

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей физики

**Компьютерное моделирование усилителя мощности в диапазон 2 – 4 ГГц**

**АВТОРЕФРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТА**

Студента 2 курса 252 группы

Направления 03.04.02 «Физика»  
код и наименование направления (специальности)  
физического факультета  
наименование факультета, института, колледжа

Архипова Александра Владимировича  
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

Профессор, д.т.н., профессор  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
дата, подпись

А.Л. Хвалин  
инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

Профессор, д.ф.-м.н., профессор  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
дата, подпись

А.А. Игнатьев  
инициалы, фамилия

Саратов 2017 год

## Введение

В настоящее время при проектировании устройств, работающих в СВЧ диапазоне, широко используются системы автономного проектирования (САПР) некоторые из которых включают в себя большой набор инструментов, позволяющих при моделировании устройства провести его параметрическую оптимизацию, целью которой является получение наилучшего варианта набора параметров среди возможных альтернатив. В результате удачной оптимизации на выходе получается модель устройства с, очевидно, лучшими выходными параметрами, что сказывается на конечном, реальном воспроизведении устройства, например, простоте или дешевизне его производства.

*Актуальностью* и данной работы является создание конкурентоспособной аппаратуры, путем параметрической оптимизации устройства, в основе которого лежит отечественная элементная база.

*Целью и задачами* данной выпускной квалификационной работы магистра является:

1. Компьютерное моделирование двухкаскадного СВЧ усилителя мощности в диапазоне 2 – 4 ГГц, с двумя параллельными модулями усиления, на основе отечественного биполярного транзистора 2Т(КТ)937Б-2, который производится ОАО «НПП «Пульсар»,
2. Расчет и параметрическая оптимизация всех сегментов модели – делителей-сумматоров, каскадов усиления и основных частотных характеристик всего устройства в САПР «AWR Microwave Office».
3. Сравнение полученных основных параметров модели с параметрами зарубежного усилителя мощности, работающего в аналогичном диапазоне частот.

## Основные понятия параметрической оптимизации

Проектирование технических объектов всегда включает в себя элементы оптимизации – желание получить наилучший вариант из числа возможных альтернатив. Это желание реализуется перебором вариантов структуры устройства (структурный синтез) и управлением значений параметров устройства при заданной структуре (параметрическая оптимизация).

Обозначим  $n$ -мерным вектором  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  внутренние параметры устройства,  $m$ -мерным вектором  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  выходные параметры, а  $l$ -мерным вектором  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_l)$  внешние параметры.

Следовательно, в самом общем виде модель объекта проектирования можно представить в следующем виде:

$$Y = F(X, Q) \quad (1)$$

где  $F$  – векторная функция, которую можно задать разными способами – с помощью, таблиц, формул, графиков, алгоритмов вычислений и пр.

Управляемые при оптимизации параметры называются *варьируемыми параметрами* или переменными. Их также обозначают вектором  $X$  – *вектор варьируемых параметров* или вектор переменных.

Требования к проектируемому объекту возможно представить в виде системы неравенств:

$$x_i^- \leq x_i \leq x_i^+, i \in [1, n] \quad (2)$$

$$y_j^- \leq y_j \leq y_j^+, j \in [1, m] \quad (3)$$

где  $x_i^-$ ,  $x_i^+$  – значения  $i$ -й варьируемой переменной, определяющие область её возможных значений,  $y_j^-$ ,  $y_j^+$  – предельные допустимые значения выходного параметра  $Y_j$ .

Так как присутствует функциональная связь, ограничения в (3) равны системе

$$\{g_j(X), j \in [1, m]\} = g(X) \geq 0 \quad (4)$$

где  $g(X)$  –  $m$ -мерная векторная функция.

Далее полагаем, что ограничения на параметр  $q$ , заданные на интервале  $[q_{min}, q_{max}]$ , следовательно, условие (4) определяет множество допустимых значений вектора  $X$

$$D_g = \{X | g(x) \geq 0\} \quad (5)$$

Ограничения (3) определяют следующее множество допустимых значений вектора  $X$ :

$$D_x = \{x | x_i^- \leq x_i \leq x_i^+, i \in [1, n]\} \quad (6)$$

Множество, полученное пересечением множеств  $D_g$  и  $D_x$  называется *множеством допустимых значений вектора варьируемых параметров  $X$* , а именно

$$D = D_g \cap D_x \quad (7)$$

Любой вектор варьируемых переменных  $X \in D$  называется *допустимым вектором варьируемых параметров*.

Под решением задачи оптимального проектирования понимается процесс выбора варьируемых переменных  $X \in D$ , предоставляющих оптимальное значение некоторой функции  $\Phi(X)$ . Эта величина, показывающая относительное предпочтение одних значений компонент вектора  $X$  по отношению к другим значениям этих компонент, называется *критерием оптимальности*.

В зависимости от цели проектирования необходимо либо максимизировать, либо минимизировать критерий оптимальности.

Предположим, что требуется минимизировать критерий оптимальности.

*Детерминированная задача оптимизации* формулируется следующим образом:

$$\min_{X \in D} \Phi(X) = \Phi(X^*) = \Phi^* \quad (8)$$

где  $X^*$  – оптимальное значение вектора варьируемых параметров,  $\Phi(X^*) = \Phi^*$  – наименьшее, то есть оптимальное значение критерия оптимальности  $\Phi(X)$ .

*Стохастической задачей оптимизации* называется такая задача оптимизации, где критерий оптимальности  $\Phi(X)$  или ограничивающие функции  $g(X)$  зависят от случайного вектора внешних параметров  $Q$ .

Вектор  $X^*$  называется точкой локального минимума функции  $\Phi(X)$ , если для всех точек  $X$ , принадлежащих некоторой малой окрестности  $d(X)$  точки  $X^*$  имеем

$$\Phi(X^*) \leq \Phi(X), X \in d(X^*) \in D \quad (14)$$

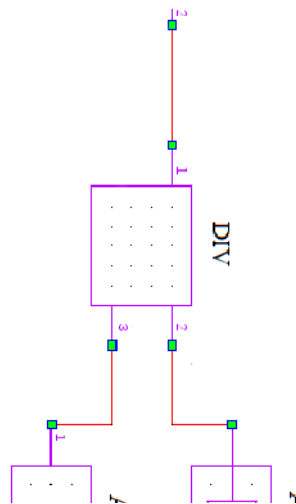
Значение функции  $\Phi(X)$  в точке локального минимума называется *локальным минимумом функции*  $\Phi(X)$ . Следовательно, если точка  $X^*$  является точкой локального минимума функции  $\Phi(X)$ , то величина  $\Phi(X^*)$  есть локальный минимум этой функции.

Точка  $X^*$  называется точкой глобального минимума  $\Phi(X)$ , если

$$\Phi(X^*) \leq \Phi(X), X \in D \quad (15)$$

следовательно, точка наименьшего из всех локальных минимумов называется точкой глобального минимума функции  $\Phi(X)$ .

## Моделирование и оптимизация характеристик двухкаскадного усилителя мощности на основе отечественного биполярно транзистора 2Т937Б-2.



**Рисунок 1.** Итоговая блок-схема моделируемого устройства – усилителя мощности на базе биполярных транзисторов 2Т937Б-2.

Обозначения блок-схемы на Рисунке 1: P1 – вход; P2 – выход; VIP1, VIP2 – каскады усиления; AMP1, AMP2 – два параллельных усилителя мощности; DIV – делитель мощности на 2 канала; SUMM – сумматор мощности.

Так как транзисторы 2Т937Б-2, очевидно, имеют предельную входную мощность, то при входной мощности прибора, например, и коэффициенте усиления 1,8 – 2,35 уже после двух каскадов усиления (VIP1 и VIP2) выходная мощность будет превышать допустимую, что может повредить транзистор при последующем усилении сигнала. Поэтому для последующего усиления сигнал разветвляется делителем мощности (DIV) на два симметричных канала ведущих к параллельно подключенным двухкаскадным усилителям мощности (AMP1 и AMP2), в которых, в свою очередь, после очередного каскада усиления (VIPa1\_1 и VIPa2\_1), так же разделен делителем мощности (DS) на два параллельных канала с каскадами усиления (VIPa1\_2 и VIPa2\_2). После прохождения всех каскадов усиления, сигналы суммируются, сначала оба канала в усилителях AMP1 и AMP2, а

затем сумматором SUMM складываются оба сигнала выходящих от них, получая на выходе достаточно мощный сигнал.

Сначала была проведена оптимизация отдельных модулей устройства, процесс которых показан в квалификационной работе, для подгонки параметров близких к целям оптимизации всего моделируемого устройства. Если проводить оптимизацию параметров всего устройства сразу, то из-за слишком далеких от оптимальных параметров отдельных модулей, функция оптимизации скорее всего заикнется и не выдаст желаемого результата. Поэтому были сначала выявлены оптимальные параметры делителя-сумматора DS, который является частью двух крупных модулей схемы – параллельных каналов усиления AMP1 и AMP2, далее оптимизировались сами каналы и затем связывающие их модули – делитель DIV и сумматор SUM.

В ходе итоговой оптимизации были получены графики зависимости основных параметров модели усилителя от заданного диапазона частот 2 – 4 ГГц – КСВ входа (P1), КСВ выхода (P2) и коэффициент усиления показанные на Рисунках 2-4. Так же получены итоговые оптимизированные значения параметров элементов схем всех модулей и двух начальных каскадов усиления VIP1 и VIP2, представленные в Приложении 2 квалификационной работы.

Полученные характеристики были сравнены с усилителем 87405B компании «Keysight Technologies» работающем в диапазоне частот от 10 МГц до 4 ГГц. КСВ входа данного усилителя в рассматриваемом диапазоне 2 – 4 ГГц в среднем составляет 2,2, а КСВ выхода – 1,9, что несколько хуже, чем полученные параметры смоделированного устройства – КСВ входа в среднем 1,55 и КСВ выхода 1,6.

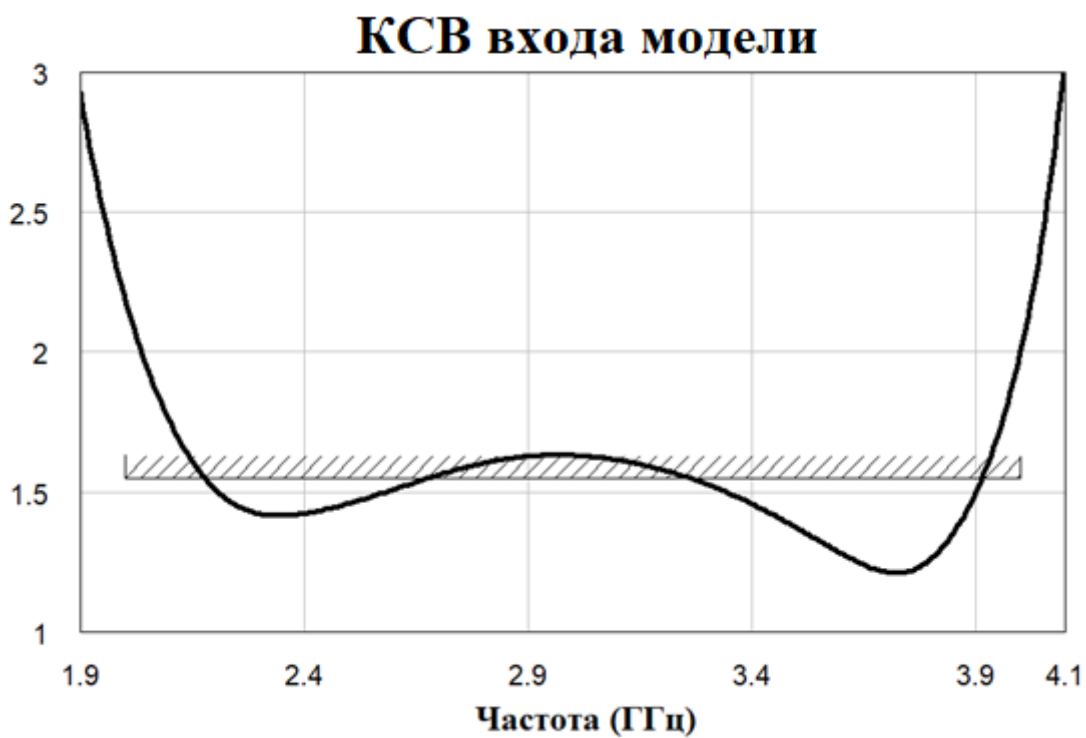


Рисунок 2. КСВ входа модели двухкаскадного усилителя мощности.

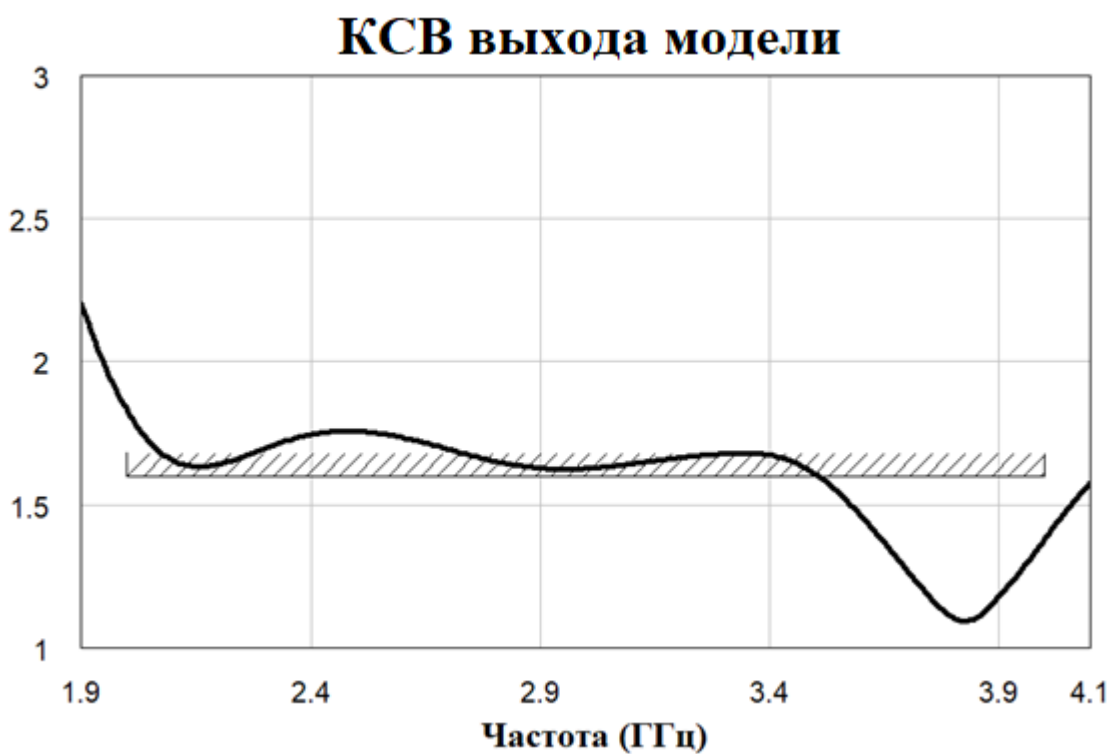
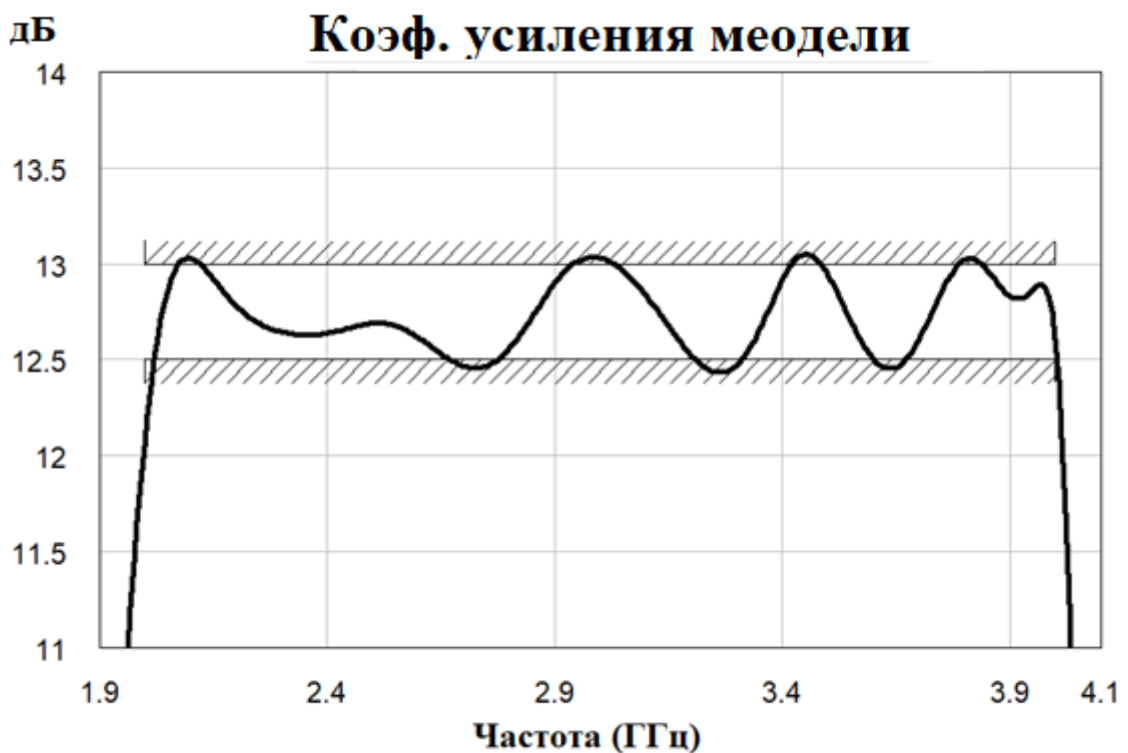


Рисунок 3. КСВ выхода модели двухкаскадного усилителя мощности.





**Рисунок 4.** Коэф. усиления модели двухкаскадного усилителя мощности.

### Заключение

В ходе проведенной выпускной квалификационной работы магистра получена топология микроросковой платы двухкаскадного СВЧ усилителя мощности в диапазоне 2 – 4 ГГц, с двумя параллельными модулями усиления, на основе отечественного биполярного транзистора 2Т(КТ)937Б-2, который производится ОАО «НПП «Пульсар», на поликоровой подложке, а также произведен расчет и параметрическая оптимизация основных частотных характеристик полученного устройства в САПР «AWR Microwave Office». В итоге получены оптимизированные параметры элементов схем модели, представленные в Приложении 2, коэффициент усиления модели в диапазоне 2 – 4 ГГц составляет 12,5 – 13 дБ. При входной мощности, например, в 0.5 Вт, выходная мощность составит около 9 – 10 Вт.