тока на частоте f_0 будет нарушено из-за низкого сопротивления нагрузки. Однако на частоте $2f_0$ токи в верхней части антенны будут нулевыми, и она станет излучать как четвертьволновой вибратор длиной $l/2$ даже на этой частоте. В этом случае использование одной нагрузки позволяет создать двухдиапазонную антенну, которую можно рассматривать как комбинацию двух четвертьволновых вибраторов разной длины.

Для ненагруженного случая показано распределение тока (серая область) и диаграмма направленности обычного вибратора. Для нагруженного случая показан вибратор с нагрузкой, который имеет одинаковые значения входного сопротивления R_n 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.

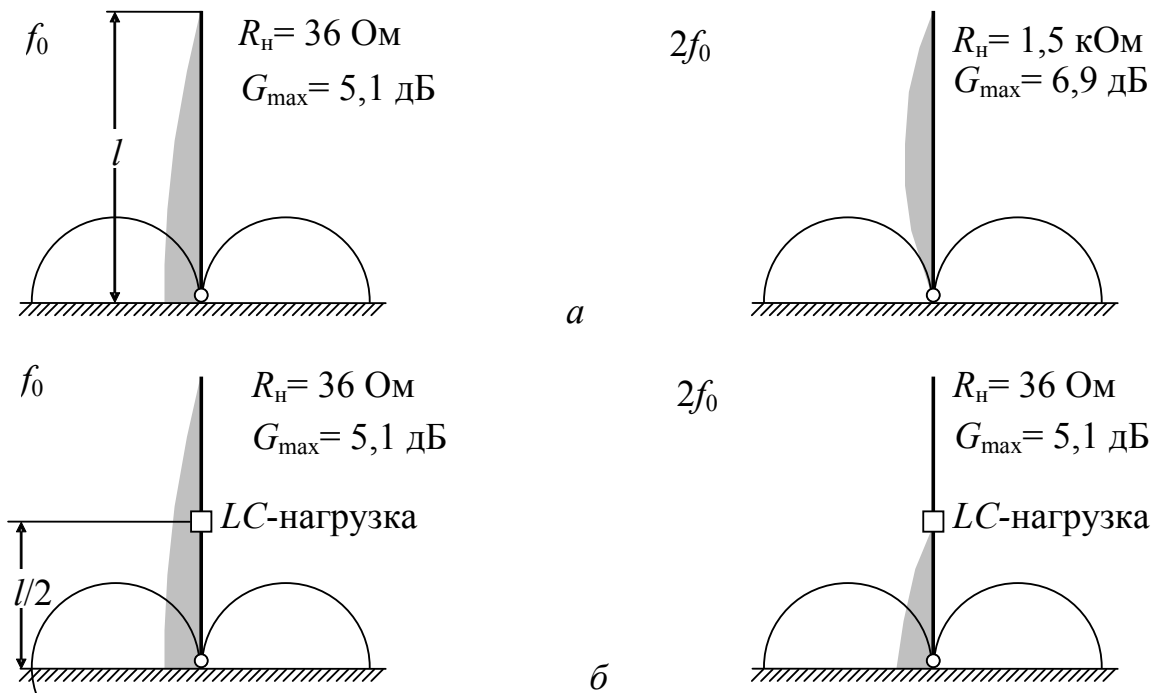


Рис. 1.2. Особенности нагруженных антенн на примере четвертьволнового вибратора длиной l при резонансных частотах f_0 и $2f_0$: а – без нагрузки; б – с нагрузкой ($l/2$ – место включения нагрузки)

При этом 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.

1.4. Анализ теоретических основ учета нагрузок

Модель Харрингтона

Задачи тонкопроводных антенн обычно анализируют, используя метод моментов. Проводная структура сначала делится на сегменты, а сосредоточенные нагрузки полагаются расположенными

в этих сегментах. В тонкопроводной аппроксимации ток принимается текущим вдоль оси провода.

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 с N неизвестными, которые обычно представляют собой коэффициенты некоторого разложения тока. Представим основные этапы анализа проводных антенн методом моментов.

1. Получение из уравнений Максвелла интегральных уравнений структуры для электрического поля

$$\mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A} - \nabla\varphi,$$

где ω — частота; $\mathbf{A} = \mu \iint_S \mathbf{J}_s \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS$; $\varphi = \frac{1}{\varepsilon} \iint_S \sigma_s \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS$; μ —

магнитная проницаемость; \mathbf{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;

$\sigma_s = \frac{-1}{j\omega} \nabla_s \cdot \mathbf{J}_s$ — 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 системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) $\mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{V}$.

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

5. Формирование вектора воздействий \mathbf{V} размером N .

6. Решение СЛАУ (определение вектора токов).

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

Рассмотрим линейную антенну, возбужденную источником напряжения в одной точке и нагруженную сосредоточенным адмиттансом в другой точке [16]. Отметим, что возможно распространение этой методики на случай многочисленных источников и/или многочисленных нагрузок, а непрерывно нагруженная антенна может аппроксимироваться проводом, нагруженным на каждом интервале своей длины.

Возьмем прямой провод, запитанный на i -м интервале источником напряжения и нагруженный на j -м интервале сосредоточенным адмиттансом Y_L . В данном случае i и j являются константами и не изменяются, а указывают на порядковый номер соответствующего сегмента и позволяют выбрать элементы матрицы адмиттанса Y_{ii} , Y_{ij} , Y_{ji} , Y_{jj} ; Y_L указывает на значение адмиттанса нагрузки (индекс L — сокращение от load — нагрузка). Структура — это два двухполюсника с токами и напряжениями портов, связанных посредством уравнения

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix}. \quad (1.1)$$

Здесь Y_{mn} являются элементами исходной матрицы $[\mathbf{Y}] = [\mathbf{Z}]^{-1}$ из выражения $[\mathbf{Z}][\mathbf{I}] = [\mathbf{V}]$, а также элементами двухполюсника при использовании метода решения посредством деления провода на сегменты. Параметр Y_L налагает на порт j ограничение

$$I_j = -Y_L V_j, \quad (1.2)$$

где знак минус — следствие исходных условий (напряжение на нагрузках имеет знак, противоположный напряжению источника).

Прямое решение уравнений (1.1) и (1.2) для входного адмиттанса $Y_{in} = I_i/V_i$ дает

$$\begin{cases} I_i = V_i Y_{ii} + V_j Y_{ij} \\ I_i = V_i Y_{ji} + V_j Y_{jj} \end{cases}, \quad \begin{cases} I_i = V_i Y_{ii} + V_j Y_{ij} \\ -Y_L V_j = V_i Y_{ji} + V_j Y_{jj} \end{cases},$$

$$\begin{cases} I_i = V_i Y_{ii} + V_j Y_{ij} \\ V_j (Y_{jj} + Y_L) = -V_i Y_{ji} \end{cases}, \quad \begin{cases} I_i = V_i Y_{ii} - \frac{V_i Y_{ji}}{(Y_{jj} + Y_L)} Y_{ij} \\ V_j = \frac{-V_i Y_{ji}}{(Y_{jj} + Y_L)} \end{cases}, \quad \begin{cases} \frac{I_i}{V_i} = Y_{ii} - \frac{Y_{ji} Y_{ij}}{Y_{jj} + Y_L} \\ V_j = \frac{-V_i Y_{ji}}{Y_{jj} + Y_L} \end{cases},$$

отсюда

$$Y_{in} = Y_{ii} - \frac{Y_{ij} Y_{ji}}{Y_{jj} + Y_L} \quad (1.3)$$

из-за взаимности $Y_{ij} = Y_{ji}$ (при методе Галеркина).

Самая простая процедура для определения распределения тока заключается в решении уравнений (1.1) и (1.2) относительно V_i и в суперпозиции токов, обусловленных напряжениями V_i и V_j . Для V_j имеет место

$$V_j = \frac{-Y_{ji}}{Y_{jj} + Y_L} V_i. \quad (1.4)$$

Суперпозиция двух источников дает

$$[\mathbf{V}] = [\mathbf{V}^i + \mathbf{V}^j], \quad (1.5)$$

где

$$[\mathbf{V}^i] = \begin{bmatrix} \cdot \\ 0 \\ V_i \\ 0 \\ \cdot \end{bmatrix} \quad [\mathbf{V}^j] = \begin{bmatrix} \cdot \\ 0 \\ V_j \\ 0 \\ \cdot \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

Ток, например при треугольных базисных функциях, задается выражением

$$I(z) \approx \sum_{n=1}^{N-1} I_n T(z-n), \quad T = \begin{cases} 1-|z|, & |z| < 1 \\ 0, & |z| > 1 \end{cases}, \quad (1.7)$$

где I_n — элементы $[\mathbf{I}]$, вычисленные по формуле

$$[\mathbf{I}] = [\mathbf{Y}][\mathbf{V}] \quad (1.8)$$

с учетом (1.5).

Поле излучения нагруженной антенны получается с помощью суперпозиции.

Для иллюстрации поведения нагруженной антенны рассмотрим антенну длиной L , запитанную на $L/4$ от одного конца источником напряжения и нагруженную адмиттансом

$$Y_L = \frac{\text{ctg}(kL/4)}{j \cdot 100} \quad (1.9)$$

на расстоянии $L/2$ от другого конца. Эта нагрузка соответствует короткозамкнутой линии передачи длиной $L/4$ с характеристическим импедансом 100 Ом. На рис. 1.3 представлен входной адмиттанс для случая $L/2a = 74,2$ (a — радиус антенны), а врезка показывает геометрию антенны.

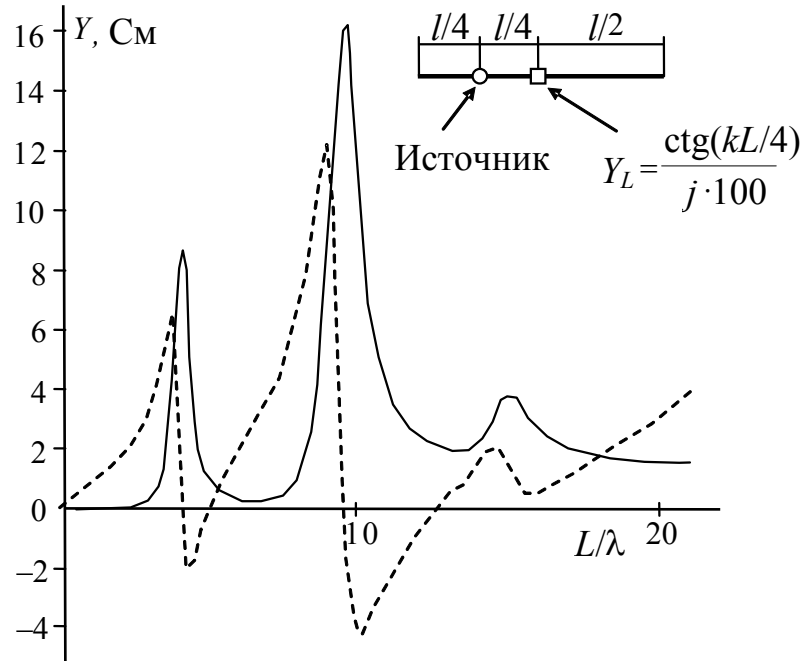


Рис. 1.3. Действительная (—) и мнимая (---) составляющие входного адмиттанса для линейной антенны ($L/2a=74,2$), запитанной на расстоянии $L/4$ от одного конца и нагруженной в центре

Распределение тока в нагруженной антенне для случаев $L = \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2, 2\lambda$ показано на рис. 1.4. Коэффициент направленного действия (КНД) антенны для тех же случаев, нормированных к изотропному источнику, представлен на рис. 1.5. Из него видно, что сосредоточенные нагрузки, включенные последовательно с проводом, позволяют управлять диаграммой направленности антенны.

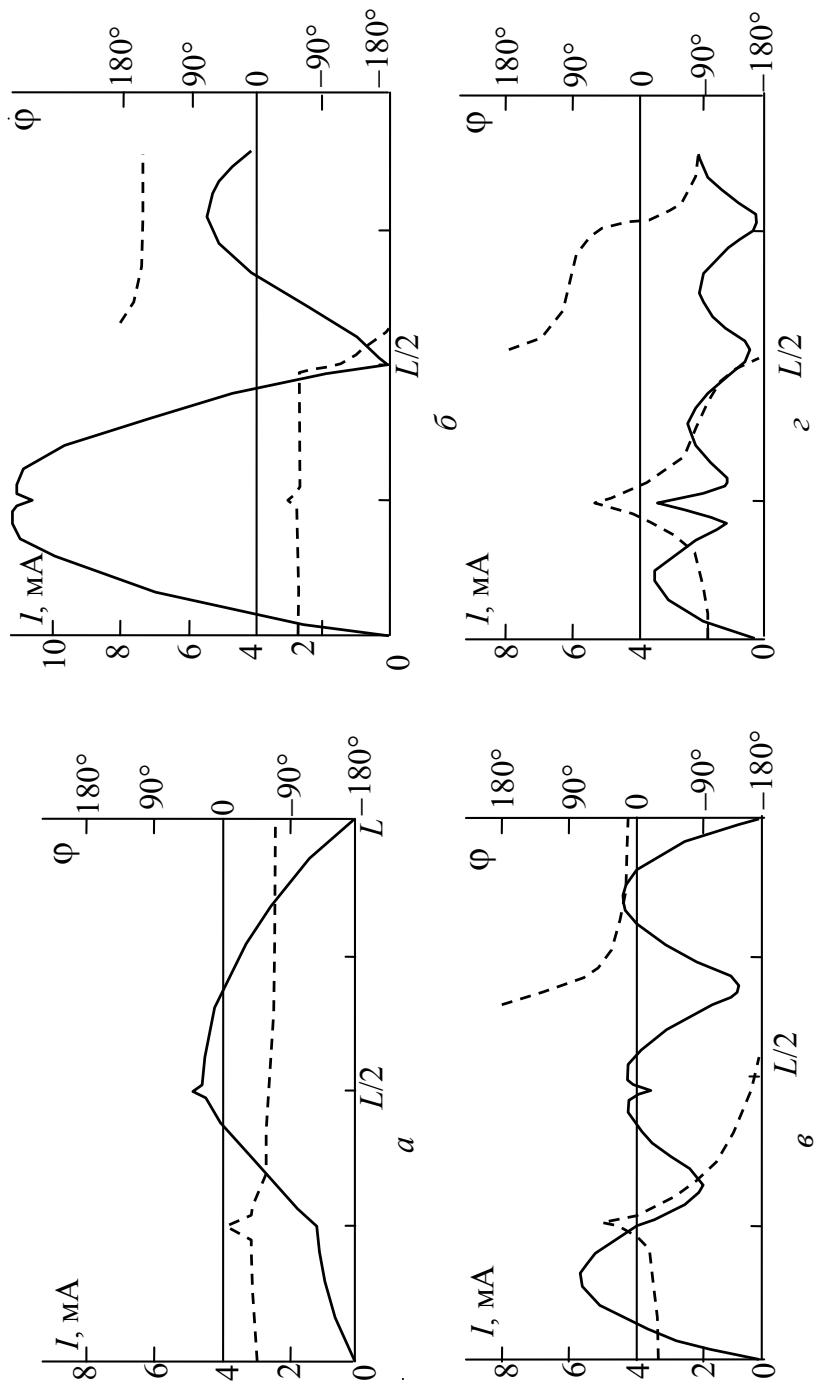


Рис. 1.4. Модуль (—) и фаза (---) тока в нагруженной антенне
(см. рис. 1.3): а — $L=1,5\lambda$; б — $L=1,5\lambda$; в — $L=2\lambda$; г — $L=2\lambda$

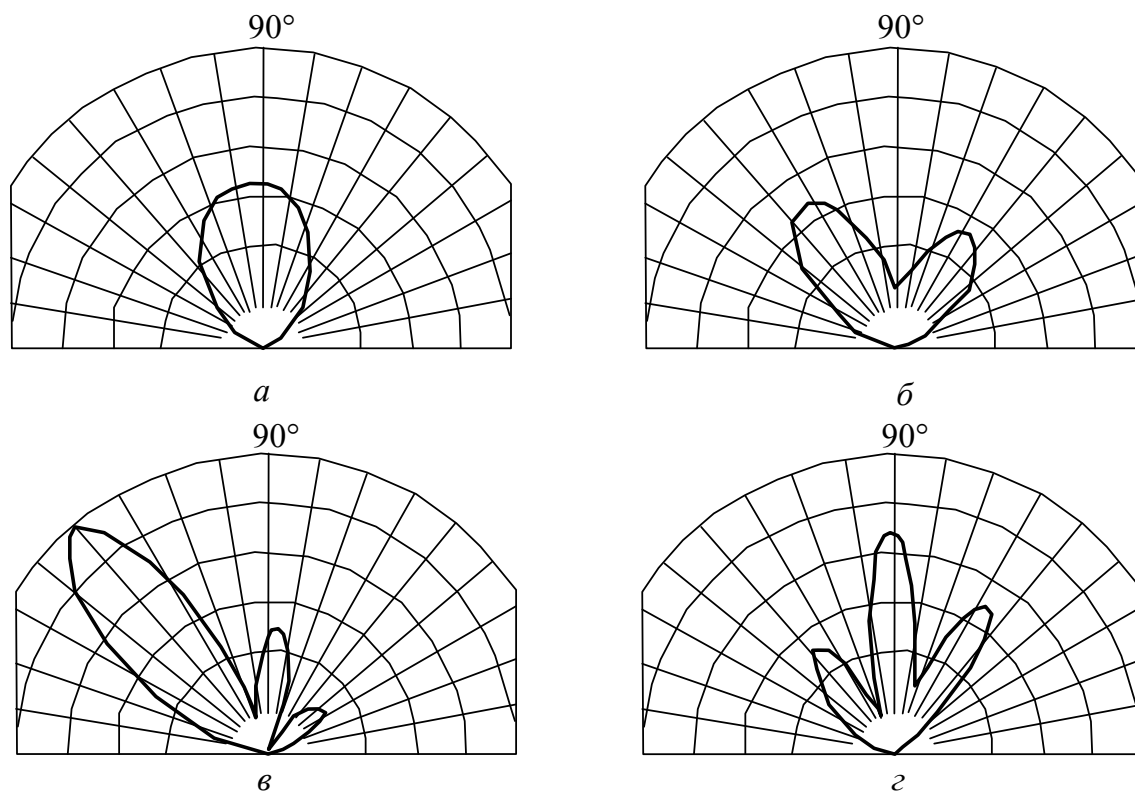


Рис. 1.5. КНД нагруженной антенны:
a – $L=\lambda/2$; *б* – $L=\lambda$; *в* – $L=1,5\lambda$; *г* – $L=2\lambda$

Модель Боаг

Рассмотрим алгоритм, который требует, чтобы матрица метода моментов вычислялась и инвертировалась один раз для ненагруженной антенны [17]. Алгоритм дает возможность вычислить характеристики произвольно нагруженных антенн по результатам, которые были получены для ненагруженной антенны, с малыми вычислительными затратами. Пример нагруженной антенны изображен на рис. 1.6.

После построения интегрального уравнения электрического поля для тока провода, разложения тока, например с помощью треугольных базисных функций, и применения метода тестирования Галеркина получаем систему линейных уравнений

$$[\mathbf{Z}][\mathbf{I}] = \left([\mathbf{Z}^0] + [\mathbf{Z}^L] \right) [\mathbf{I}] = [\mathbf{V}], \quad (1.10)$$

где $[\mathbf{Z}]$ — обобщенная матрица размером $N \times N$ импедансов нагруженной антенны; N — число неизвестных; $[\mathbf{I}]$ — вектор размером N , представляющий неизвестные коэффициенты разложения тока; $[\mathbf{V}]$ — вектор воздействий размером N ; $[\mathbf{Z}^0]$ — матрица импедансов

ненагруженной антенны; $[\mathbf{Z}^L]$ — диагональная матрица, элементы которой имеют вид

$$z_{mn}^L = \sum_{i=1}^M Z_i^L \delta_{m,n_i^L} \delta_{n,n_i^L}, \quad (1.11)$$

где $\delta_{m,n}$ — символ Кронекера:

$$\delta_{m,n} = \begin{cases} 0, & \text{если } m \neq n \\ 1, & \text{если } m = n \end{cases}, \quad [\delta_{m,n}] \equiv [\mathbf{I}],$$

$$[\mathbf{I}][\mathbf{B}] = [\mathbf{B}], \quad [\mathbf{C}][\mathbf{I}] = [\mathbf{C}],$$

$$[\mathbf{I}][\mathbf{A}] = [\mathbf{A}][\mathbf{I}] = [\mathbf{A}], \quad (1.12)$$

$[\mathbf{B}]$ — произвольная матрица, имеющая n строк; $[\mathbf{C}]$ — произвольная матрица, имеющая n столбцов; $[\mathbf{A}]$ — произвольная квадратная матрица размером n ; Z_i^L обозначает импеданс нагрузки в узле n_i^L , $i = 1, \dots, M$; M — число нагрузок.

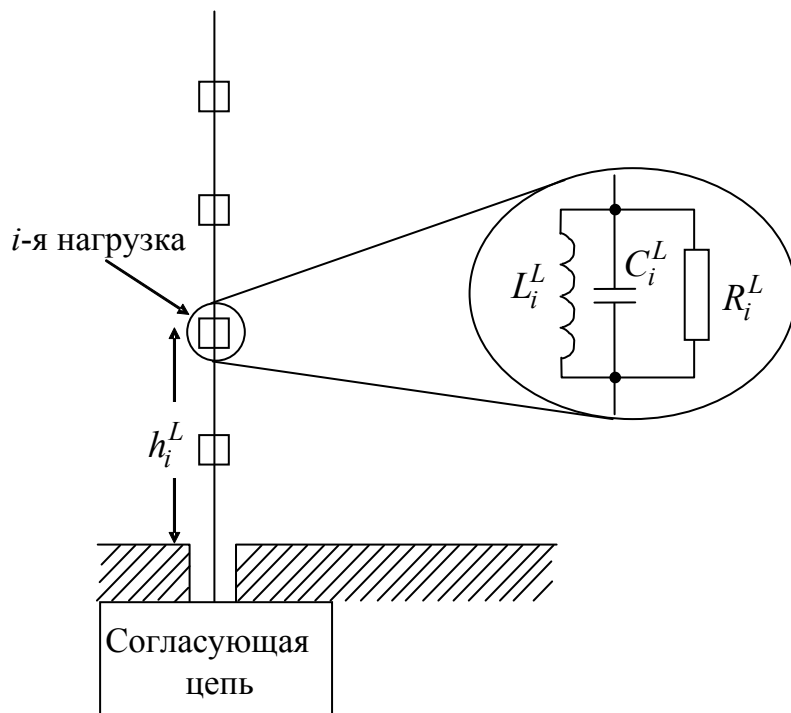


Рис. 1.6. Нагруженная проводная антенна (монополюсь)

Матрица $[\mathbf{Z}^L]$ может быть разложена на составные части

$$[\mathbf{Z}^L] = [\mathbf{U}][\mathbf{W}]^T, \quad (1.13)$$

где $[\mathbf{U}]$ и $[\mathbf{W}]$ — матрицы размером $N \times N$, определенные как

$$U_{mi} = Z_i^L \delta_{m,n_i^L}, \quad (1.14)$$

$$W_{ni} = \delta_{n,n_i^L}, \quad (1.15)$$

откуда

$$[\mathbf{U}] = \begin{bmatrix} Z_i^L & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_i^L & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Z_i^L \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{W}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}.$$

С разложением (1.13) решение системы (1.10) может быть получено по формуле Шермана – Моррисона – Вудбарри [18]

$$[\mathbf{I}] = \left([\mathbf{Z}^0] + [\mathbf{Z}^L] \right)^{-1} [\mathbf{V}] = [\mathbf{Z}^0]^{-1} [\mathbf{V}] - [\mathbf{Z}^0]^{-1} [\mathbf{U}] \times \\ \times \left([\hat{\mathbf{I}}] + [\mathbf{W}]^T [\mathbf{Z}^0]^{-1} [\mathbf{U}] \right)^{-1} [\mathbf{W}]^T [\mathbf{Z}^0]^{-1} [\mathbf{V}], \quad (1.16)$$

где $[\hat{\mathbf{I}}]$ — единичная матрица размером $M \times M$.

Если инверсия невозмущенной матрицы $[\mathbf{Z}^0]^{-1}$ может быть вычислена для всех частот, представляющих интерес, то вычисление правой части уравнения (1.16) не требует инверсии матрицы большей, чем размером $M \times M$. На практике число нагрузок M является очень малым в сравнении с общим числом неизвестных N , следовательно, $[\mathbf{Z}^L]$ — низкоранговое возмущение $[\mathbf{Z}^0]$. Принимая во внимание значительные временные затраты на инверсию матриц (в прямых методах они пропорциональны N^3) при решении уравнения (1.10), использование уравнения (1.16) значительно сокращает процесс вычисления системы (1.10) для различных конфигураций нагрузок.

Если ток в антенне найден, то можно вычислить коэффициент усиления и другие характеристики антенны.

Модель Альтмана

Существует более простой метод, который делает описанную выше процедуру еще более эффективной [19].

Матричное уравнение метода моментов для ненагруженной антенны

$$[\mathbf{Z}][\mathbf{I}] = [\mathbf{V}], \quad (1.17)$$

где $[\mathbf{Z}]$ — матрица импедансов размером $N \times N$, N — число базисных функций; $[\mathbf{I}]$ и $[\mathbf{V}]$ — векторы тока и напряжения длиной N .

Обозначим I_i вектор тока, наведенный из-за возбуждения напряжением $v_i = 1$ В в сегменте i . Матрица адмиттансов $[\mathbf{Y}]$ ($[\mathbf{Y}] = [\mathbf{Z}]^{-1}$) может быть записана как

$$[\mathbf{Y}] = [\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_N]. \quad (1.18)$$

Допустим, что антенна имеет N_L нагрузок, расположенных в узлах $n(i)$, $i = 1, \dots, N_L$, где $n(i)$ может принимать значение любой величины в пределах от 2 до N . Пусть антенна возбуждается источником напряжения $v_s = 1$ В в основании, т.е. в узле $s = 1$, и пусть это напряжение наводит вектор тока I_s в ненагруженной антенне. Когда антенна нагружена, распределение полного тока как функцию напряжений нагрузки $v_{n(i)}$ можно записать в виде

$$I = I_s + \sum_{i=1}^{N_L} v_{n(i)} I_{n(i)}. \quad (1.19)$$

Обозначим верхним индексом r сокращенные векторы длиной N_L , а также матрицы размером $N_L \times N_L$, полученные из несокращенных с помощью выборок в местах нагрузок (исключая источник), а Y_{Li} обозначим адмиттанс нагрузки i . Тогда $[\mathbf{I}^r]$ и $[\mathbf{V}^r]$ будут связаны матричным уравнением

$$[\mathbf{I}^r] = -[\mathbf{Y}_L^r][\mathbf{V}^r], \quad (1.20)$$

где $[\mathbf{Y}_L^r]$ — диагональная матрица, элементы которой являются адмиттансами Y_{Li} . Знак минус указывает, что напряжение в нагрузке

ках имеет знак, противоположный напряжению источника. Вектор \mathbf{V}^r получается посредством приравнивания (1.20) к (1.19) в местах нагрузок:

$$I_s^r + \sum_{i=1}^{N_L} v_{n(i)} I_{n(i)}^r = -[\mathbf{Y}_L^r][\mathbf{V}^r]. \quad (1.21)$$

Преобразуя равенство (1.21) и используя

$$[\mathbf{Y}^r] = [\mathbf{I}_{n(1)}^r, \mathbf{I}_{n(2)}^r, \dots, \mathbf{I}_{n(N_L)}^r]$$

(см. уравнение (1.17)), получаем желаемое уравнение напряжения на нагрузках.

Из $[\mathbf{V}^r]$ найдем вектор тока, используя формулу (1.19).

1.5. Подходы к решению задачи синтеза проводных антенн

Задача анализа проводных антенн может быть решена численными методами электродинамики, например методом моментов либо методом конечных разностей во временной области. Однако для синтеза антенн с желаемыми характеристиками необходимо обращение к алгоритму оптимизации [20]. Исторически большинство антенных структур получено за счет традиционных методов поиска. Известен ряд работ, где используются численные методы оптимизации, но основную часть в проектировании антенн занимают детерминированные (градиентные) методы [21].

Методы оптимизации могут быть детерминированными и стохастическими. Детерминированные методы оптимизации различаются способом, который используется в том или ином методе для поиска направления векторов. Обычно итеративное улучшение начального вектора решений в детерминированных методах оптимизации требует помимо значений целевой функции также значений первой и второй производных (градиентный метод и метод Ньютона). Эти методы показывают хорошую производительность для задач оптимизации простых функций, так как они позволяют найти ближайший экстремум целевой функции. Однако данные методы не справляются с плохо обусловленными задачами оптимизации из-за неточностей, которые встречаются при вычислении направлений

векторов. Это становится очевидным, когда лежащая в основе анализа задача является задачей дискретизации, как это бывает в электродинамике. При таких условиях методами детерминированной оптимизации часто невозможно решить поставленную задачу. Как известно, простейшая задача оптимизации в магнитостатике приводит к многоэкстремальной недифференцируемой целевой функции [22], то же самое имеет место для большинства задач оптимизации, связанных с распространением электромагнитных волн [17, 23].

Стохастические алгоритмы, напротив, успешно применяются для решения задач оптимизации, включающих сильно нелинейные и недифференцируемые целевые функции [24–27]. Сравнивая стохастические и детерминированные методы, можно сделать следующие выводы:

- стохастические методы являются менее чувствительными к локальным минимумам с точки зрения сходимости;
- стохастические методы не являются математически строгими;
- стохастические методы требуют больших вычислительно-временных затрат;
- детерминированные методы слабо применимы к сложным многоэкстремальным недифференцируемым задачам оптимизации.

Поэтому необходимо более подробно рассмотреть стохастические методы глобальной оптимизации, произвести их сравнение, проанализировать возможность их использования для решения задач электродинамики и выбрать из них метод, наиболее пригодный для задачи улучшения характеристик проводных антенн.

1.6. Обзор методов глобальной оптимизации

Проблема оптимизации сложных систем, к которой сводятся многие социально-экономические, технические, организационно-управленческие, комбинаторные задачи и задачи теории игр, становится одной из ведущих в мире искусственного интеллекта [28]. Она часто представима в виде функции цели, которую необходимо оптимизировать (причем функция цели может быть задана как аналитически, так и в виде «черного ящика»), и некоторого набора начальных данных и ограничений на решение. Этому представлению соответствует и задача о путешествующем коммивояжере, и задача об оптимальном размещении, и задача нахождения динамического

баланса, и многие другие задачи из соответствующих областей. Для большинства таких задач детерминированные методы решения неприемлемы или не обеспечивают необходимой степени точности [29]. Поэтому необходим альтернативный подход — использование эволюционных методов глобальной оптимизации [30] и намеренное введение элемента случайности в алгоритм поиска. При этом случайность будет служить целям сбора информации о поведении объекта исследования и целям управления. Основными достоинствами таких методов являются [31, 32]:

- повышенное быстродействие;
- высокая надежность и помехоустойчивость;
- высокая робастность, т.е. малочувствительность к нерегулярностям поведения целевой функции, наличию случайных ошибок при вычислении функции;
- сравнительно простая внутренняя реализация;
- малая чувствительность к росту размерности множества оптимизации;
- возможность естественного ввода в процесс поиска операции обучения и самообучения.

Кроме того, в рамках известных схем случайного поиска легко строятся новые алгоритмы, реализующие различные эвристические процедуры адаптации.

Рассмотрим некоторые наиболее популярные методы глобальной оптимизации.

Стохастические и термодинамические подходы

Грубый случайный поиск (метод Монте-Карло). Это самый простой и в то же время самый известный алгоритм случайного поиска, состоящий из равномерного случайного «бросания» точек в пространство поиска. Основное его достоинство — простота, и в теории глобальной оптимизации этот алгоритм применяется, как правило, в качестве эталона при теоретическом или численном сравнении алгоритмов и в качестве составной части некоторых алгоритмов глобального случайного поиска.

Алгоритм имитации отжига. Этот алгоритм был разработан Киркпатриком в 1982 г. [33] и хорошо описан в [34]. В основе имитации отжига лежит теория термодинамического процесса нагревания и медленного охлаждения субстанции для получения

кристаллической структуры. Начиная со случайно выбранной точки в пространстве поиска, делается шаг в случайном направлении. Если этот шаг приводит в точку с более низким уровнем значения функции оптимизации, то он принимается. Если же шаг приводит в точку с большим значением функции оптимизации, то он принимается с вероятностью $P(I)$, где I — время. Функция $P(I)$ сначала близка к единице, но затем постепенно уменьшается до нуля — по аналогии с охлаждением твердого тела. Таким образом, в начале процесса моделирования принимаются любые ходы, но, когда «температура» падает, вероятность совершения негативных шагов уменьшается. Негативные шаги иногда необходимы в том случае, когда нужно избежать локального оптимума, но принятие слишком многих негативных шагов может увести в сторону от глобального оптимума.

В настоящее время этот метод активно исследуется (быстрый переотжиг, параллельный отжиг) и успешно применяется во множестве областей [34–37].

Детерминированный подход

Метод ветвей и границ. В методах ветвей и границ множество решений \mathbf{M} разбивается на ряд подмножеств \mathbf{M}_k (ветвление), и вместо перебора всех элементов этих подмножеств рассчитываются нижние границы $L(\mathbf{M}_k)$ минимизируемой целевой функции $F(\mathbf{X})$ в подмножествах \mathbf{M}_k . Сокращение перебора возможно в связи с тем, что далее ветвлению подвергается только то подмножество \mathbf{M}_k , у которого нижняя граница оказалась наименьшей. Однако если у новых появившихся подмножеств нижние границы окажутся хуже, чем у какого-либо из ранее образованных подмножеств, то придется вернуться к шагу ветвления, на котором было образовано это более перспективное подмножество. При этом метод обеспечивает точное решение задачи, но в худшем случае из-за таких возвратов имеет место полный перебор. Для применения метода необходимо иметь алгоритм вычисления нижних границ. Если использовать какое-либо упрощение задачи (приближенное вычисление нижних границ, ограничение возвратов и т.п.), то метод становится приближенным и за счет потери точности гарантирует приемлемые затраты времени решения.

Метод поиска с запретами. Поиск с запретами является еще одним стохастическим методом глобального поиска [38]. Он основан на аналогии с человеческим поведением, т.е. на присутствии в поведенческой схеме человека случайных элементов, которые означают, что в одной и той же ситуации человек может повести себя разным образом. Сохранение листа запретов, в котором, например, может содержаться набор уже рассмотренных точек пространства поиска, является одной из основных характеристик данного подхода. Алгоритм заключается в выборе случайной точки в пространстве поиска, рассмотрении точек из окрестностей данной точки и при достижении определенного критерия выборе новой точки в другом регионе поиска, который еще не рассматривался.

Эвристические и метаэвристические подходы

Эволюционное программирование. Подход основан на тех же принципах, что и ГА, но содержит больше эвристических зависимостей и базируется на ранжированных мутациях. Он применяется в ряде комбинаторных и оптимизационных задач, в задачах машинного обучения [39].

Эволюционные стратегии. В этом подходе при конструировании структуры индивида используется адаптивный уровень мутации, что позволяет приспособиться к любой изменяющейся модели. Он применяется в комбинаторике, экспертных системах и при машинном обучении [40].

Генетические алгоритмы. ГА относятся к группе эвристических методов, которые используются для решения проблем поиска и оптимизации. Они сочетают в себе элементы детерминированного и стохастического подходов. В силу этого ГА относятся не только исключительно к методам случайного поиска. Более того, они успешно применяются в комбинациях с аналитическими методами или другими алгоритмами поиска и оптимизации [41–43]. В основе ГА лежит принцип естественного отбора (выживания сильнейшего или наиболее приспособленного). В процессе поиска анализируется сразу несколько ветвей эволюции. Применяя так называемую функцию приспособленности, определяющую, насколько хорошо найденное решение проблемы, и выполняющую роль окружающей среды при моделировании эволюционного процесса, ГА

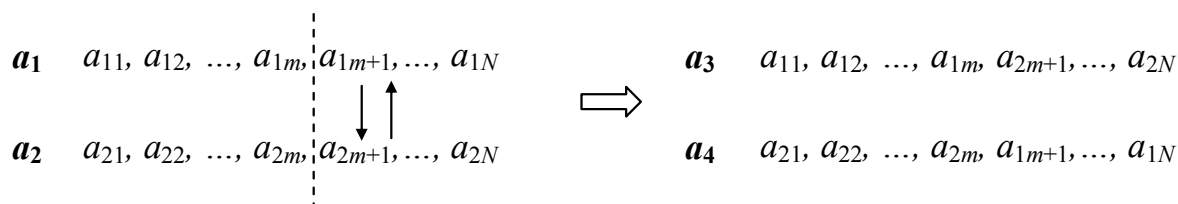
«выращивают» новые популяции объектов, генная структура которых более приспособлена к текущей ситуации. Таким образом, генетическая модель имитирует эволюцию приспособления через механизмы изменчивости объектов [32].

В ГА используется следующая терминология:

- генетический алгоритм — метод или путь решения поставленной задачи;
- геном — класс возможных решений, дает представление о том, каким решение может быть вообще;
- целевая функция — взаимно однозначное отображение, переводящее пространство переменных в пространство решений и возвращающее значение пригодности переменной;
- ген — один из параметров задачи;
- особь (хромосома, индивид) — набор генов;
- популяция — набор особей;
- поколение — цикл жизни популяции от создания до формирования новой;
- эволюция — последовательность поколений до достижения условия останова ГА.

Опишем простой ГА с технической точки зрения. Рассмотрим случай функции одной переменной. Пусть имеется пространство решений, пространство независимых переменных и взаимно однозначное отображение, переводящее пространство переменных в пространство решений (целевая функция). Необходимо найти такую переменную, при которой решение будет удовлетворять заданному условию. Изначально указываем допустимые пределы изменения истинного решения. Далее, хаотично выбираем n численных значений переменной (формируем первое поколение). Представляем каждое из значений переменной в бинарном виде. Выполняем рекомбинации и мутации (будут подробно рассмотрены ниже). Значения переменных, полученные в результате рекомбинаций и мутаций, представляем в десятичном виде. Для этих значений переменных вычисляем функцию пригодности и выбираем k значений переменных, удовлетворяющих исходному условию. Формируем новое поколение, состоящее из k только что полученных значений и l новых (хаотично выбранных) значений переменных ($n = k + l$). Все указанные выше шаги повторяются многократно. В итоге получаем, что каждое следующее поколение лучше предыдущего.

Остановимся подробнее на операциях рекомбинации и мутации. Существует несколько видов рекомбинации. Наиболее простой из них, называемый одноклеточным кроссовером или кроссинговером, заключается в следующем: пусть имеются два вектора (набор решений, равный N): $\mathbf{a}_1(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1N})$ и $\mathbf{a}_2(a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2N})$, тогда в результате кроссинговера мы получим два новых вектора: $\mathbf{a}_3(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1m}, a_{2m+1}, \dots, a_{2N})$ и $\mathbf{a}_4(a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2m}, a_{1m+1}, \dots, a_{1N})$. При этом точка m выбирается случайным образом:



Мутация представляет собой случайный выбор какого-либо значения переменной, выполняемый в следующем порядке. Значение переменной представляют в двоичном виде. Часть разрядов числа в соответствии с коэффициентом мутации изменяют на противоположное значение (с 0 на 1 и наоборот). Важными параметрами являются соответствующие коэффициенты. Так, коэффициент рекомбинации обычно лежит в пределах от 0,6 до 1, а коэффициент мутации чаще всего берут равным 0,1. Мутация не дает прогресса в поиске решения, но страхует от локальных экстремумов.

Сфера применения ГА очень широка: от автоматизированного проектирования [44, 45], решения комбинаторных задач и проектирования нейронных сетей до использования в экспертных и обучающихся системах [46, 47]. Основные области применения на практике:

- оптимизация сложных численных функций (наиболее традиционное использование ГА);
- распознавание образов, речи и т.п. (например, снимки из космоса или создание фотороботов);
- комбинаторные задачи (включая задачи о путешествующем коммивояжере, планирование работ и т.п.);
- планирование (от размещения мебели до сложных экономических и политических проблем);
- самообучающиеся системы (в так называемых классифицирующих системах, где ГА создают набор правил типа *если..., то* для решения предложенной проблемы);

– контроль и управление (в больших комплексных системах, таких как фабрика или завод, они способны управлять множеством параметров для поддержания оптимального режима работы системы).

1.7. Сравнение основных методов эволюционных вычислений

В работе [48] приведен краткий обзор результатов применения четырех разных эволюционных методов оптимизации к двум сложным тестовым функциям. Рассматривались методы: ГА, эволюционное программирование (ЭП), эволюционные стратегии (ЭС) и алгоритм имитации отжига (ИО). Методы применялись к функции *royal road* и 5-мерной функции *bump*. Эти функции очень сложны для большинства методов оптимизации. *Royal road* является типичной для большинства методов. Функция *bump* является функцией сглаживания, но содержит сотни тысяч пиков приблизительно одной величины. Более того, ее оптимальная величина определена наличием четкой границы.

Функция *bump*. Функция *bump* определена соотношением

$$\max \frac{\left| \sum_{i=1}^n \cos^4(x_i) - 2 \cdot \prod_{i=1}^n \cos^2(x_i) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ix_i^2}}, \quad 0 < x_i < 10, \quad i = 1, \dots, n,$$

где $\prod_{i=1}^n x_i > 0,75$ и $\sum_{i=1}^n x_i < 15n/2$, начиная с $x_i = 5$, $n = 1, 2, 3, \dots$; x_i — переменные (выраженные в радианах); n — размерность.

Эта функция представлена в виде сильно ухабистой поверхности (рис. 1.7 для $n=2$), где истинным глобальным оптимумом обычно является точка на ее границе.

Функция *royal road*. Хотя функция *royal road* разрабатывалась как наиболее простая для ГА и наиболее сложная для других методов, выяснилось, что даже ГА затрудняются в поиске ее решения. Функция, следовательно, является полезным примером экстремального случая, когда связь между переменными в функции и ее зна-

чениями сильно нелинейная и имеет большое количество пошаговых изменений.

Функция `goval road` была разработана как простейший класс, содержащий характеристики, наиболее подходящие для изучения ГА. Входным параметром функции `goval road` является бинарная строка, на выходе функции получаем действительное значение, которое должно быть максимизировано.

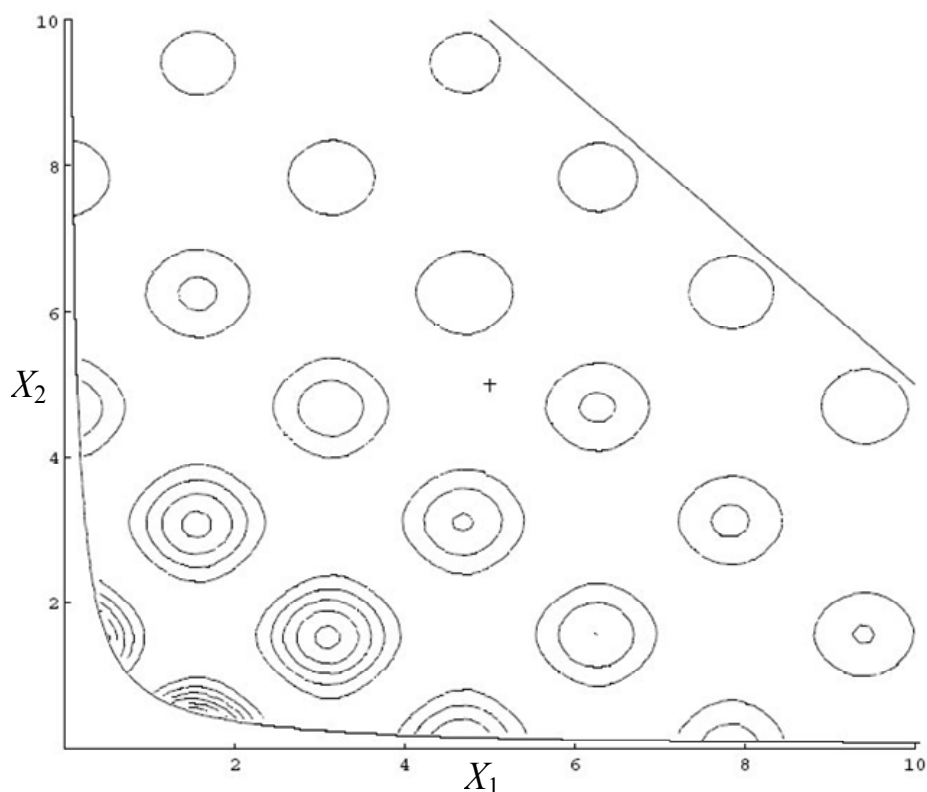


Рис. 1.7. Внутр-функция для $n=2$

Строка состоит из 2^k непересекающихся смежных областей, каждая длиной $b+g$. Используя значения Холланда по умолчанию: $k=4$, $b=8$, $g=7$, получаем 16 областей длиной 15 и общую длину строки, равную 240. Каждая область разделена на две непересекающиеся части. Первая длиной b , равной 8 битам (с 1-го по 8-й), называется блоком (`block`, блок-часть), а вторая длиной g , равной 7 битам (с 9-го по 15-й), называется разрывом (`gap`, разрыв-часть) (табл. 1.1). При расчете пригодности учитываются только те биты, которые принадлежат блок-части каждой области. Расчет состоит из двух частей: начальное вычисление пригодности и дополнительное вычисление.

Таблица 1.1

Условный вид функции royal road

Строка																		
1	...	8	9	...	15	1	...	8	9	...	15	...	1	...	8	9	...	15
Блок 1			Разрыв 1			Блок 2			Разрыв 2			...	Блок 16			Разрыв 16		
Область 1					Область 2					...	Область 16							

В ходе начального вычисления значению пригодности каждого блока прибавляется v за каждую единицу, входящую в состав блока, до определенного значения m^* . Если в блоке содержится больше единиц, чем m^* , но меньше, чем b единиц, то из значения пригодности такого блока вычитается значение v за каждую единицу, большую допустимого значения. Значения по умолчанию $v = 0,02$ и $m^* = 4$, тогда блок с шестью единицами получит значение пригодности $-0,02(6-4) = -0,04$. То есть если блок имеет более чем 4 и меньше чем 8 единиц, то значение пригодности уменьшается, и наоборот (табл. 1.2). Если блок состоит только из единиц, то он считается завершенным. Это приводит к дополнительному вычислению.

Таблица 1.2

Расчет пригодности элементов функции royal road

Кол-во единиц в блоке	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Значение пригодности	0,00	0,02	0,04	0,06	0,08	-0,02	-0,04	-0,06	0,00

В дополнительном вычислении используются только завершенные блоки. Первому завершенному блоку присваивается значение u^* , по умолчанию — 1,0, а каждому последующему — u , по умолчанию — 0,3. Затем смежные пары завершенных блоков получают значение пригодности таким же способом, затем четыре завершенных блока и так далее, пока не будет рассчитано значение пригодности всех 16 блоков. Это приводит к тому, что максимальное целевое значение

$$1,0 + (1,0+0,3) + (1,0+3 \cdot 0,3) + (1,0+7 \cdot 0,3) + (1,0+15 \cdot 0,3) = 12,8.$$

Наличие разрыв-частей, которые не влияют на вычисление пригодности, обеспечивает разнообразное количество строк, которые имеют максимальное значение. Оптимальное значение пригодности получается, когда найдена единственная предопределенная последовательность нескольких блоков битов, которая образуется из набора основных блоков.

Результаты сравнения методов. Задачи оптимизации, рассмотренные выше, являются весьма сложными: они имеют множество переменных, ярко выраженные нелинейные зависимости между переменными и целевые функции с большим количеством максимумов и минимумов. Поиск методов, которые могут решать такие задачи, приводит к эволюционному вычислению. Методики поиска наилучших решений в этой области делятся в зависимости от того, каким типом стратегии эволюционного управления контролируется стохастический подход. Сегодня существует четыре основных метода: генетические алгоритмы, где применяются методы эволюции Дарвина для отбора наиболее «приспособленных» моделей (особей); эволюционное программирование, основанное на ранжированной мутации и являющееся более эвристическим подходом к задаче; эволюционные стратегии, где отдельные особи мутируются, используя адаптивные значения мутации, настраиваемые индивидуально для каждой переменной в задаче; имитации отжига, где стратегия управления основана на имитации кинетики твердотельных кристаллов и возможности изменений, даже если они приводят к худшему решению. Первые три метода одновременно работают над группами особей, называемых популяциями, а последний — только над одним решением.

Из результатов оптимизации для пяти запусков каждого метода (рис. 1.8–1.15) видно, что все методы испытывают сложности для решения этих задач. На оси X отложено количество вычислений целевой функции, а на оси Y — вычисленное значение целевой функции по мере работы соответствующего метода. Наибольшую проблему вызывает задача *royal road*, что неудивительно, учитывая дискретность и сложность ее целевой функции. Особенно это видно при работе метода ЭП. Также четко видны «жидкая», «твердая» стадии и стадия «кристаллизации» при запусках алгоритма ИО, указывающие на то, что соответствующие значения вышли за пределы корректно заданных параметров (температурных значений) ИО.

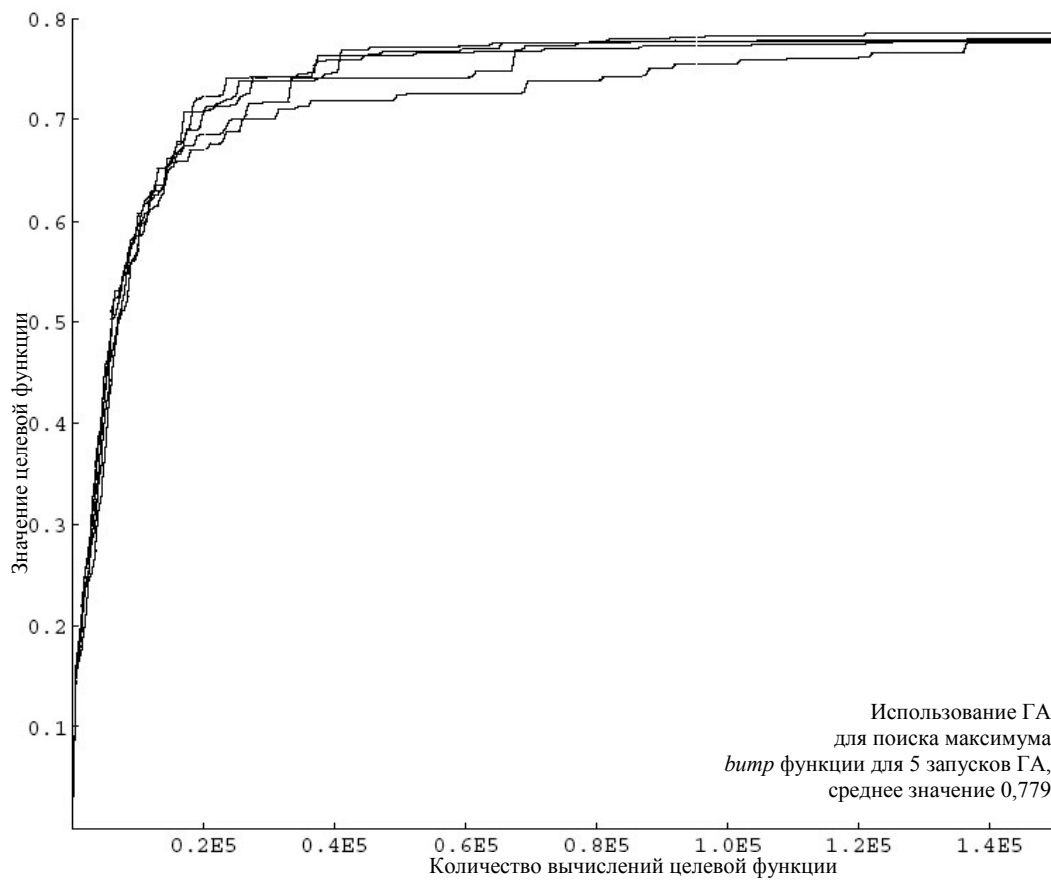


Рис. 1.8. Результаты оптимизации *bump*-функции методом ГА

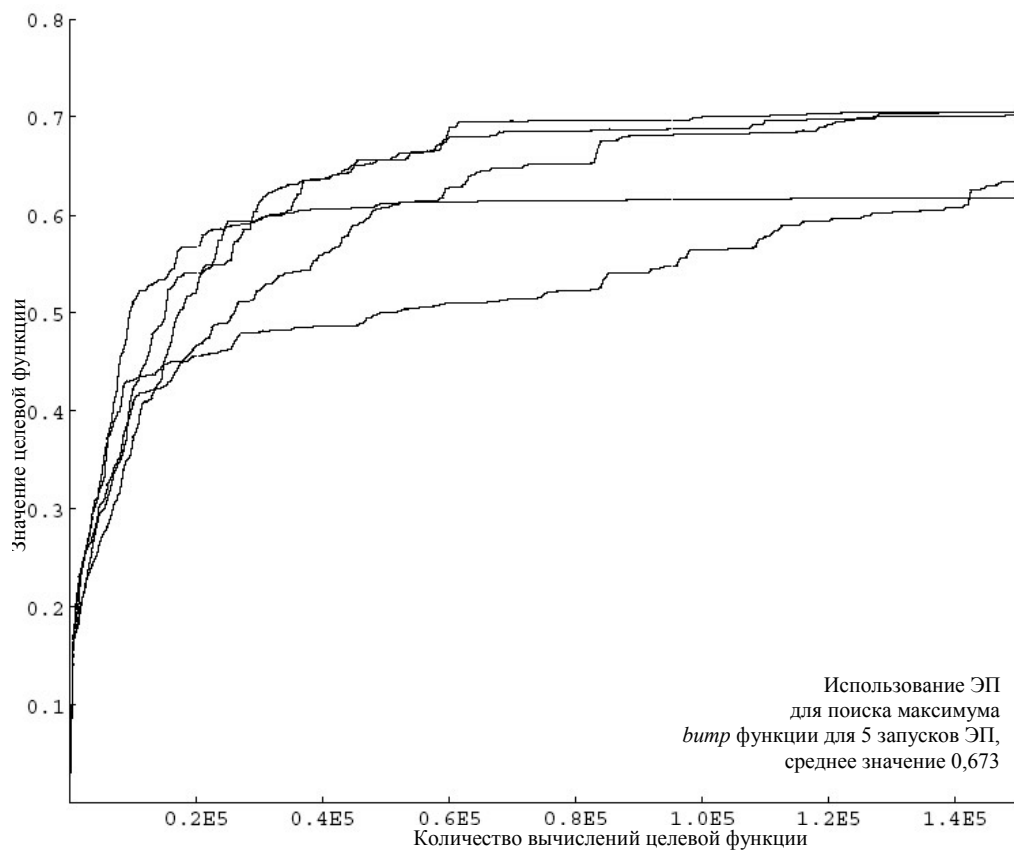


Рис. 1.9. Результаты оптимизации *bump*-функции методом ЭП

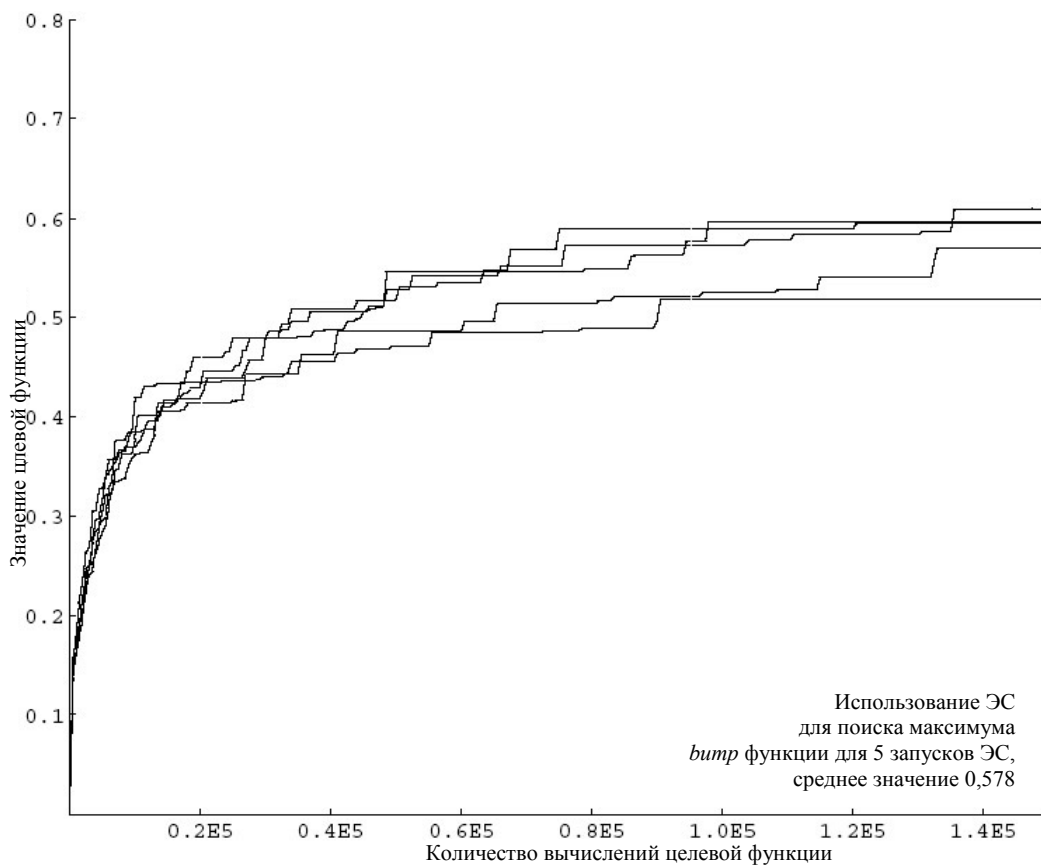


Рис. 1.10. Результаты оптимизации *bump*-функции методом ЭС

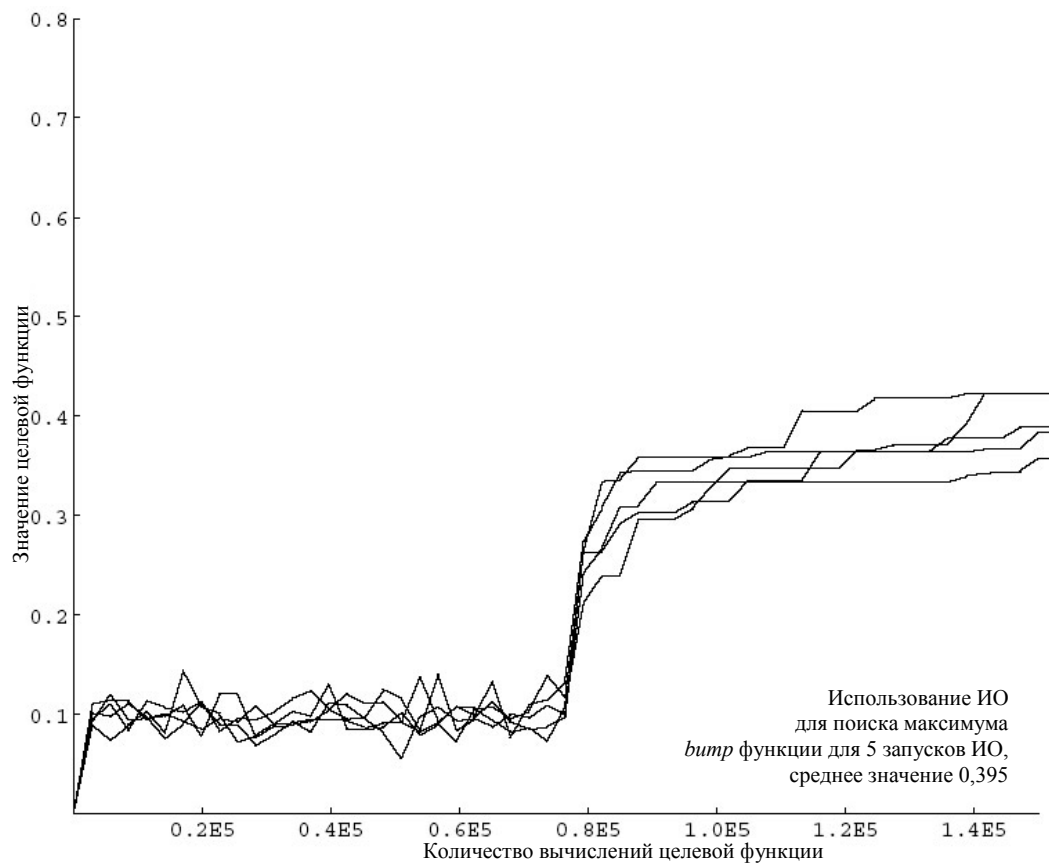


Рис. 1.11. Результаты оптимизации *bump*-функции методом ИО

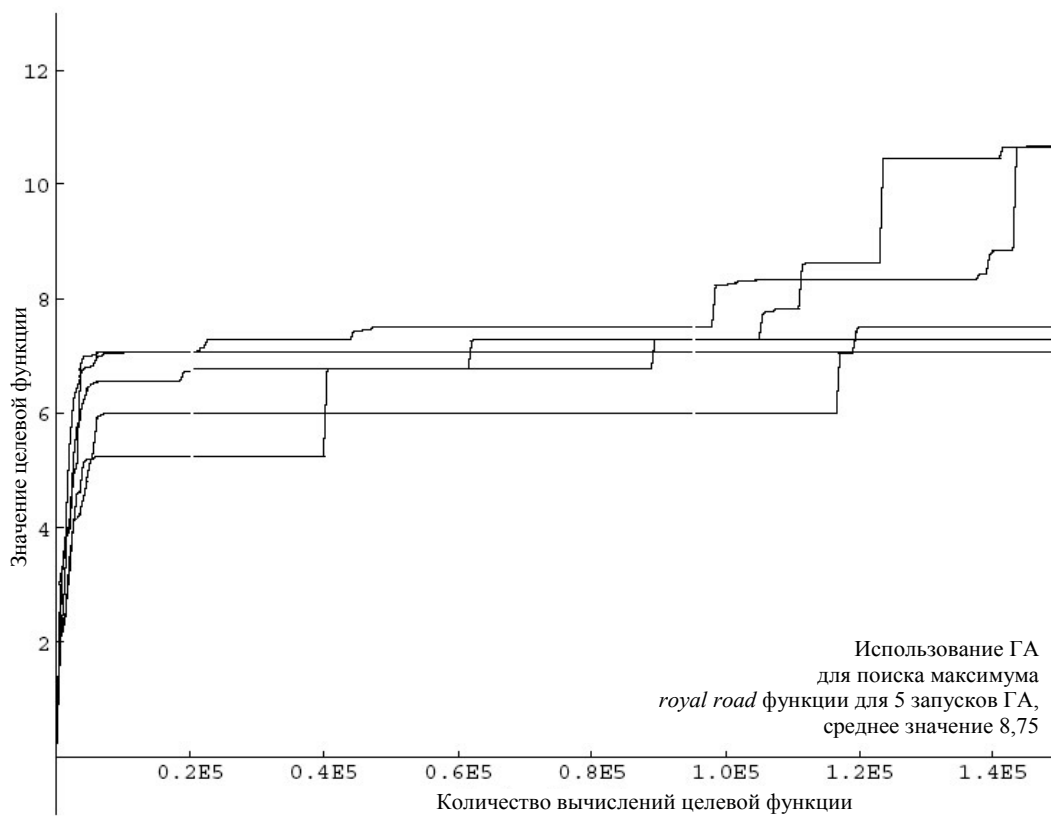


Рис. 1.12. Результаты оптимизации *royal road*-функции методом ГА

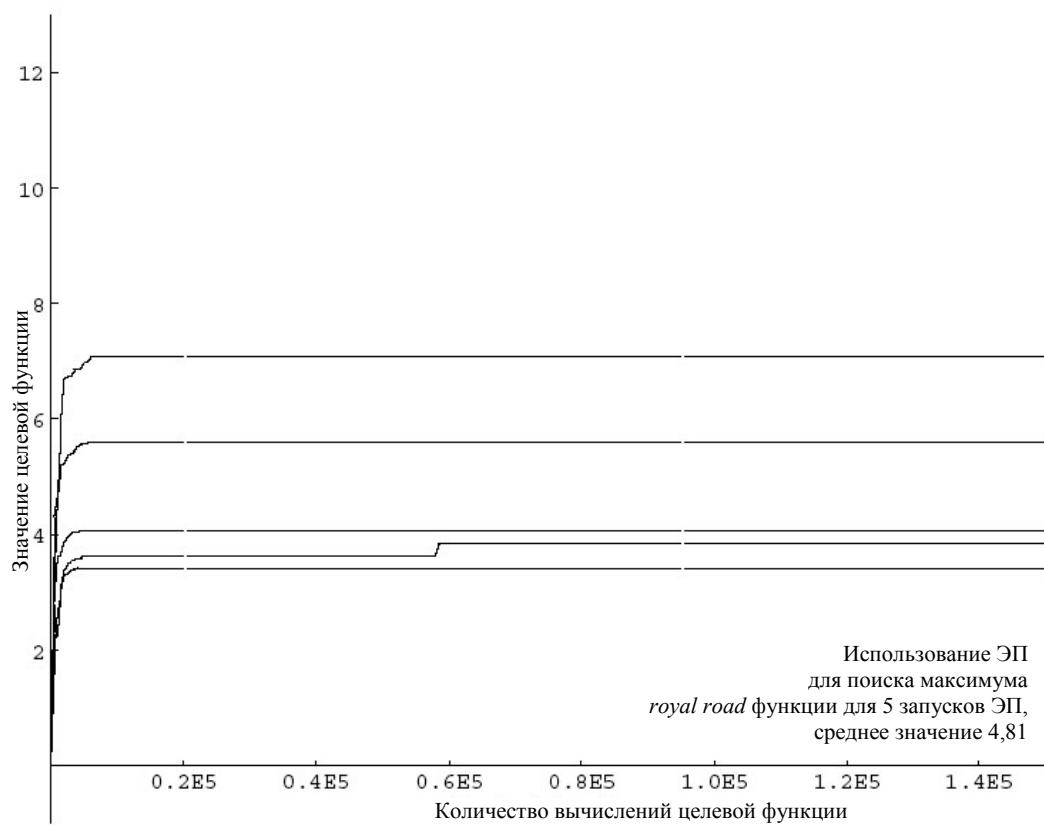


Рис. 1.13. Результаты оптимизации *royal road*-функции методом ЭП

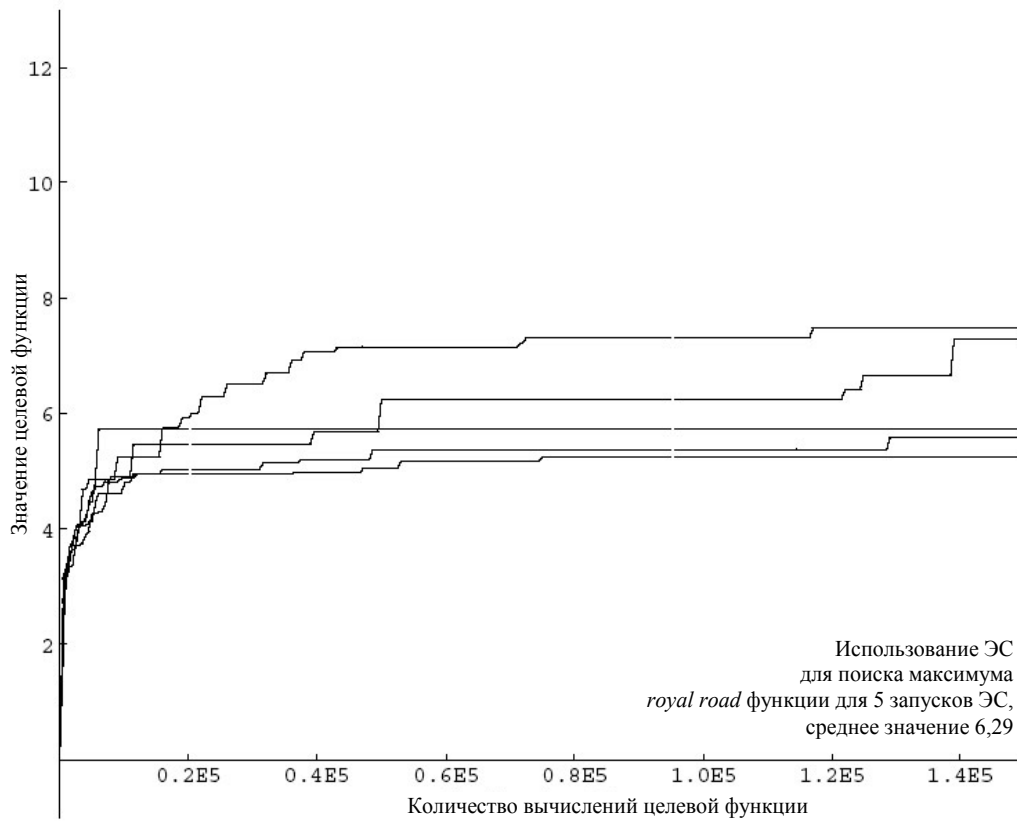


Рис. 1.14. Результаты оптимизации *royal road*-функции методом ЭС

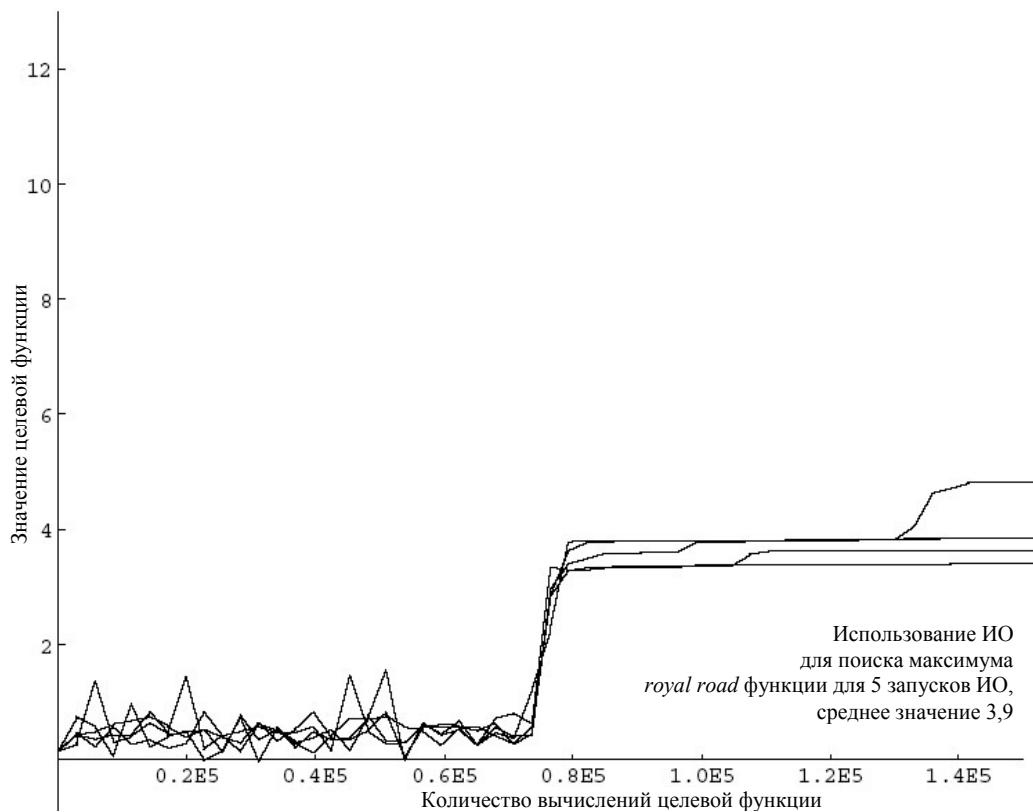


Рис. 1.15. Результаты оптимизации *royal road*-функции методом ИО

Видно, что ГА работают лучше всего, тогда как алгоритм ИО показал наихудшие результаты. Тем не менее, каждый из методов может дать лучшие результаты после оптимизации своих параметров (например, известен ряд работ, где разновидности метода ИО дают результаты не хуже, чем ЭП и ЭС). В любом случае необходимо уделять особое внимание настройкам оптимизатора при решении каждой задачи оптимизации. Однако при стандартных настройках и прочих равных условиях для одной и той же задачи именно ГА показывают наилучшие результаты.

1.8. Комплексная оптимизация генетическими алгоритмами

Недавно предложен подход, названный комплексной оптимизацией генетическими алгоритмами [49]. В нем применены ГА, поскольку они широко используются в последнее десятилетие и зарекомендовали себя надежным средством оптимизации в различных задачах технической электродинамики [50], в частности известны работы, в которых ГА используются для параметрической и структурной оптимизации различных проводных структур. Ниже кратко рассматриваются некоторые из этих работ, положенных в основу комплексной оптимизации с помощью ГА.

В [16] структурный синтез выполняется эмпирически: выбирается несколько конструкций антенн, затем одна из них, имеющая по результатам моделирования подходящую диаграмму направленности и минимальный КСВ в заданном диапазоне частот. Далее выполняется параметрическая оптимизация антенны с помощью ГА, в частности оптимизируется расположение и параметры элементов заграждающих фильтров с целью минимизации КСВ и расширения диапазона частот.

В работе [12] с помощью ГА выполняется автоматизированный синтез, который формально является параметрическим, поскольку оптимизируются геометрические параметры элементов антенны. Однако к этим параметрам относятся, в частности, пространственные координаты элементов антенны, что приводит к совершенно новым и необычным конструкциям антенн. Их невозможно получить эмпирически по интуиции, так что использование ГА позволяет автоматизировать структурный синтез.

В [51] продемонстрирован автоматизированный структурный синтез двухдиапазонной микрополосковой антенны, поскольку использована возможность кодирования в ГА не непрерывных параметров антенны, а наличия или отсутствия проводящих частей ее поверхности. Интересно, что в анализе методом моментов отсутствие частей антенны может выражаться просто вырезанием тех столбцов и строк матрицы \mathbf{Z} , которые соответствуют отсутствующим частям, так что матрица \mathbf{Z} может вычисляться только один раз. В работе получена новая, не интуитивная структура, соответствующая заданным критериям, однако показано, что она не оптимальна и ее характеристики могут быть улучшены.

Известны также различные модификации ГА, делающие их более эффективными для конкретных задач [50]. Кроме того, установлено, что существуют оптимальные значения параметров ГА, например размера популяции и вероятности мутации, минимизирующие число итераций для нахождения решения [52].

Наконец, большой задел создан в ТУСУРе [53] из квазистатистических моделей, позволяющих с приемлемой точностью, но гораздо быстрее электродинамических анализировать структуры проводников и диэлектриков различной сложности. Поэтому корректное использование моделей квазистатистического анализа в процедуре автоматизированного синтеза с помощью ГА существенно ускоряет процесс.

Таким образом, создан новый подход, объединяющий в себе достоинства известных методов и имеющий новое качество, — эффективный автоматизированный структурный синтез. Этот подход назван комплексной оптимизацией генетическими алгоритмами (КОГА). Под термином «комплексная» обобщается совместное использование:

- 1) параметрического синтеза с помощью ГА;
- 2) структурного синтеза с помощью ГА;
- 3) адаптации ГА и его параметров к задаче;
- 4) синтеза основных элементов;
- 5) синтеза вспомогательных элементов;
- 6) электродинамического анализа;
- 7) квазистатистического анализа;
- 8) вырезания строк и столбцов матрицы СЛАУ.

1.9. Постановка задач исследования

Проектирование антенн является весьма сложной проблемой. Особый этап проектирования — улучшение характеристик антенны за счет оптимизации. И главной задачей разработчика является сбалансированное улучшение нужных характеристик при неизменном качестве или незначительном ухудшении других или не очень важных. Из всего семейства 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 его стараются улучшить в первую очередь.

Особую роль среди различных типов антенн играют вибраторные антенны. Проводные антенны вибраторного типа являются быстроразворачиваемыми, простыми в изготовлении и отличаются малой парусностью. Эти достоинства антенн вибраторного типа обусловили их использование для обеспечения резервной скрытной радиосвязи в специальных и военных целях. Такое резервирование становится особенно актуальным в свете угрозы электромагнитного терроризма [54], реальность которой активно исследуется во всем мире [55–57].

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. Но недостатками включения таких нагрузок являются большие габариты и низкий коэффициент полезного действия (КПД) антенны — 40–50 %. 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 укорачивать длину вибратора. При этом включение таких

нагрузок не в центр симметричного вибратора, а на некотором расстоянии от него повышает активное сопротивление антенны [58]. Этот эффект, как правило, используется для согласования антенн с подводющим фидером, имеющим волновое сопротивление, например, 50 Ом [59]. В данной работе предлагается использовать преимущества использования всех перечисленных нагрузок в виде включения в структуру вибраторной антенны сосредоточенных *RLC*-нагрузок. Один из способов расчета антенны сводится к решению задачи определения распределения тока в ней. Включение неоднородностей в структуру антенны усложняет решение этой задачи. Использование модели Альтмана позволяет произвести расчет нагруженных проводных антенн и объединить задачу анализа и оптимизации. Анализ и сравнение моделей, представленных в подразделе 1.5, выделяет методику Альтмана по следующим преимуществам над остальными:

- наглядная;
- простая в реализации;
- распространяется на случаи многочисленных нагрузок;
- менее затратная в вычислительном плане.

Поэтому для учета сосредоточенных нагрузок при проектировании широкополосных антенн целесообразно использовать модель Альтмана. В общем случае проектирование широкополосных антенн с сосредоточенными нагрузками является сложной нелинейной задачей оптимизации [60, 61]. Для ее решения необходим эффективный метод глобальной оптимизации, который позволит определить геометрию антенны, расположение сосредоточенных нагрузок и их параметры так, чтобы полученная антенна соответствовала техническому заданию [19, 62, 63].

Существует множество методов глобальной оптимизации. Проводятся конференции и публикуются тематические выпуски [64] известных журналов, посвященные их разновидностям, например эволюционным вычислениям [65, 66]. Большинство работ по исследованию и использованию таких методов направлено на изучение особенностей их применения в конкретной области и, как правило, носит частный характер. К сожалению, мало внимания уделяется вопросу выбора нужного метода, и тем более сравнению различных методов глобальной оптимизации и выбору наилучшего. В общем случае выбор метода оптимизации является весьма сложной задачей. Поэтому для обоснованного выбора нужного метода

глобальной оптимизации необходимо произвести их классификацию и выполнить сравнение наиболее популярных.

Известен ряд зарубежных работ [15, 37, 42, 44, 67, 68], в которых рассмотрены задачи уменьшения КСВ за счет включения сосредоточенных нагрузок и их дальнейшей оптимизации, но работ, в которых рассматривалась бы параметрическая и структурная оптимизация с помощью ГА для вибраторных антенн, к сожалению, нет. Между тем вибраторные антенны сегодня широко используются. Универсальность, простота изготовления, малые размеры, дешевизна до сих пор позволяют применять этот вид антенн как самостоятельный элемент приемопередающих систем, так и в составе антенных решеток. Поэтому предлагается сформулировать методологию уменьшения КСВ за счет включения сосредоточенных нагрузок и оптимизации их параметров и произвести тестирование данной методологии на примере модифицированных вибраторных антенн. В результате анализа основных методов глобальной оптимизации необходимо выбрать и программно реализовать наиболее пригодный алгоритм для уменьшения КСВ проводных антенн за счет включения *RLC*-фильтров. Сегодня разработаны программные комплексы для учета нагрузок при проектировании антенн. К ним относятся MMANA [69] (модификация MMANA-GAL [70]), NEC (модификации 4NEC2 [71], SuperNEC, MiniNec), BLADE [15] и другие. Все они позволяют проектировать проводные антенны с сосредоточенными нагрузками и оптимизировать параметры для улучшения их характеристик. Однако они имеют некоторые ограничения: в MMANA-GAL отсутствует структурная оптимизация; для определения функции качества в программе BLADE необходимо обращаться к внешнему программному комплексу MATLAB. Ни один из перечисленных программных комплексов не позволяет осуществлять одновременную структурно-параметрическую оптимизацию сосредоточенных нагрузок для улучшения КСВ антенны. Поэтому необходимо разработать собственное алгоритмическое и программное обеспечение для проектирования антенн с сосредоточенными нагрузками и возможностью их оптимизации. Для тестирования созданного программного обеспечения предлагается сравнить результаты, полученные с его помощью, с результатами аналогов и применить его для параметрической и структурной оптимизации модифицированных вибраторных антенн и их элементов [72, 73].

2. Методы глобальной оптимизации

2.1. Классификация методов оптимизации

Предлагается классификация по явлениям и принципам, лежащим в основе методов глобальной оптимизации [74, 75].

В [76] приведен подробный анализ применения эволюционных методов для задач проектирования. Проектирование — итерационный процесс, в котором чередуются процедуры синтеза и анализа. Синтез — это создание проектного решения в виде описания облика изделия, его конструкции, структурной, функциональной или принципиальной схемы. Анализ — это оценка результатов синтеза. В современных системах автоматизированного проектирования (САПР) преимущественно развито математическое и программное обеспечение процедур анализа. Синтез — трудноформализуемая задача. Наряду с формализуемыми задачами имеются типы задач, для которых формализация не может быть достигнута (их решение возможно лишь при малом размере, но практически важные задачи имеют размеры, существенно превышающие возможности точного решения).

Поэтому все подходы к решению задач синтеза в САПР подразделяются на две группы:

- интеллектуальные методы (в основном это экспертные методы);
- методы дискретной оптимизации.

Используя материалы [76, 77], представим общую классификацию методов оптимизации в зависимости от сложности поставленной задачи (рис. 2.1) [74].

Как видно из рис. 2.1, задача проектирования может быть формализуемой (используются точные методы, когда анализируется все пространство возможных решений) и неформализуемой. Для решения неформализуемых задач существует два основных класса:

методы дискретной оптимизации и интеллектуальные экспертные методы. Различают также глобальные и локальные методы оптимизации. Приведем классификацию глобальных методов оптимизации по явлениям и процессам, лежащим в их основе (рис. 2.2) [74].



Рис. 2.1. Классификация методов оптимизации в зависимости от сложности поставленной задачи

Существует классификация с позиции вычислительной математики, при этом большинство глобальных методов оптимизации относится к так называемым «мягким вычислениям». Термин «мягкие вычисления» введен Лофти Заде в 1994 году. Это новый метод

вычислительной математики, который был поддержан аппаратными средствами (нечеткими процессорами) и в ряде проблемных областей стал более эффективным, чем классические методы.



Рис. 2.2. Классификация методов глобальной оптимизации

Методы «мягких вычислений» включают в себя:

- нечеткую логику;
- нейронные сети;
- вероятностные рассуждения;
- сети доверия;
- эволюционные алгоритмы.

Таким образом, представлены различные классификации методов оптимизации: общая; по явлениям и принципам, лежащим в основе глобальных методов; с позиции вычислительной математики.

2.2. Анализ методов глобальной оптимизации

В работах [78, 79] приведен краткий анализ методов, представленных выше, рассмотрена работа и пригодность 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. В итоге сделаны следующие выводы: алгоритм ИО является наиболее «хрупким» из этих методов, он более всего зависит от выбранных параметров моделирования; ГА при настройке показывают лучшие (примерно на 10–15 %) результаты, но даже с параметрами по умолчанию позволяют добиться приемлемой точности.

По результатам работ [48, 79] сформирована общая таблица условной результативности применения описанных методов к конкретным задачам и рассчитан условный средний ранг для каждого метода (табл. 2.1). При этом 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 в таблице представляет собой средний ранг применения к различным задачам каждого метода.

Все рассмотренные методы имеют общие характеристики: они все являются методами глобальной оптимизации (за исключением детерминированных методов) и для каждого существует сходимость к глобальному оптимуму. В теореме NFL (No Free Lunch) утверждается, что производительность всех алгоритмов, ищущих экстремум функции качества, одинакова, если усреднить результаты по всевозможным функциям качества, т.е. на полном множестве задач нельзя выделить самый лучший метод оптимизации [65].

Таблица 2.1

Ранжирование методов глобальной оптимизации

Метод	Задача										Среднее
	Функция goal goad	Функция выпр	Оптимизация графа	Размещение элементов цели	Заполнение рюкзака	Предсказание банковского курса	Составление расписания				
ГА	1	1	2	1	1	2	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			

Практическое значение этой теоремы состоит в том, что не существует панацеи на все случаи жизни, несомненный успех какого-либо оптимизационного метода в определенной области знаний не гарантирует такого же успеха в другой области. Следовательно, для каждой специфической области необходимо проводить исследования и отыскивать приемлемый метод оптимизации. Однако из табл. 2.1 видно, что ГА применяются с наибольшим успехом, причем для решения очень широкого круга задач.

2.3. Недостатки и преимущества генетических алгоритмов

Анализ работ [46, 76, 79] позволяет выделить ряд недостатков и преимуществ ГА. Недостатки использования ГА:

- с помощью ГА проблематично найти точный глобальный оптимум;
- ГА непросто настроить для нахождения всех решений задачи;
- не для всех задач удастся найти оптимальное кодирование параметров;
- ГА трудно применить для изолированных функций. Изолированность («поиск иголки в стоге сена») является проблемой для любого метода оптимизации, поскольку функция не предоставляет информации, подсказывающей, в какой области искать максимум. Лишь случайное попадание особи в глобальный экстремум может решить задачу (рис. 2.3);

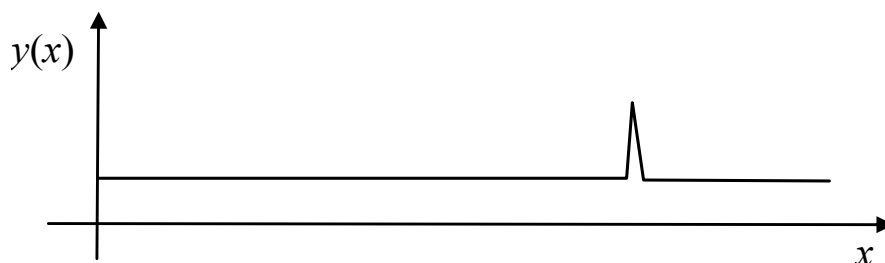


Рис. 2.3. Изолированная функция

- ГА трудно применить к зашумленным функциям. Дополнительный шум сильно влияет на сходимость многих эволюционных методов, поэтому часто замедляет поиск решения ГА (рис. 2.4).

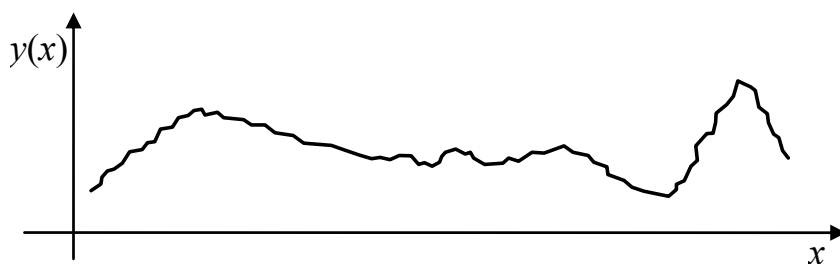


Рис. 2.4. Зашумленная функция

Однако существует ряд преимуществ применения ГА относительно других методов глобальной оптимизации:

- простота использования;
- слабая зависимость эффективности использования от настроек оптимизатора для многих задач;
- ГА являются универсальным методом оптимизации сложных многопараметрических функций;
- ГА не зависят от исследуемой проблемы, так как работают с закодированными параметрами;
- ГА успешно используются для широкого круга задач;
- ГА применимы для неформализуемых задач, когда целевая функция нечетко сформулирована или вообще отсутствует.

Выводы, сделанные выше, позволяют использовать ГА как универсальный инструмент для оптимизации очень сложных задач [80–84], при этом необходимо отметить, что результаты, полученные с использованием ГА, будут не хуже, а скорее всего лучше, чем результаты, полученные другими методами, при тех же временных затратах. Поэтому решение задачи оптимизации новой, еще не исследованной проблемы следует начать именно с применения ГА.

3. Программное обеспечение для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками

3.1. Определение требований к программному обеспечению

Разрабатываемое программное обеспечение (ПО) для моделирования проводных антенн с нагрузками входит в состав программного комплекса «Система моделирования электромагнитной совместимости TALGAT» [49, 53, 85] (далее TALGAT), расширяет его возможности и позволяет использовать его как систему моделирования оптимальных широкополосных антенн с оптимизацией сосредоточенных нагрузок на основе ГА [86].

Цель разработки программного обеспечения — предоставить пользователю удобный инструмент моделирования проводных антенн, возможность максимально быстрого и легкого ввода сосредоточенных нагрузок, использования ГА для структурной и параметрической оптимизации антенн.

Особое внимание при разработке ПО уделялось вопросу структурной и параметрической оптимизации посредством ГА [87] с возможностью изменения основных параметров алгоритма (размер популяции, количество особей в популяции, коэффициент кроссовера, мутации и т.д.) и его типов (простой, установившийся, возрастающий и параллельный).

К программному обеспечению для моделирования проводных антенн с нагрузками предъявляется ряд требований:

- 1) удобный современный интерфейс пользователя;
- 2) возможность оптимизации любых параметров исследуемых структур;

3) как значения функции качества должны использоваться любые вычисляемые системой характеристики структур и их комбинации;

4) возможность одновременной оптимизации нескольких структур;

5) независимость работы ГА от других компонентов системы.

3.2. Библиотека GAlib

Библиотека GAlib — это полнофункциональная библиотека объектов и методов для разработки ГА (рис. 3.1). Она включает в себя типы данных, различные классы генотипов, ГА, популяций, схем селекций, классы сбора и накопления статистики по работе алгоритма и классы генерации случайных чисел. Все права на распространение принадлежат Массачусетскому технологическому институту и автору программы Мэтью Волу (Matthew Wall) [88]. Библиотека используется и распространяется по GPL-соглашению, т.е. пользователь имеет права копировать, модифицировать и распространять (в том числе на коммерческой основе) программы, а также гарантировать, что и пользователи всех производных программ получат вышеперечисленные права.

Классы ГА:

- GAGeneticAlgorithm (основной класс);
- GASimpleGA (не перекрывающиеся популяции);
- GASTeadyStateGA (перекрывающиеся популяции);
- GAIcrementalGA (возрастающие популяции);
- GADemeGA (параллельные популяции с миграцией);
- GASTatistics (класс статистики ГА);
- GAParameterList (класс параметров ГА);
- GAPopulation (класс популяции ГА);
- GAScalingScheme (класс стратегий отбора для скрещивания);
- GANoScaling (без оценки);
- GALinearScaling (линейная оценка);
- GASigmaTruncationScaling (оценка с уменьшением ошибки);
- GAPowerLawScaling (оценка по степенному закону);
- GASHaring (оценка по разделению);
- GASElectionScheme (класс стратегий отбора для формирования будущих поколений);

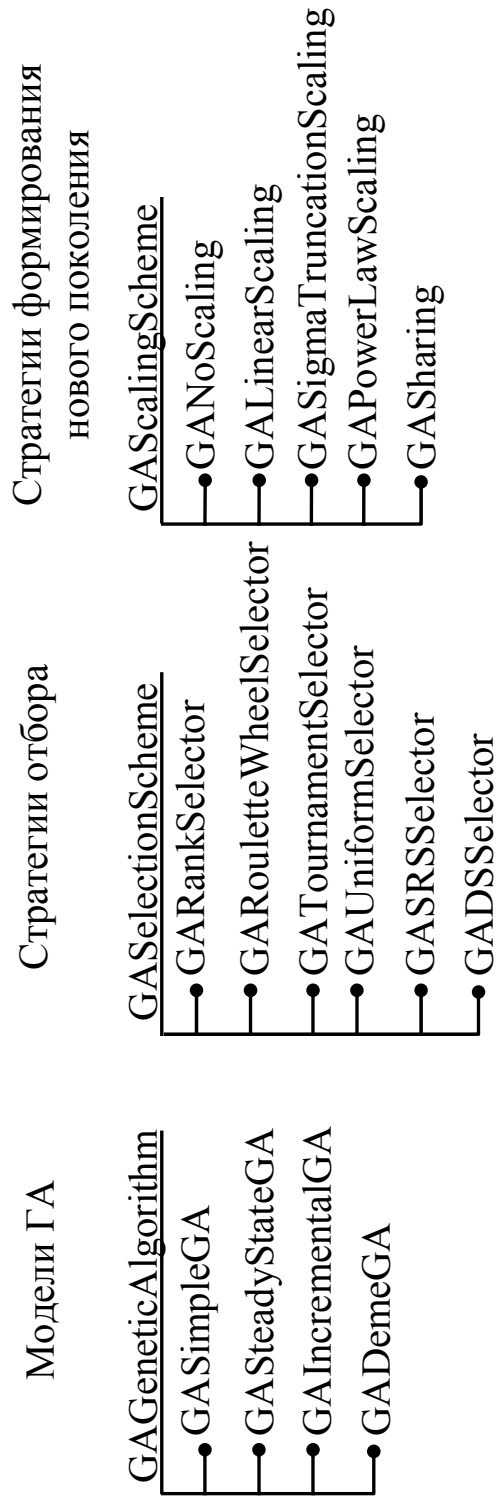


Рис. 3.1. Структура библиотеки GAlib

- GARankSelector (отбор наилучшего индивидуума в каждом поколении);
- GARouletteWheelSelector (отбор наилучшего индивидуума с некоторой вероятностью p);
- GATournamentSelector (отбор на основе метода рулетки);
- GAUniformSelector (универсальный случайный отбор);
- GASRSSSelector (стохастический остаточный детерминированный отбор);
- GADSSSelector (стохастический детерминированный отбор).

Основные возможности GALib:

- библиотека GALib может быть скомпилирована под операционными системами DOS/Windows, Windows NT/95, MacOS, UNIX;
- параметры ГА могут быть заданы из файла, с командной строки и/или исходного кода программы;
- использование ГА с перекрывающимися и не перекрывающимися поколениями, выбор процента перекрытия;
- разработка своего ГА благодаря созданию своих классов на базе основного класса ГА;
- применение элитизма (алгоритм, при котором наиболее приспособленные особи дают потомство с большей вероятностью) для не перекрывающихся видов ГА;
- реализованы основные виды отбора: ранговый, рулетка, турнир, стохастический, универсальный, вероятностный;
- доступна полная статистика по всем параметрам эволюции;
- хромосомы могут быть созданы из любого типа данных, доступных в C++;
- доступны операторы инициализации: uniform random, order-based random, initialize-to-zero;
- доступны операторы мутации: random flip, random swap, Gaussian, destructive, swap subtree, swap node, swap node;
- доступны операторы кроссовера: partial match, ordered, cycle, single point, two point, even, odd, uniform, node- and subtree-single point.

При работе с библиотекой GALib используют два класса: Genome и Genetic Algorithm. Genome — геном, представляет собой совокупность возможных решений задачи. Genetic Algorithm — класс ГА, определяющий, как должно достигаться решение. Как упоминалось выше, ГА использует целевую функцию (которую задает

пользователь) для вычисления степени «приспособленности» каждого генома к выживанию. Чтобы решить поставленную задачу, используя ГА, необходимо:

- определить представление чисел;
- выбрать операторы и задать параметры ГА;
- задать целевую функцию.

ГА определяет, какие индивидуумы должны выжить, какие — участвовать в скрещивании, а какие — умереть. Также ГА определяет, как долго будет длиться процесс эволюции. Обычно ГА не имеет четкого условия останова. Необходимо задать критерий завершения работы. Часто таким критерием является количество поколений или вырождение популяции, т.е. если практически нет разнообразия в генах особей популяции либо задано время работы. Схема работы ГА представлена на рис. 3.2.

Библиотека GAlib предоставляет полный набор инструментов, чтобы быстро и просто реализовать представление чисел и использовать нужные операторы ГА. Но целевую функцию должен задать именно пользователь. GAlib включает четыре основных типа ГА, отличающихся тем, как новые индивидуумы будут заменять старых в ходе эволюции. Следует отметить, что выбор типа ГА полностью зависит от сложности поставленной задачи. Правильное применение ГА позволяет использовать его как при глобальном, так и при локальном поиске экстремума. При этом временные затраты зависят от корректного выбора операторов и параметров ГА, а также от сложности «формы» пространства решений.

Библиотека содержит 4 типа ГА. Первый — простой ГА (simple). Этот алгоритм является одним из первых и самых простых. Он использует не перекрывающиеся популяции и элитизм. С каждым поколением алгоритм создает полностью новую популяцию индивидуумов. Второй тип — установившийся ГА (steady-state), использует перекрывающиеся популяции. В этом алгоритме задается, какая часть популяции будет заменена в каждом поколении. Третий вариант — возрастающий ГА (incremental), в котором каждое поколение состоит только из одного или из двух детей. Возрастающий ГА позволяет обычными методами замены определить, как новые особи попадут в популяцию. Так, например, полученный ребенок может занять место родителя, может заменить любого члена популяции случайным образом либо заменить индивидуума, который больше всего похож на него. Четвертый тип — параллель-

ный ГА (deme). Этот алгоритм создает параллельно множество популяций, используя установившийся ГА. В нем с каждым поколением несколько индивидуумов одной популяции мигрируют в другую популяцию.



Рис. 3.2. Схема генетического алгоритма

Каждый геном имеет три основных оператора — это инициализация, мутация, кроссовер. Их использование позволяет влиять на начальную популяцию, определять особенности мутации и кроссовера для задачи либо изменять части ГА по мере развития популяции. В библиотеке GAlib все эти операторы имеют установки по

умолчанию для каждого типа генома, но можно изменить любой из них.

Оператор инициализации определяет, как будет инициализирован геном. Он вызывается, когда инициализируется популяция или ГА. Этот оператор не создает геном, скорее, он «наполняет» геном первоначальным генетическим материалом, из которого будут получены все решения. Часто в его основе лежит какой-либо генератор случайных чисел. Класс популяции имеет свой оператор инициализации. По умолчанию в популяции просто вызывается оператор инициализации генома, но можно вызывать любой оператор инициализации.

Оператор мутации определяет процесс мутации каждого генома. В разных типах данных мутация действует по-разному. Например, типичный оператор мутации, примененный к бинарной строке, проинвертирует биты в строке с заданной вероятностью.

Оператор кроссовера определяет процедуру создания ребенка от двух родителей генома. Как и у оператора мутации, действие оператора кроссовера зависит от типа данных. В отличие от мутации, кроссовер включает множество геномов. В GAlib каждый геном «знает» свой предпочитаемый метод скрещивания (метод кроссовера по умолчанию).

Помимо трех основных операторов, каждый геном может содержать целевую функцию, а также компаратор. Целевая функция используется для развития генома. Компаратор (часто называемый функцией расстояния) используется, чтобы определить, насколько один геном отличается от другого. Для каждого ГА необходима целевая функция. Именно по ней ГА определяет, какие индивидуумы лучше, чем другие. Для некоторых ГА необходим компаратор.

Представленные основные возможности библиотеки GAlib, типы ГА, операторы инициализации, мутации и кроссовера необходимы для реализации работы ГА в программном обеспечении моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками.

3.3. Программная реализация работы генетического алгоритма на примере тестовых функций

Используя схему ГА, изображенную на рис. 3.2, представим работу ГА для некоторой функции $y(x)$, при этом будем считать, что $y(x)$ может быть функцией одной или нескольких переменных. Изобразим алгоритм программы поиска экстремума функции $y(x)$ на основе работы ГА (рис. 3.3).

Программная реализация ГА осуществлялась в среде Microsoft Visual C++. Написан код программы, реализующей ГА с помощью стандартных библиотек C++ на основе схемы, представленной на рис. 3.3. В качестве тестовой задачи реализован поиск максимума функции одной переменной. Для примера взята функция $y(x) = \sin(0,1x)\sin(x)$. Ее график приведен на рис. 3.4.

Данная функция имеет глобальный максимум в диапазоне изменения переменной x от 0 до 30. Написанная программа позволяет найти максимум такой функции. При запуске пользователь должен задать пределы изменения независимой переменной: начальное и конечное значения (в нашем случае 0 и 30). Затем необходимо указать количество поколений.

В результате выполнения программы на экран будет выведено максимальное значение $y(x)$ и соответствующее ему значение x для каждого поколения. Параметры ГА: количество особей в поколении 30; коэффициент мутации 0,01; коэффициент кроссовера 0,7. Результаты нескольких поисков максимума функции при различном числе поколений (5, 10, 50, 100, 200, 1000) представлены в табл. 3.1. Среди пяти максимумов функции одной переменной программная реализация поиска экстремума с помощью ГА позволяет найти именно глобальный максимум с хорошей точностью ($< 1\%$) уже при 100 поколениях.

Исходная программа была усовершенствована за счет подключения библиотеки GAlib. Она содержит компоненты ГА для оптимизации (объекты и классы для языка программирования C++) и существенно упрощает процесс создания кода программы. Чтобы реализовать оптимизацию с помощью ГА, пользуясь этой библиотекой, необходимо задать:

- вид кодирования значений переменных;

- используемые операции ГА;
- функцию пригодности.



Рис. 3.3. Схема алгоритма программы поиска экстремума функции $y(x)$ на основе работы генетического алгоритма

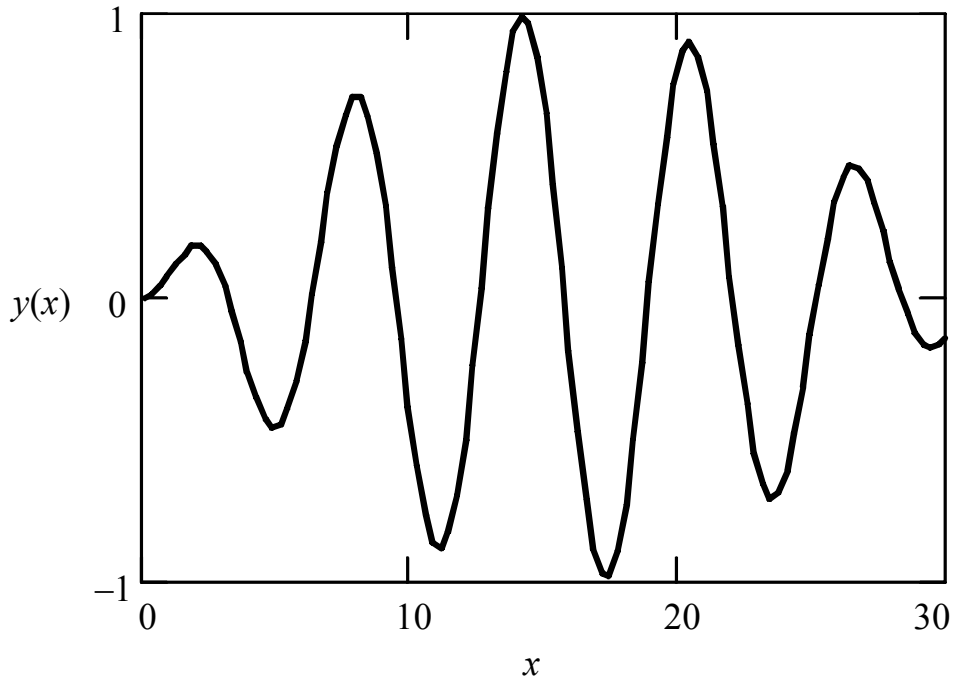


Рис. 3.4. График зависимости
 $y(x) = \sin(0,1x)\sin(x)$

Таблица 3.1

Результаты поиска максимума функции
 $y(x) = \sin(0,1x)\sin(x)$ при $0 < x < 30$

Число поколений	Результаты	
	$y(x)$	x
5	0,000275	0,052451
10	0,841014	20,709726
50	0,915702	13,769531
100	0,980410	14,030914
200	0,987451	14,179688
1000	0,987744	14,141235
Точное значение	0,987808	14,150390

В итоге написана программа на основе алгоритма, представленного на рис. 3.3, позволяющая найти максимум следующей функции нескольких переменных:

$$f(x, y) = \left| \frac{\sin(\pi(x-3))}{\pi(x-3)} \right| \left| \frac{\sin(\pi(y-3))}{\pi(y-3)} \right|.$$

На рис. 3.5 приведено изображение данной зависимости.

Исследуемая функция имеет глобальный максимум при $0 < x < 8$ и $0 < y < 8$. Программа позволяет найти этот экстремум и соответствующие ему значения независимых переменных x и y . При этом пользователь может задавать основные параметры ГА: вероятность кроссинговера, вероятность мутации, количество поколений, число особей в поколении, длину хромосомы (которая определяется задаваемым числом переменных и точностью их представления).

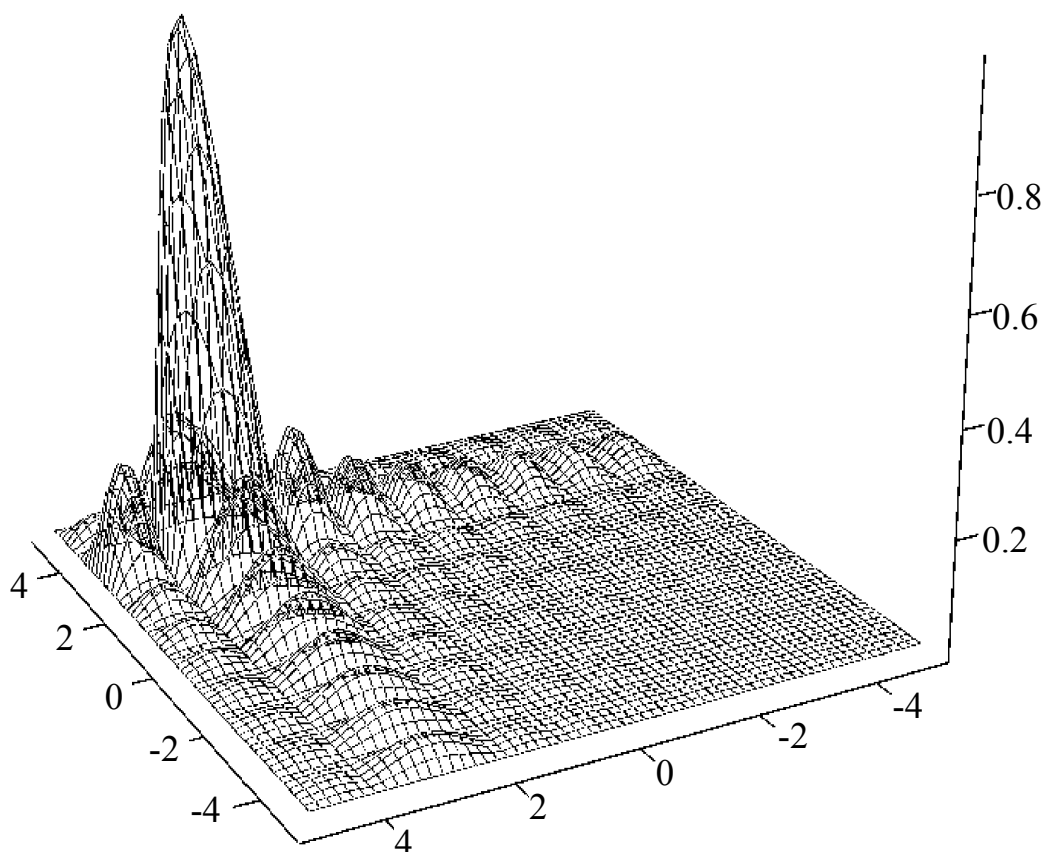


Рис. 3.5. Изображение зависимости $f(x,y)$

Результатом работы программы является вывод на экран значений x и y , при которых функция $f(x,y)$ максимальна. Параметры ГА: количество особей 30; коэффициент мутации 0,01; коэффициент кроссовера 0,7; количество поколений 5, 10, 50, 100, 200, 1000. Результаты, полученные при использовании данной программы, представлены в табл. 3.2. Среди множества максимумов функции двух переменных программная реализация поиска экстремума с помощью ГА позволяет найти именно глобальный максимум с хорошей точностью ($< 1\%$) уже при 100 поколениях.

Таблица 3.2

Результаты отыскания максимума функции $f(x,y)$
при $0 < x < 8, 0 < y < 8$

Число поколений	Результаты		
	$f(x,y)$	x	y
5	0,99647	2,97453	2,96123
10	0,79501	3,03886	2,63688
50	0,99999	3,00005	3,00273
100	1,00000	3,00017	2,99980
200	1,00000	3,00029	3,00005
1000	1,00000	3,00005	3,00017
Точное значение	1,00000	3,00000	3,00000

Точно такая же функция рассматривалась как пример для нахождения экстремума максимума функции двух переменных с помощью ГА в [50], где сообщается, что оптимальное решение $f(x,y) = 1$ достигается при $x = 3,000290, y = 2,999924$ за 41 поколение. Рассмотрим более сложный пример использования ГА. Исследуем функцию вида $y(x_1, x_2) = \sin(0,1x_1) \cdot \sin(x_1) \cdot \sin(0,1x_2) \cdot \sin(x_2)$ (рис. 3.6).

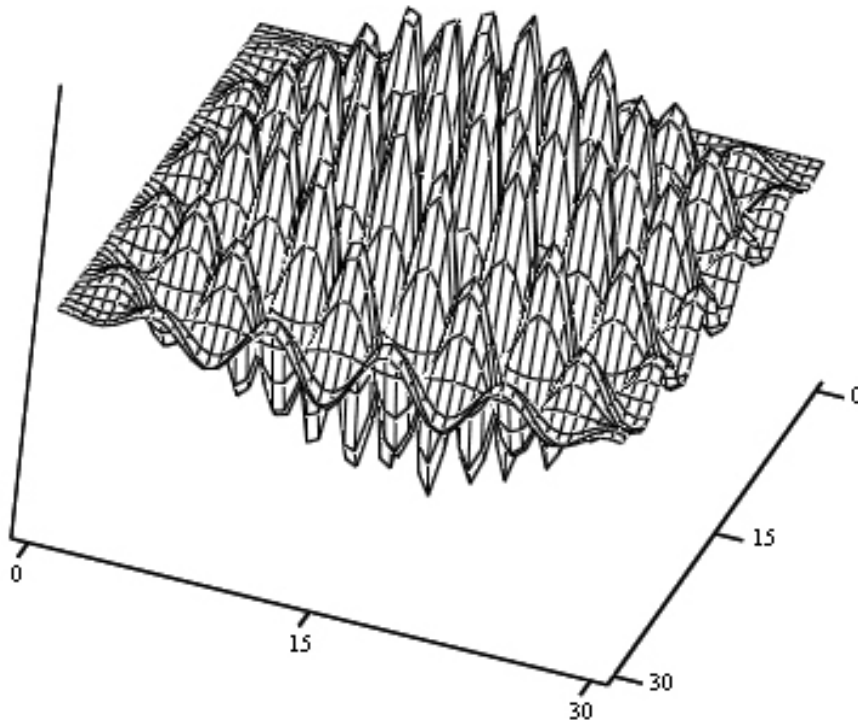


Рис. 3.6. График функции
 $y(x_1, x_2) = \sin(0,1x_1) \cdot \sin(x_1) \cdot \sin(0,1x_2) \cdot \sin(x_2)$

Данная функция имеет многочисленные и близкие по значению максимумы и глобальный максимум при $x_1 = 14,15$, $x_2 = 14,15$.

Используем программу оптимизации с помощью ГА для поиска максимума данной функции.

```
INCLUDE "UTIL"  
INCLUDE "GA"  
INCLUDE "INFIX"  
CREATE_KEYWORD "quality_function"  
  SET_INFIX_VARIABLE "x1" GA_PARAM_1  
  SET_INFIX_VARIABLE "x2" GA_PARAM_2  
  SET_INFIX_VARIABLE my_x01 my_x1  
  SET_INFIX_VARIABLE my_x02 my_x2  
  SET_VARIABLE      "my_y1"      INFIX  
sin(0.1*x1)*sin(x1)  
  SET_VARIABLE      "my_y2"      INFIX  
sin(0.1*x2)*sin(x2)  
  SET_VARIABLE "qf_result" MUL my_y1 my_y2  
  END_CREATE_KEYWORD qf_result  
GASTART_MAX 0 0 3 30 1000 0.01 0.052  
0. 30. 0. 30.      "quality_function"  
ECHO GET_BEST_GA_PARAMETER 0  
ECHO GET_BEST_GA_PARAMETER 1
```

Так как функция довольно сложная, увеличим количество поколений до 1000. Результат выполнения программы оптимизации функции $y(x_1, x_2)$ представлен на рис. 3.7.

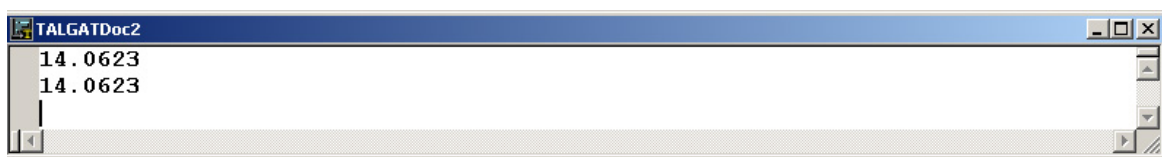


Рис. 3.7. Результаты выполнения программы оптимизации функции $y(x_1, x_2)$

Таким образом, показано успешное применение ГА для поиска глобального максимума на примере тестовых функций разной сложности.

3.4. Структура программного обеспечения

Задача синтеза проводных антенн с сосредоточенными нагрузками в общем случае включает анализ и сравнение большого числа сходных структур, потенциально обладающих необходимыми свойствами. Использование ГА позволяет автоматизировать процесс анализа, сравнения и выбора оптимальных структур в системе TALGAT. Особенность системы TALGAT состоит в открытости для включения моделей анализа разнотипных структур, что не позволяет «жестко» закодировать определенный набор функций качества. Однако наличие встроенного скриптового языка системы помогает решить эту проблему. В результате такого подхода становится возможным оптимизировать любой параметр анализируемой структуры в системе с помощью ГА (рис. 3.8).

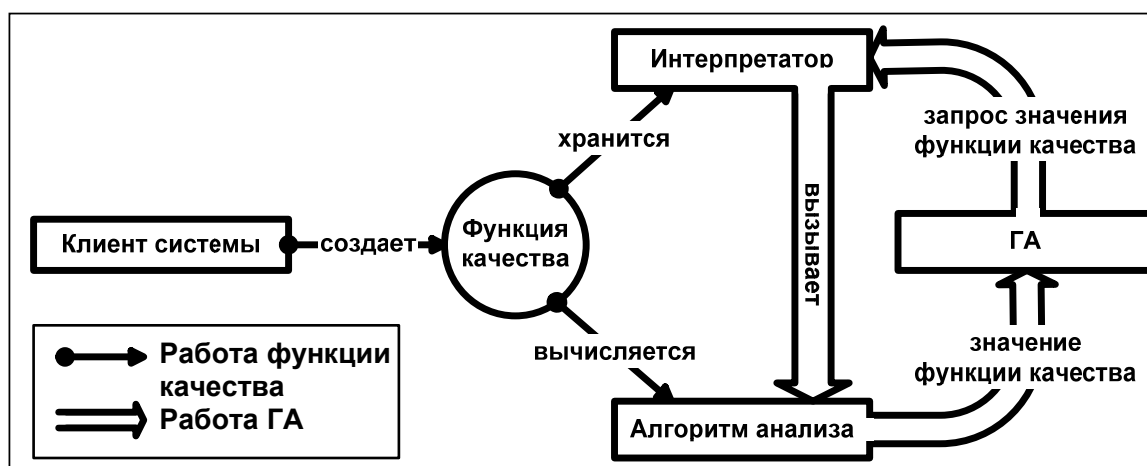


Рис. 3.8. Принцип работы ГА в программном обеспечении для моделирования проводных антенн с нагрузками

На рис. 3.8. представлены следующие функциональные элементы реализации ГА:

- 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 — динамически загружаемый модуль системы, содержащий библиотеку компонентов GAlib [88].

Принцип работы ГА может быть представлен в виде алгоритма (рис. 3.9).

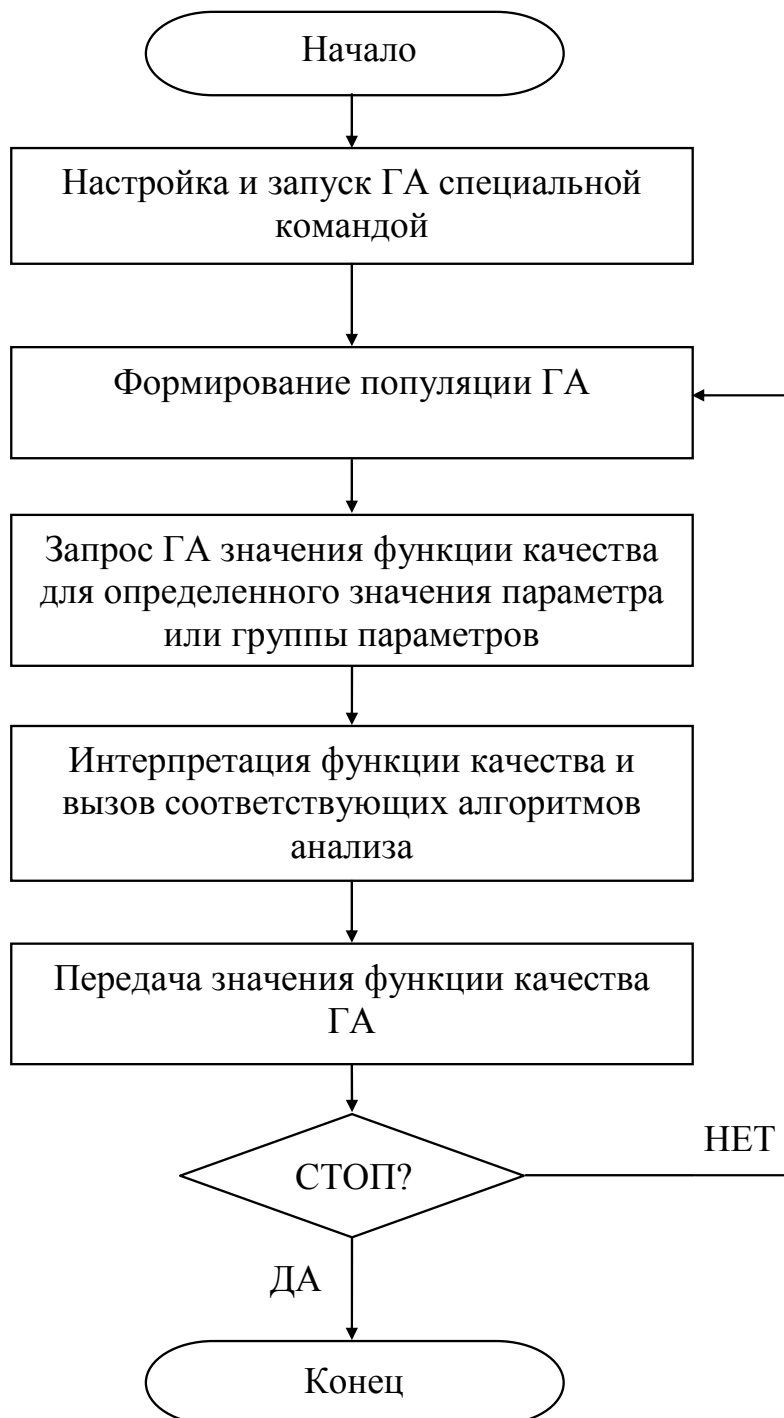


Рис. 3.9. Общий алгоритм работы ГА в программном обеспечении для моделирования проводных антенн с нагрузками

Особым элементом реализации ГА в системе является функция качества — созданная пользователем команда на скриптовом языке.

Из рис. 3.8 видно, что функция качества хранится интерпретатором и при необходимости может быть вычислена с помощью алгоритмов анализа. При этом значения параметров функции качества внутри пользовательской команды являются переменными и пользователь может использовать их по своему усмотрению (например, в качестве одного из геометрических параметров структуры для его оптимизации).

Разработанная система моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками является модульной и включает интерпретатор, вычислительные модули, модуль оптимизации (рис. 3.10).

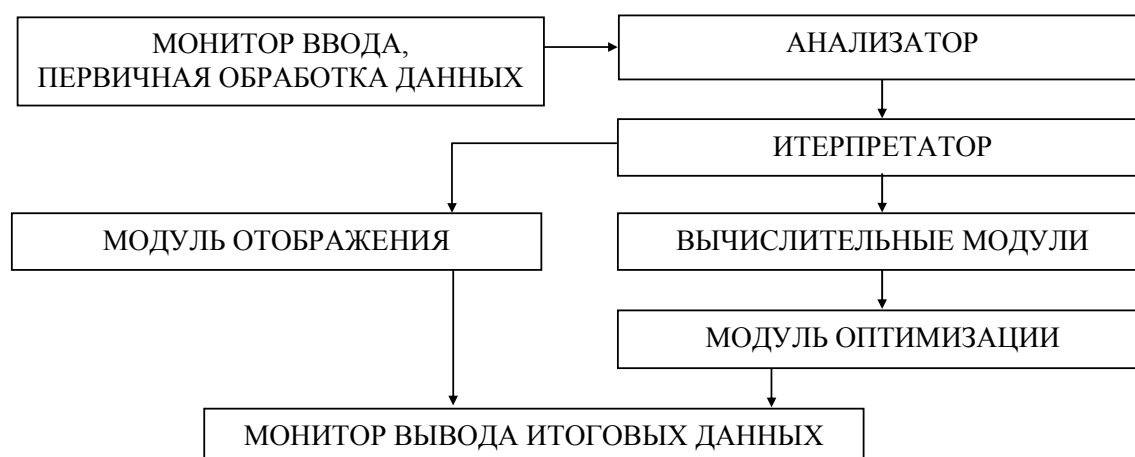


Рис. 3.10. Структурная схема программного обеспечения для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками

3.5. Информационное и алгоритмическое обеспечение

Для определения нужных характеристик антенны необходимо задать исследуемую проводную структуру в виде входного файла. При этом каждый провод антенны с нагрузками или без задается отдельно в виде структуры. Представим алгоритм учета сосредоточенной нагрузки при моделировании проводных антенн, реализованный в разработанной системе (рис. 3.11).

Параметры и места включения сосредоточенных нагрузок задаются отдельно.

К параметрам функции включения нагрузок относятся: номер провода (TAG); тип нагрузки (LOAD_PARALLEL_SUBSECTION,

LOAD_SERIAL_SUBSECTION); номер сегмента, в который включена данная нагрузка; значения сопротивления, индуктивности и емкости.

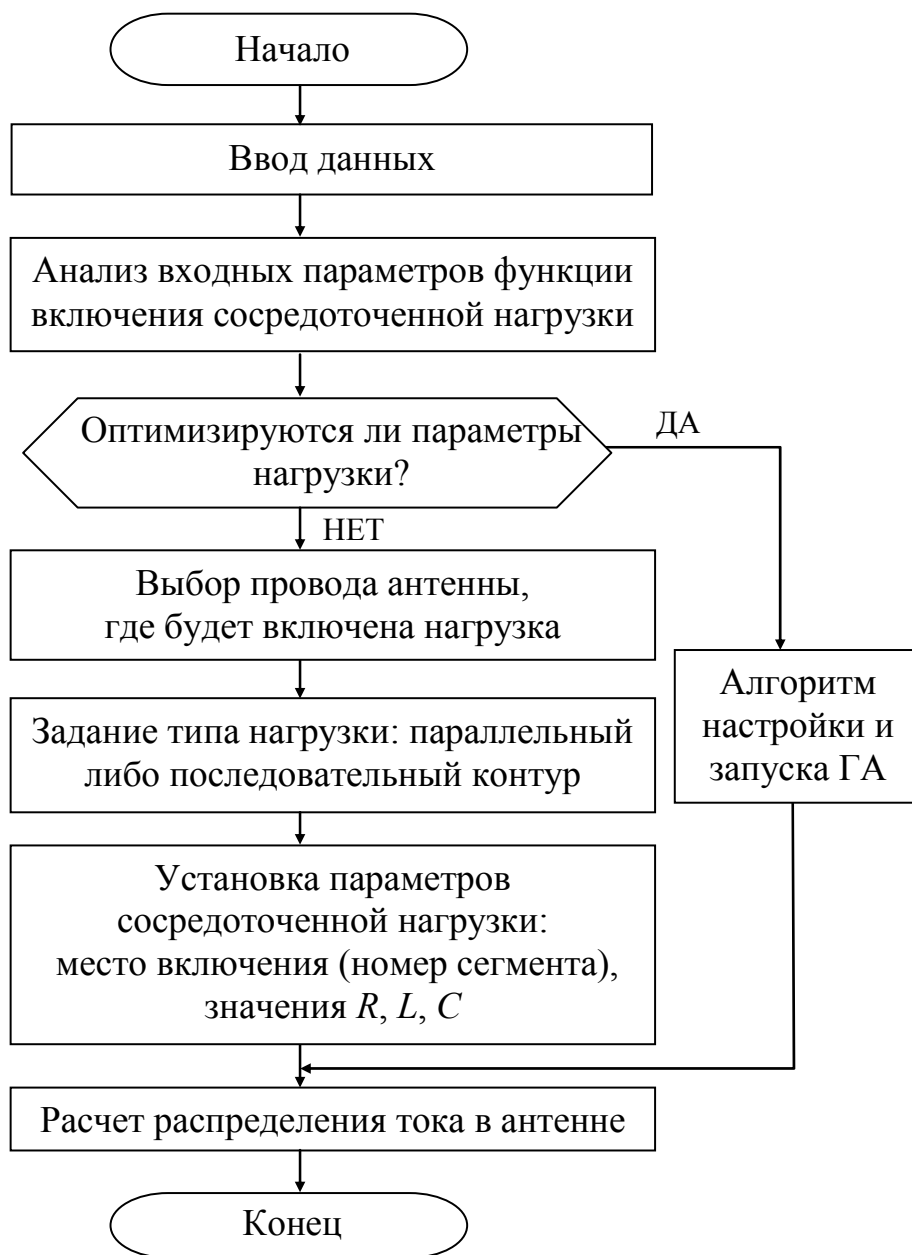


Рис. 3.11. Схема алгоритма включения сосредоточенной нагрузки в структуру антенны

Пример задания одного провода с сосредоточенной нагрузкой в виде параллельного RLC -контур ($R = 820$ Ом, $L = 7,85$ мкГн, $C = 5$ пФ):


```

SET_TAG 1
SET_SUBSECTIONS 300
BEGIN 0.00000000e+000      1.50000000e-00 2
1.80000000e+001
END 3.00000000e+001      1.60000000e+001
1.58000000e+000
RADIUS 3.00000000e-003
CREATE_WIRE
FOR_WIRE_TAG 1 LOAD_PARALLEL_SUBSECTION 273
8.20000000e+002  7.85000000e-006
5.00000000e-012

```

Особое место при моделировании проводных антенн с сосредоточенными нагрузками занимает оптимизация. Любая задача оптимизации с точки зрения информационного обеспечения сводится к заданию критерия оптимизации и начальных установок оптимизации. Реализация оптимизации в модуле выполнена в виде обычного обращения к функции, называемой функцией оптимизации. В программном обеспечении для моделирования проводных антенн с нагрузками критерием оптимизации служит минимизация или максимизация значения функции качества, а для установок работы самого алгоритма используются параметры функции оптимизации. Основное требование к функции качества — возврат необходимого значения для дальнейшего использования в функции оптимизации. Задание функции качества в общем виде выглядит следующим образом:

```

CREATE_KEYWORD "ИМЯ_ФУНКЦИИ_КАЧЕСТВА"
АНАЛИЗИРУЕМАЯ_СТРУКТУРА
ВЫЧИСЛЕНИЕ_ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ_ХАРАКТЕРИСТИК
END_CREATE_KEYWORD ИМЯ_ПЕРЕМЕННОЙ
(ЗНАЧЕНИЕ_ФУНКЦИИ_КАЧЕСТВА)

```

Задание функции оптимизации в общем виде на примере минимизации функции:

```

GA_MIN ПАРАМЕТРЫ_ФУНКЦИИ_ОПТИМИЗАЦИИ
"ИМЯ_ФУНКЦИИ_КАЧЕСТВА"

```

Представим схему взаимодействия данных в модуле оптимизации в общем виде (рис. 3.12).



Рис. 3.12. Структура информационного обеспечения системы моделирования проводных антенн с нагрузками

Из рис. 3.12 видно, что входными параметрами программного обеспечения для моделирования проводных антенн с нагрузками являются параметры анализируемой структуры и диапазон их изменения, необходимые электродинамические характеристики, критерий оптимизации, параметры ГА и условие останова (как правило, определяется количеством поколений и задается в параметрах ГА), а выходным параметром — оптимальная структура. В итоге настройку параметров и запуск работы ГА можно представить в виде алгоритма (рис. 3.13).

Теперь получим алгоритм работы полного программного обеспечения для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками (рис. 3.14).



Рис. 3.13. Схема алгоритма настройки и запуска ГА в системе моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками



Рис. 3.14. Алгоритм работы программного обеспечения для моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками

3.6. Графическое отображение

Наличие графического отображения является одним из первых требований пользователя к программному обеспечению. Как правило, ввод необходимой структуры осуществляется пользователем через ввод координат. Поэтому важно «видеть» вводимую структуру, чтобы иметь возможность проверить ее схожесть с исходной. Отображение также необходимо для выявления ошибок непосредственно при вводе структуры: желаемая структура не будет отображаться (либо будет отображаться некорректно), если входной файл не отвечает основным требованиям входного файла системы. Также при наличии отображения легко увидеть опечатки при вводе. Поэтому отображение является обязательной составляющей системы.

Для реализации отображения в системе TALGAT использован один из самых популярных прикладных программных интерфейсов для разработки приложений двумерной и трехмерной графики — OpenGL. Сегодня графическая система OpenGL поддерживается большинством аппаратных и программных платформ. В частности, эта система доступна тем, кто работает в операционных системах семейства Windows. Среди причин выбора именно этой графической системы наиболее важными являются следующие.

1. Надежность и переносимость. Приложения, использующие OpenGL, гарантируют одинаковый визуальный результат вне зависимости от типа используемой операционной системы и организации отображения информации. Кроме того, эти приложения могут выполняться как на персональных компьютерах, так и на рабочих станциях и суперкомпьютерах.

2. Легкость применения. Стандарт OpenGL имеет продуманную структуру и интуитивно понятный интерфейс, что позволяет с меньшими затратами создавать эффективные приложения, содержащие меньше строк кода, чем с использованием других графических библиотек. Необходимые функции для обеспечения совместимости с различным оборудованием реализованы на уровне библиотеки и значительно упрощают разработку приложений.

3. OpenGL состоит из набора библиотек. Все базовые функции хранятся в основной библиотеке GL. Помимо основной библиотеки, OpenGL включает в себя несколько дополнительных библиотек. В системе использовались две из них: GLU и GLAUX. В состав

первой входит реализация более сложных геометрических примитивов (плоскость, куб и т.д.) и дополнительные операции над матрицами. Вторая является специальной переносимой библиотекой для обеспечения часто используемых функций взаимодействия с пользователем и отображения информации с помощью оконной подсистемы.

4. Отображение трехмерных структур. Любой входной файл трехмерной структуры для системы содержит ее координаты относительно плоскости Земли. Этих данных достаточно для отображения трехмерной структуры. Алгоритм построения графического отображения исходной структуры представлен на рис. 3.15.

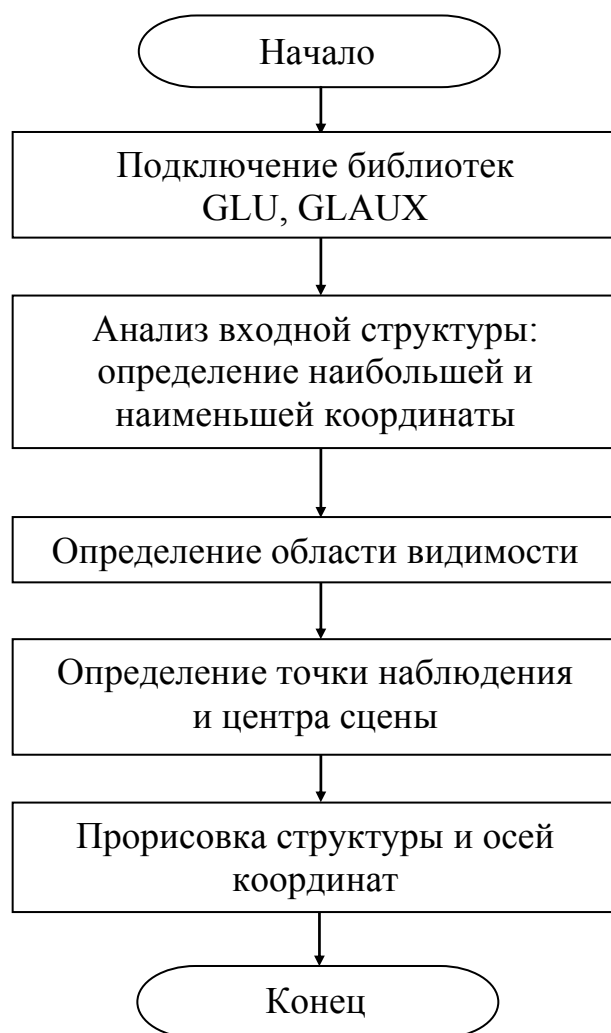


Рис. 3.15. Схема алгоритма построения графического отображения исходной структуры

При реализации отображения трехмерной структуры масштабирование осуществляется за счет определения точки наблюдения

и центра «сцены», которые вычисляются из исходных координат структуры. При отображении трехмерной структуры базисные векторы (x ; y ; z) образуют правовинтовую систему. Центром «сцены» является точка, координаты которой равны минимальной координате исходной структуры.

При отображении трехмерной структуры черным цветом отображается структура антенны, синими параллелепипедами — сосредоточенные нагрузки (их центры соответствуют местам включения фильтров), красным цветом — места включения источников. Имеется возможность перемещаться вокруг отображаемой структуры в декартовой системе координат, используя клавиши «ВВЕРХ», «ВНИЗ», «ВПРАВО», «ВЛЕВО», и масштабировать изображение «сцены» за счет клавиш «PgUp», «PgDown». Таким образом, в системе реализовано отображение трехмерных проводных структур с сосредоточенными нагрузками.

3.7. Интерфейс: использование DHTML-диалогов

Система TALGAT содержит встроенный интерпретируемый скриптовый язык TALGAT_Script, с помощью которого пользователь «общается» с ней. TALGAT_Script представлен набором команд для работы с системой. Однако не всегда удобно представлять конечный результат работы в виде входного файла с соответствующим набором команд. Особенно сложно восприятие последовательности команд TALGAT_Script для человека, никогда не работавшего с системой. Для облегчения работы с системой используются встроенные DHTML-диалоги.

DHTML (Dynamic Hyper Text Mark-up Language) — динамический язык гипертекстовой разметки. За использование DHTML-диалогов в системе отвечает модуль DHTML [89]. Технология DHTML предназначена для создания web-интерфейса в MFC-приложениях (которым и является система TALGAT). Под формулировкой «приложение с web-интерфейсом» подразумевается то, что пользовательский интерфейс или его часть в приложении создается на основе HTML. DHTML способен обеспечить при создании web-документов использование языков сценариев, поэтому документы HTML могут изменяться как сами, так и с помощью внешних или встроенных программ. В сущности, DHTML представляет собой модифицированную форму HTML, объединенную

с Cascaded Style Sheets (CSS) и Extensible Markup Language (XML). То есть при вызове DHTML-диалога в системе можно использовать HTML-язык для создания интерфейса, позволяющего изменять входной файл системы (параметры исследуемой структуры, параметры используемых команд). Также можно использовать любой HTML-редактор (Dreamweaver) [90] для создания элементов дизайна в диалоге, что улучшает визуальное восприятие подаваемой информации.

Модуль DHTML позволяет с помощью интерфейса пользователя изменять входной файл системы, применяя HTML. (Предполагается, что пользователь знаком с основными тегами HTML и основами web-программирования.) Сначала необходимо загрузить модуль DHTML:

```
INCLUDE «UTIL»  
CHECK_CORE_VERSION 6000  
INCLUDE "VisualClient.exe" "DHTML"
```

Ниже приведен пример использования наиболее часто встречающихся HTML-объектов, а именно таблицы, RADIOBUTTON, BUTTON, CHECKBOX, EDITBOX, RADIOBUTTON_GROUP. Также показана работа команды LOAD_BODY, позволяющей использовать непосредственно HTML (загрузка таблицы).

```
SET_SCROLL_BARS 1  
SET_VARIABLE "VARIABLE_1" 0  
CREATE_KEYWORD "cb_VARIABLE_1" SET_VARIABLE  
"VARIABLE_1" 0  
END_CREATE_KEYWORD  
SET_VARIABLE "GA_TYPE0" 0  
CREATE_KEYWORD "cb_GA_TYPE0" SET_VARIABLE  
"GA_TYPE0" 1  
END_CREATE_KEYWORD  
CREATE_KEYWORD "cb_GA_TYPE1"  
SET_VARIABLE "GA_TYPE0" 1  
END_CREATE_KEYWORD  
CREATE_KEYWORD "cb_GA_TYPE2"  
SET_VARIABLE "GA_TYPE0" 2  
END_CREATE_KEYWORD  
SET "check_state" TO_STRING "unchecked"
```



```

CREATE_KEYWORD "cb_check"
  SET_PROPERTY "my_edit" "size" TO_STRING PLUS
TO_LONG GET_PROPERTY "my_edit" "size" 5
  IF EQU check_state TO_STRING "unchecked"
  THEN SET "check_state" TO_STRING "checked"
  THEN SET_PROPERTY "my_edit" "value"
check_state
  THEN NULL
  IF EQU check_state TO_STRING "checked"
  THEN SET "check_state" TO_STRING "unchecked"
  SET_PROPERTY "my_edit" "value" check_state
END_CREATE_KEYWORD
CLEAR_BODY
LOAD_BODY PLUS GET_DIRECTORY dhtml/table.htm
TEXT <CENTER>
TEXT LINE_TO_STRING пример использования
RADIOBUTTON
TEXT <br>
RADIOBUTTON VARIABLE1 "cb_VARIABLE1"
TEXT VARIABLE1
TEXT </CENTER>
TEXT <CENTER>
TEXT LINE_TO_STRING пример использования
BUTTON
TEXT <br>
TEXT <tr>
BUTTON "nil" "HIDE_DIALOG" Применить
TEXT </tr>
TEXT </CENTER>
TEXT <CENTER>
TEXT <tr>
TEXT LINE_TO_STRING пример использования
CHECKBOX
TEXT <br>
CHECKBOX "my_check" "cb_check"
TEXT LINE_TO_STRING click me pliz
TEXT <tr>
TEXT LINE_TO_STRING пример использования
EDITBOX
TEXT <br>
EDITBOX "my_edit" "/" check_state
TEXT <tr>

```

```

TEXT LINE_TO_STRING пример использования
группового RADIOBUTTON`a
TEXT <br>
RADIOBUTTON_GROUP "a1" "cb_GA_TYPE0" "group1"
RADIOBUTTON_GROUP "a2" "cb_GA_TYPE1" "group1"
RADIOBUTTON_GROUP "a3" "cb_GA_TYPE2" "group1"
SHOW_DIALOG
SET_WINDOW_POS 0 0 1024 700

```

Отметим, что файл, из которого происходит загрузка HTML-кода, должен содержать ту часть кода, которая находится между тегами `<body>` `</body>`. Также можно использовать любой HTML-тег, если перед ним будет стоять команда `TEXT`. Все, что касается HTML-кода, необходимо писать после команды `CLEAR_BODY`. Как только все необходимые для создания DHTML-диалога команды будут написаны, нужно задать команду `SHOW_DIALOG`. Дополнительные команды:

`SET_SCROLL_BARS 1` — включение вертикального скрола в диалоге (по умолчанию отсутствует);

`SET_WINDOW_POS 0 0 1024 700` — параметры окна диалога (в пикселях): расположение на экране (координаты x, y левого верхнего угла будущего диалога), размер диалога (ширина, высота). (По умолчанию диалог находится в центре экрана с размерами окна 500×500 .)

Результат выполнения листинга примера использования основных объектов HTML представлен на рис. 3.16.

Элементы DHTML-диалогов и соответствующие им команды скриптового языка `TALGAT_Script` представлены в табл. 3.3.

Применение DHTML-диалога для оптимизации функции двух переменных показано на рис. 3.17. При этом пользователь может изменять как параметры работы ГА, так и расположение максимумов оптимизируемой функции.

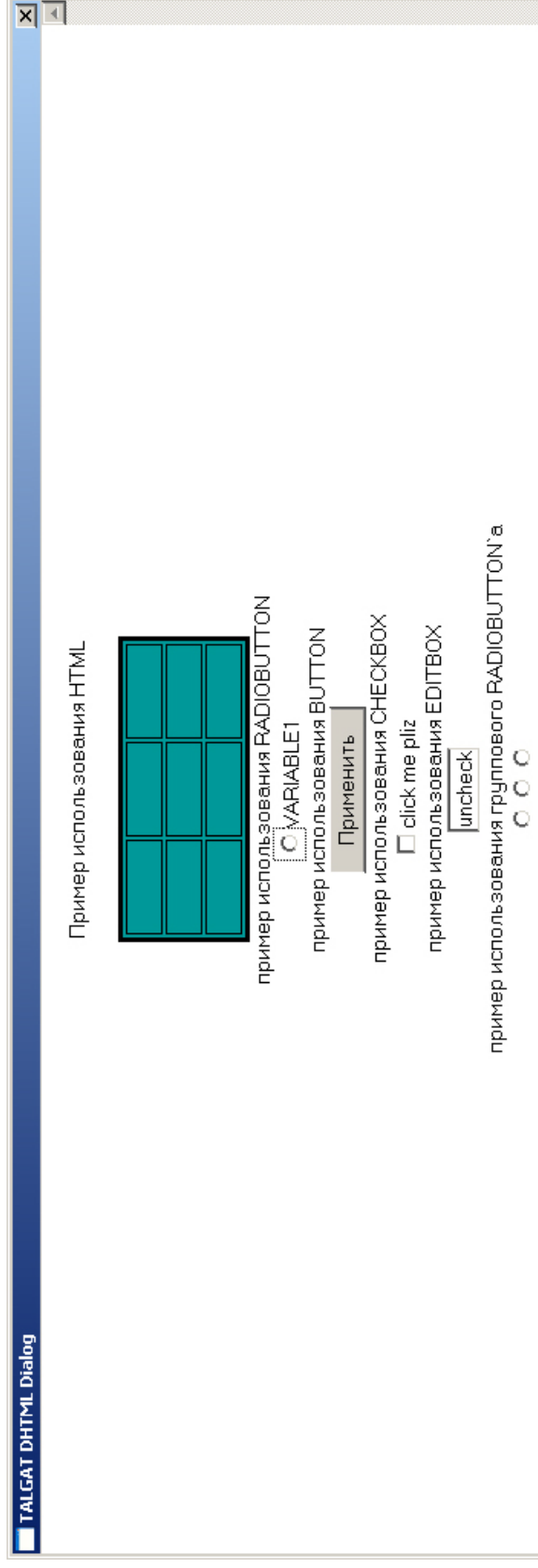


Рис. 3.16. Результат выполнения листинга примера использования объектов HTML

Таблица 3.3

Основные элементы DHTML-диалогов

Вид	Название	Команда TALGAT_Script
<input checked="" type="radio"/> VARIABLE1	RADIOBUTTON	[RADIOBUTTON]:bool RADIOBUTTON string_id string_callback
Применить	BUTTON	[BUTTON]: bool BUTTON string_id string_callback string_caption
<input type="text"/>	EDITBOX	[EDITBOX]: bool EDITBOX string_id string_callback string_caption
<input checked="" type="checkbox"/>	CHECKBOX	[CHECKBOX]: bool CHECKBOX string_id string_callback
<input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/>	RADIOBUTTON_GROUP	[RADIOBUTTON_GROUP]: bool RADIOBUTTON_GROUP string_id string_callback string_group

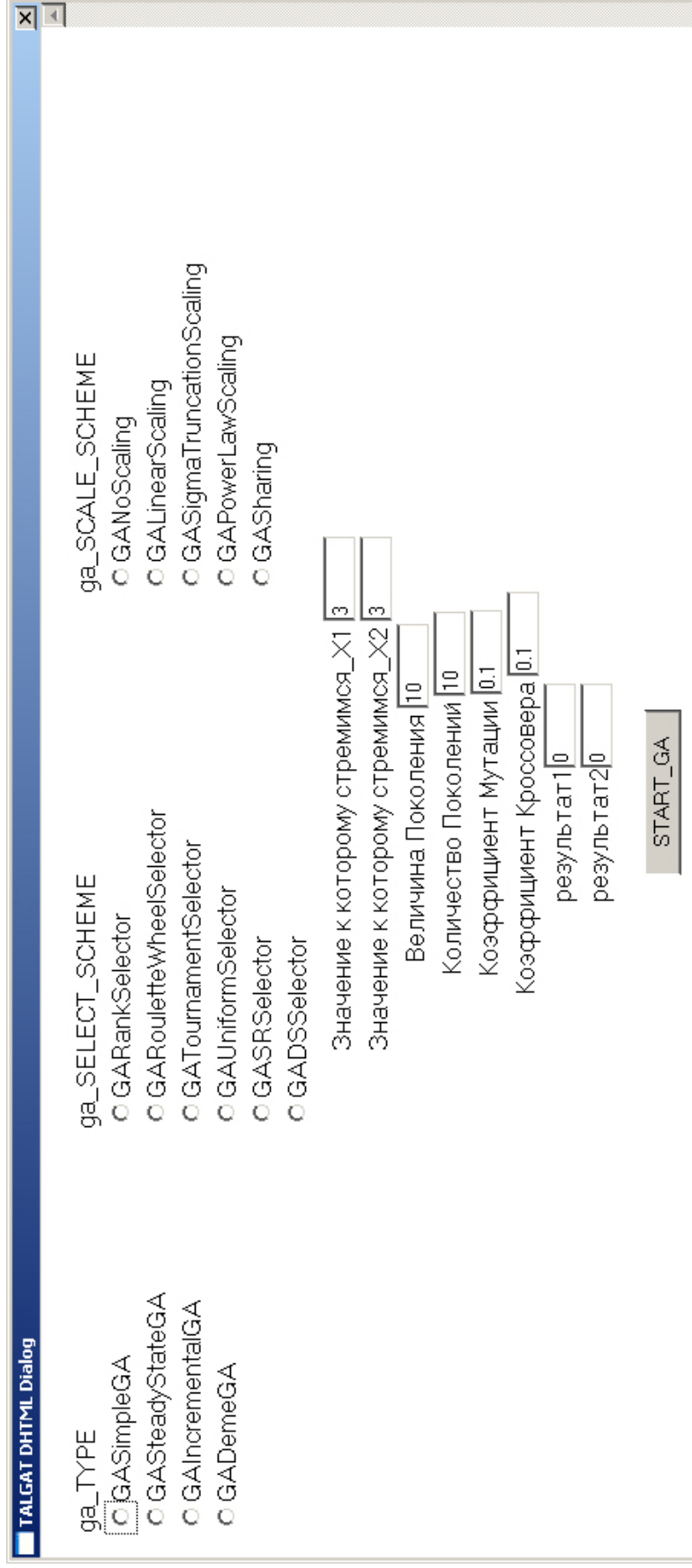


Рис. 3.17. Пример использования DHTML-диалога для оптимизации функции двух переменных

Таким образом, предлагается использовать DHTML-диалоги для представления конечного результата работы в системе вместо стандартного входного файла с соответствующим набором команд TALGAT_Script.

3.8. Исследование точности решения СЛАУ методом Гаусса

Исследуем точность решения систем линейных алгебраических уравнений методом Гаусса в зависимости от числа обусловленности, порядка матрицы и точности представления чисел. Для разного представления чисел покажем зависимость требуемого количества байтов от порядка матрицы [91, 92].

Электродинамический анализ проводных антенн с нагрузками сводится к решению СЛАУ. Существует несколько подходов к этой задаче. Одним из наиболее известных является метод Гаусса, однако в работе [93] показана его несостоятельность на примере матрицы Гильберта. При увеличении ее порядка число обусловленности сильно возрастает, что ведет к резкому росту ошибки решения. Но авторы используют 24-разрядные числа, причем рассматривают матрицы довольно малых порядков: весь анализ строится на примере матриц Гильберта 4, 5 и 6-го порядка.

Однако в современных персональных компьютерах количество разрядов для представления чисел с плавающей запятой составляет 32 (тип float), 64 (тип double), 80 (тип long double). С другой стороны, современные задачи вычислительной электродинамики требуют решения СЛАУ порядка в несколько десятков тысяч [94]. Поэтому важно оценить точность решения СЛАУ при данных параметрах.

Верхняя граница для точности решения методом Гаусса определяется выражением

$$\frac{\|\Delta X\|_2}{\|\Delta X\|} = \frac{2^{-t} [\sqrt{N} + 1] \text{cond}[\mathbf{A}]}{1 - \sqrt{N} \text{cond}[\mathbf{A}] 2^{-t}},$$

где t — количество бинарных разрядов представления числа; N — порядок матрицы $[\mathbf{A}]$; $\text{cond}[\mathbf{A}]$ — число обусловленности, равное отношению максимального и минимального собственных значений матрицы $[\mathbf{A}]$.

Исследуем точность решения в зависимости от изменения порядка матрицы с 10^2 до 10^5 при числе разрядов, равном 24 (как это сделано в работе [93]), а также 32, 64 и 80 (в соответствии со стандартными типами данных), и при трех значениях числа обусловленности: 1, 10^3 , 10^6 . Соответствующие графики показаны на рис. 3.18.

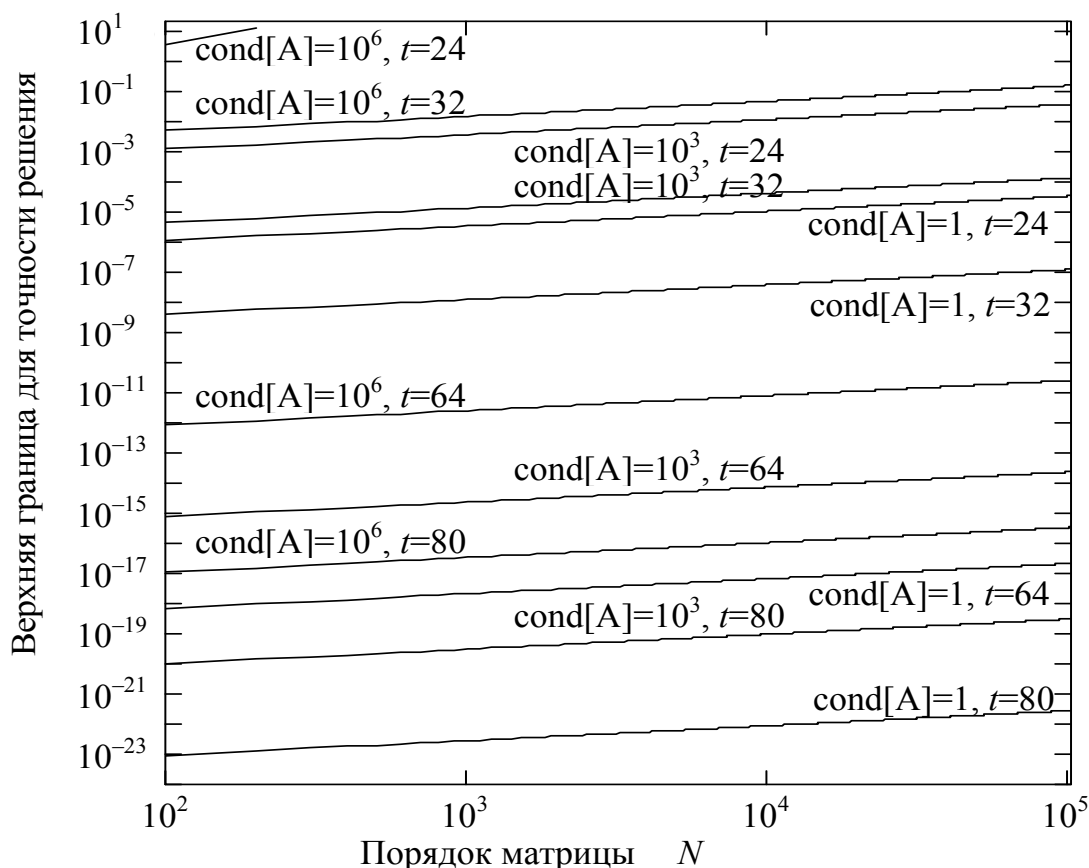


Рис. 3.18. Зависимость верхней границы точности решения СЛАУ от порядка матрицы для различной обусловленности и точности представления чисел

Из рис. 3.18 можно сделать следующие выводы.

1. Прежде всего видно, что при увеличении N во всем диапазоне точность решения ухудшается всего на один-два порядка (за исключением самого верхнего графика).
2. Рост числа обусловленности матрицы на три порядка ухудшает точность решения также приблизительно на три порядка.
3. Переход от 24 разрядов к большему числу разрядов резко улучшает точность решения и значительно расширяет область применимости метода Гаусса. Так, большая ошибка для числа обуслов-

ленности 10^6 при 24 разрядах (самый верхний график) становится гораздо меньшей (второй сверху график) для малых N уже при 32 разрядах и совершенно незначительной при 64 разрядах.

4. При снижении числа обусловленности от 10^6 до 10^3 ошибка становится вполне приемлемой (третий график сверху) во всем диапазоне изменения N даже для 24-разрядных чисел и совершенно незначительной уже при 32 разрядах.

5. Все остальные графики (ниже третьего сверху) дают точность решения лучше 10^{-4} , что удовлетворительно в большинстве практических приложений.

6. Применение повышенной разрядности чисел, особенно при хорошо обусловленных матрицах, является избыточным, во всяком случае для решения СЛАУ с заданной точностью.

В связи с последним выводом важно отметить, что в современных персональных компьютерах все расчеты с числами с плавающей запятой проводятся в математическом сопроцессоре с 80 разрядами. Таким образом, даже при числе обусловленности 10^6 точность решения получается лучше 10^{-15} , что очень избыточно. Поэтому единственным резонаном использования чисел меньшей разрядности остается уменьшение объема памяти для хранения матрицы. Действительно, количество байтов для хранения матрицы из N^2 комплексных чисел разрядностью t равно $2N^2t/8$. Зависимость требуемого количества байтов от порядка матрицы N для различной точности представления чисел t показана на рис. 3.19.

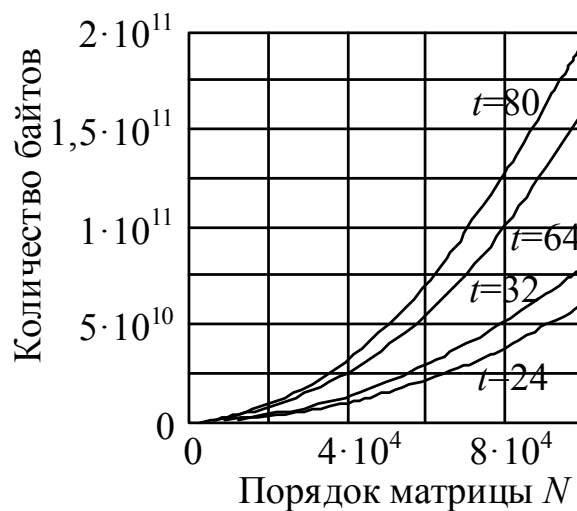


Рис. 3.19. Зависимость требуемого количества байтов от порядка матрицы для различной точности представления чисел

Например, из графика видно, что для матрицы порядка 10^5 при разрядности чисел, равной 80, необходимо 200 Гбайт памяти, тогда как снижение разрядности до 32 требует уже 80 Гбайт.

Таким образом, выводы работы [93] по поводу несостоятельности метода Гаусса для решения СЛАУ больших порядков и с большими числами обусловленности справедливы лишь при использовании чисел с 24 разрядами. Так как в современных процессорах все вычисления проводятся с числами, представленными 80 разрядами, метод Гаусса вполне применим независимо от порядка матрицы и, что самое важное, независимо от ее числа обусловленности.

3.9. Тестирование

С целью тестирования разработанного программного обеспечения проведем сравнение значений КСВ для одинаковых антенн в системах TALGAT и 4NEC2 [95]. Для каждого сравнения будем рассчитывать среднеквадратичное отклонение δ_x по формуле

$$\delta_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2},$$

где x_i^* — значение КСВ, полученное для i -й частотной точки в TALGAT; x_i — значение КСВ, полученное для i -й частотной точки в 4NEC2; n — количество частотных точек.

Сравнение КСВ в диапазоне частот от 70 до 130 МГц для сложной антенны без нагрузок, структура которой представлена на рис. 3.20, с данными, полученными в системе 4NEC2, показано на рис. 3.21.

Общий характер кривых, представленных на рис. 3.21, близок ($\delta_x = 3,64$). Расчет среднеквадратичного отклонения приведен для частотных точек, которые попадают в рабочий диапазон данной антенны (85–105 МГц). Расхождения объясняются различными моделями для расчета распределения тока и довольно сложной формой антенны.

Выполним сравнение результатов, полученных в системах TALGAT и 4NEC2, для структур с различными нагрузками.

1. КСВ в диапазоне частот от 50 до 300 МГц для структуры «диполь» с двумя нагрузками (рис. 3.22) в виде параллельного контура ($R=10$ Ом, $L=100$ мкГн, $C=100$ пФ). Результаты сравнения представлены на рис. 3.23.

2. КСВ для той же структуры «диполь» с двумя нагрузками с теми же параметрами, но в виде последовательного контура. Результаты сравнения представлены на рис. 3.24.

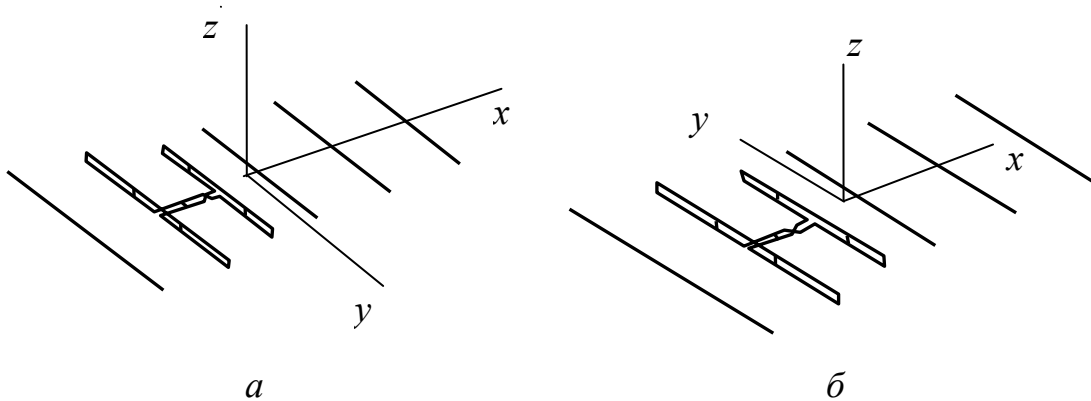


Рис. 3.20. Вид исследуемой антенны в программных системах:
a – TALGAT; *б* – 4NEC2

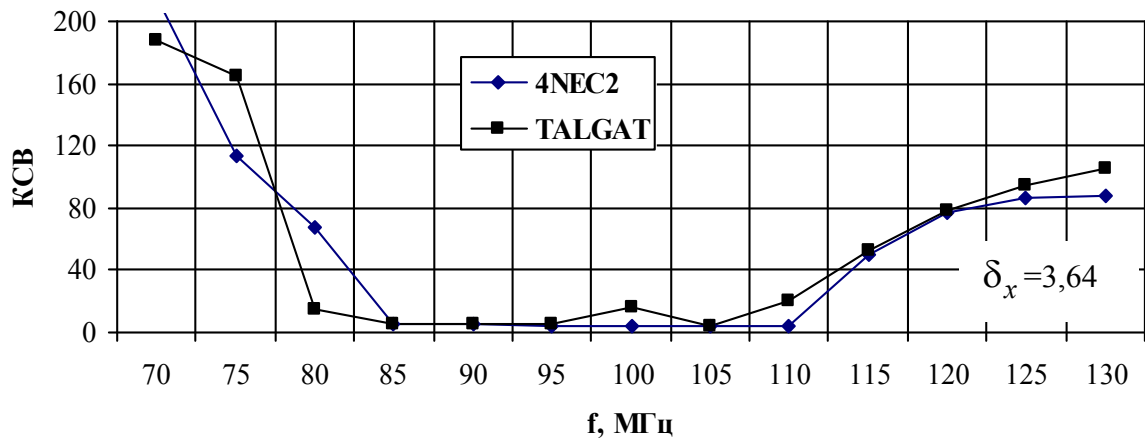


Рис. 3.21. Частотная зависимость КСВ
 исследуемой антенны сложной формы в программных
 системах TALGAT и 4NEC2

Как видно, результаты очень хорошо совпадают ($\delta_x = 0,03$ и $\delta_x = 0,02$), что говорит о корректности программной реализации учета последовательных и параллельных нагрузок при моделировании проводных антенн в системе TALGAT.

Рис. 3.22. Общий вид структуры «диполь» с двумя нагрузками

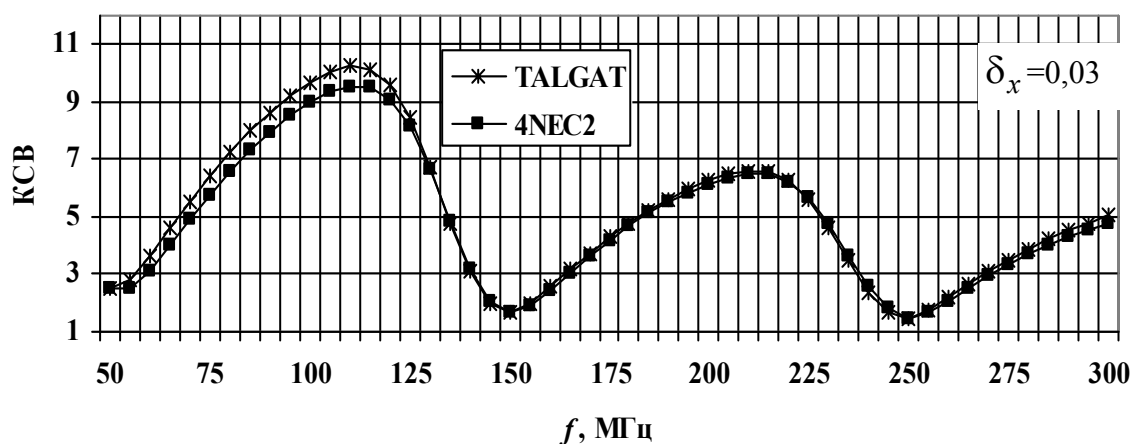
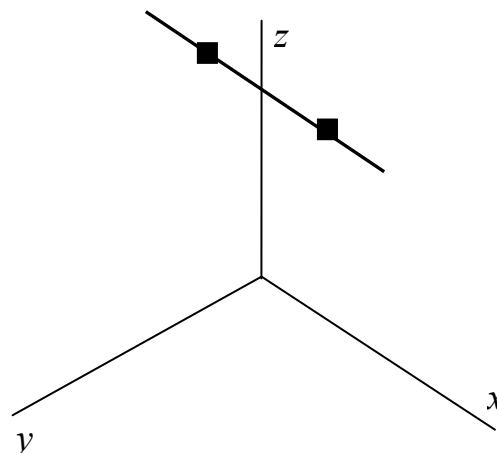


Рис. 3.23. Частотная зависимость КСВ структуры «диполь» с двумя нагрузками в виде параллельного контура в программных системах TALGAT и 4NEC2

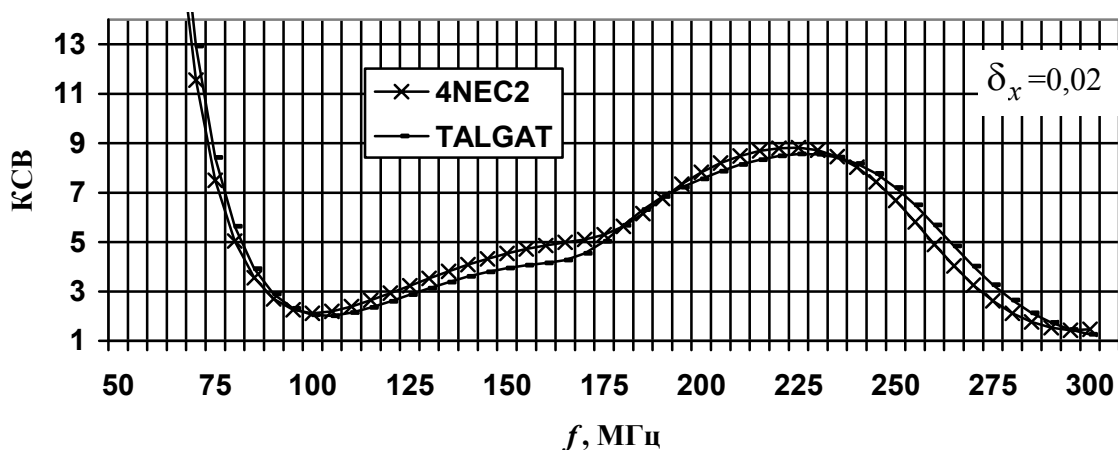


Рис. 3.24. Частотная зависимость КСВ структуры «диполь» с двумя нагрузками в виде последовательного контура в программных системах TALGAT и 4NEC2

Исследуем антенну с большим числом нагрузок, структура и диаграмма направленности (модуль вектора напряженности электрического поля для частоты 5 МГц) которой представлены на рис. 3.25, а описание сосредоточенных нагрузок (в виде 10 параллельных RLC -контуров) — в табл. 3.4. Сравнение КСВ в диапазоне частот от 5 до 30 МГц, полученного в системах TALGAT и 4NEC2, показано на рис. 3.26. Видно хорошее совпадение ($\delta_x = 1,62$) даже при большом количестве нагрузок.

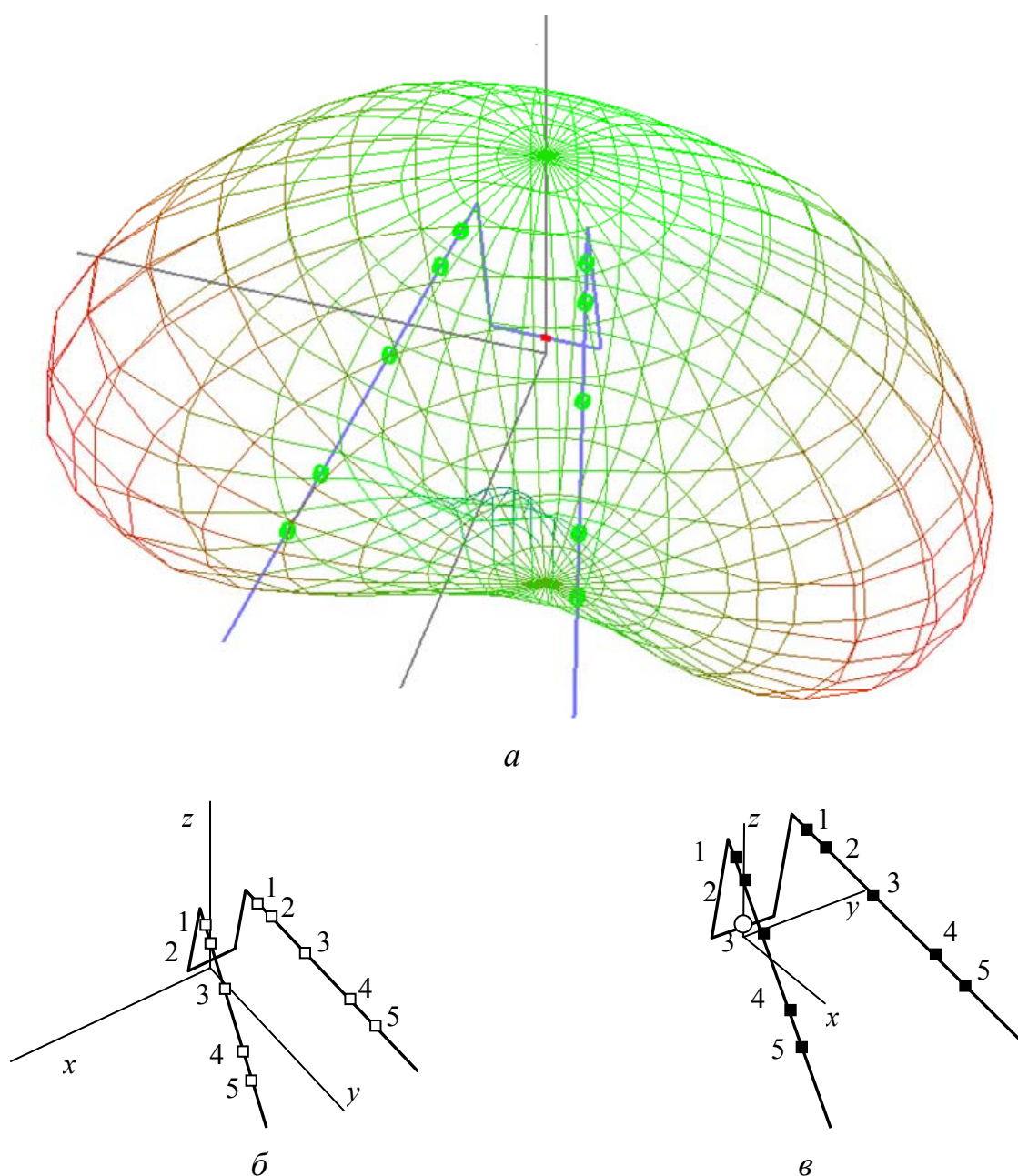


Рис. 3.25. Вид исследуемой антенны с 10 параллельными нагрузками: *а* – с диаграммой направленности на частоте 5 МГц; *б* – в системе TALGAT; *в* – в системе 4NEC2

Таким образом, из рис. 3.21, 3.23–3.25 видно, что результаты, полученные в системе TALGAT, совпадают с результатами, полученными в программе 4NEC2. Соответственно методика Альтмана, используемая при учете сосредоточенных нагрузок в системе TALGAT, реализована верно.

Таблица 3.4

Параметры нагрузок исследуемой антенны (см. рис. 3.25)

Номер фильтра	Номер сегмента	R , Ом	L , мкГн	C , пФ
1	94	810,0	7,85	5,0
2	86	810,0	19,8	5,0
3	66	810,0	62,54	5,0
4	39	810,0	121,8	10,0
5	26	810,0	150,7	10,0

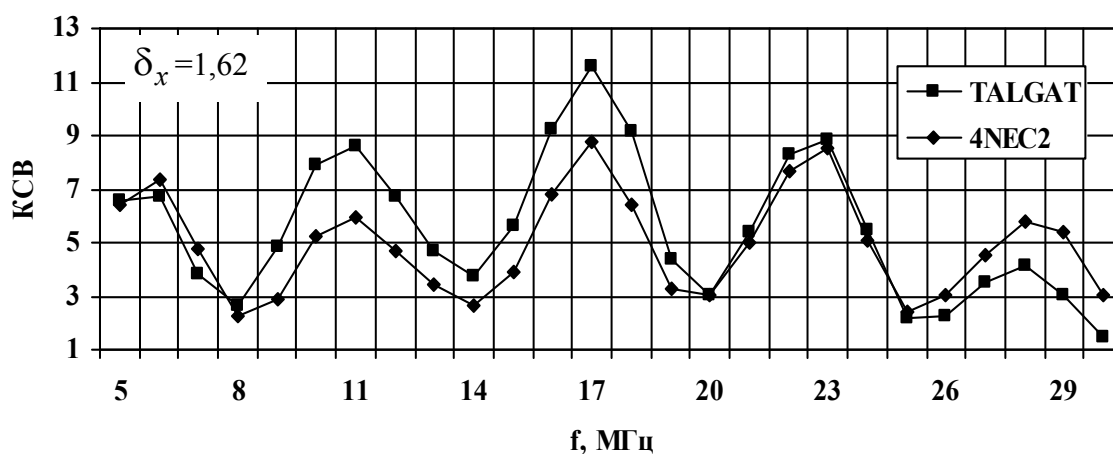


Рис. 3.26. Частотная зависимость КСВ антенны с 10 нагрузками в программных системах TALGAT и 4NEC2

4. Оптимизация сосредоточенных нагрузок при моделировании проводных антенн

4.1. Методология снижения КСВ антенн за счет использования сосредоточенных нагрузок

Анализ существующих подходов к проектированию антенн и опыт автора по их практической реализации позволили сформулировать методологию снижения КСВ антенны за счет оптимизации генетическими алгоритмами параметров и мест включения сосредоточенных нагрузок, включающую следующие этапы.

1. Эмпирический этап. Анализ требований технического задания, учет особенностей геометрии и условий работы проектируемой 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 — неточными, возможны отличия исходных параметров от реальных, которые трудно учесть.

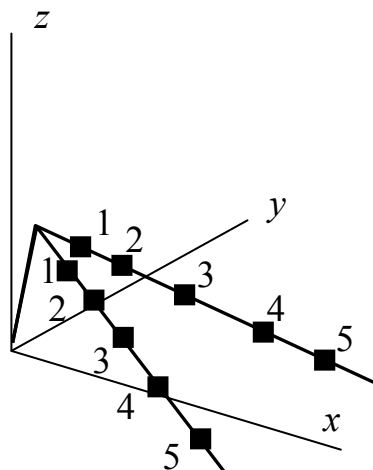
С использованием данной методологии создана широкополосная антенная система для работы в декаметровом диапазоне.

4.2. Поэтапная оптимизация отдельных параметров антенны на основе генетических алгоритмов

В качестве примера использования ГА для оптимизации характеристик антенн рассмотрим оптимизацию реальной антенны с помощью программного продукта 4NEC2 [96, 97]. Исходная структура антенны показана на рис. 4.1, где квадратами отмечено расположение фильтров (RLC , параллельное соединение).

Задача оптимизации состояла в достижении минимума КСВ в диапазоне частот 1–30 МГц. При этом проводилась оптимизация как целых групп фильтров для сохранения симметрии, так и асимметричная оптимизация. Отдельно оптимизировалась первая пара фильтров, так как их влияние на КСВ значительно, чем влияние других фильтров.

Рис. 4.1. Исходная структура антенны с нумерацией фильтров



Оптимизация проходила в три этапа.

1. Оптимизация расположения групп фильтров (первые три фильтра). Переменными являлись номера сегментов первых фильтров. При этом два последующих фильтра были жестко закреплены за первыми, что обеспечивало перемещение группы из трех фильтров.

2. Оптимизация расположения (не симметричного) фильтров на антенне. Каждая часть антенны, в которой расположены фильтры, поделена на 100 сегментов. Переменными являлись номера сегментов, в которых расположены фильтры. При этом диапазон

изменения расположения каждого фильтра задавался так, чтобы исключить возможность пересечения фильтров.

3. Оптимизация значений параметров первых фильтров (C , L). Переменными являлись значения C и L для первых фильтров. Были выбраны следующие диапазоны соответствующих параметров: $4,5 < L < 18$ мкГн, $2 < C < 8$ пФ.

Частотные зависимости КСВ до и после оптимизации представлены на рис. 4.2–4.4.

Из рис. 4.2–4.4 видно, что в результате оптимизации с помощью ГА наблюдается снижение максимального значения КСВ от 5,796 до 3,653 (в 1,5 раза).

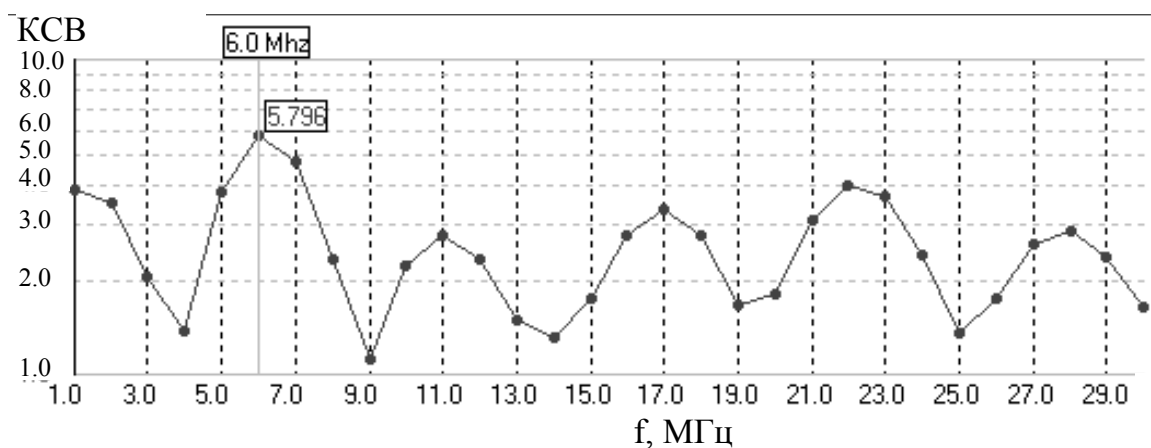


Рис. 4.2. Частотная зависимость КСВ исходной структуры

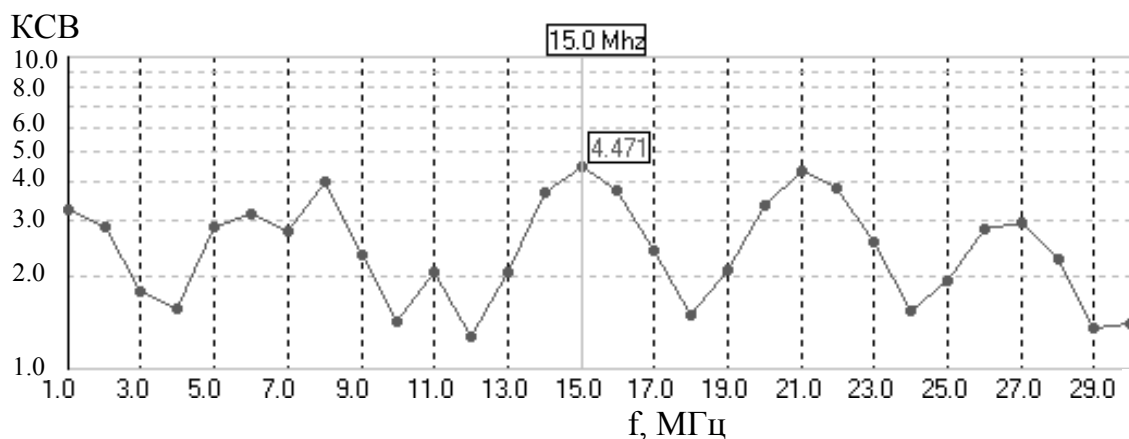


Рис. 4.3. Частотная зависимость КСВ структуры, полученной после оптимизации расположения фильтров

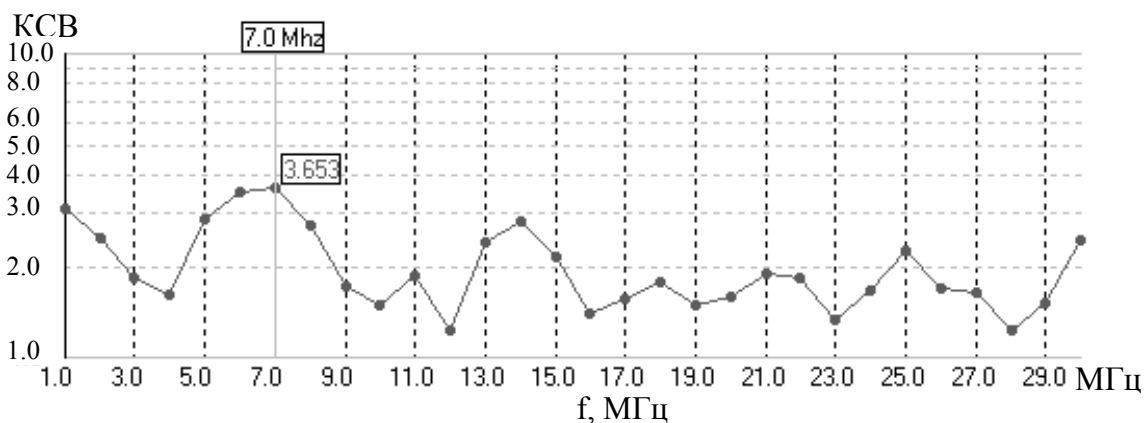


Рис. 4.4. Частотная зависимость КСВ структуры, полученной при оптимизации расположения групп фильтров и значений параметров первых двух фильтров

Таким образом, поэтапная оптимизация отдельных параметров антенны с помощью ГА позволяет существенно улучшить согласование в диапазоне частот от 1 до 30 МГц.

4.3. Снижение КСВ антенны за счет оптимизации расположения и параметров полосозапирающих фильтров

Автором решалась задача создания широкополосной антенны с $КСВ < 5$ в диапазоне частот от 1,5 до 30 МГц, не изменяя заданные исходные размеры и геометрию антенны, а включая полосозапирающие фильтры (ПЗФ) в структуру антенны [98, 99]. Сначала был произведен теоретический расчет структуры антенны в системе 4NEC2: смоделирована геометрия, оптимизированы параметры и расположение фильтров в антенне (рис. 4.5).

Получено по 5 фильтров во внешних проводах (нумерация курсивом на рис. 4.5, б, в: *1, 2, 3, 4, 5*) и 4 фильтра во внутренних (обычная нумерация на рис. 4.5, б, в: *1, 2, 3, 4*). Места включения и параметры фильтров представлены в табл. 4.1. Под местом включения понимается номер сегмента, отсчитываемый от конца провода. При этом каждый провод разбит на 100 сегментов. Оптимизировались индуктивности L и место включения каждого ПЗФ.

По расчетам построена антенна и измерен ее КСВ. Расчетный КСВ исходной антенны без нагрузок показан на рис. 4.6. Как видно, $КСВ < 3$ в диапазоне частот от 13 до 30 МГц. Расчетный и экспериментальный КСВ антенны с нагрузками показаны на рис. 4.7.

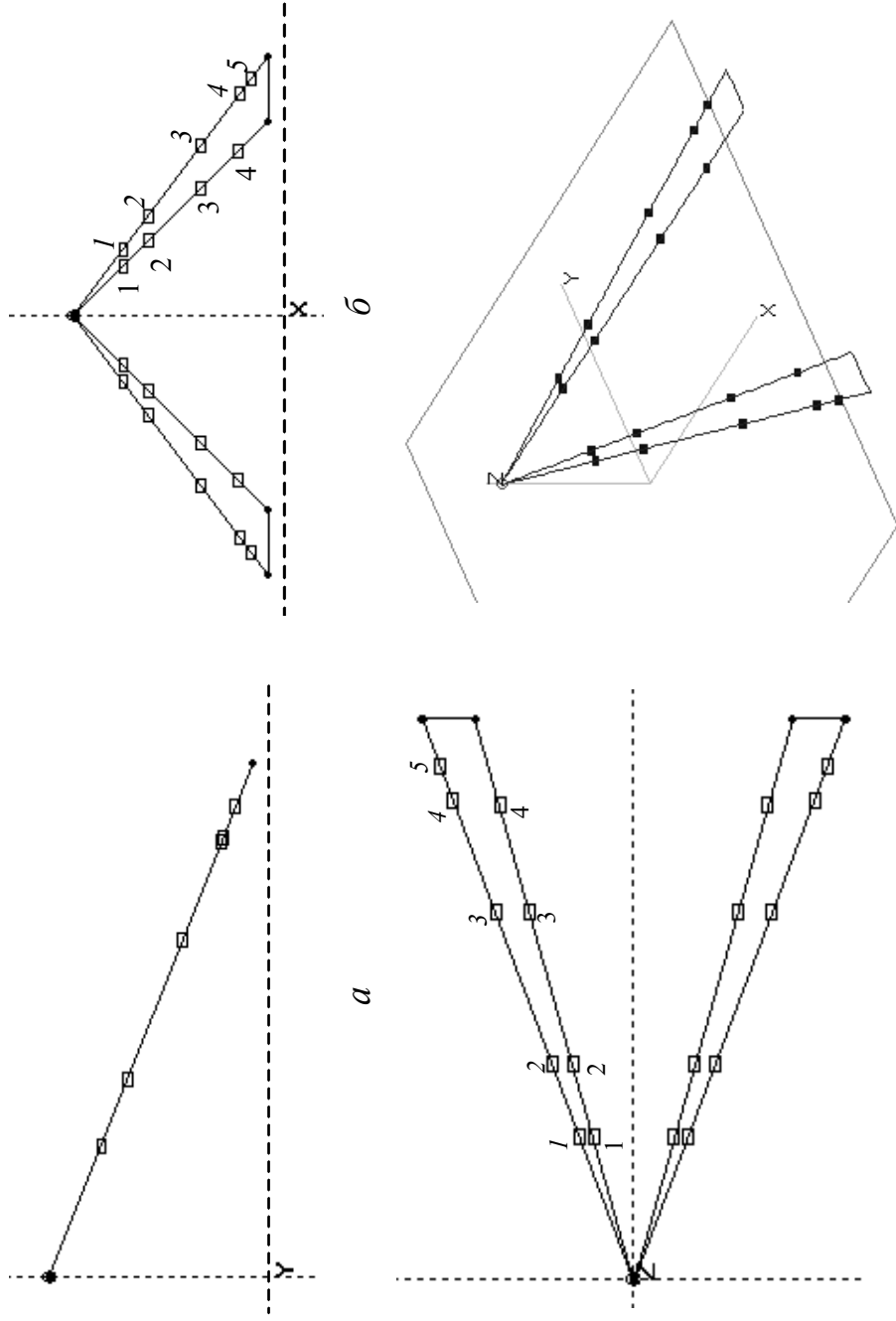


Рис. 4.5. Вид структуры исследуемой антенны: *а* – в плоскости XZ; *б* – в плоскости YZ; *в* – в плоскости XY; *г* – общий вид; прямоугольниками обозначены места включения ПЗФ

Места включения и параметры фильтров

Внутренние провода				
Номер фильтра	Номер сегмента	R , Ом	L , мкГн	C , пФ
1	74	820	150,7	10,0
2	61	820	121,8	10,0
3	34	820	62,54	5,0
4	15	820	19,8	5,0
Внешние провода				
Номер фильтра	Номер сегмента	R , Ом	L , мкГн	C , пФ
1	74	820	150,7	10,0
2	61	820	121,8	10,0
3	34	820	62,54	5,0
4	14	820	19,8	5,0
5	8	820	7,85	5,0

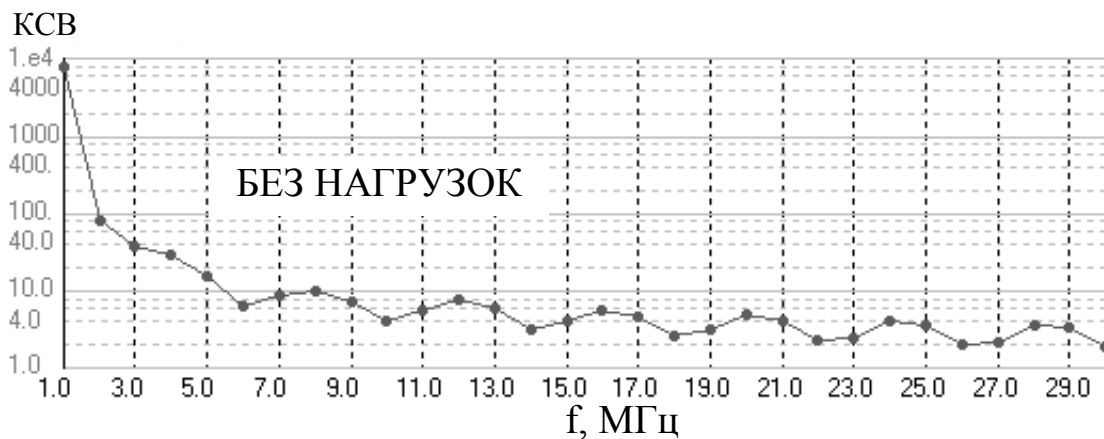


Рис. 4.6. Частотная зависимость КСВ исходной антенны без нагрузок при моделировании

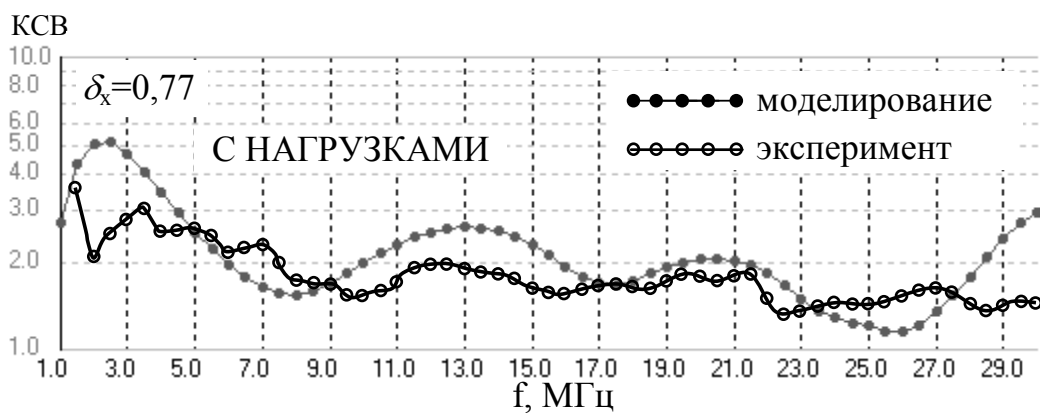


Рис. 4.7. Частотные зависимости КСВ антенны с оптимизированными нагрузками при моделировании и в эксперименте

Как видно, $KCB < 5$ в диапазоне частот от 1,5 до 30 МГц, что соответствует техническому заданию.

Таким образом, включение и оптимизация ПЗФ позволяют значительно расширить диапазон частот при заданном КСВ. Сходство расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное. Следовательно, оптимизируя расположение и параметры ПЗФ, можно значительно улучшить КСВ антенны, не меняя ее структуру и геометрические размеры.

4.4. Оптимизация сосредоточенных нагрузок при моделировании проводных антенн с нагрузками

Продемонстрируем параметрическую оптимизацию антенны с помощью программного обеспечения для моделирования проводных антенн с нагрузками на примере диполя длиной 3 м с нагрузками. Будем изменять места расположения нагрузок и их параметры (R , L , C). Минимизируем КСВ в диапазоне частот от 30 до 300 МГц. Параметры ГА: 30 особей, 100 поколений, коэффициент мутации 0,06, коэффициент кроссовера 0,6. Результат оптимизации изображен на рис. 4.8. Описание структуры до и после оптимизации представлено в табл. 4.2.

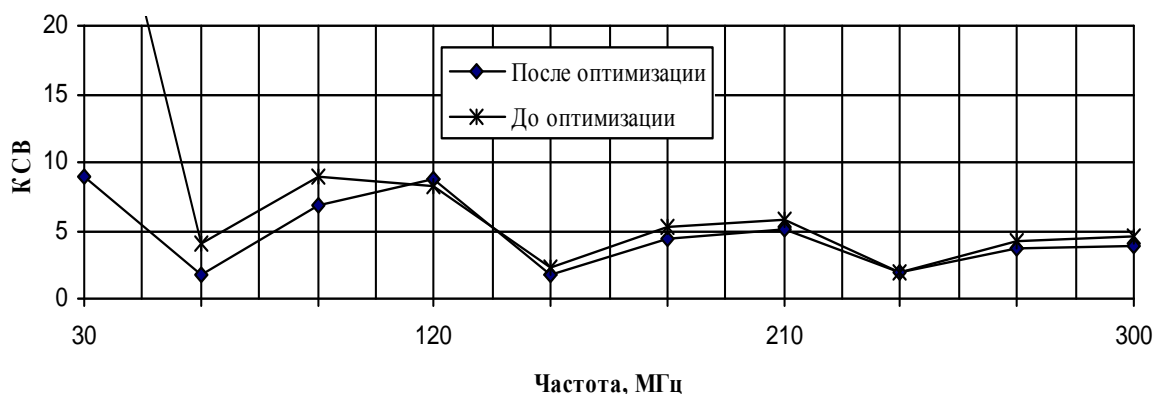


Рис. 4.8. Частотная зависимость КСВ диполя до и после параметрической оптимизации двух нагрузок в системе моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками

Из рис. 4.8. видно, что оптимизация параметров сосредоточенных нагрузок в системе моделирования проводных антенн с нагрузками уменьшает КСВ, особенно на низких частотах.

Таблица 4.2

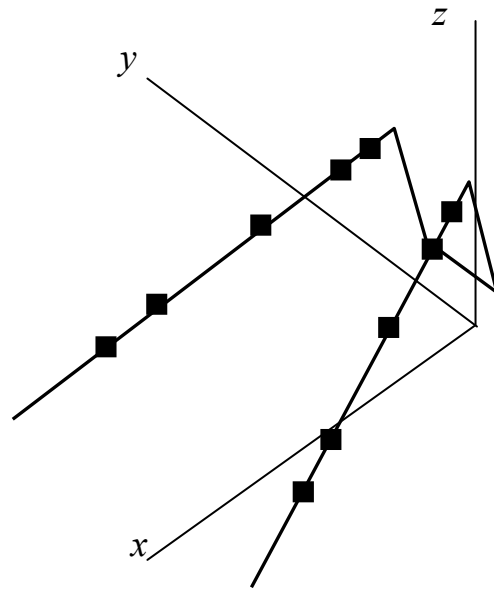
Структура «диполь» до и после оптимизации

Параметры	До оптимизации	После оптимизации
Номер сегмента 1-й нагрузки	1	4
$R1$, кОм	1	4,24765
$L1$, мкГн	10	484,312
$C1$, пФ	10	62,5553
Номер сегмента 2-й нагрузки	19	13
$R2$, кОм	1	0,228275
$L2$, мкГн	10	24,9252
$C2$, пФ	10	10,0906

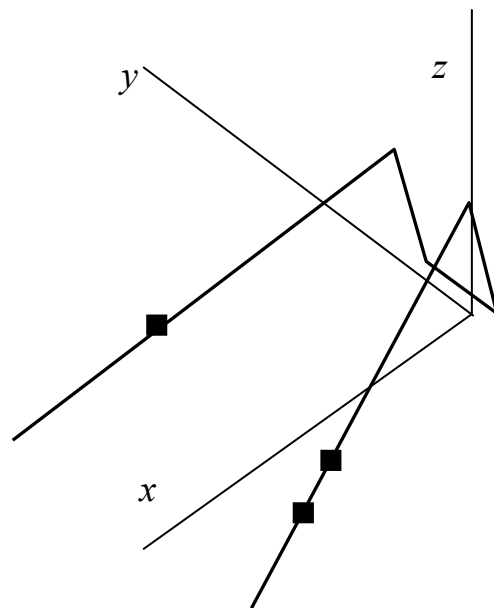
Главной особенностью разработанного алгоритмического и программного обеспечения является возможность структурной оптимизации на основе ГА. Представим структурную оптимизацию широкодиапазонной быстроразворачиваемой модифицированной вибраторной антенны (рис. 4.9) [86].

Минимизируем КСВ в диапазоне частот от 3 до 30 МГц при наличии либо отсутствии фильтров в структуре антенны. Параметры ГА: 10 особей, 10 поколений, коэффициент мутации 0,06, коэффициент кроссовера 0,6. Результат оптимизации представлен на рис. 4.10, а описание структуры до и после оптимизации — в табл. 4.3. Как видно, максимальный КСВ без фильтров довольно большой и составляет 17. Введение 10 нагрузок с параметрами и местами включения, выбранными из эмпирических и аналитических соображений, уменьшило максимальный КСВ до 9.

Структурная оптимизация снизила максимальный КСВ до 8, причем остались лишь 3 нагрузки из 10. Таким образом, структурная оптимизация в системе моделирования проводных антенн с сосредоточенными нагрузками позволяет получить более простые структуры.



a



\bar{b}

Рис. 4.9. Исследуемая структура:
 a – до оптимизации; \bar{b} – после оптимизации

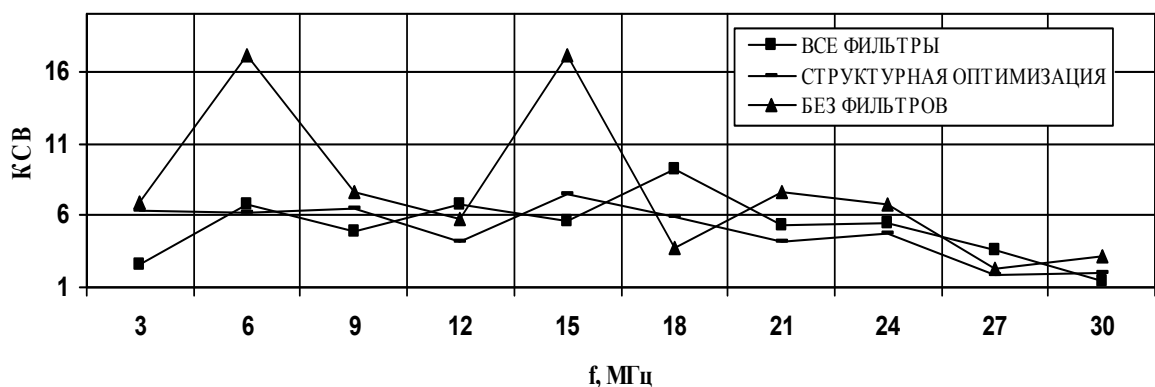


Рис. 4.10. Частотная зависимость КСВ проводной антенны: без нагрузок; с 10 нагрузками до структурной оптимизации; с 3 нагрузками после структурной оптимизации

Таблица 4.3

Описание исследуемой антенны (см. рис. 4.9) до и после структурной оптимизации

До оптимизации				
1-й провод				
Номер фильтра	Номер сегмента	R, Ом	L, мкГн	C, пФ
1	93	820	7,85	5,0
2	85	820	19,8	5,0
3	65	820	62,54	5,0
4	38	820	121,8	10,0
5	25	820	150,7	10,0
2-й провод				
Номер фильтра	Номер сегмента	R, Ом	L, мкГн	C, пФ
1	93	820	7,85	5,0
2	85	820	19,8	5,0
3	65	820	62,54	5,0
4	38	820	121,8	10,0
5	25	820	150,7	10,0
После структурной оптимизации				
1-й провод				
Номер фильтра	Номер сегмента	R, Ом	L, мкГн	C, пФ
4	38	820	121,8	10,0
2-й провод				
Номер фильтра	Номер сегмента	R, Ом	L, мкГн	C, пФ
4	38	820	121,8	10,0
5	25	820	150,7	10,0

4.5. Экспериментальное исследование быстроразвертываемых антенн ДКМВ-диапазона на примере четырехпроводной антенны

Представим инженерно-техническое решение по созданию широкодиапазонной быстроразвертываемой антенны ДКМВ-диапазона и измеренные частотные зависимости ее КСВ [100]. Разработанный эскиз конструкции антенны запатентован, она испытана в полевых условиях [101]. Получен КСВ не более 3,5 в диапазоне частот от 1,5 до 30 МГц. Экспериментальная проверка результатов анализа и оптимизации подтвердила приемлемую точность расчетов [102].

Схема эксперимента представлена на рис. 4.11.

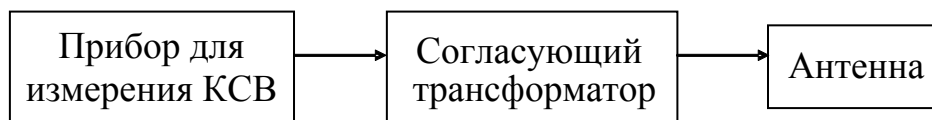


Рис. 4.11. Схема эксперимента

Параметры антенны приведены в табл. 4.4.

Эксперимент 1: антенна с согласующим снижением, зазор в верхней точке 60 см. Результаты эксперимента показаны на рис. 4.12.

Эксперимент 2: антенна с согласующим снижением, зазор в верхней точке уменьшен до 20 см. Результаты эксперимента показаны на рис. 4.13. Наблюдается некоторое улучшение согласования на частотах 2–4 МГц: КСВ уменьшается с 2,5 до 2.

Эксперимент 3: антенна с согласующим снижением, зазор в верхней точке 20 см, закорочена пара фильтров на внешних проводниках (это фильтры № 3 согласно табл. 4.4). График КСВ показан на рис. 4.14. Результат — подавление максимума на частоте 13,5 МГц, во всем диапазоне уровень КСВ не превышает значения 3.

Эксперимент 4: антенна без согласующего снижения, выход трансформатора подключен к проводам № 2 и № 4 (см. табл. 4.4). График КСВ показан на рис. 4.15. Результат — улучшение параметров в высокочастотной области и ухудшение — в низкочастотной.

Эксперимент 5: антенна без согласующего снижения. Трансформатор подключен к проводам № 2 и № 4 (см. табл. 4.4). Закорочены фильтры № 5 (см. табл. 4.4) на внутренней паре проводов. Получен наилучший вариант в диапазоне от 7,5 до 30 МГц, уровень КСВ ниже 2, а во всем диапазоне не превышает 3,5 (рис. 4.16).

Таблица 4.4

Параметры четырехпроводной антенны

Номер элемента	Название элемента	Параметры			
		R , Ом	L , мкГн	C , пФ	Длина, м
1	Согласующее снижение	–	–	–	19,41
2	Внешняя пара проводов	–	–	–	4,07
3	Внешняя пара фильтров	810	7,85	5,0	–
4	Внутренняя пара проводов	–	–	–	0,70
5	Внутренняя пара фильтров	4300	7,85	5,0	–
6	Внешняя пара проводов	–	–	–	3,35
7	Внешняя пара фильтров	810	19,8	5,0	–
8	Внутренняя пара проводов	–	–	–	6,13
9	Внутренняя пара фильтров	810	19,8	5,0	–
10	Внешняя пара проводов	–	–	–	9,09
11	Внешняя пара фильтров	810	62,54	5,0	–
12	Внутренняя пара проводов	–	–	–	9,43
13	Внутренняя пара фильтров	810	62,54	5,0	–
14	Внешняя пара проводов	–	–	–	12,93
15	Внешняя пара фильтров	810	121,8	10,0	–
16	Внутренняя пара проводов	–	–	–	12,74
17	Внутренняя пара фильтров	810	121,8	10,0	–
18	Внешняя пара проводов	–	–	–	6,22
19	Внешняя пара фильтров	810	150,7	10,0	–
20	Внутренняя пара проводов	–	–	–	6,13
21	Внутренняя пара фильтров	810	150,7	10,0	–
22	Внешняя пара проводов	–	–	–	12,21
23	Внутренняя пара проводов	–	–	–	12,03

Таким образом, в эксперименте 5 установлено лучшее использование базового варианта четырехпроводной антенны. Антенна должна включаться без согласующего снижения с зазором 20 см в точке соединения с вибраторами и с закороченными фильтрами № 5 (см. табл. 4.4) на внутренней паре проводов.

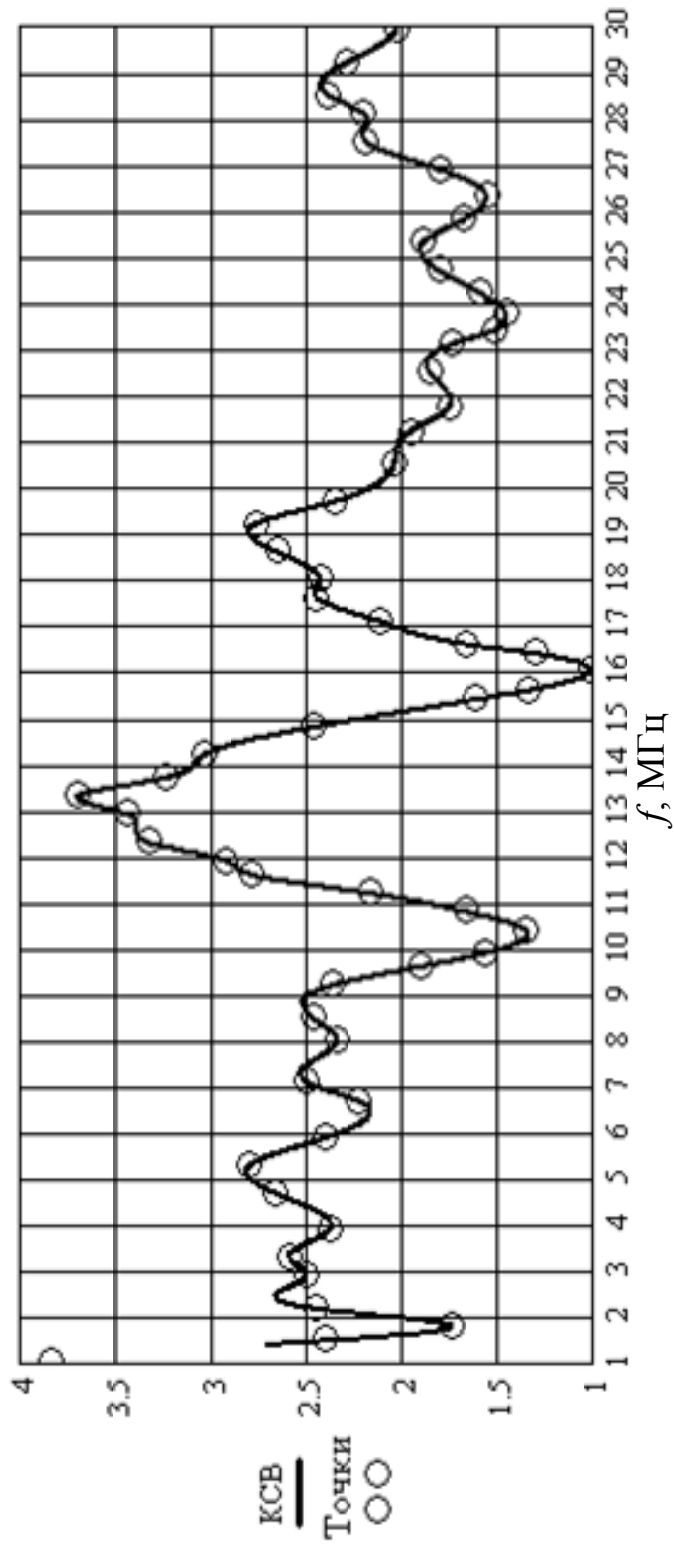


Рис. 4.12. Частотная зависимость КСВ четырехпроводной антенны с согласующим снижением и зазором 60 см

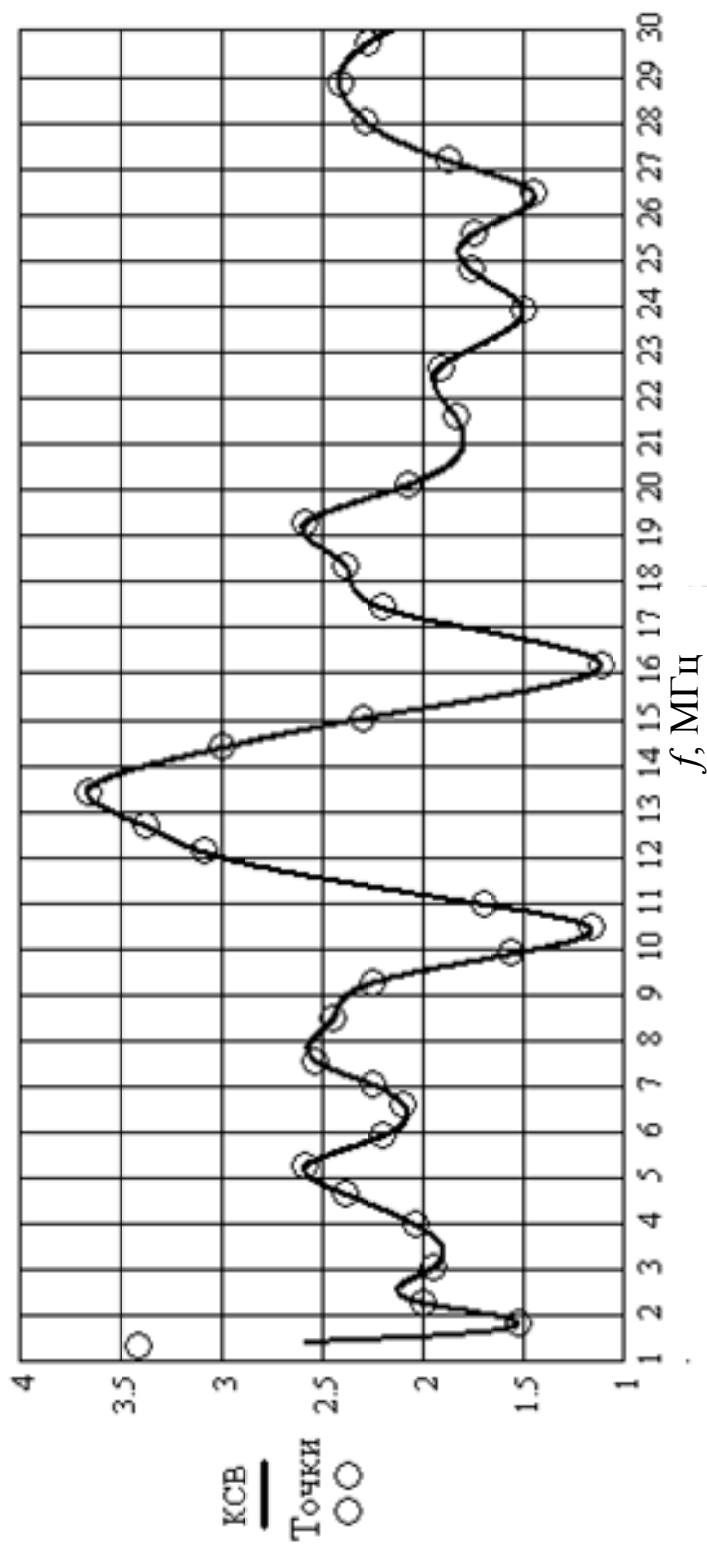


Рис. 4.13. Частотная зависимость КСВ четырехпроводной антенны с согласующим снижением и зазором 20 см

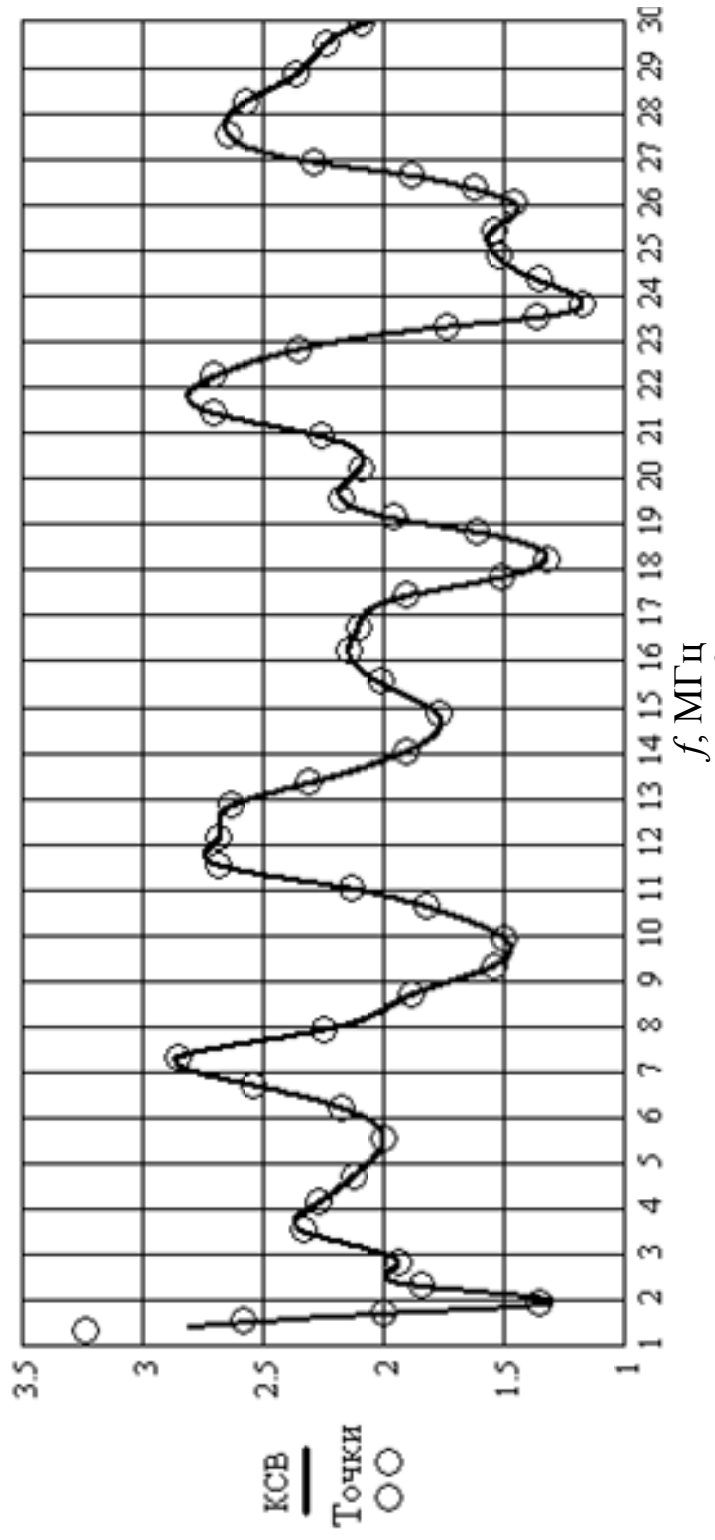


Рис. 4.14. Частотная зависимость КСВ четырехпроводной антенны с согласующим снижением, зазором 20 см и закороченными фильграмми № 3

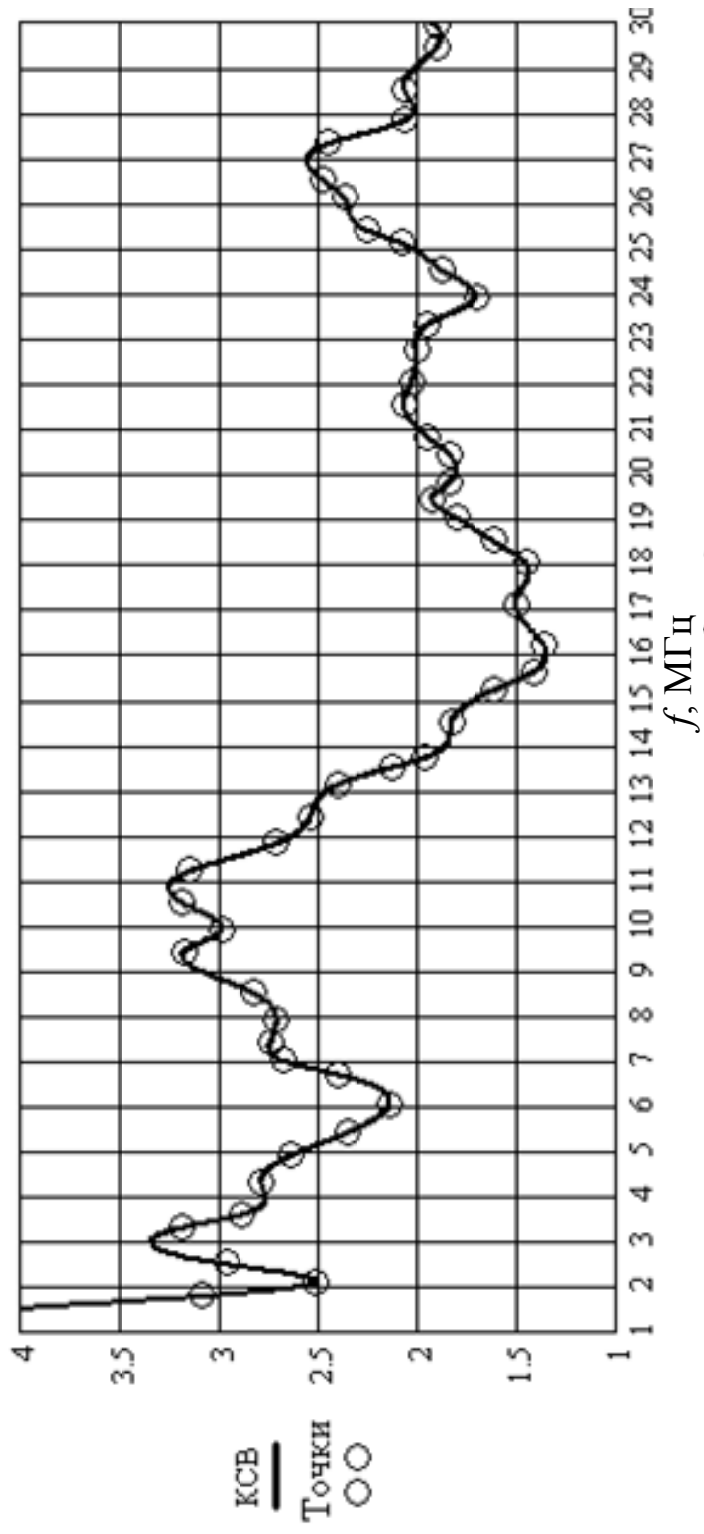


Рис. 4.15. Частотная зависимость КСВ четырехпроводной антенны с зазором 20 см без согласующего снижения

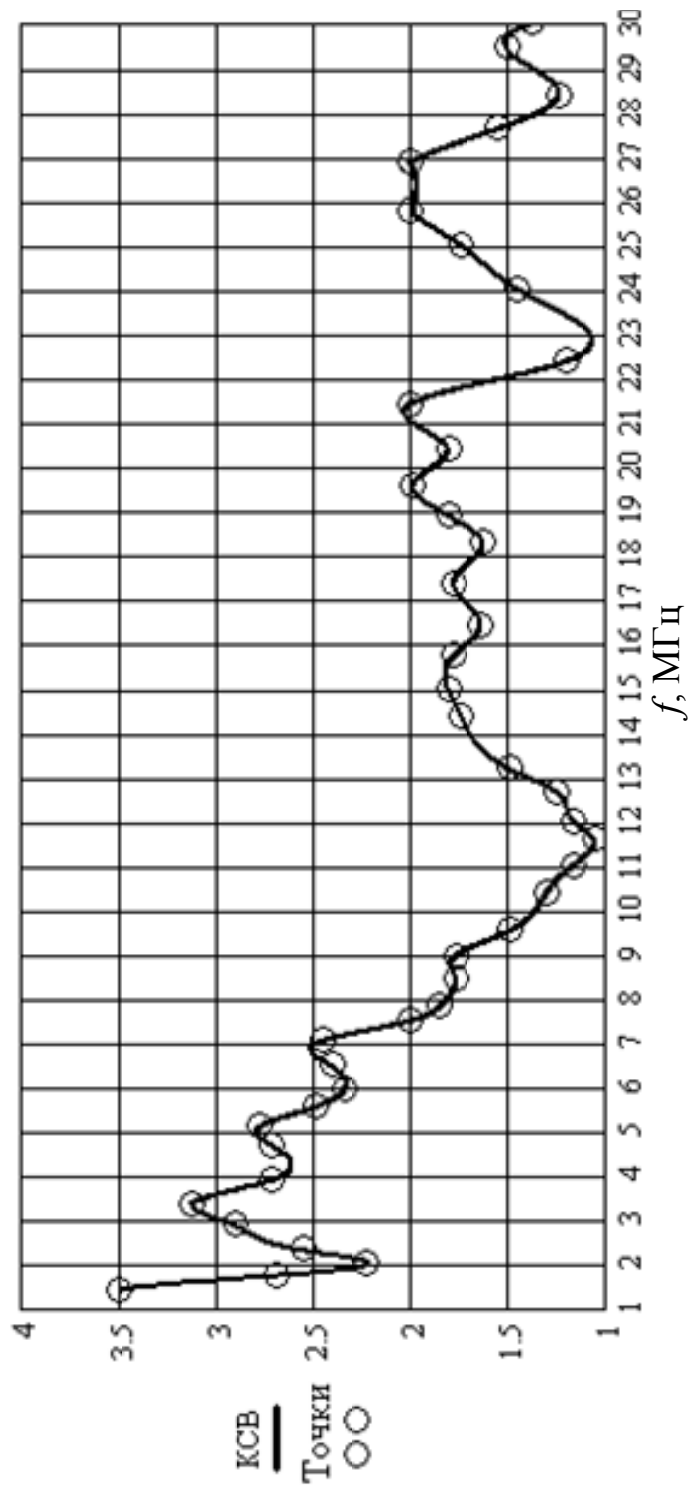


Рис. 4.16. Частотная зависимость КСВ четырехпроводной антенны с зазором 20 см без согласующего снижения, закорочены фильтры № 5 (см. табл. 4.4)

4.6. Особенности технологического исполнения четырехпроводной комбинированной антенны

Изготовление антенны следует начинать со сборки и настройки корректирующих фильтров. Параметры сопротивлений, емкостей и индуктивностей даны в табл. 4.4. Сборка фильтров включает в себя следующие операции.

1. Изготовление конструктивных конденсаторов. Конструктивный конденсатор создан на основе двустороннего фольгированного материала с известной диэлектрической проницаемостью, например ФЛАН-10 [103]. Его чертеж представлен на рис. 4.17. Размер a выбирается так, чтобы конденсатор вместе с закрепленным на нем сопротивлением помещался внутри каркаса катушки индуктивности.

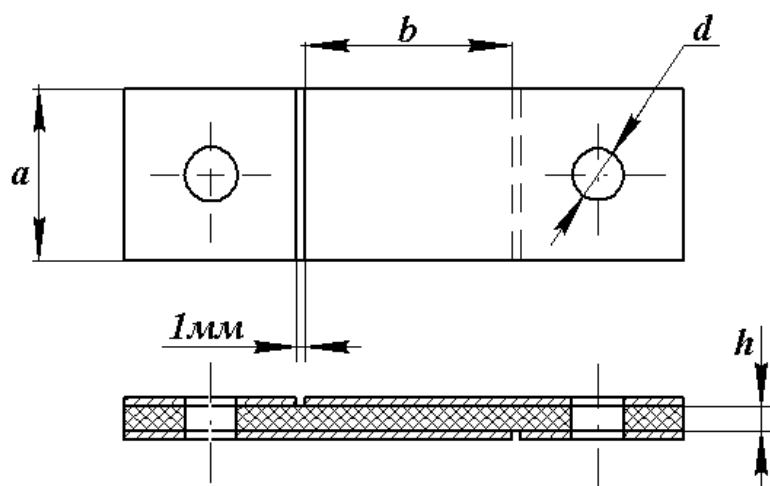


Рис. 4.17. Размеры для конструктивного конденсатора фильтра

Диаметр отверстия d должен быть в 1,1 раза больше диаметра вывода резистора. Размер b рассчитывается по формуле

$$b = \frac{Ch \cdot 10^{-6}}{\varepsilon_r \varepsilon_0 a},$$

где C — емкость, пФ; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость основания; ε_0 — диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; h — толщина основания, мм; a — ширина основания, мм.

Рекомендуется размер b взять на 2 мм больше. Возможно изменение емкости конденсатора настройкой на нужное значение по показаниям RLC -метра путем снятия фольги механическим способом или подтравливанием области перекрытия, ограниченной размером b на чертеже.

2. Изготовление индуктивностей. Диаметр каркаса должен быть таким, чтобы в пространство внутреннего диаметра помещался конденсатор с закрепленным на нем резистором, как показано на рис. 4.18.

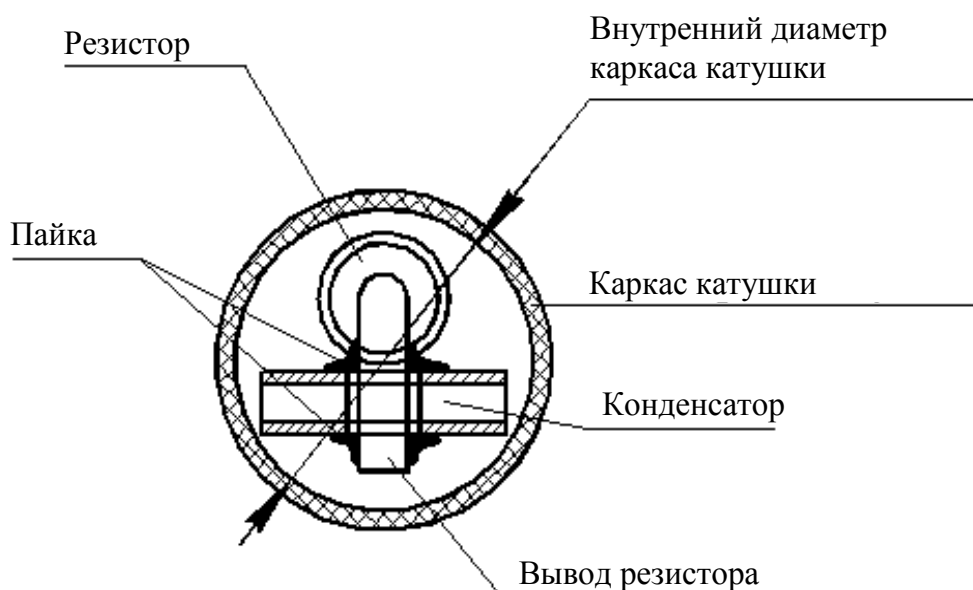


Рис. 4.18. Поперечное сечение RLC -фильтра

Диаметр стенок целесообразно выбирать от 2 до 5 мм. Провода для катушки должны быть эмалированные диаметром от 0,7 до 2 мм. Затем по известному внешнему диаметру, диаметру проводов и индуктивности вычисляется число витков посредством любой программы для расчета индуктивностей, например ММАНА (рис. 4.19) [69].

Рекомендуется намотать в 1,2 раза больше витков, чем получено при расчете. Индуктивность настраивается на требуемое значение с помощью RLC -метра путем сматывания лишних витков. При настройке в катушку обязательно должны быть вмонтированы конденсатор и резистор для исключения расстройки после сборки. После изготовления крайние витки закрепляются.

3. Сборка фильтров. Резистор устанавливается на конденсатор и припаивается с двух сторон (рис. 4.20). К конденсатору также

припаивается провод вывода. Многожильный медный провод с одного конца расплетается на две равные части, залуживается и припаивается к конденсатору также с двух сторон. Затем конденсатор с резистором вставляется в катушку. Выводы катушки припаиваются к выводам на конденсаторе.

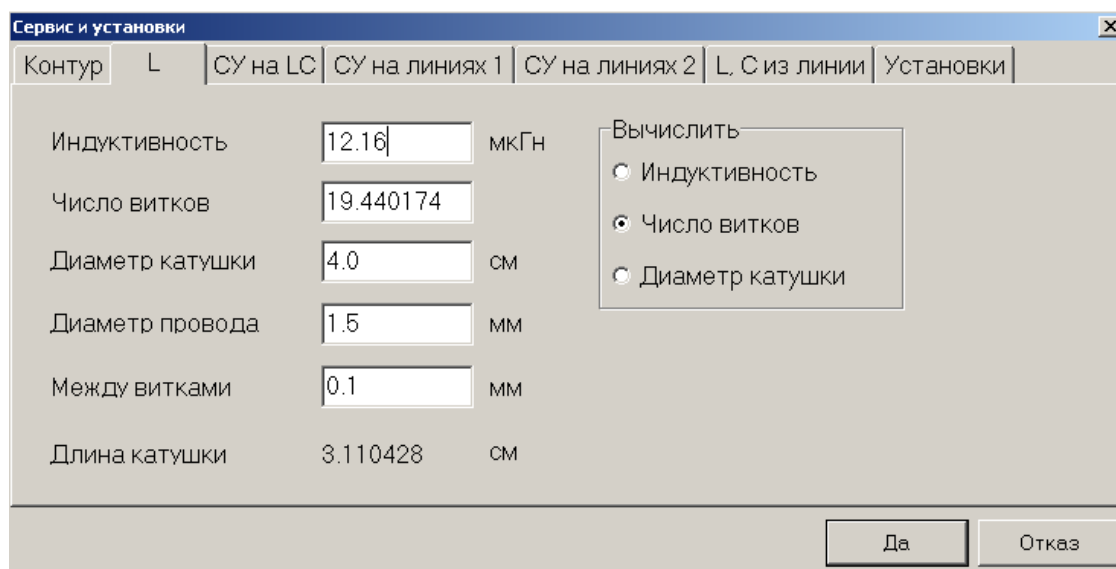


Рис. 4.19. Расчет индуктивности в программе MMANA

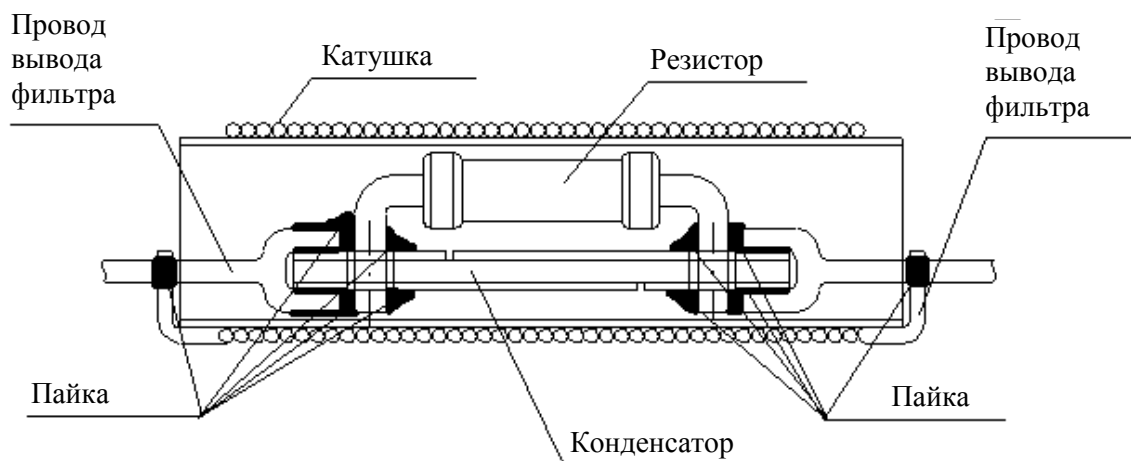


Рис. 4.20. Промежуточная стадия сборки фильтра

Затем фильтр герметизируется, помещается в трубку из текстолита или высокопрочной пластмассы и с двух сторон заливается компаундом. После герметизации фильтры маркируются для их монтажа в антенну.

Чертеж собранного фильтра представлен на рис. 4.21.

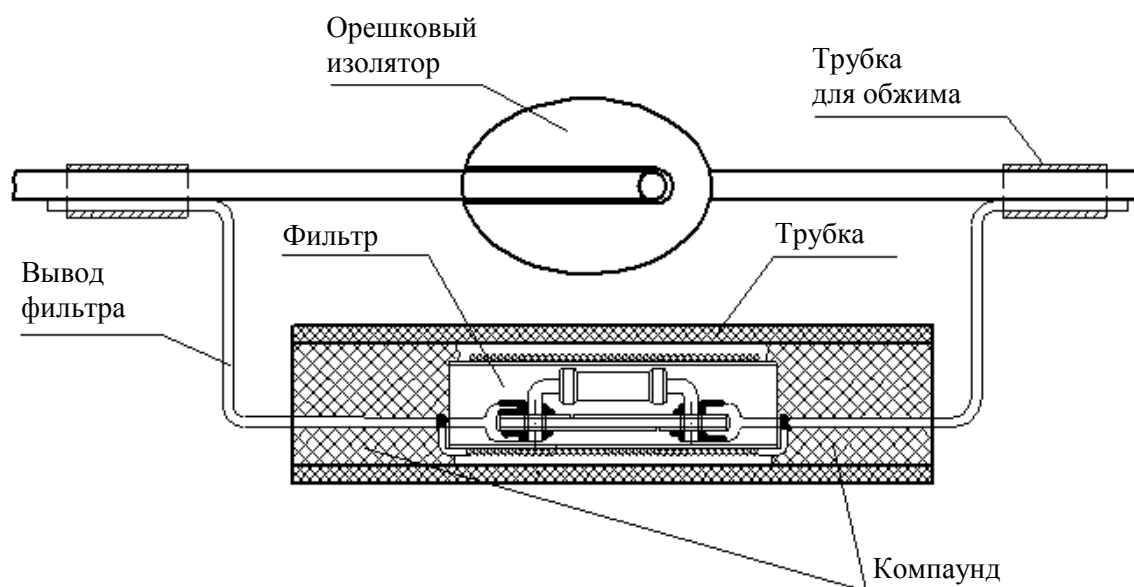


Рис. 4.21. Фильтр в сборе

После изготовления фильтров нарезаются отрезки проводов согласно табл. 4.4, при этом длины отрезков должны быть с запасом 40 см для крепления орешковых изоляторов. По чертежу антенны через изоляторы связываются провода, изоляторы ставятся в места включения фильтров, при этом между отрезками не должно быть электрического контакта, кроме контакта между отрезками № 1 и № 2. Изоляторы устанавливаются на свободных концах отрезков № 1 и № 23 для крепления канатов-растяжек. На каждый провод надеваются по 2 трубки для обжима выводов фильтров, на провода № 2 и № 23 — по одной. Затем к антенне крепятся фильтры, как показано на рис. 4.21. Выводы фильтров обжимаются в трубках.

К антенне крепятся растяжки и она устанавливается на мачту. Крепление фильтров и проводов осуществляется в соответствии с рис. 4.22. Электрический контакт обеспечивается между отрезками № 1, 2 и 4. Антенна разворачивается в пространстве в соответствии с рис. 4.22, 4.23, подключается к трансформатору, а трансформатор — к фидерной линии.

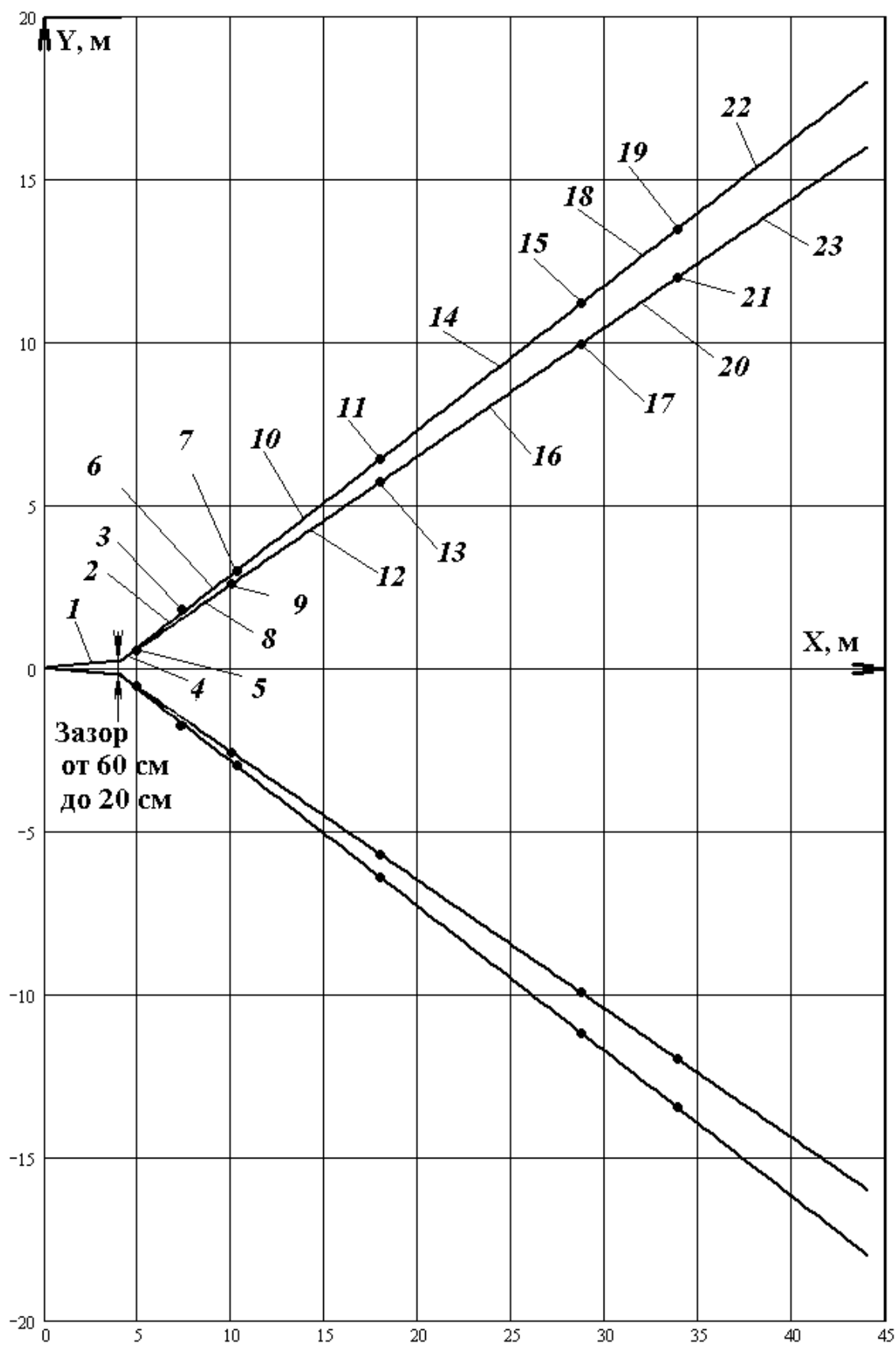


Рис. 4.22. Четырехпроводная антенна (вид сверху)

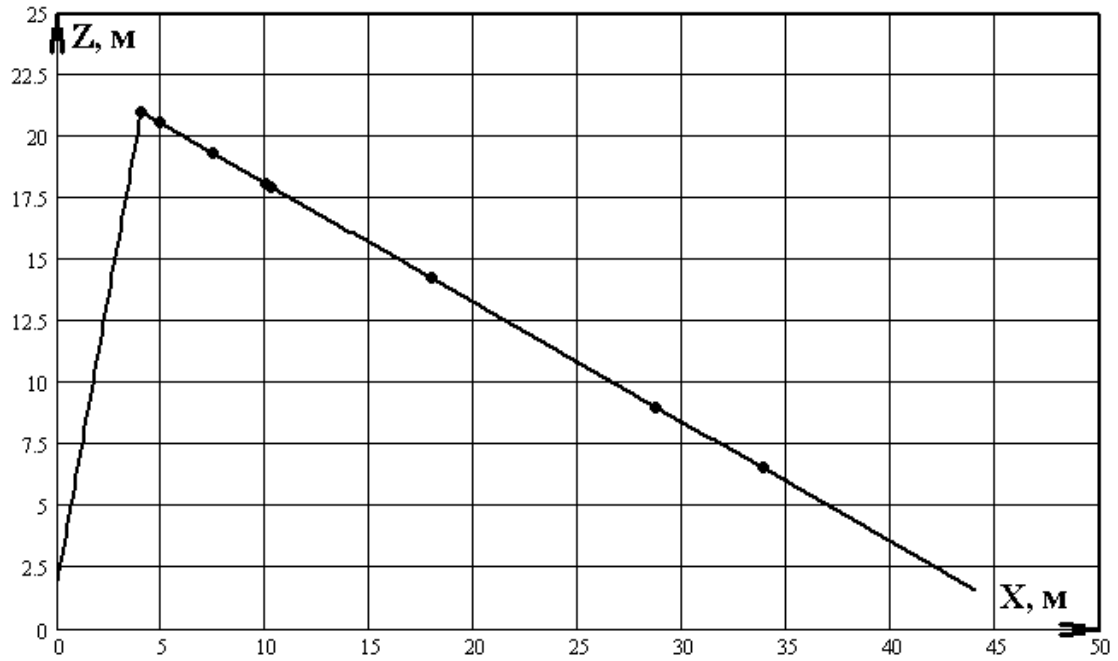


Рис. 4.23. Четырехпроводная антенна (вид сбоку)

Заключение

В данной работе рассмотрена задача синтеза оптимальных проводных антенн, показана эффективность применения ГА для уменьшения КСВ конкретных антенных структур. Предложена методология уменьшения КСВ антенн за счет включения сосредоточенных нагрузок. Впервые выполнено моделирование широкодиапазонной модифицированной вибраторной антенны с оптимизацией сосредоточенных нагрузок. Представлена параметрическая и структурная оптимизация антенн с нагрузками.

Оптимизация расположения и параметров нагрузок позволяет значительно улучшить КСВ антенны, не меняя ее структуру и геометрические размеры.

В результате экспериментального исследования получена конструкция комбинированной четырехпроводной антенны. Антенна изготовлена и испытана в сеансах связи на диапазонах 1,8; 3,5; 7; 14; 21; 28 МГц в полевых условиях. Подтверждена достаточно устойчивая связь с пунктами на удалении до 100 км. Таким образом, показана эффективность автоматизированного синтеза оптимальных проводных антенн.

Литература

1. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский [и др.] ; под ред. Д.И. Воскресенского. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Радиотехника, 2006. – 376 с.
2. Справочник по спутниковой связи и вещанию / под ред. Л.Я. Кантора. – М. : Радио и связь, 1983.
3. Современные проблемы антенно-волноводной техники : сб. ст. / под ред. А.А. Пистолькорса. – М. : Наука, 1967. – 217 с.
4. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. Р. Митры. – М. : Мир, 1977. – 485 с.
5. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие / В.В. Никольский. – М. : Наука, 1973.
6. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн / С.И. Баскаков. – М. : Высшая школа, 1992.
7. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ / А.Д. Григорьев. – М. : Высшая школа, 1990.
8. Электродинамический расчет характеристик излучения плосковых антенн / Б.А. Панченко [и др.]. – М. : Радио и связь, 2002. – 253 с.
9. Бахрах Л.Д. Синтез излучающих систем (теория и методы расчета) / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий. – М. : Радио и связь, 1974.
10. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ : учеб. для вузов / Д.М. Сазонов. – М. : Высшая школа, 1988.
11. Марков Г.Т. Антенны : учеб. для вузов / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М. : Энергия, 1975.
12. Altshuler E.E. Wire-antenna designs using genetic algorithms / E.E. Altshuler, D.S. Linden // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1997. – Vol. 39, № 2. – P. 33–43.
13. Чернышов В.П. Антенно-фидерные устройства радиосвязи и радиовещания / В.П. Чернышов. – М. : Связь, 1978.

14. Ротхаммель К. Антенны / К. Ротхаммель ; под ред. А. Кришке. – 11-е изд. – Минск : Наш Город, 2001.
15. Mattioni L. Blade : A Broadband Loaded Antenna Designer / L. Mattioni, G. Marrocco // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2006. – Vol. 48. – P. 120–129.
16. Harrington R.F. Straight wires with arbitrary excitation and loading / R.F. Harrington, J.R. Mautz // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1967. – Vol. 15. – P. 502–515.
17. Boag A. Design of electrically loaded wire antennas using genetic algorithms / A. Boag, E. Michelssen, R. Mittra // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1996. – Vol. 44. – P. 687–695.
18. Грегори Р. Безошибочные вычисления : методы и приложения / Р. Грегори, Е. Кришномурти. – М. : Мир, 1988.
19. Altman Z. New designs of ultra wide-band communication antennas using a genetic algorithm / Z. Altman, R. Mittra, A. Boag // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1997. – Vol. 45. – P. 1494–1501.
20. Jones E.A. Genetic design of linear antenna arrays / E.A. Jones, W.T. Joines // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2000. – Vol. 42, № 3. – P. 92–100.
21. Popovic B.D. CAD of Wire Antennas and Related Radiating Structures. Somerset / B.D. Popovic. – U.K. : Research Studies Press, 1991.
22. Loney S.T. Design of compound solenoids to produce highly homogeneous magnetic fields / S.T. Loney // Inst. Math. Appl. – 1966. – Vol. 2 – P. 111–125.
23. Migliore M.D. A simple and robust adaptive parasitic antenna / M.D. Migliore, D. Pinchera, F. Schettino // IEEE Transactions Antennas and Propagation Magazine. – 2005. – Vol. 44, № 10. – P. 3262–3272.
24. Липцер Р.Ш. Статистика случайных процессов / Р.Ш. Липцер, А.Н. Ширяев. – М. : Наука, 1974.
25. Ахо А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Д. Хопкрофт, Д. Ульман. – М. : Мир, 1979.
26. Кормен Т. Алгоритмы : построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. – М. : МЦНМО, 1999.
27. Sandlin B.S. Sensitivity of a genetic algorithm solution for a wire antenna geometry / B.S. Sandlin, A.J. Terzuoli // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 1998. – Vol. 1. – P. 54–57.

28. Гилл Ф. Практическая оптимизация : пер. с англ. / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М. : Мир, 1985. – 509 с.
29. Mitchell M. When will a genetic algorithm outperform hill climbing? / M. Mitchell, J.H. Holland, S. Forrest // In J.D. Cowan, G. Tesauro and J. Alspector, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 6*. – CA : Morgan Kaufmann, 1994. – P. 51–58.
30. Back T. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice* / T. Back. – NY : Oxford University Press, 1996.
31. Растрингин Л.А. Статистические методы поиска / Л.А. Растрингин. – М. : Наука, 1968.
32. Goldberg E. *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning* / E. Goldberg. – Addison-Wesley, 1989.
33. Kirkpatrick S. Optimization by simulated annealing / S. Kirkpatrick, C.D. Jr. Gelatt, M.P. Vecchi. – *Science*, 1983. – P. 671–680.
34. Rutenbar R.A. Simulated annealing algorithms : An overview / R.A. Rutenbar // *IEEE Circuits and Devices Magazine*. – 1989. – Vol. 5, № 1 – P. 19–26.
35. De Leao M.T.P. A simulated annealing approach to evaluate long term marginal costs and investment decisions / M.T.P. De Leao, J.T. Saraiva // *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. – 2000. – Vol. 4. – P. 2284–2289.
36. Aarts E.H.L. Simulated annealing / E.H.L. Aarts, J.H.M. Korst, P.J.M. van Laarhoven // In E. Aarts, J.K. Lenstra, editors, *Local search in combinatorial optimization*. – Chichester : Wiley, 1997. – P. 91–120.
37. Thompson M. Application of the genetic algorithm and simulated annealing to LC filter tuning Circuits / M. Thompson, J.K. Fidler // *IEEE Devices and Systems*. – 2001. – Vol. 148, № 4. – P. 177–182.
38. Glover F. *Tabu Search* / F. Glover, M. Laguna // Kluwer Academic Publishers. – Boston : MA, 1997.
39. Fogel D.B. Applying evolutionary programming to selected traveling salesman problem / D.B. Fogel // *Cybernetics and Systems*. – 1993. – Vol. 24, № 1. – P. 27–36.
40. Back T. A Survey of Evolution Strategies / T. Back, F. Hoffmeister and H.-P. Schwefel ; In R.K. Belew and L.B. Booker, editors // *In Proceedings of the 4th International Conference on Genetic Algorithms (ICGA IV)*. – SanDiego : Morgan Kaufman Publishers Inc., 1991. – P. 2–9.

41. Freisleben B. A genetic local search algorithm for solving symmetric and asymmetric traveling salesman problems / B. Freisleben, P. Merz // IEEE International Conference on Evolutionary Computation. – 1996. – May. – P. 616–621.

42. Mittra R. Application of micro-genetic algorithm (MGA) to a class of electromagnetic analysis and synthesis problems / R. Mittra, S. Chakravarty, J. Yeo // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2002. – Vol. 1. – P. 306–309.

43. Yegin K. On the design of broad-band loaded wire antennas using the simplified real frequency technique and a genetic algorithm / K. Yegin, A.Q. Martin // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2003. – Vol. 51, № 2. – P. 220–228.

44. GA design of a thin-wire bow-tie antenna for GPR applications / C.M.J. van Coevorden [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2006. – Vol. 44, № 4. – P. 1004–1010.

45. Бовбель Е.И. Применение генетических алгоритмов в задачах прикладной электродинамики / Е.И. Бовбель, П.Д. Кухарчик, Д.В. Тишков // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – Т. 9, № 1. – С. 33–45.

46. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы : учеб.-метод. пособие / Т.В. Панченко ; под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань : Астраханский ун-т, 2006. – 89 с.

47. Батищев Д.И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач : учеб. пособие / Д.И. Батищев ; под ред. Я.Е. Львовича. – Воронеж, 1995.

48. A Brief Comparison of Some Evolutionary Optimization Methods / A.J. Keane [et al.] // Modern Heuristic Search Methods. – 1996. – P. 255–272.

49. Комплексная оптимизация генетическими алгоритмами для обеспечения ЭМС / Т.Р. Газизов [и др.] // Материалы 6-го междунар. симп. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. – СПб., 2005. – С. 160–164.

50. Johnson J.M. Genetic algorithms in engineering electromagnetic / J.M. Johnson, Y. Rahmat-Samii // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1997. – Vol. 39, № 4. – P. 7–21.

51. Johnson J.M. Genetic algorithms and method of moments (GA/MOM) in the design of integrated antennas / J.M. Johnson, Y. Rahmat-Samii // IEEE Transactions Antennas and Propagation Magazine. – 1999. – Vol. 47, № 10 – P. 1606–1614.

52. Haupt R.L. Optimum population size and mutation rate for a simple real genetic algorithm that optimizes array factors / R.L. Haupt // IEEE Symposium on Antennas and Propagation Digest. – 2000. – P. 1034–1037.

53. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 8376 от 24.05.2007 «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. – Зарег. в Отраслевом фонде алгоритмов и программ Госкоорцентра Минобрнауки РФ, рег. номер ВНТИЦ 50200701103.

54. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / под ред. Т.Р. Газизова. – Томск : Том. гос. ун-т, 2002. – 206 с.

55. Kohlberg I. Electromagnetic terrorism and potential infrastructure failures / I. Kohlberg, C.E. Baum, D. Giri // Book of abstracts EUROEM 2008. – Lausanne, Switzerland, 2008. – 21–25 July. – P. 2.

56. Some recent work on intentional EMI in Sweden / M. Backstrom [et al.] // Book of abstracts EUROEM 2008. – Lausanne, Switzerland, 2008. – 21–25 July. – P. 3.

57. Giri D. Documented electromagnetic effects (EME) / D. Giri // Book of abstracts EUROEM 2008. – Lausanne, Switzerland, 2008. – 21–25 July. – P. 7.

58. Пистолькорс А.А. Введение в теорию адаптивных антенн / А.А. Пистолькорс, О.С. Литвинов. – М. : Наука, 1991. – 200 с.

59. Овсяников В.В. Вибраторные антенны с реактивными нагрузками / В.В. Овсяников. – М. : Радио и связь, 1985. – 120 с.

60. Reuster D.D. A high-efficiency broadband HF wire-antenna system / D.D. Reuster, K.J. Cybert // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2000. – Vol. 42, № 4. – P. 53–69.

61. Kun-Chou Lee. Genetic algorithms based analyses of nonlinearly loaded antenna arrays including mutual coupling effects / Lee Kun-Chou // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2003. – Vol. 51, № 4. – P. 776–781.

62. Yegin K. Very broadband loaded monopole antennas / K. Yegin, A.Q. Martin // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 1997. – Vol. 1. – P. 232–235.

63. Rogers S.D. Genetic algorithm optimization and realization of broadband loaded wire monopoles / S.D. Rogers, C.M. Butler,

A.Q. Martin // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2001. – Vol. 4. – P. 676–679.

64. Rahmat-Samii Y. Guest Editorial for the Special Issue on Synthesis and Optimization Techniques in Electromagnetics and Antenna System Design / Y. Rahmat-Samii, C.G. Christodoulou // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2007. – Vol. 55, № 3. – P. 518–522.

65. Hoorfar A. Evolutionary Programming in Electromagnetic Optimization : a Review / A. Hoorfar // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2007. – Vol. 55, № 3. – P. 523–537.

66. Wolpert D.H. No free lunch theorems for optimization / D.H. Wolpert, W.G. Macready // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 1997. – Vol. 1, № 1.

67. Altshuler E.E. Design of a loaded monopole having hemispherical coverage using a genetic algorithm / E.E. Altshuler, D.S. Linden // IEEE Transactions Antennas and Propagation. – 1997. – Vol. 45, № 1. – P. 1–4.

68. Yegin K. On the design of broad-band loaded wire antennas using the simplified real frequency technique and a genetic algorithm / K. Yegin, A.Q. Martin // IEEE Transactions Antennas and Propagation. – 2003. – Vol. 51, № 2. – P. 220–228.

69. Моделировщик антенн MMANA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cqham.ru/mmana.htm>.

70. MMANA-GAL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dl2kq.de/mmana/4-1.htm>.

71. NEC based antenna modeler and optimizer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://home.ict.nl/~arivoors/>

72. Газизов Т.Т. Параметрическая оптимизация антенны генетическими алгоритмами / Т.Т. Газизов // Научная сессия ТУСУР-2004 : материалы региональной науч.-техн. конф. – Томск, 2004. – Ч. 1. – С. 108–110.

73. Газизов Т.Т. Параметрическая оптимизация генетическими алгоритмами в программных системах электромагнитного моделирования для решения задач безопасности / Т.Т. Газизов, Т.Р. Газизов // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности : материалы 6-й всерос. науч.-практ. конф. – Томск, 2004. – С. 110–112.

74. Газизов Т.Т. Классификация методов глобальной оптимизации для решения задач безопасности / Т.Т. Газизов // Докл. Том.

гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – Томск, 2008. – № 2 (18). – Ч. 1. – С. 130–131.

75. Газизов Т.Т. Классификация методов глобальной оптимизации в задачах проектирования / Т.Т. Газизов // Научная сессия ТУСУР-2008: материалы докл. всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск : В-Спектр, 2008. – Ч. 1. – С. 60–63.

76. Норенков И.П. Эволюционные методы в задачах выбора проектных решений / И.П. Норенков, Н.М. Арутюнян // Наука и образование. – 2007. – № 9 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/68376.html>.

77. Computational intelligence [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_intelligence.

78. Газизов Т.Т. Сравнение методов глобальной оптимизации / Т.Т. Газизов // 16-е Туполевские чтения : материалы междунар. молодежной науч. конф. – Казань, 2008. – С. 219–221.

79. Минаков И.А. Сравнительный анализ некоторых методов случайного поиска и оптимизации / И.А. Минаков // Известия (Самарский научный центр РАН). – 1999. – № 2. – С. 286–293.

80. Golino G. A genetic algorithm for optimizing the segmentation in subarrays of planar array antenna radars with adaptive digital beamforming / G. Golino // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. – 2003. – October. – P. 211–216.

81. Hosung Choo. Design of electrically small wire antennas using genetic algorithm taking into consideration of bandwidth and efficiency / Choo Hosung, R. Rogers, Ling Hao // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2002. – Vol. 1. – P. 330–333.

82. Haupt R.L. Thinned arrays using genetic algorithms / R.L. Haupt, J.J. Menozzi, C.J. McCormack // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 1993. – P. 712–715.

83. Linden D.S. Evolving wire antennas using genetic algorithms : a review / D.S. Linden, E.E. Altshuler // Proc. 1st NASA/DoD Workshop on Evolvable Hardware. – 1999. – P. 225–232.

84. Design of ultra-broadband loaded monopoles / M. Bahr [et al.] // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 1994. – AP-S. Digest, Vol. 2. – 20–24 Jun. – P. 1290–1293.

85. Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков TALGAT / Т.П. Газизов [и др.] // Ком-

пьютерные учебные программы и инновации. – М. : ГОСКООР-ЦЕНТР, МФЮА, РУИ, 2007. – № 10. – С. 89–90.

86. Газизов Т.Т. Автоматизированное проектирование оптимальных антенн с сосредоточенными нагрузками / Т.Т. Газизов, А.О. Мелкозеров // Электронные средства и системы управления : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2005. – С. 149–152.

87. Газизов Т.Т. Параметрическая оптимизация антенны генетическими алгоритмами // 12-е Туполевские чтения : материалы междунар. молодежной науч. конф. – Казань, 2004. – С. 153–154.

88. A C++ Library of Genetic Algorithm Components [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lancet.mit.edu/ga/galib.tar.gz>.

89. Айзекс А. Dynamic HTML BHV / А. Айзекс. – СПб., 1998.

90. Тауерс Дж. Тарин. Macromedia Dreamweaver MX для Windows и Macintosh / Дж. Тарин Тауерс. – М. : ДМК, 2003.

91. Газизов Т.Т. Исследование точности решения СЛАУ методом Гаусса / Т.Т. Газизов // Научная сессия ТУСУР-2003 : материалы региональной науч.-техн. конф. – Томск, 2003. – Ч. 1. – С. 95–98.

92. Газизов Т.Т. Точность решения СЛАУ методом Гаусса / Т.Т. Газизов // 11-е Туполевские чтения : материалы междунар. молодежной науч. конф. – Казань, 2003. – С. 98.

93. Sarkar Tapan K. Survey of Numerical Methods for Solution of Large Systems of Linear Equations for Electromagnetic Field Problems / Tapan K. Sarkar // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. – 1981. – Vol. AP-29, № 6. – P. 847–853.

94. Singer H. The Method of Moments (MOM) and Related Codes / H. Singer // Supplement to Proceedings of 13th International Zurich Symposium. – Zurich, Switzerland, 1999. – 16–18 Febr. – P. 11–21.

95. Газизов Т.Т. Улучшение КСВ антенны включением полосозапирающих фильтров / Т.Т. Газизов, Т.Р. Газизов // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности : материалы 7-й всерос. науч.-практ. конф. – Томск, 2005. – С. 51–54.

96. Газизов Т.Т. Использование генетических алгоритмов для проектирования антенн / Т.Т. Газизов // Электронные и электромеханические системы и устройства : материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов. – Томск : ОАО «НПЦ "Полюс"», 2008. – С. 174–175.

97. Газизов Т.Т. Использование генетического алгоритма при оптимизации антенн / Т.Р. Газизов, Т.Т. Газизов // Современные

проблемы радиоэлектроники : материалы 6-й всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов. – Красноярск, 2004. – С. 296–298.

98. 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 7-й всерос. науч.-практ. конф. – Томск, 2005. – С. 47–51.

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

100. Широкодиапазонные приемопередающие комбинированные антенны : принципы построения, решение внутренней задачи / Н.Д. Малютин [и др.] // Электронные средства и системы управления : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Томск : Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004. – С. 107–111.

101. Пат. РФ на полезную модель № 66613. Широкополосная антенная система для работы в декаметровом диапазоне / Малютин Н.Д. [и др.]. – Заявка № 2007114313. – Приоритет полезной модели от 16 апреля 2007 г.

102. Экспериментальные характеристики комбинированных широкополосных антенн ДКМВ-диапазона / А.П. Рыбин [и др.] // Электронные средства и системы управления : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Томск : Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004. – С. 88–90.

103. Справочник по элементам полосковой техники (направленные ответвители 1–3 класса) / под ред. А.Л. Фельдштейна. – М. : Связь, 1979. – 336 с.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОВОДНЫХ АНТЕНН С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ	
1.1. Назначение антенн и их классификация	5
1.2. Основные задачи проектирования антенн	6
1.3. Использование сосредоточенных нагрузок в проводных антеннах.....	9
1.4. Анализ теоретических основ учета нагрузок	11
1.5. Подходы к решению задачи синтеза проводных антенн.....	21
1.6. Обзор методов глобальной оптимизации	22
1.7. Сравнение основных методов эволюционных вычислений.....	28
1.8. Комплексная оптимизация генетическими алгоритмами.....	36
1.9. Постановка задач исследования	38
2. МЕТОДЫ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ	
2.1. Классификация методов оптимизации.....	41
2.2. Анализ методов глобальной оптимизации	44
2.3. Недостатки и преимущества генетических алгоритмов.....	46
3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОВОДНЫХ АНТЕНН С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ	
3.1. Определение требований к программному обеспечению	48
3.2. Библиотека GAlib.....	49
3.3. Программная реализация работы генетического алгоритма на примере тестовых функций.....	55
3.4. Структура программного обеспечения	61
3.5. Информационное и алгоритмическое обеспечение	63
3.6. Графическое отображение	69
3.7. Интерфейс: использование DHTML-диалогов.....	71
3.8. Исследование точности решения СЛАУ методом Гаусса.....	77
3.9. Тестирование.....	80
4. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ НАГРУЗОК ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОВОДНЫХ АНТЕНН	
4.1. Методология снижения КСВ антенн за счет использования сосредоточенных нагрузок.....	85
4.2. Поэтапная оптимизация отдельных параметров антенны на основе генетических алгоритмов	86
4.3. Снижение КСВ антенны за счет оптимизации расположения и параметров полосозапирающих фильтров.....	88

4.4. Оптимизация сосредоточенных нагрузок при моделировании проводных антенн с нагрузками	91
4.5. Экспериментальное исследование быстроразвертываемых антенн ДКМВ-диапазона на примере четырехпроводной антенны	95
4.6. Особенности технологического исполнения четырехпроводной комбинированной антенны.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	108
ЛИТЕРАТУРА.....	109

Научное издание
Газизов Тимур Тальгатович
СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОВОДНЫХ АНТЕНН
Монография
Корректор Л.И. Кирпиченко
Компьютерная верстка Е.Н. Ворониной
Подписано в печать 19.09.13. Формат 60x84/16.
Усл.-печ. л. 6,98. Тираж 100 экз. Заказ 904.

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018.