

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)

Кафедра телевидения и управления (ТУ)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ТУ

\_\_\_\_\_ Т.Р. Газизов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ ПО ДИСЦИПЛИНАМ:  
«МОДАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ» И «ЗАЩИТНЫЕ ФИЛЬТРЫ»**

Разработчики:

\_\_\_\_\_ А.М. Заболоцкий

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

\_\_\_\_\_ А.О. Белоусов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

\_\_\_\_\_ Е.Б. Черникова

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Томск 2018

**А.М. Заболоцкий, А.О. Белоусов, Е.Б. Черникова**

Учебно-методическое пособие к лабораторным занятиям по дисциплинам:  
«Модальные фильтры» и «Защитные фильтры». – Томск: Томск. гос. ун-т  
систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 20 с.

Предназначено для магистрантов технических вузов, обучающихся по  
направлениям подготовки 11.04.01 «Радиотехника» и 11.04.02  
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

## **1 Лабораторная работа №1: Основные подходы к геометрическому построению поперечных сечений модальных фильтров. Вычисление и анализ матриц первичных и вторичных параметров.**

Цель работы – повторение основ построения поперечного сечения модального фильтра (МФ), вычисление матриц первичных и вторичных погонных параметров и вычисление временного отклика.

Для этого необходимо проанализировать поперечное сечение МФ в системе TALGAT, вычислить матрицы электростатической ( $\mathbf{C}$ ) и электромагнитной ( $\mathbf{L}$ ) индукций, характеристического импеданса ( $\mathbf{Z}_c$ ), погонных задержек ( $\mathbf{\tau}$ ), потерь в проводниках ( $\mathbf{R}$ ) и диэлектриках ( $\mathbf{G}$ ), вычислить временной отклик.

### **1.1 Краткая теоретическая справка**

Современные радиоэлектронные устройства имеют широкие функциональные возможности, но повышенную восприимчивость к электромагнитным помехам. Особо опасными представляются кондуктивные помехи, которые могут подаваться и проникать в аппаратуру непосредственно по проводникам. Возможности современных генераторов сверхкоротких импульсов (СКИ) весьма велики, поэтому необходимо совершенствовать защиту от СКИ.

Для защиты радиоэлектронных устройств от СКИ предложена технология модальной фильтрации, основанная на использовании модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за различия задержек мод.

При распространении импульса в отрезке линии, с неоднородным диэлектрическим заполнением, из  $N$  проводников (не считая опорного) импульс может подвергаться модальным искажениям, вплоть до разложения на  $N$  импульсов меньшей амплитуды из-за различия погонных задержек мод в линии. Полное разложение импульса в отрезке длиной  $l$  имеет место, если общая длительность импульса  $t_{\Sigma}$  меньше минимального модуля разности

задержек распространения мод в линии, т.е. при условии

$$t_{\Sigma} < l \cdot \min|\tau_i - \tau_k|, \quad i, k=1, \dots, N, \quad i \neq k, \quad (1.1)$$

где  $\tau_{i(k)}$  – погонная задержка  $i(k)$ -й моды отрезка. Для пары связанных линий ( $N=2$ ) из (1.1) следует

$$t_{\Sigma} < l \cdot |\tau_2 - \tau_1|, \quad (1.2)$$

где  $\tau_2, \tau_1$  – погонные задержки чётной и нечётной мод в отрезке связанных линий. Таким образом, если в начало отрезка связанных линий между одним и общим проводниками подается импульс длительностью меньшей, чем разность задержек мод этого отрезка, то к концу отрезка (между теми же проводниками) придут 2 импульса (импульс 1 и импульс 2), причем амплитудой в 2 раза меньшей, чем амплитуда импульса в начале отрезка, как показано на рис. 1.1 (Результаты вычислены при значениях резисторов, выбранных из условия псевдосогласования).

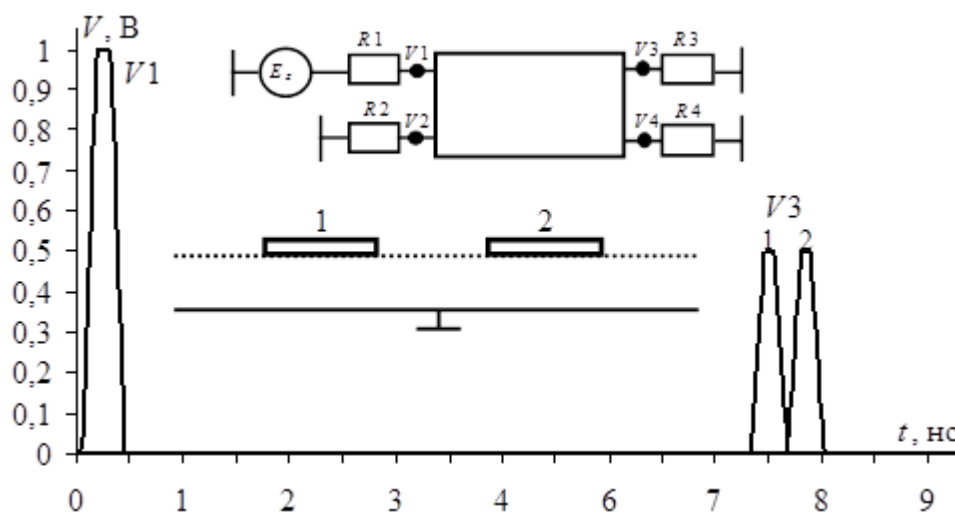


Рисунок 1.1 – Разложение импульса в одиночном отрезке связанной линии

Режим холостого хода на концах пассивного проводника (когда к концам пассивного проводника подключались резисторы с сопротивлением 10 кОм, а на активных проводниках выбирались из условия псевдосогласования) не влияет на форму импульсов разложения, а только незначительно изменяет их амплитуду (рис. 1.2).

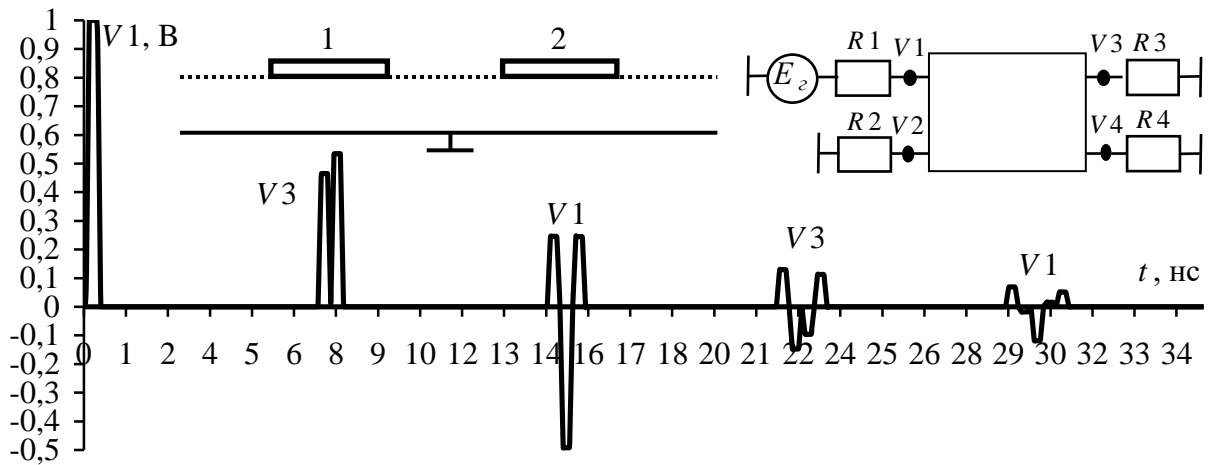


Рисунок 1.2 – Формы напряжения в активном проводнике для режима холостого хода на концах пассивного проводника

В системе TALGAT для моделирования МФ необходимо построить геометрическую модель поперечного сечения МФ, вычислить матрицы первичных погонных параметров электростатической ( $C$ ) и электромагнитной ( $L$ ) индукций, на их основе вычислить матрицы характеристического импеданса ( $Z_c$ ), погонных задержек ( $\tau$ ). Они связаны следующим образом:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.3)$$

$$\tau = l \cdot \sqrt{LC}, \quad (1.4)$$

где  $l$  – длина линии.

Для учета потерь в линии вычисляются матрицы потерь в проводниках ( $R$ ) и диэлектриках ( $G$ ).

Далее выполняется построение принципиальной электрической схемы для моделирования, задаются нагрузки и воздействие, вычисляется временной отклик на импульсное воздействие СКИ.

## 1.2 Порядок выполнения работы

1. Проанализировать поперечное сечение трехпроводного МФ.
2. Используя команды системы TALGAT вычислить матрицы  $L$ ,  $C$ ,

$R, G, Z_c, \tau$ .

3. Построить принципиальную электрическую схему с нагрузками на концах МФ 50 Ом (рис. 1.3).

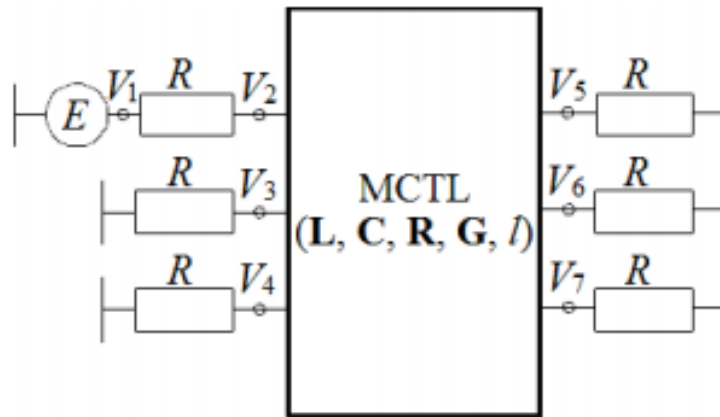


Рисунок 1.3 – Принципиальная электрическая схема трехпроводного МФ

4. Задать воздействие СКИ трапецеидальной формы с длительностью фронта, спада и плоской вершины равными по 50 пс, так что  $t_{\Sigma}=150$  пс, а амплитуда – 5 В (рис. 1.4).

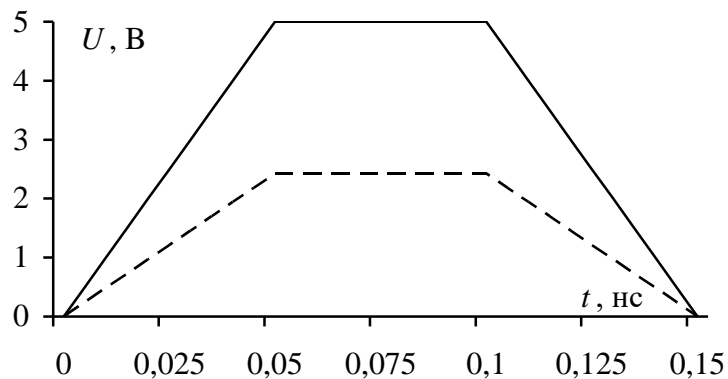


Рисунок 1.4 – Форма ЭДС (—) и форма сигнала на входе (---)

5. Вычислить временной отклик на импульсное воздействие.
6. Определить ослабление выходного сигнала.

### 1.3 Содержание и требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 «Работы

студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления».

## **2 Лабораторная работа №2: Формулировка основных критериев для оптимизации модальных фильтров. Оптимизация эвристическим поиском**

Цель работы – ознакомиться с основными критериями оптимизации МФ, выполнить оптимизацию трехпроводного МФ эвристическим поиском по выбранным критериям.

### **2.1 Краткая теоретическая справка**

Известно, что параметры поперечного сечения МФ влияют на характеристики МФ. Для улучшения характеристик МФ необходимо выполнять оптимизацию. Для успешного выполнения задачи оптимизации необходимо определиться со следующими понятиями:

- целевые параметры – это те требования, которые определены в техническом задании;

- варьируемые параметры – это параметры, характеризующие свойства модели (сопротивление, толщина, длина линий и т.д.). Чем больше варьируемых параметров, тем более сложным и длительным становится решение задачи оптимизации;

- граничные условия – это диапазоны значений варьируемых параметров, выход за которые в процессе оптимизации запрещается.

Оптимизация бывает однокритериальной и многокритериальной. Формирование и достижение цели при однокритериальной оптимизации обычно выглядит достаточно просто: нужно максимально приблизить критерий оптимизации к заданному значению.

Можно выделить основные критерии оптимизации МФ.

#### *А. Амплитудный Критерий*

Наиболее важным критерием оптимизации МФ является амплитудный. Он может рассматриваться во временной и частотной областях. Для защиты от СКИ актуален анализ формы сигнала  $U(t)$  на выходе МФ. Поэтому рассмотрим амплитудный критерий во временной области. В данном случае,



опасность представляет максимальный уровень сигнала  $U(t)$  на выходе МФ. Используя это, можно сформулировать выражения для  $f_i$  и  $K_i$ :

$$f_1 = \max|U(t)|, \quad K_1 = \max|E(t)|. \quad (2.1)$$

### *В. Диапазонно-временные Критерии*

Диапазонно-временные критерии связаны с расширением временного диапазона импульсов разложения на выходе МФ. Эти критерии важны для увеличения максимальной длительности воздействующего СКИ, который будет полностью разлагаться. Первый из них устремляет значение погонной задержки первого импульса ( $\tau_{\min}$ ) к минимально возможному, т.е. определяемому скоростью света в вакууме. Второй критерий устремляет значение погонной задержки последнего импульса ( $\tau_{\max}$ ) к максимально возможному, т.е. определяемому скоростью света в диэлектрике МФ с максимальным значением относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{r\max}$ ).

1. Для первого диапазонно-временного критерия

$$f_2 = \tau_{\min} - \frac{1}{c}, \quad K_2 = \frac{\sqrt{\epsilon_{r\max}} - 1}{c}. \quad (2.2)$$

2. Для второго диапазонно-временного критерия

$$f_3 = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} - \tau_{\max}, \quad K_3 = \frac{\sqrt{\epsilon_{r\max}} - 1}{c}. \quad (2.3)$$

Эти критерии естественно использовать совместно. Они применимы для МФ с любым числом проводников ( $N$ ).

### *С. Интервально-временной Критерий*

Этот критерий важен при  $N > 2$ . Он применяется для выравнивания временных интервалов между импульсами на выходе МФ. Оно позволяет увеличить длительность воздействующего СКИ, который будет разлагаться на выходе МФ полностью. Для упорядоченных по возрастанию значений погонных задержек, на основе отклонения текущих значений погонных

задержек промежуточных мод от значений при равномерных временных интервалах между импульсами, получим

$$f_4 = \max \left| \tau_i - (\tau_{\min} + (i-1) \cdot \Delta) \right|, \quad i = 2, \dots, N-1,$$

$$K_4 = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r \max}} - 1}{c}, \quad (2.4)$$

где

$$\Delta = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{N-1}, \quad (2.5)$$

где  $\tau_i$  – значение погонной задержки  $i$ -й моды.

#### *D. Критерий согласования*

Одним из важных критериев при оптимизации МФ является критерий согласования. Этот критерий важен для минимизации отражений полезных высокочастотных сигналов от входа МФ.

Известно условие согласования двух связанных линий сопротивлениями  $R$  на их концах. Оно определяется как среднегеометрическое значение импедансов четной и нечетной мод [11]:

$$R = \sqrt{Z_e \cdot Z_o}. \quad (2.6)$$

В многопроводных линиях передачи количество распространяющихся мод равно количеству проводников ( $N$ ). Из собственных значений матрицы импедансов линии можно определить импедансы мод. Последующие этапы определения условия согласования, видимо, возможны на основе теории многопроводных линий передачи, но авторам пока не ясны. Между тем, по аналогии с согласованной одиночной линией передачи, для согласования тракта с многопроводной линией передачи можно использовать условие равенства амплитуды сигнала в начале линии  $U_{IN}(t)$  и половины ЭДС источника сигнала  $E(t)$ . Тогда после упрощения получим

$$f_5 = \left| \max(E(t)) - 2 \max(U_{IN}(t)) \right|, \quad K_5 = \max |E(t)|. \quad (2.7)$$

Данный критерий естественно использовать при  $N > 2$ . Однако он требует вычисления отклика в начале линии, хотя и не требующего существенных дополнительных затрат при анализе в частотной области.

Существует также класс алгоритмов оптимизации, которые не опираются на какую-либо теорию, но результативность, которых доказано экспериментально. Такая оптимизация называется эвристическим поиском.

## **2.2 Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с основными видами критериев оптимизации.
2. Выполнить оптимизацию эвристическим поиском трехпроводного МФ по критериям:
  - a. минимизация максимальной амплитуды на выходе МФ;
  - b. расширение временного диапазона импульсов разложения на выходе МФ;
  - c. выравнивание временных интервалов между импульсами разложения на выходе МФ;
  - d. согласование МФ.
3. Оценить влияние каждого параметра на решение целевой функции.

## **2.3 Содержание и требования к оформлению отчета**

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления».

### **3 Лабораторная работа №3: Введение в генетические алгоритмы. Реализация генетического алгоритма в системе TALGAT на примере тестовой функции**

Цель работы – ознакомиться с принципами работы генетических алгоритмов (ГА) и выполнить реализацию генетического алгоритма в системе TALGAT на примере тестовой функции.

#### **3.1 Краткая теоретическая справка**

Использование генетических алгоритмов при решении инженерных задач позволяет с большой вероятностью найти верное решение.

Для реализации программного обеспечения работы ГА необходимо алгоритмическое обеспечение. Используя алгоритм работы ГА, представим алгоритм работы ГА для некоторой функции  $y(x)$ , при этом будем считать, что  $y(x)$  может быть, как функцией одной, так и нескольких переменных. Принцип работы ГА упрощенно проиллюстрирован на рисунке 3.1 и может быть представлен в виде алгоритма.

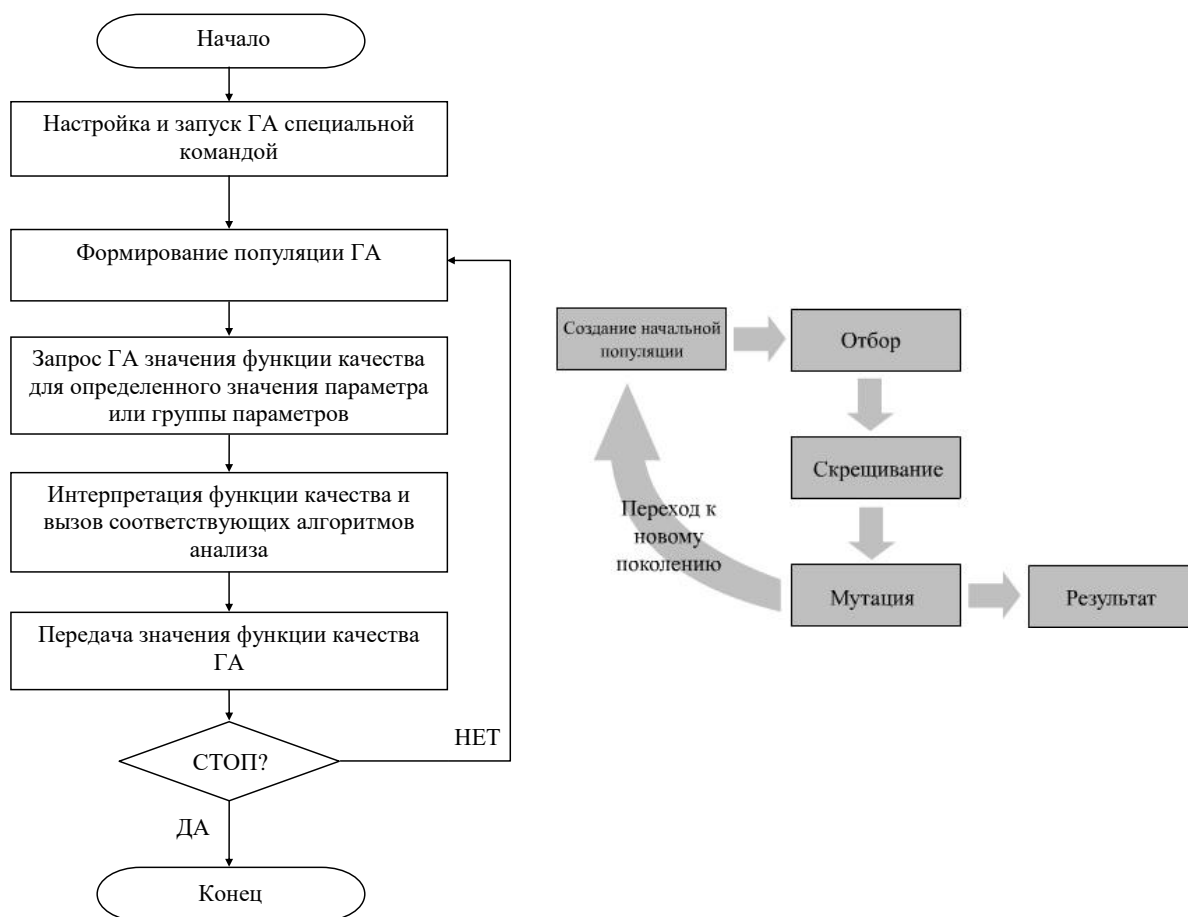


Рисунок 3.1 – Принцип работы ГА

Генетический алгоритм (англ. genetic algorithm) — это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём последовательного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию. Является разновидностью эволюционных вычислений (англ. evolutionary computation). Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе.

Для решения поставленных задач целесообразно пронаблюдать реализацию работы ГА на примере тестовой функции, зависящей от двух переменных.

1. Случайным образом генерируется конечный набор пробных решений:  $P^1 = \{p_1^1 \dots p_n^1\}$ ,  $p_i^1 \in X$  (первое поколение,  $n$  - размер популяции).

2. Оценка приспособленности текущего поколения:  $F^k = \{f_1^k \dots f_n^k\}$ ,  $f_i^k = W(p_i^k)$

3. Выход, если выполняется критерий останова, иначе

4. Генерация нового поколения посредством операторов селекции  $S$ , скрещивания  $C$  и мутаций  $M$ :  $P^{k+1} = M \cdot C \cdot S(P^k, F^k)$  и переход к пункту 2.

В процессе селекции выживают отбирают только несколько лучших пробных решений, остальные далее не используются. Скрещивание за место пары решений создаёт другую, элементы которой перемешаны каким-то особым образом. Мутация случайным образом меняет какую-нибудь компоненту пробного решения на иную.

### Иные обозначения

Несмотря на внушительный возраст, в генетических алгоритмах до сих пор используют различную терминологию, проистекающей как из генетики, так и из кибернетики.

Встречаются такие обозначения:

1. Функция приспособленности (Fitness)  $W(x)$  - целевая функция;
2. Особь - пробное решение  $p_i^k \in X$ ;
3. Популяция - все поколения, вносящие вклад в последующее. Чаще всего поколение и популяция - синонимы;
4. Ген - компонент вектора  $x$  пространства поиска  $X$ ;

### 3.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с реализацией ГА в системе TALGAT.
2. Выполнить оптимизацию функций, представленных в (3.1), (3.2), (3.3), в которых требуется найти  $\max f(x_1, x_2)$  (всего 10 запусков).

$$f(x_1, x_2) = (-2x_2^3 + 6x_2^2 + 6x_2 + 10) \cdot \sin(\ln(x_1) \cdot e^{x_2}), \quad (3.1)$$
$$0,5 \leq x_1 \leq 1,1, 1,0 \leq x_2 \leq 4,6$$

$$f(x_1, x_2) = (1 - x_1)^2 + 5(x_2 - x_1)^2, \quad -10 \leq x_1 \leq 10 \quad -10 \leq x_2 \leq 10 \quad (3.2)$$

$$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)) \quad (3.3)$$

3. Результаты оптимизации с помощью ГА для функции соответственно занести в табл 3.1.

4. Привести графики сходимостей значений переменных для функций.

Таблица 3.1 – Результаты работы ГА для тестовой функции

Номер запуска	Параметры запуска: 30 особей 10 поколений	Параметры запуска: 30 особей 100 поколений	Параметры запуска: 30 особей 1000 поколений
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
Эталон			

### 3.3 Содержание и требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления».

#### **4 Лабораторная работа №4: Реализация генетического алгоритма на примере модального фильтра. Реализация программного кода. Оптимизация по выбранному критерию**

Цель работы – выполнить оптимизацию трехпроводного МФ генетическим алгоритмом в системе TALGAT.

##### **4.1 Краткая теоретическая справка**

Использование ГА позволяет автоматизировать процесс анализа, сравнения и выбора оптимальных структур в системе TALGAT. Особенность системы TALGAT состоит в открытости для включения моделей для анализа разнотипных структур, что не позволяет «жестко» закодировать определенный набор функций качества. Однако наличие встроенного скриптового языка системы позволяет решить эту проблему. В результате такого подхода становится возможным оптимизировать любой параметр анализируемой структуры в системе с помощью ГА.

Особым элементом реализации ГА в системе является функция качества – созданная пользователем команда на скриптовом языке. При этом значения параметров функции качества внутри пользовательской команды являются переменными, которые пользователь может использовать по своему усмотрению (например, в качестве одного из геометрических параметров структуры – для оптимизации данного геометрического параметра).

Особую роль при моделировании МФ играет 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. ПО для моделирования проводных антенн с нагрузками использует в качестве критерия оптимизации использует минимизацию или максимизацию значения функции качества, а в качестве установок работы самого алгоритма – 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 (рис. 4.1):

```
CREATE_KEYWORD "ИМЯ_ФУНКЦИИ_КАЧЕСТВА"
АНАЛИЗИРУЕМАЯ_СТРУКТУРА
ВЫЧИСЛЕНИЕ_ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ_ХАРАКТЕРИСТИК
END_CREATE_KEYWORD ИМЯ_ПЕРЕМЕННОЙ
(ЗНАЧЕНИЕ_ФУНКЦИИ_КАЧЕСТВА)
```

Рисунок 4.1 – Листинг функции качества в общем виде

Задание функции оптимизации в общем виде, на примере минимизации функции, выглядит следующим образом (рис. 4.2).

```
GA_MIN ПАРАМЕТРЫ_ФУНКЦИИ_ОПТИМИЗАЦИИ
"ИМЯ_ФУНКЦИИ_КАЧЕСТВА"
```

Рисунок 4.2 – Листинг функции оптимизации в общем виде

На рис. 4.3 приведена схема взаимодействия данных в модуле оптимизации в общем виде.



Рисунок 4.3 – Структура информационного обеспечения системы комплексной оптимизации радиоэлектронных устройств

Из рис. 4.3 видно, что входными параметрами ПО для моделирования МФ являются: параметры анализируемой структуры и диапазоны их изменения, необходимые характеристики, критерий оптимизации, параметры ГА и условие останова (как правило, определяется количеством поколений и задается в параметрах ГА), а выходным параметром является оптимальная структура.

#### 4.2 Порядок выполнения работы

1. Адаптировать имеющийся файл трехпроводного МФ для реализации оптимизации ГА по одному критерию.
2. Реализовать целевую функцию для критерия с помощью скриптового языка системы TALGAT.
3. Результаты оптимизации с помощью ГА для трехпроводного МФ занести в табл 3.1.
4. Привести графики сходимостей значений переменных к целевой функции.

Таблица 4.1 – Результаты работы ГА для тестовой функции

Номер запуска	Параметры запуска: 30 особей 10 поколений	Параметры запуска: 30 особей 100 поколений	Параметры запуска: 30 особей 1000 поколений
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
Эталон			

#### 4.3 Содержание и требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать титульный лист, название работы и цель

работы, исходные данные, результаты расчетов, таблицы и графики, анализ результатов и выводы по работе.

Оформление должно соответствовать ОС ТУСУР 01-2013 "работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления".

## Литература

1. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. Томск: Томский государственный университет, 2007. –152 с.
2. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Томск: Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники-2013. –151 с.
3. Салов В.К., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Суровцев Р.С., Орлов П.Е. Совершенствование моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. Томск: Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники-2014. – 131 с.
4. Калимулин И.Ф., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Методики и модели для учёта паразитных параметров печатных узлов при анализе электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. Томск: Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники-2015. –160 с.
5. Калимулин И.Ф., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Томск: Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники-2016. –288 с.
6. Мелкозеров А.О. Компьютерное моделирование и оптимизация электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры космических аппаратов: моногр. / А.О. Мелкозеров, Р.И. Аширбакиев. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 220 с.