

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Радиотехнический факультет (РТФ)

Кафедра средств радиосвязи (СРС)

**В.А. Кологривов**

**ЦИКЛ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО РАЗДЕЛУ  
«ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ»**

**Учебное методическое пособие**  
для студентов радиотехнических специальностей  
по лабораторным работам  
в среде для инженерных и научных расчетов  
MATLAB

**2012**

Кологривов В.А.

Цикл лабораторных работ по разделу “Оптимизация параметров радиоэлектронных устройств”: Учебное методическое пособие для студентов радиотехнических специальностей по лабораторным работам – Томск: ТУСУР. Образовательный портал, 2012. – 50 с.

Учебное методическое пособие содержит описание лабораторных работ по разделу “Оптимизация параметров радиоэлектронных устройств” предусмотренных дисциплиной “Основы автоматизированного проектирования РЭУ” либо ей подобными. Рассмотрены наиболее известные методы оптимизации параметров радиоэлектронных устройств с целью достижения заданных характеристик. Пособие предназначено для студентов очной формы обучения высшего специального образования, по направлениям: «Радиотехника», «Телекоммуникации» и др.

© Кологривов В.А., 2012

© ТУСУР, РТФ, каф. СРС, 2012 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение	4
1 Краткие теоретические сведения	6
1.1 Постановка задачи оптимизации	6
1.2 Функциональная среда системы MATLAB	10
2 Содержание лабораторных работ. Общие рекомендации по выполнению	14
3 Описания лабораторных работ	17
3.1 Лабораторная работа №1. Функции оптимизации системы MATLAB	17
3.2 Лабораторная работа №2. Оптимизация параметров резистивного аттенюатора	18
3.3 Лабораторная работа №3. Оптимизация параметров модели биполярного транзистора	22
3.4 Лабораторная работа №4. Оптимизация параметров каскада с комбинированной ОС	27
3.5 Лабораторная работа №5. Настройка контура резонансного усилителя на заданную частоту	31
3.6 Лабораторная работа №6. Настройка безиндуктивного резонансного усилителя на заданную частоту	36
4 Образец оформления отчета по лабораторной работе	42
Список использованных источников	50

## ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация или параметрический синтез является основным способом автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры по заданным требованиям. Под автоматизированным проектированием будем в данном случае понимать один из его этапов, а именно, этап схемотехнического проектирования.

Схемотехническое проектирование подразумевает разработку схемного решения заданного устройства и гарантирование его электрических характеристик в заданных пределах. Схема устройства, в общем случае представляет собой графическое отображение соединений элементов, реализующих заданное устройство. Таким образом, схема или принципиальная схема представляет собой графическую модель соединений элементов с отображением некоторых параметров элементов.

Наряду с принципиальными схемами, в радиотехнике и электронике, часто используются эквивалентные схемы или модели сложных базовых элементов типа диода, транзистора и так далее. Эквивалентные схемы представляют собой электрическую модель сложного элемента в виде соединения набора идеализированных базовых элементов. К базовым элементам относятся идеальные резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы, трансформаторы, независимые и управляемые генераторы тока и напряжения и так далее. Эквивалентные модели строятся, как правило, на основании представлений о протекающих физических процессах при работе элемента и отражают их электрическую аналогию.

Параметрический синтез предполагает, что выбран вариант схемного решения, способного обеспечить заданные требования. В процессе параметрического синтеза уточняются конкретные значения параметров элементов схемы. Оптимизация, как метод автоматизированного проектирования, представляет собой стратегию целенаправленного перебора параметров элементов схемы с целью удовлетворения заданным требованиям.

Для реализации целенаправленного перебора параметров элементов на каждом этапе перебора производится вычисление значения, так называемой целевой функции, включающей отклонения полученных характеристик от требуемых. Это означает, что при построении и вычислении целевой функции алгоритмы расчета характеристик предполагаются известными.

Расчет характеристик сводится к построению и численному решению математических моделей устройства. Под математической моделью понимается, та или иная система уравнений, переменные (параметры) которой описывают динамику электрических процессов реальных устройств. Наиболее часто встречаемые в автоматизированном проектировании математические модели представляют собой системы линейных либо нелинейных алгебраических уравнений, системы дифференциальных уравнений, а также всевозможные их комбинации. Математические модели

автоматически формируются на основании заданных схемных решений и известных эквивалентных моделей сложных элементов.

Расчет электрических параметров схемных решений часто называют схемотехническим моделированием. В настоящее время получили распространение ряд пакетов или систем схемотехнического проектирования и моделирования, например, Electronics WorkBench (EWB), Micro Cap, PSpice и другие. Они различаются, как по своим возможностям, так и по областям применения. В тоже время профессиональная работа с этими пакетами подразумевает глубокое знание предметной области, моделей элементной базы, методов формирования математических моделей и алгоритмов их решения. Только в этом случае удастся довести проектирование сложного устройства или аппаратуры до конца. Кроме того, у разработчика аппаратуры часто возникают нестандартные задачи проектирования, не реализованные в настоящее время в универсальных пакетах, или они ему по какой либо причине недоступны.

Таким образом, изучение основ автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств или устройств нельзя отождествлять с изучением работы конкретного универсального пакета автоматизированного проектирования. Это, скорее всего, необходимый элемент в изучении данной дисциплины, тем более что методы и алгоритмы реализации основных этапов моделирования и проектирования, как правило, скрыты от пользователя. В связи с этим в ТУСУРе, в частности на радиотехническом факультете, принята другая концепция изучения данной дисциплины.

В основу курса лекций и лабораторных работ по дисциплине положено овладение концепцией, принципами, методами и алгоритмами автоматизированного проектирования. В этом случае студент или выпускник, изучивший основные принципы и методы, сможет легко осваивать работу конкретного пакета, участвовать в его модернизации или разработке новых программных продуктов, а также использовать полученные знания в своей повседневной профессиональной деятельности при решении нестандартных задач проектирования.

В качестве среды для реализации практического овладения методами и алгоритмами выбрана известная система для инженерных и научных расчетов **MATLAB**, получившая распространение во многих университетах мира. Систему **MATLAB** отличают: простота входного языка программирования; богатство математической среды; средства объектного программирования; прекрасные средства визуализации вычислений и организации графического интерфейса; сопряжение с алгоритмическими языками **C**, **Fortran** и редактором **Word**; обилие пакетов расширений системы, в частности, **“Optimization Toolbox”** (Оптимизация), **Signal Processing Toolbox**, **Simulink**, **Control System Toolbox** и другие. К настоящему времени выпущена целая серия книг посвященных программированию в системе **MATLAB** и пакетам ее расширений. Студенты

очной формы обучения знакомятся с основами программирования в среде системы **MATLAB**, начиная с первого года обучения.

В связи с обстоятельствами, перечисленными выше, система **MATLAB** выбрана в качестве основной среды для реализации цикла лабораторных работ по дисциплине «Основы автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств (АПР РЭУ)». Причем для реализации лабораторных работ достаточно версии **MATLAB\_4.0**, как наиболее доступной и наименее требовательной к ресурсам компьютера.

Следует, однако, отметить, что при переходе от младшей к старшей версии **MATLAB** могут возникнуть определенные трудности. Так, начиная с версии **MATLAB 5.3**, изменились названия универсальных функций минимизации пакета расширений “**Optimization Toolbox**” (Оптимизация) и содержание входных параметров.

**Цель цикла лабораторных работ по оптимизации:** приобретение навыков работы с системой для инженерных и научных расчетов **MATLAB**; иллюстрация форм организации графического интерфейса программ в среде системы **MATLAB**; ознакомление с содержанием пакета расширений “**Optimization Toolbox**” (Оптимизация) и постановкой задач оптимизации (параметрического синтеза) РЭУ; выполнение оптимизации параметров на схемотехническом уровне простых РЭУ; изучение особенностей и эффективности различных методов оптимизации реализованных в виде универсальных функций пакета расширений **MATLAB “Optimization Toolbox”**.

## 1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1.1 Постановка задачи оптимизации

**Основные понятия.** Оптимизация или параметрический синтез представляет собой целенаправленный перебор параметров РЭУ с целью удовлетворения требованиям (характеристикам или техническим показателям) определенным техническим заданием (ТЗ). Применительно к этапу схемотехнического проектирования подразумевается перебор параметров схемы устройства с целью удовлетворения заданным требованиям на электрические характеристики. Представление о существующих методах оптимизации можно получить из [1-6].

Набор требований ТЗ чаще всего противоречив в том смысле, что улучшение одного показателя зачастую ведет к ухудшению других. В связи с этим задача оптимизации состоит в нахождении компромиссного схемного решения по совокупности технических характеристик.

Оптимизации предшествует анализ требований ТЗ и выбор предполагаемого схемного решения, способного, по мнению

проектировщика при определенном наборе параметров удовлетворить заданным требованиям. Кроме того, исходя из опыта проектировщика, необходимо задать начальные значения варьируемых параметров – вектор начальных значений. Таким образом, различают заданные характеристики и текущие характеристики при конкретном наборе варьируемых параметров.

Целью оптимизации является поиск такого набора параметров схемы, при котором отклонение текущих характеристик от заданных ТЗ, минимально. Для организации целенаправленного перебора параметров схемы РЭУ необходимо на каждом шаге перебора вычислять заданные характеристики и принимать решение относительно их улучшения, с тем, чтобы предложить следующий набор параметров. В связи с этим вводится понятие обобщенного показателя или целевой функции объединяющей всю совокупность требований.

Акцентируем внимание еще раз на том, что при изложении вопросов оптимизации под параметрами будем понимать варьируемые значения номиналов элементов либо значений внешних факторов (например, температуры), а под характеристиками – требования и показатели, определяемые ТЗ, и зависящие от параметров.

**Целевая функция.** Рассмотрим возможный вариант построения целевой функции. Прежде всего, она должна включать сумму отклонений текущих характеристик от заданных ТЗ. Для того чтобы отклонения с разным знаком не скомпенсировали друг друга и соответственно для исключения ложного оптимума необходимо суммировать квадраты отклонений. Так как значения характеристик и их отклонений, могут существенно отличаться друг от друга и их вклады в целевую функцию в связи с этим могут оказаться разными. Для обеспечения одинакового вклада отклонений в целевую функцию их нормируют относительно соответствующего значения заданной характеристики. Иногда желательно вклад конкретного отклонения в целевую функцию изменить в большую или меньшую сторону. Изменение вклада конкретного отклонения реализуется весовыми коэффициентами. Под целевой функцией, чаще всего, понимают корень квадратный из суммы квадратов нормированных отклонений характеристик заданных с весовыми коэффициентами.

Таким образом, мы пришли к выражению целевой функции следующего вида

$$z = \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i \left( \frac{fz_i - ft_i}{fz_i} \right)^2},$$

где  $z$  - значение целевой функции;  $n$  - число характеристик учитываемых целевой функцией;  $fz_i$  - требуемые значения характеристик;  $ft_i$  - текущие значения характеристик;  $p_i$  - весовые коэффициенты отклонений. Здесь под числом характеристик следует понимать не только в полном смысле различные показатели, но и их значения на разных точках частотного диапазона и так далее.

Естественно, что целевая функция может быть иной, например, иметь следующий вид

$$z = \sqrt{\sum_{i=1}^n P_i \left( \frac{fz_i}{ft_i} - \frac{ft_i}{fz_i} \right)^2}.$$

Как видим, в данном случае, целевая функция имеет вид относительной расстройки, имеющей несимметричный характер в окрестности оптимума.

Вообще, целевая функция отражает специфику решаемой задачи и опыт разработчика конкретных РЭУ. Особую сложность при оптимизации представляет включение в целевую функцию требований на фазовую характеристику в связи с ее неоднозначностью относительно  $\pi$  радиан.

Написание целевой функции является своего рода искусством и во многом определяет успех решения поставленной задачи. Дело в том, что целевая функция, не отражающая специфику поставленной задачи, часто приводит к неприемлемым результатам.

Встречаются и задачи максимизации или получения предельных значений характеристик. Можно, однако, легко убедиться, что сменой знака целевой функции задача минимизации преобразуется в задачу максимизации и наоборот. В связи с этим в дальнейшем мы будем вести речь о задаче минимизации целевой функции.

Особый интерес представляют различного рода ограничения на диапазон варьируемых параметров, например, исходя из условий физической реализуемости. Такого рода задачи относятся к классу задач условной оптимизации. Только иногда в простых случаях при использовании адекватных моделей устройств и разумных требований удается найти физически реализуемое решение, не накладывая ограничения на параметры, то есть, используя безусловную оптимизацию.

Эффективность оптимизации существенно зависит от метода или стратегии перебора параметров. В настоящее время известно огромное число методов и их модификаций. Поиск оптимального решения производится в пространстве варьируемых параметров, что соответствует понятию многомерного пространства в математике. Естественно, что параметры предполагаются независимыми, и каждый из них соответствует координатной оси многомерного пространства.

**Классификация методов оптимизации.** Все методы условно можно разбить на две большие группы: градиентные и безградиентные методы.

**Градиентные методы** в процессе перебора параметров или принятия решений используют значения градиента (вектора производных) целевой функции по каждому параметру или направлению в пространстве параметров. Эти методы требуют аналитического задания градиента либо его численного определения. Некоторые методы используют и вторые производные целевой функции по варьируемым параметрам.



**Безградиентные методы** используют лишь значения целевой функции в текущей и предшествующих точках при переборе параметров и выработке решений. В технических приложениях, как правило, целевые функции весьма сложные и задать градиент аналитически не представляется возможным, поэтому используют методы с численным определением градиента.

По другой классификации все стратегии оптимизации подразделяют на методы нулевого, первого и второго порядков.

**К методам нулевого порядка относятся** методы, не использующие значения градиента целевой функции. Это методы типа Хука-Дживса, симплексный метод и метод Розенброка, которые имеют линейную скорость сходимости, а некоторые из них весьма гибкую стратегию перебора параметров.

**К методам первого порядка относятся** методы типа наискорейшего спуска, сопряженных градиентов, Флетчера-Пауэла и так далее, использующие первые производные целевой функции по параметрам в виде Якобиана. Эти методы имеют квадратичную скорость сходимости в окрестности оптимума.

**К методам второго порядка относятся** квази-Ньютоновские методы, учитывающие вторые производные целевой функции по параметрам в виде Гессиана, имеющие еще большую скорость сходимости.

Необходимо особо отметить, что все эти методы при сложных многоэкстремальных функциях ищут ближайший к исходной точке многомерного пространства минимум. Для поиска глобального минимума и детального исследования многоэкстремальной функции цели используют различные начальные точки пространства параметров. Иногда для поиска глобального минимума используют датчик равномерного случайного выбора в многомерном пространстве параметров для выбора начальных значений параметров.

**Математическая формулировка задачи оптимизации.** Простейшая задача оптимизации или параметрического синтеза формулируется как задача нахождения оптимального набора варьируемых аргументов  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  функции  $f(x)$ , при котором она принимает минимальное значение, причем все аргументы принадлежат  $n$ -мерному пространству действительных чисел  $R^n$ . Эта задача безусловной минимизации кратко записывается в виде  $\min_{x \in R^n} f(x)$ .

Общая формулировка задачи оптимизации предполагает нахождение оптимального вектора аргументов соответствующего  $\min_{x \in R^n} f(x)$ , при выполнении дополнительных ограничений типа равенств  $q(x) = 0$ , неравенств  $g(x) \leq 0$  и на диапазон варьируемых аргументов  $x_l \leq x \leq x_u$ . При линейных ограничениях и целевой функции задача оптимизации соответствует задаче линейного программирования. В случае линейных ограничений, но квадратичной относительно аргументов целевой функцией

имеем дело с задачей квадратичного программирования. В общем же случае получаем задачу нелинейного программирования.

Заметим, что в данном случае речь идет об оптимизации скалярной функции нескольких аргументов (переменных). При этом значение скалярной функции одновременно является целевой функцией. В том случае, когда рассматривается вектор или набор скалярных функций нескольких аргументов, говорят о многокритериальной оптимизации. При этом минимизируется вектор функций (целей) в ограниченном либо неограниченном пространстве параметров. Из предыдущего изложения следует, что сведение нескольких критериев в одну целевую функцию позволяет перейти к оптимизации по одному обобщенному критерию.

Подчеркнем еще раз, что задача сведения нескольких критериев (требований) в один общий требует глубокого знания предметной области и предварительных исследований. Дело в том, что вид целевой функции наряду с методом оптимизации существенно влияют на эффективность оптимизации.

## 1.2 Функциональная среда системы MATLAB

Данный цикл лабораторных работ предлагается провести в среде системы для научных и инженерных расчетов **MATLAB**. Дело в том, что система **MATLAB** имеет достаточное число универсальных функций оптимизации реализующих гибкие стратегии поиска оптимальных решений, как в полном, так и ограниченном пространстве параметров. Последние версии **MATLAB** содержат пакеты расширения системы, в частности пакет **“Optimization Toolbox”**. Младшие версии системы **MATLAB** содержат те же функции оптимизации в каталоге **“Optimize”**. К ним в частности относятся функции:

**fmin**- скалярная одномерная оптимизация при ограничении диапазона изменения параметров;

**fmins**- безусловная многомерная (без ограничений) оптимизация;

**fminu**- безусловная многомерная оптимизация при использовании значений градиента минимизируемой функции;

**constr**- многомерная минимизация при наличии ограничений (условная);

**seminf**- многомерная полубесконечная оптимизация;

**attgoal**- многомерная, многоцелевая оптимизация с ограничениями.

В данном методическом пособии рассмотрена система **MATLAB 4.0** в связи с тем, что она работает с младшими версиями **Windows**, занимает меньший объем на диске и должна быть существенно дешевле последних версий системы. В тоже время ее возможности позволяют в полной мере реализовать поставленные в лабораторном цикле задачи и при необходимости легко перейти к последним версиям системы. Более

подробное представление о системе **MATLAB**, функциях оптимизации реализованных в пакете **Optimization Toolbox**” и методах оптимизации можно найти в [6-11].

Перейдем непосредственно к более подробному описанию универсальных функций оптимизации и используемых ими параметров.

**Управляющий массив.** Все функции оптимизации используют вектор управляющих параметров **opt**, включающий 18 компонентов используемых, как для задания опций – инструкций по режим поиска, так и для возвращения данных о проведенном поиске. Исходные значения вектора управляющих параметров извлекается с помощью функции **foptions: opt=foptions;**, где **opt**-возвращаемый вектор опций.

Различают исходные значения компонент управляющего вектора и значения по умолчанию (**Default**), которые устанавливаются в начале работы конкретной функции оптимизации. По завершении работы некоторые компоненты содержат информацию о результатах поиска. Для задания опции отличной от значения по умолчанию достаточно присвоить элементу вектора необходимое значение, например, **opt(2)=1e-6;**. С помощью команды **opt=options(opt\_in);** можно задать новые значения управляющего вектора, где **opt\_in**- входной вектор новых значений опций.

Приведем список назначений опций и их исходных значений либо значений по умолчанию:

**opt(1)**- необходимость вывода промежуточных результатов 0– нет, 1– да, (Default 0);

**opt(2)**- итерационная погрешность для аргумента (Default 1e-4);

**opt(3)**- итерационная погрешность для функции (Default 1e-6);

**opt(4)**- критерий соблюдения ограничений (Default 1e-6);

**opt(5)**- используемый алгоритм стратегии (исходное 0);

**opt(6)**- используемый алгоритм оптимизации (исходное 0);

**opt(7)**- используемый алгоритм линейного поиска (Default 0);

**opt(8)**- полученное значение целевой функции или параметра  $\lambda$  (лямбда) для функции **attgoal** (исходное 0);

**opt(9)**- необходимость использования градиента целевой функции (при использовании установить – 1, (исходное 0);

**opt(10)**- количество выполненных итераций (исходное 0);

**opt(11)**- количество вычисленных градиентов (исходное 0);

**opt(12)**- количество вычисленных ограничений (исходное 0);

**opt(13)**- количество вычисленных ограничений в виде равенств (исходное 0);

**opt(14)**- максимальное количество итераций (исходное 0) (Default устанавливается соответствующей функцией, например, **100\*n**, где **n**- число варьируемых параметров);

**opt(15)**- коэффициент достижения цели, возвращается функцией **attgoal**, (исходное 0);

**opt(16)**- минимальное приращение параметров при вычислении градиента (исходное 1e-8);

**opt(17)**- максимальное приращение параметров при вычислении градиента (исходное 0.1);

**opt(18)**- размер шага минимизации (Default <=1).

Более подробные сведения можно получить по команде **help foptions**.

**Минимизация функции одной переменной.** Одномерная оптимизация при ограничении диапазона изменения параметра осуществляется функцией **fmin**.

Синтаксис:

**function [x,opt]=fmin('fun',xl,xu,opt,p1,p2,...,p10);**

Параметры:

**'fun'**- имя целевой функции одной переменной;

**xl, xu**- диапазон изменения варьируемого параметра ( $x_l < x < x_u$ );

**opt**- управляющий массив, исходный возвращаемый **foptions**, либо заданный пользователем;

**p1, p2, ..., p10**- дополнительные входные параметры целевой функции  $z_f = \text{fun}(x, p_1, p_2, \dots, p_{10})$ ; где  $z_f$ - возвращаемое значение целевой функции;

**x**- возвращаемое оптимальное значение варьируемого параметра.

Функция **fmin** реализует методы “золотого сечения” и параболической интерполяции.

**Безусловная минимизация функций нескольких переменных.** Безусловная (без ограничений) многомерная оптимизация параметров осуществляется функцией **fmins**.

Синтаксис:

**Function [x,opt]=fmins('fun',x0,opt,[ ],p1,p2,...,p10);**

Параметры:

**'fun'**- имя целевой функции нескольких переменных  $[z_f, df] = \text{fun}(x, p_1, p_2, \dots, p_{10})$ ; где **x**- вектор входных параметров;  $z_f$ - возвращаемое значение целевой функции;  $df$ - дополнительный, не используемый в данном случае, выходной параметр;

**x0**- начальное значение вектора варьируемых параметров;

**opt**- управляющий массив, исходный возвращаемый **foptions**, либо заданный пользователем;

[ ] -незначимый для данной функции параметр, введен для совместимости с функцией **fminu**, для которой на данном месте стоит имя функции - 'grfun', вычисляющей градиент целевой функции;

**p1, p2, ..., p10**- дополнительные входные параметры целевой функции;

**x**- возвращаемый оптимальный вектор варьируемых параметров.

Функция **fmins** реализует метод Недлера-Мида, как вариант симплекс-метода.

**Безусловная градиентная минимизация функций нескольких переменных.** Безусловная (без ограничений) многомерная градиентная оптимизация параметров осуществляется функцией **fminu**.

Синтаксис:

**function [x,opt]=fminu('fun',x0,opt,'grfun',p1,p2,...,p10);**

Параметры:

'**fun**'- имя целевой функции нескольких переменных [zf,df]=fun(x,p1,p2,...,p10);, где x- вектор входных параметров; zf- возвращаемое значение целевой функции; df- дополнительный, не используемый в данном случае, выходной параметр;

**x0**- начальное значение вектора варьируемых параметров;

**opt**- управляющий массив, исходный, возвращаемый функцией **foptions**, либо заданный пользователем;

'**grfun**'- имя функции, вычисляющей градиент целевой функции  $gf=grfun(x)$ , где  $gf$ - возвращаемое значение градиента;

**p1, p2, ..., p10**- дополнительные входные параметры целевой функции;

**x**- возвращаемый оптимальный вектор варьируемых параметров.

Функция **fminu** реализует алгоритм BFGS квази-Ньютоновского метода со смешанной квадратичной и кубичной интерполяцией.

Заметим, что при необходимости использования градиента целевой функции следует предварительно установить **opt(9)=1**.

**Условная градиентная минимизация функций нескольких переменных.** Многомерная градиентная оптимизация параметров при наличии ограничений осуществляется функцией **constr**.

Синтаксис:

**function [x,opt]=constr('fun',x0,opt,xl,xu,'grfun',p1,p2,...,p15);**

Параметры:

'**fun**'- имя целевой функции нескольких переменных [zf,c]=fun(x,p1,p2,...,p15);, где x- вектор входных параметров; zf- значение целевой функции;  $c(x)=0$ - вектор линейных ограничений на параметры;

**x0**- начальное значение вектора варьируемых параметров;

**opt**- управляющий массив, исходный, возвращаемый функцией **foptions**, либо заданный пользователем;

**xl, xu**- вектора границ поиска варьируемых параметров;

'**grfun**'- имя функции, вычисляющей градиент целевой функции  $[gr,cg]=grfun(x)$ , где x- вектор входных параметров;  $gr$ - возвращаемое значение градиента целевой функции;  $cg(x)=0$ - вектор ограничений на градиент;

**p1, p2, ..., p15**- дополнительные входные параметры целевой функции;

**x**- возвращаемый оптимальный вектор варьируемых параметров.

Функция **constr** реализует алгоритм BFGS квази-Ньютоновского метода со смешанной квадратичной и кубичной интерполяцией.

Заметим, что при необходимости использования градиента целевой функции следует предварительно установить **opt(9)=1**.

**Полубесконечная минимизация функций нескольких переменных с ограничениями.** Полубесконечная многомерная оптимизация параметров с ограничениями осуществляется функцией **seminf**.

Синтаксис:

**function [x,opt]=seminf('fun',n,x0,opt,xl,xu,p1,p2,...,p10);**

Параметры:

'**fun**'- имя целевой функции нескольких переменных вида  $[zf,g,q1,\dots,qn,s]=f(x,s,p1,\dots,p10)$ ; где  $x$ - входной вектор переменных;  $s$ - матрица  $(n*2)$ -начальных интервалов дискретизации;  $p1,p2,\dots,p10$ - дополнительные входные параметры целевой функции;  $zf$ - возвращаемое значение целевой функции;  $g$ - вектор линейных ограничений вида  $g(x)\leq 0$ ;

$n$ - число ограничений вида  $q1(x,w_i)\leq 0,\dots,qn(x,w_i)\leq 0$ ; где  $w_i$ - некоторые задаваемые векторы;

**x0**- начальное значение вектора варьируемых параметров;

**opt**- управляющий массив, исходный возвращаемый функцией **foptions**, либо заданный пользователем;

**xl, xu**- векторы границ поиска варьируемых параметров;

**p1, p2, ..., p10**- дополнительные входные параметры целевой функции  $[zf,df]=fun(x,p1,p2,\dots,p10)$ ; где  $zf$ - возвращаемое значение целевой функции;  $df$ - дополнительный, не используемый в данном случае выходной параметр;

**x**- возвращаемый оптимальный вектор варьируемых параметров.

Сведения об алгоритме, реализуемом функцией **seminf**, отсутствуют, известно лишь, что внутри вызывается функция **constr**, которая реализует алгоритм BFGS квази-Ньютоновского метода со смешанной квадратичной и кубичной интерполяцией.

Заметим, что во всех перечисленных функциях список входных параметров может быть неполным, однако пропуск промежуточных параметров недопустим, то есть все предшествующие последнему параметру должны быть перечислены.

Следует также отметить, что в технических задачах, как правило, не представляется возможным воспользоваться градиентом целевой функции ввиду невозможности выразить его в аналитическом виде. Однако возможно использование квази-Ньютоновских методов, использующих численное представление градиента целевой функции. Функции **constr**, **seminf** позволяют, кроме того, задать ограничения на поиск оптимальных параметров в виде границ, линейных и нелинейных ограничений.

## 2 СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ

**Общие сведения.** Цикл лабораторных работ по разделу «Оптимизация параметров радиоэлектронных устройств» дисциплины «Основы автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств» включает 6 компьютерных работ:

1) функции минимизации (оптимизации) системы **MATLAB** (Script-файл **Fun\_Opt.m**);

2) оптимизация параметров резистивного аттенюатора (Script-файл **Att\_Res.m**);

3) оптимизация параметров модели биполярного транзистора (Script-файл **Model\_BT.m**);

4) оптимизация параметров каскада с комбинированной параллельно-последовательной ОС (Script-файл **Amp\_Comb.m**);

5) настройка контура резонансного усилителя на заданную частоту (Script-файл **Cont\_Res.m**);

6) настройка безиндуктивного резонансного усилителя на заданную частоту (Script-файл **Ucnd\_Res.m**).

Для выполнения любой работы достаточно запустить соответствующий Script-файл. Можно также воспользоваться общей меню-оболочкой для всего цикла лабораторных работ по разделу «Оптимизация параметров радиоэлектронных устройств» (Script-файл **Lab\_Opt.m**). В этом случае любая лабораторная работа может быть запущена соответствующим пунктом меню **MENU\_LAB**. Для выхода из цикла лабораторных работ можно воспользоваться пунктом меню **Break** либо кнопкой «**Break**» на панели управления.

Результаты работы выводятся, как на панель управления и графические окна, так и параллельно в командное окно, что позволяет скопировать их средствами **Windows** в текстовый файл отчета либо воспользоваться командой **MATLAB diary <имя файла отчета>** для открытия файла-отчета.

#### **Общие указания по проведению работ:**

1. В целях сохранения исходных текстов программы рекомендуется иметь копию оригинала на диске, лучше в другом подкаталоге (папке).

2. При внесении изменений в текст программ целесообразно не удалять оригинальный фрагмент, а закомментировать его, для того чтобы при необходимости вернуться назад.

3. Путь к рабочему каталогу пользователя в **MATLAB-4.0** необходимо прописать в файле **matlabrc.m**, в противном случае необходимо в начале сеанса воспользоваться меню **File-Run-Browse-имя m-файла**.

4. Для получения дополнительной информации об используемых универсальных функциях системы **MATLAB** и пакета расширений оптимизации **MATLAB “Optimization Toolbox”** используйте команду **help имя m-функции**.

5. Выводы по работе должны прежде всего отражать физическую суть наблюдаемых процессов и явлений и при необходимости опираться на математическое описание в виде соотношений и формул.

6. При многократных повторных запусках какой либо из программ возможно сообщение системы **MATLAB**, о недопустимой ошибке и необходимости выхода из системы. В этом случае следует перезапустить систему и программу и продолжить исследование.

**Методические указания** по выполнению лабораторных работ и порядок их представления для студентов дистанционной формы обучения представлены в первой части методических указаний.

Применительно к данному циклу лабораторных работ можно рекомендовать следующее:

1. При выполнении первой ознакомительной работы по разделу оптимизация, вначале просмотреть результаты при исходных установках, а затем, ориентируясь на эти исходные данные, вносить изменения, предварительно комментируя оригинальные фрагменты.

2. Результаты компьютерного эксперимента по оптимизации параметров конкретных устройств, как правило, приводятся в табличной форме, куда сносятся исходные данные (требуемые характеристики и начальные значения параметров и целевой функции), а также результаты - в виде полученных характеристик, оптимальных значениях параметров, значения целевой функции и числа итераций. Все эти сведения, как правило, выводятся на панель управления.

3. Диапазон изменения требуемых характеристик и начальных значений параметров следует задавать, сначала, в пределах (10-20)%, от установленных по умолчанию, а далее, сообразуясь с конкретной ситуацией, физическими представлениями о функционировании устройства и возможностями алгоритмов оптимизации.

**Порядок проведения работ** (для студентов очной формы обучения): Каждая работа выполняется подгруппой студентов из 2-х - 3-х человек в течение 4-х академических часов. Каждый студент ведет рабочую тетрадь, в которой отражаются результаты подготовки к предстоящей работе в виде кратких понятий и определений, необходимых аналитических выкладок и предварительного плана проведения исследований. Содержание рабочей тетради является основным критерием допуска к работе.

Отчет выполняется один на подгруппу, рабочую тетрадь ведет каждый студент. Защита работы производится в конце текущего занятия, либо, как исключение, в начале следующего. Зачет работы проставляется в журнале преподавателя и рабочих тетрадях студентов.

Отчет оформляется в текстовом редакторе **Notepad** («блокноте»), в виде краткого текстового файла. Отчет содержит название работы, фамилии исполнителей и преподавателя, дату выполнения, цель работы и ее краткое содержание, с интерпретацией полученных результатов и выводами.

Приложениями отчета являются рабочая тетрадь с аналитическими выкладками, файл программы сценария на языке **MATLAB** с краткими комментариями, графические результаты, оформленные должным образом.



### 3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

#### 3.1 Лабораторная работа №1. Функции оптимизации системы MATLAB

**Цель работы:** ознакомление с содержанием пакета расширений MATLAB “**Optimization Toolbox**” (Оптимизация) на примерах минимизации скалярных функций одной и нескольких переменных.

**Задачи работы:** приобретение навыков работы с системой для инженерных и научных расчетов MATLAB, ознакомление с особенностями использования функций условной и безусловной минимизации и их возможностями, иллюстрация форм организации графического интерфейса программ в среде системы MATLAB.

**Исходные предпосылки:** Программа иллюстрации универсальных функций пакета расширений “**Optimization Toolbox**” (Оптимизация) системы MATLAB реализована в виде Script-файла **Fun\_Opt.m**. Минимизируемые тестовые функции и их градиенты с линейными и нелинейными ограничениями пространства оптимизируемых параметров реализованы m-файлами - **fun1, fun2, fun3, gfun3, fun4, gfun4, fun5**. Программа иллюстрирует особенности использования универсальных функций минимизации - **fmin, fmins, fminu, constr, seminf**.

Содержание данных функций минимизации дано в кратких теоретических сведениях к циклу лабораторных работ по оптимизации. Выбор иллюстраций производится посредством диалогового меню. Для вывода результатов использован графический интерфейс системы MATLAB. Графическое поле разбито на четыре области. Слева выводится исходная информация о поиске оптимума и её результаты. Справа дается двух или трехмерное графическое представление скалярной функции одной либо двух переменных и проекция линий уровня, для функций двух переменных, на плоскость варьируемых параметров.

Для выхода из лабораторной работы можно воспользоваться пунктом диалогового меню **Break**.

Заметим, что в данной лабораторной работе роль целевых функций выполняют сами скалярные функции одной либо нескольких переменных.

В данной лабораторной работе предоставляется возможность ознакомления с универсальными функциями оптимизации системы MATLAB, реализующих поиск минимумов функций одной или нескольких переменных.

**Задание:**

1. Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями к циклу лабораторных работ по оптимизации.

2. Ознакомиться с текстами Script- и m- файлов, реализующих данную работу.

3. Запустить программу **Fun\_Opt** на выполнение и с помощью диалогового меню выбора просмотреть результаты работы различных функций минимизации.

4. Просмотреть реакцию функций минимизации на изменение начального вектора варьируемых параметров.

5. Представить краткое резюме об использованных функциях пакета расширений **MATLAB “Optimization Toolbox”**.

6. Дать ответ на контрольные вопросы.

7. Отчет оформляется в «блокноте», в виде краткого текстового файла.

**Указания по проведению работы:**

1. Обратите внимание на общие указания по проведению данного цикла лабораторных работ.

**Контрольные вопросы:**

1. Какие функции реализуют условный поиск минимума.

2. Какого вида условия или ограничения используются.

3. Какие функции позволяют учесть значение градиента при поиске.

4. Какие параметры управляющего массива позволяют задать требования на поиск минимума.

5. Какие параметры управляющего массива несут информацию о результатах поиска минимума.

6. Перечислить функции **MATLAB** использованные при организации графического интерфейса лабораторной работы.

**Содержание отчета:**

1. Название работы, исполнители, преподаватель, дата выполнения.

2. Цель работы, краткое содержание.

3. Интерпретация полученных результатов и выводы.

4. Приложениями отчета являются - рабочая тетрадь с аналитическими выкладками, файл программы сценария на языке **MATLAB** с краткими комментариями, графические результаты, оформленные должным образом.

Для студентов дневной формы обучения отчет выполняется один на подгруппу, рабочую тетрадь ведет каждый студент. Защита работы производится либо в конце занятия, либо в начале следующего. Зачет работы проставляется в журнале преподавателя и рабочих тетрадях студентов.

### **3.2 Лабораторная работа N2. Оптимизация параметров резистивного аттенюатора**

**Цель работы:** ознакомление с содержанием пакета расширений **MATLAB “Optimization Toolbox”** (Оптимизация) и оптимизация параметров резистивного T-образного аттенюатора по заданным требованиям на коэффициент передачи по напряжению **K0**, входное **Zvx** и выходное **Zwx** сопротивления.

**Задачи работы:** приобретение навыков работы с системой для инженерных и научных расчетов **MATLAB**; расчет передаточных характеристик резистивного аттенюатора методом узловых потенциалов; ознакомление с особенностями формирования целевой функции по комплексу требований на передаточные характеристики частотно-независимого аттенюатора; иллюстрация форм организации графического интерфейса программ в среде системы **MATLAB**.

**Исходные предпосылки:** Аттенюатор, как простейшее радиоэлектронное устройство, предназначен для получения заданного ослабления в тракте передачи сигнала. Аттенюатор используется часто как дополнительное развязывающее звено. Кроме заданного коэффициента передачи к аттенюатору часто предъявляются требования по согласованию элементов тракта при внесении заданного ослабления. Следующим важным показателем для аттенюатора является рабочий диапазон частот. Дело в том, что в силу существования различных паразитных конструктивных параметров устройств и элементной базы, нелинейности их параметров от управляющего воздействия, диапазон рабочих частот, в котором заданные требования остаются в допустимых пределах, сужается.

Область применения аттенюаторов в радиотехнике и радиоэлектронике весьма широка. Это, например, всем известная автоматическая регулировка усиления (АРУ) приемных устройств, предохраняющая выходные каскады от перегрузки. Системы АРУ современных высококачественных усилителей звуковых частот. Различного рода радиоизмерительные установки также не обходятся без аттенюаторов. Так, например, панорамные измерительные установки для измерения амплитудно- и фазо-частотных характеристик не обходятся без набора аттенюаторов с фиксированным значением ослабления. Современные системы специального назначения, например, радиолокационные станции, содержат огромное число аттенюаторов, используемых при обработке сигналов отраженных от целей.

В зависимости от рабочего диапазона частот конструктивное исполнение аттенюатора может быть различным. Так, в СВЧ волноводных трактах роль аттенюатора часто выполняет пластина из радиопоглощающего материала. В диапазоне умеренных частот роль аттенюатора выполняет, например, обычный резистивный делитель напряжения.

По функциональным свойствам различают плавные и дискретные аттенюаторы. Плавные аттенюаторы путем механического или электрического способа изменения параметров аттенюатора позволяют плавно изменять ослабление в заданных пределах. Дискретные аттенюаторы позволяют с помощью механической или электрической коммутации получать дискретный набор ослаблений. Широкое распространение получили диодные электрически управляемые аттенюаторы, позволяющие в заданном диапазоне частот получать необходимое ослабление и согласование тракта.

В данной лабораторной работе предлагается исследовать частотно-независимый Т-образный аттенюатор на предмет обеспечения заданного ослабления и согласования по входу и выходу, см. рисунок 3.1.

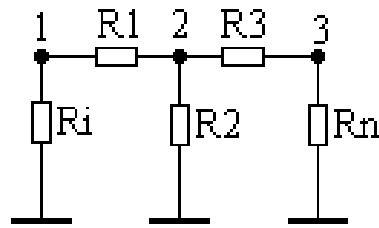


Рисунок 3.1- Т-образный резистивный аттенюатор

Программа оптимизации параметров резистивного аттенюатора реализована в виде Script-файла **Att\_Res.m**. В Script-файле реализована панель управления графического интерфейса. Диалоговый обмен данными графического интерфейса реализован функцией **opt\_att**. Функция **zf\_att** реализует расчет передаточных характеристик аттенюатора и вычисление значения целевой функции по отклонению характеристик от требуемых.

Для оптимизации параметров аттенюатора, по минимуму отклонения передаточных характеристик от требуемых, используется универсальная функция безусловной минимизации **fmins**. В принципе можно воспользоваться и другими универсальными функциями пакета расширений **MATLAB "Optimization Toolbox"** (Оптимизация)- **fminu**, **constr**, **seminf**.

На панель управления сверху по центру вынесено название лабораторной работы. В левом верхнем углу выведено изображение принципиальной схемы Т-образного резистивного аттенюатора. Заметим, что нагрузки по входу и выходу соответствуют **50**-омному тракту. В правой верхней части графического окна выводится справка об используемой функции оптимизации и ее параметрах.

В левой нижней части графического окна выведены редактируемые окна, позволяющие задать исходные параметры аттенюатора **R1**, **R2**, **R3** и требуемые характеристики в виде коэффициента передачи **K0**, входного сопротивления **Zvx**, выходного сопротивления **Zwx**. Сопротивление тракта временно закрыто для редактирования и установлено как **Ri=Rn=50**. В начале сеанса в редактируемых окнах выводятся исходные данные, установленные по умолчанию.

После редактирования исходных параметров и требований с помощью мыши производится нажатие клавиши «**Pe\_Старт**» и в правой нижней части графического окна выводятся результаты оптимизации. В частности, для указанных начальных значений параметров **R1**, **R2**, **R3** приводятся исходные значения требуемых характеристик **K0**, **Zvx**, **Zwx** и исходное значение целевой функции **zf**. Далее приводятся оптимальные значения варьируемых параметров и соответствующие им характеристики. В заключение выводится

результатирующее значение целевой функции и число выполненных итераций  $n$ . Заметим, что редактирование исходных данных и «**Pe\_Старт**» можно выполнять многократно, при этом результаты оптимизации постоянно обновляются.

Для выхода из лабораторной работы следует воспользоваться кнопкой «**Break**» на панели управления, которая сразу появляется на панели управления после запуска программы.

В данной лабораторной работе предоставляется возможность, задавая начальное значение параметров аттенюатора и различные непротиворечивые требования по передаче и сопротивлениям нагрузок по входу и выходу, находить оптимальные значения параметров аттенюатора.

Заметим, что характеристики резистивного аттенюатора, коэффициент передачи по напряжению, входное и выходное сопротивления однозначно связаны и это обстоятельство следует учитывать при задании требований.

#### **Задание:**

1. Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями к циклу лабораторных работ по оптимизации.

2. Ознакомиться с текстами Script- и m- файлов, реализующих данную работу.

3. Запустить программу **Att\_Res** на выполнение и с помощью диалогового меню выбора просмотреть и зафиксировать в виде таблицы результаты работы при различных значениях исходных параметров и требований.

4. Обратит внимание на тот факт, что задание различных требований по **Z<sub>vх</sub>** и **Z<sub>wх</sub>** приводит к несимметричной схеме аттенюатора, пояснить данный результат.

5. Обратит внимание на тот факт, что возможности трансформации сопротивления тракта аттенюатором обусловлены требуемым ослаблением, дать пояснения. Убедиться, что некорректные (противоречивые) требования приводят к физически нереализуемым результатам.

6. Дать ответ на контрольные вопросы.

7. Отчет оформляется в «блокноте», в виде краткого текстового файла.

#### **Указания по проведению работы:**

1. Обратите внимание на общие указания по проведению данного цикла лабораторных работ.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Какая функция минимизации использована в работе и ее краткая характеристика.

2. Назначение аттенюаторов и их основные показатели (параметры).

3. Суть метода узловых потенциалов, и каким образом в работе вычисляются необходимые передаточные характеристики.

4. Какого вида целевая функция использована в работе.

5. Перечислить функции **MATLAB**, использованные при организации панели управления и графического интерфейса лабораторной работы.

### **Содержание отчета:**

1. Название работы, исполнители, преподаватель, дата выполнения.
2. Цель работы, краткое содержание.
3. Интерпретация полученных результатов и выводы.
4. Приложениями отчета являются - рабочая тетрадь с аналитическими выкладками, файл программы сценария на языке **MATLAB** с краткими комментариями, графические результаты, оформленные должным образом.

Для студентов дневной формы обучения отчет выполняется один на подгруппу, рабочую тетрадь ведет каждый студент. Защита работы производится либо в конце занятия, либо в начале следующего. Зачет работы проставляется в журнале преподавателя и рабочих тетрадях студентов.

### **3.3 Лабораторная работа N3. Оптимизация параметров модели биполярного транзистора**

**Цель работы:** ознакомление с содержанием пакета расширений **MATLAB “Optimization Toolbox”** (Оптимизация) и оптимизация параметров модели биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ) в 50-омный тракт, по заданным (измеренным) в диапазоне частот параметрам рассеяния **S11, S12, S21, S22**.

**Задачи работы:** приобретение навыков работы с системой для инженерных и научных расчетов **MATLAB**; расчет S-параметров рассеяния транзистора по Y-параметрам малосигнальной модели; ознакомление с особенностями формирования целевой функции по комплексу требований на параметры рассеяния биполярного транзистора в диапазоне частот; иллюстрация форм организации графического интерфейса программ в среде системы **MATLAB**.

**Исходные предпосылки:** Автоматизированное проектирование подразумевает использование эквивалентных моделей сложных элементов радиоэлектронной аппаратуры. Актуальность использования моделей сложных элементов обусловлена тем, что предварительное измерение параметров элементов в диапазонах частот, режимов и температур и занесение результатов в базу данных не представляется возможным. Гораздо проще, опираясь на физическое представление о принципах работы элемента, построить эквивалентную электрическую модель и использовать ее в процессе схемотехнического моделирования.

Необходимо, однако, отметить, что построение модели полностью адекватной элементу невозможно, так как при этом она оказалась бы бесконечно сложной. В то же время построение модели, удовлетворительно описывающей поведение элемента в заданном диапазоне частот, температур и режимов работы, возможно и широко используется на практике. Другими словами, модели элементной базы, отражающие наиболее важные характеристики элементов в умеренных диапазонах изменения

определяющих параметров, широко используются инженерами-проектировщиками.

Несмотря на то, что наиболее важным требованием, предъявляемым к моделям, является их адекватность реальным элементам процессам или явлениям, на практике используются модели, наиболее полно отражающие поведение лишь отдельных характеристик элементов. Другим важным требованием, предъявляемым к моделям, является точность отображения поведения его характеристик. Именно точность ограничивает область применения модели. Естественно требуемая точность, как правило, обусловлена ее сложностью, поэтому приемлемая сложность модели также ограничивает область ее применения. Следующим важным требованием является универсальность модели, то есть способность адекватно отображать разные зависимости и характеристики. Инженера-разработчика могут интересовать частотные, температурные, режимные и другие характеристики элемента. Естественно, в полном смысле универсальных моделей не бывает и это также связано с их сложностью и точностью.

Исходя из перечисленных требований к моделям, их и классифицируют. Так, по способности отображать прохождение сигнала заданного уровня различают малосигнальные модели и модели для сигнала высокого уровня. По способности отображать нелинейные эффекты при прохождении сильных сигналов различают линейные и нелинейные модели. По способности отображения динамических свойств различают статические (безинерционные) и динамические (инерционные) модели. По виду отображаемых характеристик различают сигнальные, шумовые, температурные и другие модели. Часто модели известны в нескольких вариантах, и только опыт и практическая целесообразность помогут выбрать приемлемый вариант и ее сложность.

В данной работе предлагается познакомиться с широко известной линейной передаточной моделью биполярного транзистора, используемой в умеренном частотном диапазоне. Модель построена на основе физических представлений об устройстве и работе транзистора. Так, область базы отображена резистором  $R_b$ . Инерционность открытого эмиттерного перехода представлена параллельным соединением резистора  $R_e$  и емкости  $C_e$ , включающей барьерную (зарядную) и диффузионную составляющие. Диффузионная составляющая обычно много больше барьерной составляющей и постоянная времени цепи эмиттера в основном и определяет частотные свойства транзистора. Инерционность закрытого коллекторного перехода отображена барьерной емкостью  $C_c$ . Усилительная способность транзистора, обусловленная движением носителей от эмиттера к коллектору через область базы под действием электрического поля создаваемого источником питания, моделируется источником тока, включенным в коллекторную цепь и управляемым напряжением на эмиттерном переходе. Крутизна управляемого источника определяется приближенным соотношением  $S \approx \alpha / R_e \approx 1 / R_e$ , где  $\alpha$  - коэффициент передачи по току в

схеме с ОБ, при коротком замыкании (к.з.) на выходе. Наряду с этой моделью часто используется модель с источником тока в цепи коллектора, управляемым током в цепи эмиттера. В учебной литературе встречается также модель Джиаколетто, в которой зависимый источник тока включен между эмиттером и коллектором и управляется напряжением на эмиттерном переходе, проводимость которого пересчитывается в соответствии с соотношением  $Y_e = (1 - \alpha) \cdot y_e$ , где  $y_e = 1 / Re + j \cdot \omega \cdot Ce$ . Можно, однако показать, все три модели полностью эквивалентны, при условии преобладающего влияния постоянной времени эмиттерной цепи.

Не следует путать крутизну управляемого источника  $S$  с крутизной транзистора  $S_T$ , включенного, например, по схеме с ОЭ, которая в этом случае описывается выражением

$$S_T = \frac{Re \cdot (S - j \cdot \omega \cdot Cc)}{Rb + Re - S \cdot Rb \cdot Re - j \cdot \omega \cdot (Ce + Cc) \cdot Rb \cdot Re}.$$

Для области низких частот, где можно пренебречь влиянием емкостей эмиттерного и коллекторного переходов, получаем упрощенное соотношение вида

$$S_T \approx \frac{Re \cdot S}{Rb + Re - S \cdot Rb \cdot Re} \approx S.$$

Передаточные свойства транзистора в диапазоне частот принято описывать в терминах  $Y$ - или  $S$ - параметров.  $Y$ - параметры, соответствующие описанию модели методом узловых потенциалов, являются удобной математической моделью в смысле ее формирования и решения. В то же время измерение  $Y$ - параметров в диапазоне частот сопряжено с трудностью обеспечения режима короткого замыкания на высоких частотах и неустойчивой работой транзистора в этом режиме. По этим причинам на современных панорамных приборах обычно измеряют параметры рассеяния  $S$ . Параметры рассеяния  $S$  описывают связь падающих и отраженных волн на входных и выходных зажимах транзистора. Параметры рассеяния широко используются в СВЧ технике, так как позволяют производить измерение параметров устройств в стандартном **50-** или **75-**омном тракте с использованием направленных ответвителей, позволяющих разделять падающие и отраженные волны. Конечные нагрузки, как правило, обеспечивают устойчивость работы транзистора в процессе измерений. Падающие и отраженные волны представляют собой соответственно сумму и разность напряжения и тока на входе или выходе транзистора. Напряжения и токи, нормированы к волновому сопротивлению тракта. Так как падающие и отраженные волны однозначно связаны с напряжениями и протекающими токами, то  $Y$ - и  $S$ - параметры однозначно взаимосвязаны

$$Y = (1 - S) * (1 + S)^{-1}, \quad S = (1 - Y) * (1 + Y)^{-1},$$

где  $Y$ - нормированная матрица проводимостей;  $S$ - матрица рассеяния;  $1$ - единичная матрица. Элементы матрицы рассеяния устройства, как многополюсника, имеют простой физический смысл. Так диагональные элементы матрицы соответствуют коэффициенту отражения



соответствующего входа (пары зажимов), то есть отношению отраженной и падающей волн, при обеспечении согласования на других входах. Недиagonальные элементы соответствуют коэффициенту передачи, то есть отношению волны, прошедшей на выход, к падающей на вход волне, также при отсутствии отражений по другим входам.

Смысл данной работы сводится к подбору параметров модели биполярного транзистора, с помощью универсальных функций минимизации пакета расширений **MATLAB “Optimization Toolbox”** (Оптимизация). Целевая функция представляет собой, нормированную сумму, квадратов отклонений модулей параметров рассеяния транзистора, включенного по схеме с ОЭ, от заданных (или измеренных) параметров в частотном диапазоне.

В данной лабораторной работе предлагается использовать малосигнальную передаточную модель биполярного транзистора на предмет подбора параметров обеспечения заданных S-параметров в определенном диапазоне частот, см. рисунок 3.2.

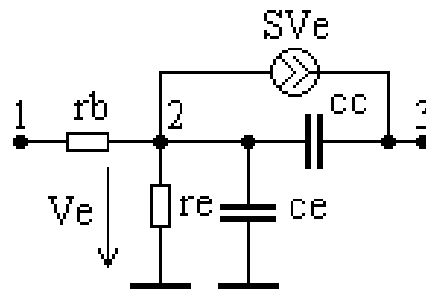


Рисунок 3.2- Малосигнальная модель биполярного транзистора

Программа оптимизации параметров модели биполярного транзистора реализована в виде Script-файла **Model\_BT.m**. В Script-файле реализована панель управления графического интерфейса. Диалоговый обмен данными графического интерфейса реализован функцией **opt\_mod**. Функция **zf\_mod** реализует расчет параметров рассеяния биполярного транзистора и вычисления значения целевой функции по отклонению текущих параметров рассеяния от требуемых.

Для оптимизации параметров модели транзистора, по минимуму отклонения параметров рассеяния от требуемых, используется универсальная функция безусловной минимизации **fmins**. В принципе можно воспользоваться и другими универсальными функциями пакета расширений **MATLAB “Optimization Toolbox”** (Оптимизация), **fminu**, **constr**, **seminf**.

На панель управления сверху по центру вынесено название лабораторной работы. В левом верхнем углу выведено изображение линейной эквивалентной схемы биполярного транзистора с использованием источника тока, включенного в коллекторную цепь и управляемого напряжением на эмиттерном переходе. Заметим, что активные сопротивления нагрузок на входе и выходе каскада моделируют

сопротивление тракта. В правой верхней части графического окна выводится справка об используемой функции оптимизации и ее параметрах.

В нижней части графического окна выведены исходные данные для оптимизации в виде редактируемых окон, позволяющих задать исходные параметры модели. Часть исходных параметров, касающихся диапазона частот **F<sub>n</sub>**, **F<sub>h</sub>**, **F<sub>v</sub>** и сопротивления тракта **R<sub>n</sub>**, временно закрыты для редактирования в целях упрощения работы. В качестве начальных значений варьируемых параметров эквивалентной модели предлагается ввести номиналы элементов **R<sub>b</sub>**, **R<sub>e</sub>**, **C<sub>e</sub>**, **C<sub>c</sub>**. Значение крутизны транзистора определяется по упрощенному соотношению **S=1/R<sub>e</sub>**.

Требуемые параметры рассеяния биполярного транзистора, в указанном диапазоне частот, получены в работе путем задания некоторых типовых значений параметров модели. В начале сеанса в редактируемых окнах выводятся исходные данные, установленные по умолчанию.

После редактирования исходных параметров с помощью мыши производится нажатие клавиши «**Ре\_Старт**» и в нижней части графического окна выводятся результаты оптимизации. Вначале выводится значение целевой функции **z<sub>f</sub>** при установленных параметрах. Далее выводятся результаты оптимизации в виде оптимальных значений параметров модели, результирующее значение целевой функции и число выполненных итераций.

Кроме панели управления, после очередного нажатия клавиши «**Ре\_Старт**» выводятся два, смещенных относительно первого и друг друга, графических окна. В первом из них выводятся частотные зависимости требуемых и исходных параметров рассеяния. Требуемые характеристики отображены на графиках дискретно значками '+'. Во втором дополнительном окне выводятся требуемые и полученные в результате оптимизации параметры рассеяния. Графические зависимости позволяют визуально оценить результаты оптимизации.

Заметим, что редактирование исходных данных и «**Ре\_Старт**» можно выполнять многократно, при этом результаты оптимизации постоянно обновляются.

Для выхода из лабораторной работы следует воспользоваться кнопкой «**Break**» на панели управления, которая появляется на панели управления после первого выполнения программы.

#### **Задание:**

1. Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями к циклу лабораторных работ по оптимизации.
2. Ознакомиться с текстами Script- и m- файлов реализующих данную работу.
3. Запустить программу **Model\_BT** на выполнение и с помощью диалогового меню выбора просмотреть и зафиксировать в виде таблицы результаты работы при различных значениях исходных параметров и требований.

4. Задать параметры модели транзистора близкими к оптимальным и убедиться в том, что начальные значения характеристик близки к требуемым, и зафиксировать эти результаты.

5. Задать поочередное отклонение по одному из параметров модели от оптимального, в пределах 10%, и зафиксировать получаемые результаты.

6. Дать ответ на контрольные вопросы.

7. Отчет оформляется в «блокноте», в виде краткого текстового файла.

**Указания по проведению работы:**

1. Обратите внимание на общие указания по проведению данного цикла лабораторных работ.

2. В работе использована простейшая эквивалентная модель биполярного транзистора с параметрами модели соответствующими весьма высокочастотному транзистору.

**Контрольные вопросы:**

1. Какие функции минимизации могли бы быть использованы в работе и их краткая характеристика.

2. Необходимость использования моделей элементов при автоматизированном проектировании.

3. Назначение параметров используемой модели биполярного транзистора (физическое содержание).

4. Какого вида целевая функция использована в работе.

5. Перечислить функции **MATLAB**, использованные при организации панели управления и графического интерфейса лабораторной работы.

**Содержание отчета:**

1. Название работы, исполнители, преподаватель, дата выполнения.

2. Цель работы, краткое содержание.

3. Интерпретация полученных результатов и выводы.

4. Приложениями отчета являются - рабочая тетрадь с аналитическими выкладками, файл программы сценария на языке **MATLAB** с краткими комментариями, графические результаты, оформленные должным образом.

Для студентов дневной формы обучения отчет выполняется один на подгруппу, рабочую тетрадь ведет каждый студент. Защита работы производится либо в конце занятия, либо в начале следующего. Зачет работы проставляется в журнале преподавателя и рабочих тетрадях студентов.

### **3.4 Лабораторная работа N4. Оптимизация параметров каскада с комбинированной ОС**

**Цель работы:** ознакомление с содержанием пакета расширений **MATLAB** “**Optimization Toolbox**” (Оптимизация) и оптимизация параметров каскада с комбинированной параллельно-последовательной обратной связью (ОС) по заданным требованиям на коэффициент передачи по напряжению **K<sub>0</sub>**, входное **Z<sub>вх</sub>** и выходное **Z<sub>вых</sub>** сопротивления.

**Задачи работы:** приобретение навыков работы с системой для инженерных и научных расчетов **MATLAB**; расчет передаточных характеристик транзисторного каскада с комбинированной ОС методом узловых потенциалов; ознакомление с особенностями формирования целевой функции по комплексу требований на передаточные характеристики каскада в диапазоне частот; иллюстрация форм организации графического интерфейса программ в среде системы **MATLAB**.

**Исходные предпосылки:** Каскад с комбинированной ОС позволяет получать заданный коэффициент передачи в широком диапазоне частот при одновременном согласовании по входу и выходу, что позволяет использовать его как универсальное функциональное звено усилительных трактов. Обычные каскады, не охваченные ОС или, охваченные ОС одного вида, имеют, как правило, существенно отличающиеся по значению входное и выходное сопротивления, что препятствует построению многокаскадных усилительных трактов.

Обычный каскад на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (ОЭ), имеет более высокий коэффициент передачи по напряжению в сравнении с другими схемами включения транзистора. Кроме того, модуль входного сопротивления каскада по схеме с ОЭ меньше модуля выходного сопротивления, причем выходное сопротивление обычно значительно выше стандартных сопротивлений трактов, составляющих **50** или **75 Ом**. Для набора однородных трактов усиления желательно, чтобы входное и выходное сопротивления были примерно одинаковы и близки к стандартному сопротивлению тракта.

Использование параллельной ОС по напряжению приводит к снижению коэффициента передачи по напряжению и примерно к одинаковому снижению, как входного, так и выходного сопротивлений. Следовательно, выровнять входное и выходное сопротивления при этом не удастся. При использовании последовательной отрицательной ОС по току также снижается коэффициент передачи, и увеличиваются, как входное, так и выходное сопротивления каскада. Причем, входное сопротивление увеличивается в большей степени, чем выходное, то есть значения сопротивлений выравниваются.

Использование комбинированной (параллельно-последовательной) ОС позволяет, увеличивая значения сопротивлений по входу и выходу, с помощью последовательной ОС по току, добиться их выравнивания, а, используя параллельную ОС по напряжению, снизить их до приемлемой величины. Соотношения для расчета параметров комбинированной ОС в широкополосных каскадах, как правило, сложны, поэтому целесообразно для определения их оптимальных значений воспользоваться процедурой оптимизации или параметрического синтеза.

В данной лабораторной работе предлагается исследовать широкополосный каскад усилителя на биполярном транзисторе с комбинированной ОС на предмет обеспечения заданного усиления и

согласования по входу и выходу, см. рисунок 3.3. Параметры модели биполярного транзистора предполагаются заданными.

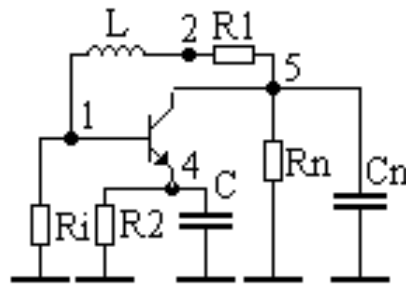


Рисунок 3.3- Транзисторный каскад с комбинированной ОС

Программа оптимизации параметров комбинированной ОС транзисторного каскада реализована в виде Script-файла **Amp\_Comb.m**. В Script-файле реализована панель управления графического интерфейса. Диалоговый обмен данными графического интерфейса реализован функцией **opt\_amp**. Функция **zf\_amp** реализует расчет передаточных характеристик каскада и вычисления значения целевой функции по отклонению текущих характеристик от требуемых.

Для оптимизации параметров комбинированной ОС транзисторного каскада, по минимуму отклонения передаточных характеристик от требуемых, в работе используется универсальная функция безусловной минимизации **fmins**. В принципе можно воспользоваться и другими универсальными функциями пакета расширений **MATLAB “Optimization Toolbox”** (Оптимизация), **fminu**, **constr**, **seminf**.

На панель управления сверху по центру вынесено название лабораторной работы. В левом верхнем углу панели выведено изображение ВЧ эквивалентной (принципиальной) схемы транзисторного каскада с комбинированной ОС. Заметим, что активные сопротивления нагрузок на входе и выходе каскада моделируют сопротивление тракта. В правой верхней части графического окна выводится справка об используемой функции оптимизации и ее параметрах.

В левой нижней части графического окна выведены исходные данные для оптимизации в виде редактируемых окон, позволяющих задать исходные параметры каскада, нагрузок и требуемые характеристики. Часть исходных параметров, касающихся диапазона частот **Fn**, **Fh**, **Fv**, временно закрыты для редактирования в целях упрощения работы. Требуемые характеристики, коэффициент передачи **ku0**, входное **Ri=Zvx** и выходное **Rn=Zwx** сопротивления, задаются числовыми значениями, соответствующими независимым от частоты характеристикам. Кроме того, можно ввести значение емкости нагрузки **Cn**. В качестве начальных значений варьируемых параметров предлагается ввести номиналы элементов цепей параллельной **R1**, **L** и последовательной **R2**, **C** ОС.

В правой части графического окна приведены используемые параметры упрощенной модели биполярного транзистора. Вначале сеанса в редактируемых окнах выводятся исходные данные, установленные по умолчанию.

После редактирования исходных параметров и требований с помощью мыши производится нажатие клавиши «**Ре\_Старт**» и в правой нижней части графического окна выводятся результаты оптимизации. Вначале выводится исходное значение целевой функции **zf** соответствующее начальным значениям варьируемых параметров. Ниже выводятся найденные оптимальные значения параметров цепей ОС, результирующее значение целевой функции и число выполненных итераций.

Кроме панели управления, после очередного нажатия клавиши «**Ре\_Старт**» выводится второе, смещенное относительно первого, графическое окно, на котором слева выведены частотные зависимости к моменту начала процесса оптимизации, а справа результирующие зависимости. Требуемые характеристики отображены на графиках дискретно значками '+'. Графические зависимости позволяют визуально оценить результаты оптимизации.

Заметим, что редактирование исходных данных и «**Ре\_Старт**» можно выполнять многократно, при этом результаты оптимизации постоянно обновляются.

Для выхода из лабораторной работы следует воспользоваться кнопкой «**Break**» на панели управления, которая появляется на панели управления после первого выполнения программы.

В данной лабораторной работе определяются оптимальные значения параметров комбинированной ОС, по заданным начальным значениям параметров каскада и различным непротиворечивым требованиям по передаче и сопротивлениям входа и выхода.

#### **Задание:**

1. Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями к циклу лабораторных работ по оптимизации.
2. Ознакомиться с текстами Script- и m- файлов реализующих данную работу.
3. Запустить программу **Amp\_Comb** на выполнение и с помощью диалогового меню выбора просмотреть и зафиксировать в виде таблицы результаты работы при различных значениях исходных параметров и требований.
4. Для конкретного набора требований задать параметры ОС, близкие к оптимальным, и убедиться, что начальные отклонения характеристик минимальны, и зафиксировать полученные результаты.
5. Убедиться в том, что, увеличивая требования по коэффициенту передачи, мы вынуждены снижать значения требуемых входного и выходного сопротивлений, дать пояснения.
6. Дать ответ на контрольные вопросы.

7. Отчет оформляется в «блокноте», в виде краткого текстового файла.

**Указания по проведению работы:**

1. Обратите внимание на общие указания по проведению данного цикла лабораторных работ.

**Контрольные вопросы:**

1. Какие функции минимизации могли бы быть использованы в работе и их краткая характеристика.

2. Суть использования комбинированной обратной связи в каскаде на биполярном транзисторе.

3. Совместное влияние последовательной и параллельной ОС на основные передаточные характеристики усилительного каскада.

4. Какого вида целевая функция использована в работе.

5. Перечислить функции **MATLAB** использованные при организации панели управления и графического интерфейса лабораторной работы.

**Содержание отчета:**

1. Название работы, исполнители, преподаватель, дата выполнения.

2. Цель работы, краткое содержание.

3. Интерпретация полученных результатов и выводы.

4. Приложениями отчета являются рабочая тетрадь с аналитическими выкладками, файл программы сценария на языке **MATLAB** с краткими комментариями, графические результаты, оформленные должным образом.

Для студентов дневной формы обучения отчет выполняется один на подгруппу, рабочую тетрадь ведет каждый студент. Защита работы производится либо в конце занятия, либо в начале следующего. Зачет работы проставляется в журнале преподавателя и рабочих тетрадях студентов.

### **3.5 Лабораторная работа N5. Настройка контура резонансного усилителя на заданную частоту**

**Цель работы:** ознакомление с содержанием пакета расширений **MATLAB “Optimization Toolbox”** (Оптимизация) и настройка на заданную частоту  $f_0$  параметров входного колебательного контура резонансного усилителя, выполненного на основе каскада с ОЭ.

**Задачи работы:** приобретение навыков работы с системой для инженерных и научных расчетов **MATLAB**; расчет передаточных характеристик резонансного транзисторного каскада методом узловых потенциалов; ознакомление с особенностями формирования целевой функции при настройке избирательной системы, в виде резонансного контура, на заданную частоту; оценка влияния входной динамической емкости транзистора на резонансную частоту контура; иллюстрация форм организации графического интерфейса программ в среде системы **MATLAB**.

**Исходные предпосылки:** Резонансные усилители призваны обеспечивать избирательность приемно-усилительных трактов

радиотехнических средств. В качестве избирательных систем в умеренном диапазоне частот используются одиночные и связанные колебательные контуры. Простейший колебательный контур характеризуется такими показателями, как резонансная частота  $F0 \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$ , добротность  $Q$ , характеристическое сопротивление  $\rho = \sqrt{L / C}$ , полоса пропускания  $\Delta F$ , эквивалентное сопротивление на резонансной частоте  $Roe$ . Конечная добротность  $Q$ , полоса пропускания  $\Delta F$  и эквивалентное сопротивление  $Roe$  обусловлены, как конструктивными, так и вносимыми потерями. Между указанными показателями (параметрами) существуют связи, отображаемые следующими упрощенными соотношениями:  $Q = Roe / \rho = F0 / \Delta F$ . Заметим, что потери, в общем случае влияют на резонансную частоту контура, однако в большинстве случаев этим влиянием можно пренебречь.

Построение резонансных усилителей на биполярных транзисторах имеет некоторые особенности, связанные с тем, что входной и выходной импедансы транзистора имеют низкие и частотно-зависимые значения. Это обстоятельство приводит к тому, что контура по входу и выходу включаются частично, во избежание заметного шунтирования.

Другая особенность связана с тем, что входная динамическая емкость транзистора, включенного по схеме с ОЭ, зависит от коэффициента передачи каскада по напряжению  $Cd_{vx} \approx Ce + (1 + Kv) \cdot Cc$ , где  $Ce$  - емкость эмиттерного перехода, включающая барьерную и диффузионную составляющие;  $Kv \approx S_T \cdot Rn$  - коэффициент передачи каскада по напряжению;  $Cc$  - барьерная (зарядная) емкость обратно смещенного коллекторного перехода;  $S_T \approx 1 / Re$  - крутизна транзистора;  $Rn$  - сопротивление нагрузки каскада;  $Re$  - сопротивление эмиттерного перехода.

Причина появления входной динамической емкости заключается в том, что при передаче сигнала через каскад с ОЭ на коллекторе возникает напряжение сигнала противоположной полярности в  $Kv$  раз больше, чем на базе, это равносильно увеличению емкости коллекторного перехода в  $Kv$  раз. В результате, ощущаемая входная емкость каскада помимо суммы емкостей эмиттерного  $Ce$  и коллекторного  $Cc$  переходов содержит составляющую равную  $Kv \cdot Cc$ . В связи с этим вносимая емкость в контур будет зависеть от коэффициента передачи каскада по напряжению. Значение входной емкости определяется мнимой составляющей входной проводимости каскада.

Так, используя простую Т-образную модель биполярного транзистора, запишем общее выражение для входной проводимости каскада с ОЭ

$$Y_{vx} = \frac{gb \cdot ye \cdot yc + gb \cdot (ye - S + yc) \cdot gn}{(gb + ye) \cdot yc + (gb + ye - S + yc) \cdot gn},$$

где  $gb = 1 / Rb$ ;  $ye = 1 / Re + j \cdot \omega \cdot Ce$ ;  $yc = j \cdot \omega \cdot Cc$ ;  $gn = 1 / Rn$ . Из выражения следует, что входная проводимость имеет частотно зависимые активную и реактивную составляющие. Входная динамическая емкость



каскада может быть определена через мнимую часть входной проводимости, как

$$C_{vx\_d} = \frac{Im(Y_{vx})}{\omega}.$$

Ситуация существенно осложняется в том случае, если на выходе каскада также включен контур. При этом расстройка выходного контура ведет к изменению коэффициента передачи по напряжению и расстройке входного контура за счет изменения вносимой емкости. В результате, настройка резонансных систем каскада с ОЭ представляет определенную проблему, поэтому представляет интерес решение этой задачи с использованием функций минимизации. Варьируемыми параметрами в данном случае являются номиналы элементов входного контура.

Для иллюстрации эффекта вносимой динамической емкости во входной контур каскада в данной работе предлагается с помощью функции минимизации осуществить его настройку на заданную частоту и путем обратных вычислений убедиться, что недостающее значение емкости вносится транзистором.

В данной лабораторной работе предлагается исследовать избирательный каскад усилителя на биполярном транзисторе с резонансным контуром на входе на предмет обеспечения настройки на заданную резонансную частоту с учетом влияния входной динамической емкости транзистора, см. рисунок 3.4. Параметры модели биполярного транзистора предполагаются заданными.

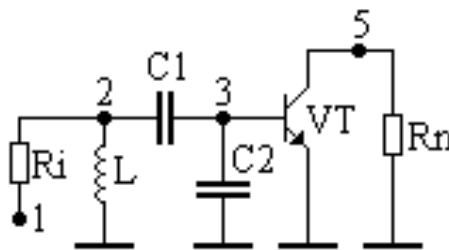


Рисунок 3.4- Каскад избирательного усилителя на транзисторе

Программа настройки параметров входного контура резонансного каскада на заданную частоту с использованием функции минимизации реализована в виде Script-файла **Cont\_Res.m**. В Script-файле реализована панель управления графического интерфейса. Диалоговый обмен данными графического интерфейса реализован функцией **opt\_cont**. Функция **zf\_cont** реализует расчет передаточных характеристик каскада и вычисление значения целевой функции по отклонению текущей частоты от требуемой. Значение входной динамической емкости каскада с ОЭ по известным параметрам эквивалентной модели транзистора, частоте  $F0$  и сопротивлению нагрузки  $R_n$  определяется функцией **cvx\_dyn**.

В качестве упрощенной целевой функции в данном случае использовано выражение  $zf = 1 / K_0$ , где  $K_0$  - значение коэффициента передачи по напряжению на заданной частоте. Поскольку при настройке в резонанс коэффициент передачи будет стремиться к максимуму, то значение целевой функции будет стремиться к минимуму. Несмотря на простейший вид целевой функции, настройка резонансного контура производится вполне удовлетворительно. Следует также отметить, что в зависимости от начальных значений параметров контура возможны варианты настройки входного контура с разным характеристическим сопротивлением.

Для оптимизации параметров резонансного контура на входе каскада с ОЭ, по минимуму отклонения передаточных характеристик от требуемых, используется универсальная функция безусловной минимизации **fmins**. В принципе можно воспользоваться и другими универсальными функциями пакета расширений **MATLAB "Optimization Toolbox"** (Оптимизация), **fminu, constr, seminf**.

На панель управления сверху по центру вынесено название лабораторной работы. В левом верхнем углу выведено изображение ВЧ эквивалентной (принципиальной) схемы резонансного транзисторного каскада по схеме с ОЭ с контуром на входе. Транзисторный каскад по схеме с ОЭ апериодический и нагружен на активное сопротивление **Rn**. Со стороны входа контур нагружен на внутреннее сопротивление источника сигнала **Ri**.

В правой верхней части графического окна выводится справка об используемой функции оптимизации и ее параметрах.

В левой нижней части графического окна выведены исходные данные для оптимизации в виде редактируемых окон, позволяющих задать исходные параметры контура **L, C1, C2**, резонансную частоту **F0** и значение нагрузки каскада **Rn**. Часть исходных параметров, касающихся диапазона частот **Fn, Fh, Fv** и внутреннее сопротивление источника сигнала **Ri**, временно закрыты для редактирования в целях упрощения работы. В правой нижней части графического окна приведены используемые параметры упрощенной модели биполярного транзистора. Вначале сеанса в редактируемых окнах выводятся исходные данные установленные по умолчанию.

После редактирования исходных параметров и требований с помощью мыши производится нажатие клавиши «**Ре\_Старт**» и в правой нижней части графического окна выводятся результаты оптимизации. Вначале выводится исходное значение целевой функции **zf**, соответствующее начальным значениям варьируемых параметров. Ниже выводятся найденные оптимальные значения параметров колебательного контура и значение входной динамической емкости каскада с ОЭ для контроля, а затем результирующее значение целевой функции и число выполненных итераций.

Кроме панели управления, после очередного нажатия клавиши «**Ре\_Старт**» выводится второе, смещенное относительно первого, графическое окно, на котором сверху выведена частотная зависимость коэффициента передачи к моменту начала процесса оптимизации, а снизу -

результат настройки колебательного контура на заданную частоту. Графические зависимости позволяют визуально оценить результаты оптимизации (настройки).

Заметим, что редактирование исходных данных и «**Pe\_Старт**» можно выполнять многократно, при этом результаты оптимизации постоянно обновляются.

Для выхода из лабораторной работы следует воспользоваться кнопкой «**Break**» на панели управления, которая появляется на панели управления после первого выполнения программы.

В данной лабораторной работе определяются оптимальные значения параметров колебательного контура на входе каскада с ОЭ с учетом входной динамической емкости транзистора, настроенного на заданную частоту. На значения параметров колебательного контура оказывает влияние значение сопротивления нагрузки, в силу изменения входной динамической емкости.

#### **Задание:**

1. Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями к циклу лабораторных работ по оптимизации.

2. Ознакомиться с текстами Script- и m- файлов реализующих данную работу.

3. Запустить программу **Cont\_Res** на выполнение и с помощью диалогового меню выбора просмотреть и зафиксировать в виде таблицы результаты работы при различных значениях исходных параметров и требований.

4. Убедиться в том, что, изменяя начальные значения, возможна настройка контура на частоту с различным характеристическим сопротивлением.

5. Убедиться в том, что параметры контура с учетом значения входной динамической емкости каскада соответствуют требуемой резонансной частоте.

6. Дать ответ на контрольные вопросы.

7. Отчет оформляется в «блокноте», в виде краткого текстового файла.

#### **Указания по проведению работы:**

1. Обратите внимание на общие указания по проведению данного цикла лабораторных работ.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Какие функции минимизации могли бы быть использованы в работе и их краткая характеристика.

2. Назначение избирательных усилителей и основные понятия и соотношения для колебательного контура.

3. Причина появления входной динамической емкости каскада с ОЭ на биполярном транзисторе.

4. Какого вида целевая функция использована в работе.

5. Перечислить функции **MATLAB**, использованные при организации панели управления и графического интерфейса лабораторной работы.

### Содержание отчета:

1. Название работы, исполнители, преподаватель, дата выполнения.
  2. Цель работы, краткое содержание.
  3. Интерпретация полученных результатов и выводы.
  4. Приложениями отчета являются - рабочая тетрадь с аналитическими выкладками, файл программы сценария на языке MATLAB с краткими комментариями, графические результаты, оформленные должным образом.
- Для студентов дневной формы обучения отчет выполняется один на подгруппу, рабочую тетрадь ведет каждый студент. Защита работы производится либо в конце занятия, либо в начале следующего. Зачет работы проставляется в журнале преподавателя и рабочих тетрадях студентов.

### 3.6 Лабораторная работа №6. Настройка безиндуктивного резонансного усилителя на заданную частоту

**Цель работы:** ознакомление с содержанием пакета расширений MATLAB “Optimization Toolbox” (Оптимизация) и настройка на заданную частоту  $f_0$  параметров безиндуктивного резонансного усилителя, выполненного на основе каскада с ОБ.

**Задачи работы:** приобретение навыков работы с системой для инженерных и научных расчетов MATLAB; расчет передаточных характеристик избирательной системы методом узловых потенциалов; ознакомление с особенностями формирования целевой функции при настройке безиндуктивной избирательной системы, на основе каскада с ОБ, на заданную частоту; оценка влияния эквивалентной индуктивности входного сопротивления транзистора, включенного по схеме с ОБ, на резонансную частоту избирательной системы; иллюстрация форм организации графического интерфейса программ в среде системы MATLAB.

**Исходные предпосылки:** Прием, обработка и преобразование сигналов на фоне мешающих воздействий предполагает селекцию полезных спектральных составляющих. Для селекции или фильтрации, в зависимости от рабочего диапазона частот, используются различного рода избирательные системы. В умеренном диапазоне частот, как правило, используются одиночные и связанные резонансные системы на основе колебательных контуров. В диапазоне УВЧ для построения избирательных систем используют отрезки длинных линий, то есть элементов с распределенными параметрами, так как сосредоточенные реактивности становятся конструктивно нереализуемыми. В диапазоне СВЧ используют диэлектрические и ферромагнитные резонаторы и фильтры на ПАВ (поверхностных акустических волнах).

В умеренном диапазоне частот используют, кроме того, пьезо - и магнитоэлектрические фильтры, обладающие высокой добротностью и позволяющие получить высокую избирательность.

Особенно остро проблема избирательности и фильтрации встает на низких частотах в связи с тем, что размеры реактивных элементов конденсаторов и катушек индуктивности становятся значительными. Это препятствует миниатюризации радиоаппаратуры. Кроме того, катушки индуктивности значительных номиналов не удастся выполнить в микро- и интегральном исполнении.

Для решения задачи избирательности на низких частотах используют в настоящее время цифровые фильтры либо активные фильтры на основе операционных усилителей. При использовании цифровых фильтров входной сигнал с помощью аналого-цифровых преобразователей преобразуется в цифровую последовательность импульсов, обрабатывается процессором и цифро-аналоговым преобразователем переводится в аналоговую форму. Избирательность цифровых фильтров ограничивается лишь разрядностью аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей. Активные фильтры строятся на основе операционных усилителей с очень высоким коэффициентом усиления путем введения соответствующих цепей ОС.

Еще одной возможностью построения безиндуктивных среднечастотных избирательных систем является использование индуктивного характера входного сопротивления каскада с ОБ. Значение входного сопротивления определяется как параметрами транзистора, так и глубиной ОС в цепи базы и величиной сопротивления нагрузки. Аналитически значение индуктивности определяется мнимой частотно-зависимой составляющей входного сопротивления каскада. Для регулирования значения индуктивной составляющей входного сопротивления используется дополнительное сопротивление в цепи базы и/или изменение режима работы каскада.

Причина появления индуктивного характера входного сопротивления каскада с ОБ, обусловлена тем фактом, что с ростом частоты начинает сказываться шунтирующее действие емкости эмиттерного перехода. При этом управляющее напряжение на эмиттерном переходе уменьшается и все больший ток ответвляется в область базы, создавая на нем возрастающее с частотой падение напряжения при неизменном входном токе. В результате наблюдается увеличение входного напряжения с частотой при одной и той же величине входного тока, что эквивалентно увеличению входного сопротивления каскада с ростом частоты. Чем больше сопротивление базы, тем сильнее проявляется этот эффект. При очень большом сопротивлении ОС начинает нарушаться естественное перераспределение тока между базой и коллектором и все меньшая часть тока ответвляется в базу. В результате значение эквивалентной индуктивности при больших значениях сопротивления ОС заметно снижается.

Так, используя простую Т-образную модель биполярного транзистора, запишем общее выражение для входного сопротивления каскада с ОБ

$$Z_{vx} = \frac{(gb+ye) \cdot yc + (gb+ye-S+yc) \cdot gn}{gb \cdot ye \cdot yc + ye \cdot (gb+yc) \cdot gn},$$

где  $g_b = 1 / R_b$ ;  $y_e = 1 / R_e + j \cdot \omega \cdot C_e$ ;  $y_c = j \cdot \omega \cdot C_c$ ;  $g_n = 1 / R_n$ . Из выражения следует, что входное сопротивление имеет частотно зависимые активную и реактивную составляющие. Входная эквивалентная индуктивность каскада может быть определена через мнимую часть входного сопротивления, как

$$L_{v\_ec} = \frac{Im(Z_{vx})}{\omega}.$$

Простейшая избирательная система, на основе каскада с ОБ, может быть построена, путем включения емкости, последовательно с входом апериодического каскада с дополнительным сопротивлением (противосвязью) в цепи базы. Невысокая добротность избирательной системы обусловлена тем, что в контур непосредственно включена активная составляющая входного сопротивления каскада. Кроме того, добротность оказывается частотно-зависимой, так как входное сопротивление зависит от частоты. Настройка подобной избирательной системы представляет определенную проблему, поэтому целесообразно решение этой задачи с использованием функций минимизации. Варьируемыми параметрами в данном случае являются номиналы емкости на входе каскада и сопротивление обратной связи в цепи базы.

Для иллюстрации эффекта резонанса внешней емкости и индуктивной составляющей входного сопротивления каскада с ОБ, в данной работе предлагается, с помощью функции минимизации осуществить настройку системы на заданную частоту и путем обратных вычислений убедиться, что эквивалентная индуктивность определяется каскадом.

В данной лабораторной работе предлагается исследовать безиндуктивный избирательный каскад на биполярном транзисторе, включенным по схеме с ОБ с дополнительным резистором ОС в цепи базы и последовательной емкостью на входе, на предмет обеспечения настройки на заданную резонансную частоту с учетом влияния входной динамической индуктивности транзистора, см. рисунок 3.5. Параметры модели биполярного транзистора предполагаются заданными.

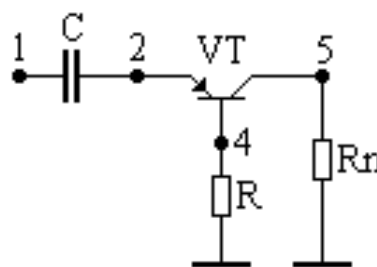


Рисунок 3.5- Безиндуктивный избирательный каскад на транзисторе

Программа настройки параметров безиндуктивной избирательной системы на заданную частоту с использованием функции минимизации

реализована в виде Script-файла **UCnd\_Res.m**. В Script-файле реализована панель управления графического интерфейса. Диалоговый обмен данными графического интерфейса реализован функцией **opt\_ucnd**. Функция **zf\_ucnd** реализует расчет передаточных характеристик каскада и вычисление значения целевой функции по отклонению текущей частоты от требуемой. Значение эквивалентной индуктивности каскада с ОБ по известным параметрам эквивалентной модели транзистора, частоте  $F0$ , сопротивлений обратной связи  $R$  и нагрузки  $Rn$  определяется функцией **lvx\_ecv**.

Поскольку в данном случае при перестройке по частотному диапазону изменяется добротность резонансной системы и коэффициент передачи по напряжению, пришлось, в качестве целевой функции, использовать выражение  $zf = |(F0 - Fmax) / (F0 \cdot K_0)|$ , где  $Fmax$  - текущее значение частоты максимума коэффициента передачи в рассматриваемом диапазоне частот;  $F0$  - требуемое значение резонансной частоты;  $K_0$  - значение коэффициента передачи по напряжению на заданной частоте. При настройке в резонанс разность частот стремится к нулю, а коэффициент передачи - к максимуму, следовательно, значение целевой функции также будет стремиться к нулю. Несмотря на достаточно простой вид целевой функции, настройка резонансной системы производится вполне удовлетворительно. Следует также отметить, что в зависимости от начальных значений параметров емкости и сопротивления ОС возможны варианты настройки входного контура с разным характеристическим сопротивлением.

Для оптимизации параметров каскада, по минимуму отклонения передаточных характеристик от требуемых, используется универсальная функция безусловной минимизации **fmins**. В принципе можно воспользоваться и другими универсальными функциями пакета расширений **MATLAB "Optimization Toolbox"** (Оптимизация), **fminu**, **constr**, **seminf**.

На панель управления сверху по центру вынесено название лабораторной работы. В левом верхнем углу выведено изображение ВЧ эквивалентной (принципиальной) схемы резонансной системы, на основе транзисторного каскада по схеме с ОБ, с дополнительным сопротивлением (противосвязью) в цепи базы. Транзисторный каскад по схеме с ОБ апериодический и нагружен на активное сопротивление **Rn**. На входе каскада включен конденсатор с варьируемой емкостью **C**, а в цепь базы - резистор обратной связи с сопротивлением **R**.

В правой верхней части графического окна выводится справка об используемой функции оптимизации и ее параметрах.

В левой нижней части графического окна выведены исходные данные для оптимизации в виде редактируемых окон, позволяющих задать исходные параметры системы **C**, **R**, резонансную частоту **F0** и значение нагрузки каскада **Rn**. Часть исходных параметров, касающихся диапазона частот **Fh**, **Fh**, **Fv**, временно закрыты для редактирования в целях упрощения работы. В правой нижней части графического окна приведены используемые параметры упрощенной модели биполярного транзистора. Вначале сеанса в

редактируемых окнах выводятся исходные данные, установленные по умолчанию.

После редактирования исходных параметров и требований с помощью мыши производится нажатие клавиши «**Ре\_Старт**» и в правой нижней части графического окна выводятся результаты оптимизации. Вначале выводится исходное значение целевой функции **zf**, соответствующее начальным значениям варьируемых параметров. Ниже, для контроля, выводятся найденные оптимальные значения параметров: конденсатора, сопротивления обратной связи **R** и значение эквивалентной входной индуктивности каскада с ОБ **Lv\_ес**. Затем выводится результирующее значение целевой функции и число выполненных итераций.

Кроме панели управления, после очередного нажатия клавиши «**Ре\_Старт**» выводится второе, смещенное относительно первого, графическое окно, на котором сверху выведена частотная зависимость коэффициента передачи к моменту начала процесса оптимизации, а снизу результат настройки колебательной системы на заданную частоту. Графические зависимости позволяют визуально оценить результаты оптимизации (настройки).

Заметим, что редактирование исходных данных и «**Ре\_Старт**» можно выполнять многократно, при этом результаты оптимизации постоянно обновляются.

Для выхода из лабораторной работы следует воспользоваться кнопкой «**Break**» на панели управления, которая появляется на панели управления после первого выполнения программы.

В данной лабораторной работе определяются оптимальные значения параметров избирательной системы на основе каскада с ОБ, настроенной на заданную частоту, с учетом входной эквивалентной индуктивности каскада. На значения параметров избирательной системы оказывает влияние и значение сопротивления нагрузки, в силу изменения входной эквивалентной индуктивности.

#### **Задание:**

1. Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями к циклу лабораторных работ по оптимизации.

2. Ознакомиться с текстами Script- и m- файлов, реализующих данную работу.

3. Запустить программу **UCnd\_Res** на выполнение и с помощью диалогового меню выбора просмотреть и зафиксировать в виде таблицы результаты работы при различных значениях исходных параметров и требований.

4. Убедиться в том, что, изменяя начальные значения, возможна настройка контура на частоту с различным характеристическим сопротивлением.



5. Убедиться в том, что параметры контура с учетом значения входной эквивалентной индуктивности каскада соответствуют требуемой резонансной частоте.

6. Дать ответ на контрольные вопросы.

7. Отчет оформляется в «блокноте», в виде краткого текстового файла.

**Указания по проведению работы:**

1. Обратите внимание на общие указания по проведению данного цикла лабораторных работ.

**Контрольные вопросы:**

1. Какие функции минимизации могли бы быть использованы в работе и их краткая характеристика.

2. Особенности построения избирательных систем устройств в микро- и интегральном исполнении.

3. Причина появления входной эквивалентной индуктивности каскада с ОБ на биполярном транзисторе.

4. Какого вида целевая функция использована в работе.

5. Перечислить функции **MATLAB** использованные при организации панели управления и графического интерфейса лабораторной работы.

**Содержание отчета:**

1. Название работы, исполнители, преподаватель, дата выполнения.

2. Цель работы, краткое содержание.

3. Интерпретация полученных результатов и выводы.

4. Приложениями отчета являются рабочая тетрадь с аналитическими выкладками, файл программы сценария на языке **MATLAB** с краткими комментариями, графические результаты, оформленные должным образом.

Для студентов дневной формы обучения отчет выполняется один на подгруппу, рабочую тетрадь ведет каждый студент. Защита работы производится либо в конце занятия, либо в начале следующего. Зачет работы проставляется в журнале преподавателя и рабочих тетрадях студентов.

## **4 ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Министерство образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра средств радиосвязи (СРС)

### **ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №**

Настройка безиндуктивного резонансного усилителя  
на заданную частоту

**из раздела «Оптимизация параметров  
радиоэлектронных устройств»**

**по дисциплине «Основы автоматизированного проектирования  
радиоэлектронных устройств (АПР РЭУ)»**

Студент группы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Неизвестный Н.Н.

Руководитель  
доцент кафедры СРС

\_\_\_\_\_ Кологривов В.А.

**Цель работы:** ознакомление с содержанием пакета расширений **MATLAB “Optimization Toolbox”** (Оптимизация) и настройка на заданную частоту **F0** параметров безиндуктивного резонансного усилителя, выполненного на основе каскада с ОБ.

**Задачи работы:** приобретение навыков работы с системой для инженерных и научных расчетов **MATLAB**; расчет передаточных характеристик избирательной системы методом узловых потенциалов; ознакомление с особенностями формирования целевой функции при настройке безиндуктивной избирательной системы, на основе каскада с ОБ, на заданную частоту; оценка влияния эквивалентной индуктивности входного сопротивления транзистора, включенного по схеме с ОБ, на резонансную частоту избирательной системы; иллюстрация форм организации графического интерфейса программ в среде системы **MATLAB**.

**Краткое содержание работы:**

Работа заключается в настройке безиндуктивного резонансного усилителя на основе каскада с ОБ на заданную частоту **F0**, с помощью универсальной функции минимизации **fmins**, при различных исходных значениях варьируемых параметров **C** и **R** и сопротивлении нагрузки **Rn** каскада. Работа выполнена в электронном варианте в системе для инженерных и научных расчетов **MATLAB 4.0**. После запуска работы появляется графическая панель управления с названием работы, изображением схемы избирательной системы и справкой об используемой в работе функции минимизации. Исходные данные для настройки избирательной системы задаются в редактируемых окнах панели управления. Запуск на выполнение осуществляется кнопкой «**Ре\_Старт**». Параметры модели используемого транзистора и результаты настройки (оптимизации) выводятся в правом нижнем углу панели управления и параллельно в командное окно. Графические результаты исходной и результирующей АЧХ выводятся в дополнительное графическое окно. После первого выполнения программы исходные данные можно отредактировать и запустить повторно либо с помощью появившейся кнопки **Break** можно выйти из программы в общее меню. Общий вид заставки или панели управления приведен на рисунке 4.1, а форма графического представления передаточной характеристики до и после настройки на рисунке 4.2.

**Настройка безиндуктивного резонансного ус-ля на заданную частоту**



Параметрический синтез безиндуктивного контура реализуется функцией `fmins`  
`fmins` реализует симплекс-метод Нелдера-Мида  
 Обращение :  
`[xmin,opt]=fmins('f',x0,opt,[],p1,p2,...,p10)`  
 где: "f" имя m-функции  $y=f(x,p1,p2,\dots,p10)$ ;  
`x0` вектор нач. значений;  
`opt` элементы управл. массива;  
`[]` первый аргумент --> `x0`;  
`p1` и т.д. - доп. арг-ты функции  
`xmin` выходной вектор параметров

Исх. данные для оптимизации:				Параметры модели б.п. транзистора:					
<code>fn [Hz]</code>	<code>fh [Hz]</code>	<code>fv [Hz]</code>		<code>rb [Om]</code>	<code>re [Om]</code>	<code>ce [F]</code>	<code>cc [F]</code>	<code>S [Sim]</code>	
1e+006	1e+006	5e+007		20	5	5e-012	3e-012	0.2	
<code>F0 [Hz]</code>	<code>Rn [Om]</code>	<code>C [F]</code>	<code>R [Om]</code>	Исх. значение целевой функции = 0.9178					
2e+007	250	5e-011	200	Результаты оптимизации :					
				<code>C [F]</code>	<code>R [Om]</code>	<code>Lv ec [H]</code>			
				1.66e-010	461.3	3.46e-007			
				Результ. знач.целевой функции = 0					
				Число выполненных итераций = 166					

Pe\_Старт
Break

Рисунок 4.1 - Панель управления лабораторной работы

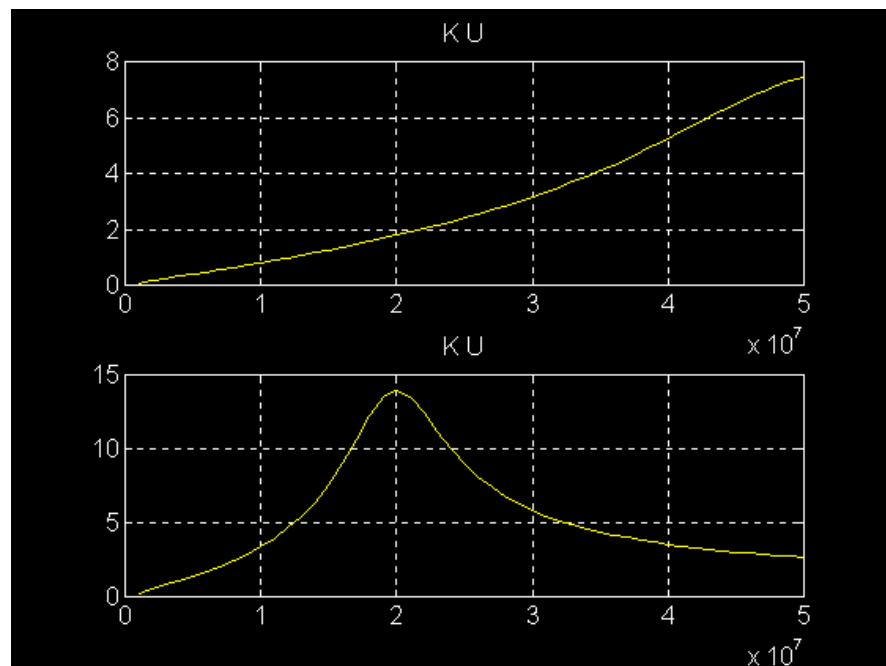


Рисунок 4.2 - АЧХ избирательной системы до и после настройки на заданную частоту

### Пункты и результаты выполнения работы:

1. Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями к циклу лабораторных работ по оптимизации.

Оптимизация или параметрический синтез представляет собой целенаправленный перебор параметров устройства с целью удовлетворения требований технического задания (ТЗ). Оптимизация является основным приемом проектирования радиоэлектронных устройств с заданными характеристиками.

Целенаправленный перебор варьируемых параметров осуществляется в соответствии с определенной стратегией на основе анализа изменения значения целевой функции.

Целевая функция представляет собой выражение, включающее суммы квадратов разностей отклонения требуемых характеристик или показателей от заданных ТЗ.

Методы или алгоритмы оптимизации делятся на градиентные и безградиентные. В технических задачах проектирования, чаще всего, не удается записать целевую функцию в явном виде, поэтому, как правило, используются безградиентные методы. Методы оптимизации (минимизации) делятся на условные и безусловные. Безусловные методы используются, в основном в математических задачах, когда на пространство параметров не накладывается никаких ограничений. В технических приложениях, как правило, используются условные методы минимизации.

В пакете расширений **MATLAB “Optimization Toolbox”** (Оптимизация) имеются, как условные, так и безусловные функции минимизации. Условные функции минимизации позволяют задать ограничения на пространство варьируемых параметров в виде интервалов или границ, линейных и нелинейных ограничений типа равенств и неравенств.

В данной работе предлагается исследовать применение задачи оптимизации для настройки безиндуктивной резонансной системы на основе каскада с ОБ на заданную резонансную частоту.

Резонансные или фильтрующие системы обеспечивают избирательность устройств приема и обработки информации. Традиционное исполнение избирательных систем с применением катушек индуктивности препятствует миниатюризации аппаратуры приема и обработки сигналов.

В данной работе рассмотрен вариант построения резонансной системы без применения индуктивных элементов, пригодных для реализации в микроисполнении. Избирательная система выполнена на основе резистивного каскада с ОБ с дополнительным сопротивлением (противосвязью) в цепи базы и емкостью на входе. Реактивная составляющая входного сопротивление каскада с ОБ играет роль эквивалентной индуктивности.

2. Ознакомиться с текстами Script- и m- файлов, реализующих данную работу.

Программа реализована в виде Script-файла **UCnd\_Res.m** и m-файлов **opt\_ucnd.m**, **zf\_ucnd.m**, **lvx\_escv.m**. Программа **UCnd\_Res** реализует панель управления лабораторной работы. Функция **opt\_ucnd** реализует диалоговый обмен данными - графический интерфейс. Функция **zf\_ucnd** реализует расчет передаточных характеристик избирательной системы и вычисления значения целевой функции по отклонению текущей частоты от требуемой. Функция **lvx\_escv** вычисляет значение эквивалентной индуктивности каскада с ОБ по известным параметрам эквивалентной модели транзистора, частоте  $F_0$ , сопротивлениям обратной связи  $R$  и нагрузки  $R_n$ .

3. Запустить программу **UCnd\_Res** на выполнение и с помощью диалогового меню выбора просмотреть и зафиксировать в виде таблицы результаты работы при различных значениях исходных параметров и требований.

Результаты исследований сведены в таблицу:

Таблица 1 – Результаты компьютерного эксперимента.

№	F0, МГц	Rn, Ом	Снач, пф	Rнач, Ом	Сopt, пФ	Ropt, Ом	Lэкв, мкГн	Kv, раз	Ro, Ом
1	10	250	50	200	331	921.7	69.5	16	458.2
2	20	250	50	200	166	461.3	34.6	14	456.6
3	30	250	50	200	96.8	344.1	25.2	11	510.2
4	40	250	50	200	67.5	270	19.3	9	534.7
5	10	500	50	200	240	696.9	1.04	25	65.8
6	20	500	50	200	114	352.5	51.2	18	670.2
7	30	500	50	200	67.5	240	33.5	13	704.5
8	40	500	50	200	65.9	133.8	18.9	14.5	535.5
9	10	100	50	200	529	1394	42.5	7.7	283.4
10	20	100	50	200	258	672.8	20.7	7.3	283.3
11	30	100	50	200	163	471.3	14.3	6.5	296.2
12	40	100	50	200	114	385	11.5	5.7	317.6
13	10	250	500	200	962	335	27.1	35	167.8
14	20	250	500	200	500	130	11.4	34	151
15	30	250	500	200	389	70.2	673	33	1315
16	40	250	500	200	359	30.6	372	33	1018
17	10	250	5	200	119	3062	1.71	3.2	122.7
18	20	250	5	200	56.3	1475	80.8	2.9	1198
19	30	250	5	200	38.2	996.3	52	2.8	1167
20	40	250	5	200	26.9	780.3	38.1	2.4	1190
21	10	250	50	2000	104	3325	1.78	2.75	130.8
22	20	250	50	2000	73	1102	68.6	4.4	969.4
23	30	250	50	2000	42.5	850	48.1	3.3	1064
24	40	250	50	2000	32.8	618.8	34.1	3.2	1020
25	10	250	50	20	1070	269	22.2	39	144
26	20	250	50	20	520	130.5	11.4	34	148
27	30	250	50	20	322	86.55	792	30	1568
28	40	250	50	20	229	64.31	613	26	1636

В таблицу сведены исходные данные компьютерного эксперимента – **F0, Rn, Cn, R**, результаты оптимизации – **Сopt, Ropt, Lecv**, коэффициент передачи каскада по напряжению **Kv** и эквивалентное характеристическое сопротивление контура  $R_0 = \sqrt{\frac{Copt}{Lecv}}$ , в качестве дополнительной информации.

Анализ результатов компьютерного эксперимента убеждает в возможности построения безиндуктивной избирательной системы на основе каскада с ОБ и емкостью на входе. Исследуемая система обладает низкой добротностью, так как активная часть входного сопротивления каскада включена последовательно в контур. Большое сопротивление обратной связи  $R$  приводит к меньшей  $L_{\text{св}}$ . При очень больших сопротивлениях ОС происходит заметное снижение  $L_{\text{св}}$ , потому что начинает нарушаться естественное перераспределение тока между базой и коллектором и все меньшая часть тока ответвляется в базу. В результате значение эквивалентной индуктивности, при больших значениях сопротивления ОС в цепи базы, заметно снижается. При повышении частоты настройки добротность избирательной системы снижается, так как активная часть входного сопротивления схемы с ОБ возрастает с частотой и оно включено последовательно в эквивалентный контур. Коэффициент передачи избирательной системы возрастает с ростом сопротивления нагрузки каскада  $R_n$ , однако, при очень больших сопротивлениях нагрузки возможно появление физически нереализуемых решений, так как использована функция безусловной минимизации **fmins**. Установка начальных значений емкости  $C$  на входе каскада и сопротивления ОС в цепи базы  $R$  задает окрестность ближайшего локального минимума по настройке избирательной системы на заданную частоту.

4. Убедиться в том, что, изменяя начальные значения, возможна настройка контура на частоту с различным характеристическим сопротивлением.

Анализ таблицы показывает, что изменение требований по  $F_0$ , значений нагрузки  $R_n$ , начальных значений варьируемых параметров  $C$  и  $R$ , приводит иногда к поиску оптимального решения, с другим характеристическим сопротивлением эквивалентного контура  $R_0$ , образованного емкостью на входе каскада с ОБ и индуктивной составляющей его входного сопротивления. Данный факт объясняется тем, что имеется два локальных минимума, соответствующих одной резонансной частоте, но разным характеристическим сопротивлениям.

5. Убедиться в том, что параметры контура с учетом значения входной эквивалентной индуктивности каскада соответствуют требуемой резонансной частоте.

Расчет резонансной частоты настройки подтверждает совпадение резонансной частоты с требуемой. Небольшие расхождения в расчетах обусловлены итерационной погрешностью для аргумента (по умолчанию параметр управляющего массива  $\text{OPT}(2)=1e-4$ ). Задание итерационной погрешности  $\text{OPT}(2)=1e-6$  приводит к лучшему совпадению расчетной частоты настройки с заданной, но увеличивает число итераций.

### Ответы на контрольные вопросы:

1. Какие функции минимизации могли бы быть использованы в работе и их краткая характеристика.

Для оптимизации параметров каскада, по минимуму отклонения передаточных характеристик от требуемых, используется универсальная функция безусловной минимизации **fmins**. В принципе можно воспользоваться и другими универсальными функциями пакета расширений **MATLAB "Optimization Toolbox"** (Оптимизация)- **fminu**, **constr**, **seminf**. Функции **constr**, **seminf** позволяют наложить дополнительные ограничения в виде границ перебора параметров, линейных равенств и или неравенств и нелинейных ограничений.

2. Особенности построения избирательных систем устройств в микро- и интегральном исполнении.

Для решения задачи избирательности на низких частотах используют в настоящее время цифровые фильтры либо активные фильтры на основе операционных усилителей. При использовании цифровых фильтров входной сигнал с помощью аналого-цифровых преобразователей преобразуется в цифровую последовательность импульсов, обрабатывается процессором и цифро-аналоговым преобразователем переводится в аналоговую форму. Избирательность цифровых фильтров ограничивается лишь разрядностью аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей. Активные фильтры строятся на основе операционных усилителей с очень высоким коэффициентом усиления путем введения соответствующих цепей ОС. Еще одной возможностью построения безиндуктивных среднечастотных избирательных систем является использование индуктивного характера входного сопротивления каскада с ОБ. Все перечисленные схемотехнические решения позволяют реализовать их в микро- или интегральном исполнении.

3. Причина появления входной эквивалентной индуктивности каскада с ОБ на биполярном транзисторе.

Причина появления индуктивного характера входного сопротивления схемы с ОБ обусловлена тем фактом, что с ростом частоты начинает сказываться шунтирующее действие емкости эмиттерного перехода. При этом управляющее напряжение на эмиттерном переходе уменьшается и все больший ток ответвляется в область базы, создавая на нем возрастающее с частотой падение напряжения при неизменном входном токе. В результате наблюдается увеличение входного напряжения с частотой при одной и той же величине входного тока, что эквивалентно увеличению входного сопротивления каскада с ростом частоты. Чем больше сопротивление базы, тем сильнее проявляется этот эффект. При очень большом сопротивлении ОС начинает нарушаться естественное перераспределение тока между базой и коллектором и все меньшая часть тока ответвляется в базу. В результате значение эквивалентной индуктивности при больших значениях сопротивления ОС заметно снижается.

4. Какого вида целевая функция использована в работе.



В качестве целевой функции используется выражение  $zf = |(F0 - Fmax) / (F0 \cdot K_0)|$ , где  $Fmax$  - текущее значение частоты максимума коэффициента передачи в рассматриваемом диапазоне частот;  $F0$  - требуемое значение резонансной частоты настройки избирательной системы;  $K_0$  - значение коэффициента передачи по напряжению на заданной частоте. Так как, при настройке в резонанс разность частот стремиться к нулю, а коэффициент передачи - к максимуму, то значение целевой функции будет стремиться к нулю. Несмотря на достаточно простой вид целевой функции, настройка резонансной системы производится вполне удовлетворительно. Следует также отметить, что в зависимости от начальных значений параметров емкости и сопротивления ОС возможны варианты настройки входного контура с разным характеристическим сопротивлением.

5. Перечислить функции **MATLAB**, использованные при организации панели управления и графического интерфейса лабораторной работы.

С помощью функций **figure()** и **set()** устанавливаются смещенные графические окна панели управления и графических результатов оптимизации по настройке избирательной системы. Функции **axes()** формируют графические области для вывода изображения исследуемой схемы и информации об используемой функции минимизации. Изображение схемы выводится функцией **image()**, а справочная информация – функцией **text()**. Основные элементы панели управления: текстовые и редактируемые окна и кнопки «**Pe\_Старт**» и «**Break**», формируются функцией **uicontrol()**. Старт программы осуществляется параметром **Callback** функции **uicontrol()**, а съем информации с окон редактирования производится функцией **get()**.

**Список использованных источников**

1. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
2. Кологривов В.А. Курс лекций по основам АПР РЭУ. – Томск: изд-во ТМЦДО ТУСУР. – 150 с.
3. Численные методы условной оптимизации / Под ред. Ф. Гилла и У. Мюррэя – М.: Мир, 1977. – 290 с.
4. Аоки М. Введение в методы оптимизации. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
5. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэкшел К. Оптимизация в технике. В 2-х кн. – Кн. 1. М.: Мир, 1986. – 349 с., Кн. 2. М.: Мир, 1986. – 320 с,
6. Коханер Д., Моулер К., Неш С. Численные методы и программное обеспечение. М.: Мир, 1988. – 575 с.
7. Потемкин В.Г. Система MATLAB. Справочное пособие. - М.: Диалог МИФИ, 1997. – 350 с.
8. Лазарев Ю.Ф. MATLAB 5.x. – К.: Издательская группа BHV, 2000. 384 с.
9. Потемкин В.Г. Инструментальные средства MATLAB 5.x. – М.: Диалог МИФИ, 2000. – 336 с.
10. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В., Круглов В.В. MATLAB 5.3.1 с пакетами расширений. – М.: Нолидж, 2001. – 880 с.
11. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.