Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт электроники и телекоммуникаций

**Высшая школа прикладной физики и космических технологий**

**К У Р С О В А Я Р А Б О Т А**

по дисциплине «Основы построения устройств приема и обработки сигналов»

направление 11.03.01 – «Радиотехника»

Работу выполнили:

студентки гр. 4931101/90101 Е. А. Денисова

А. А. Дубовик

Преподаватель: А. С. Коротков

«\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

**Содержание**

|  |  |
| --- | --- |
| 1. 1. Техническое задание…………………………………………………….. | 3 |
| 1. 2. Входной сигнал………………………………………………………….. | 4 |
| 1. 3. Входная цепь……………………………………………………………... | 5 |
| 1. 4. Усилитель радиочастоты………………………………………………… | 8 |
| 1. 5. Гетеродин………………………………………………………………… | 13 |
| 1. 6. Смеситель………………………………………………………………… | 17 |
| 1. 7. Усилитель промежуточной частоты…………………………………..... | 19 |
| 1. 8. Дробный детектор………………………………………………………... | 23 |
| Заключение…………………………………………………………………. | 27 |
| Приложение………………………………………………………………… | 28 |

**1. Техническое задание**

**Задача:**

Разработать приемный тракт, включая ВЦ, УРЧ, смеситель, гетеродин, УПЧ, детектор. Провести моделирование, сравнить результаты расчета и моделирования.

**Исходные данные:**

* Частота гетеродина: = 16 МГц
* Глубина модуляции: ψ = 7
* Модулирующая частота: *fm* = 20 кГц
* Тип частотного детектора: дробный
* Тип смесителя: на биполярных транзисторах по схеме Гильберта
* Подавление зеркального канала не хуже 34 дБ
* Динамический диапазон входного сигнала 0,15 мВ – 15 мВ

Дополнительные параметры:

* Частота несущей: *fc* = 14 МГц

Тогда *f*пч = |*fc* – *f*г| = 2 МГц

* Амплитуда входного воздействия: *Um* = 1мВ

Структурная схема проектируемого радиоприёмного устройства представлена на рисунке 1.

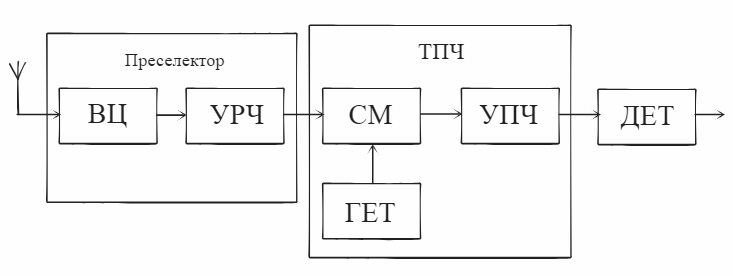


Рисунок 1 - Структурная схема устройства приёма

# 2. Входной сигнал

На вход приёмного устройства поступает ЧМ сигнал с индексом модуляции Ψ = 7 и несущей частотой *f*c = 14 МГц. Модулирующее колебание имеет частоту *f*m = 20 кГц. ЧМ сигнал описывается уравнением:

𝑈ВХ(𝑡)=𝑈𝑚𝑐𝑜𝑠(𝜔0𝑡+Ψ𝑐𝑜𝑠Ω𝑡),

где Ω=2π*f*m, 𝜔0 = 2π*f*c.

Моделирование входного воздействия производится в среде MicroCap, как и все последующие схемы в данной работе.

Зададим источник ЧМ-сигнала с помощью генератора напряжения Voltage Source. Амплитуда входного сигнала 1 мВ.

Результаты моделирования во временной области представлены на рисунке 2, а спектр ЧМ-сигнала на рисунке 3.

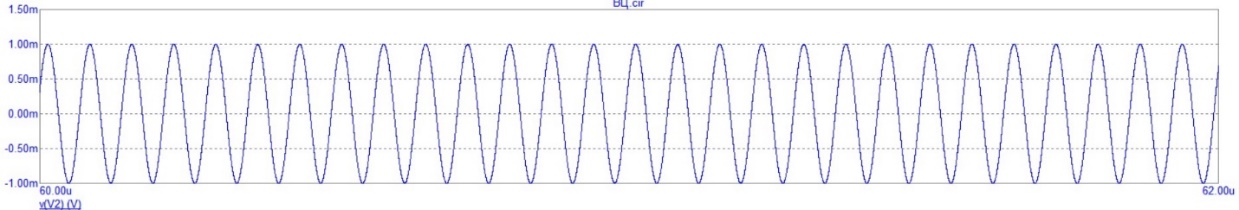


Рисунок 2 - Входной сигнал во временной области

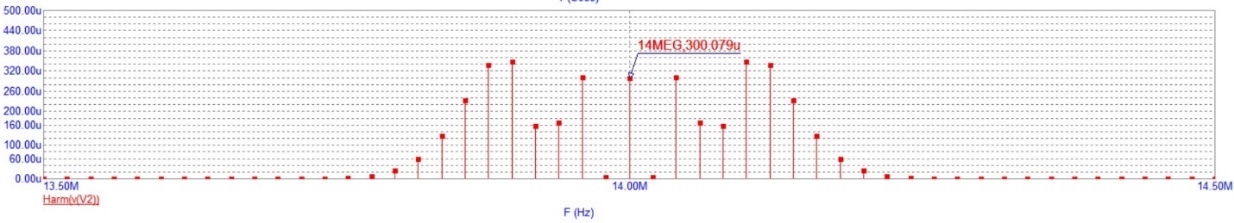


Рисунок 3 - Входной сигнал в частотной области

# 3. Входная цепь

В данной курсовой работе в качестве входной цепи (ВЦ) выбран Г-образный фильтр. Такая цепь позволяет получить требуемую избирательность по зеркальному каналу. Схема ВЦ представлена на рисунке 4.

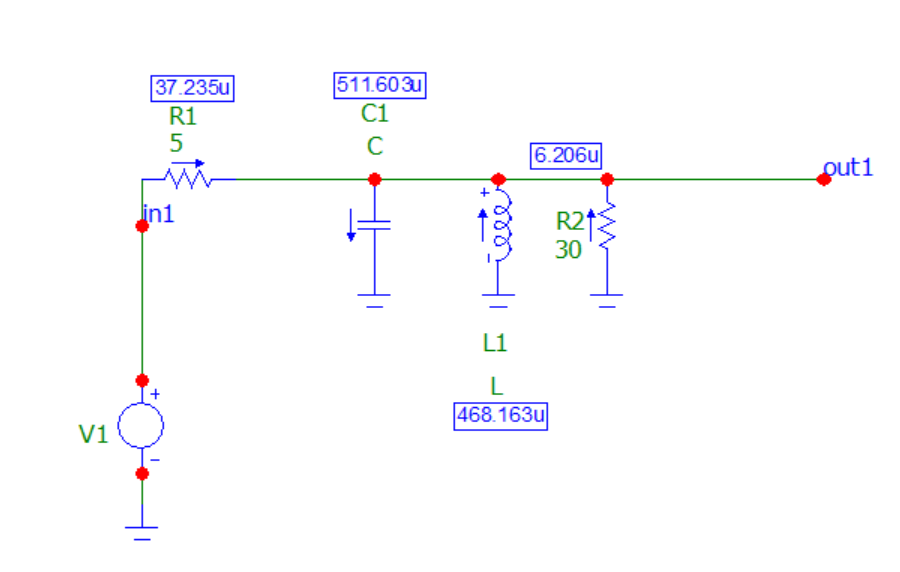


Рисунок 4 - Схема ВЦ

Полоса пропускания:

426 кГц

1.022 МГц

Расчетное значение добротности Q:

= 13.7

Пусть значение индуктивности:

Тогда значение ёмкости равно:

Расчет добротности через емкость и индуктивность:

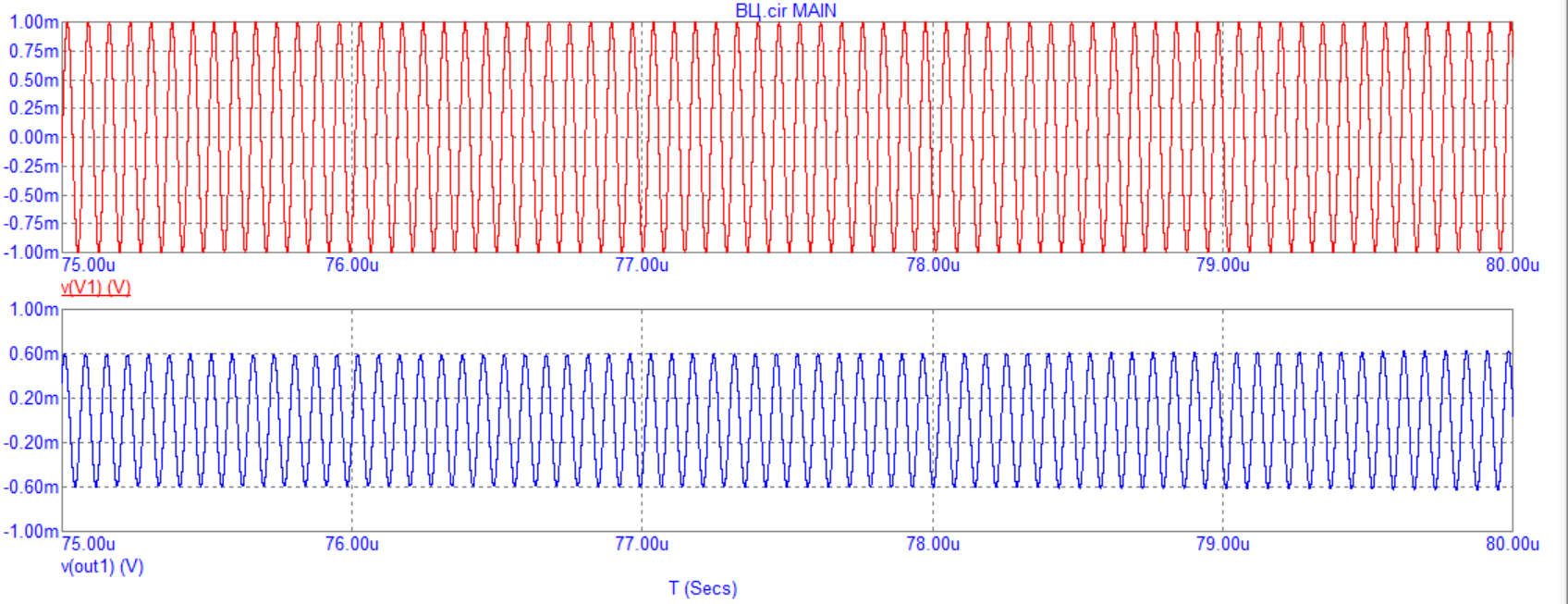
Расчетная передаточная функция входной цепи имеет следующий вид:

;

При отсутствии расстройки контура коэффициент передачи равен:

Коэффициент передачи, полученный при моделировании:

На рисунках 5 и 6 представлены результаты моделирования сигнала на входе и выходе ВЦ во временной и частотной областях.

 Рисунок 5 – Сигнал на входе (верхний) и выходе (нижний) ВЦ во временной области

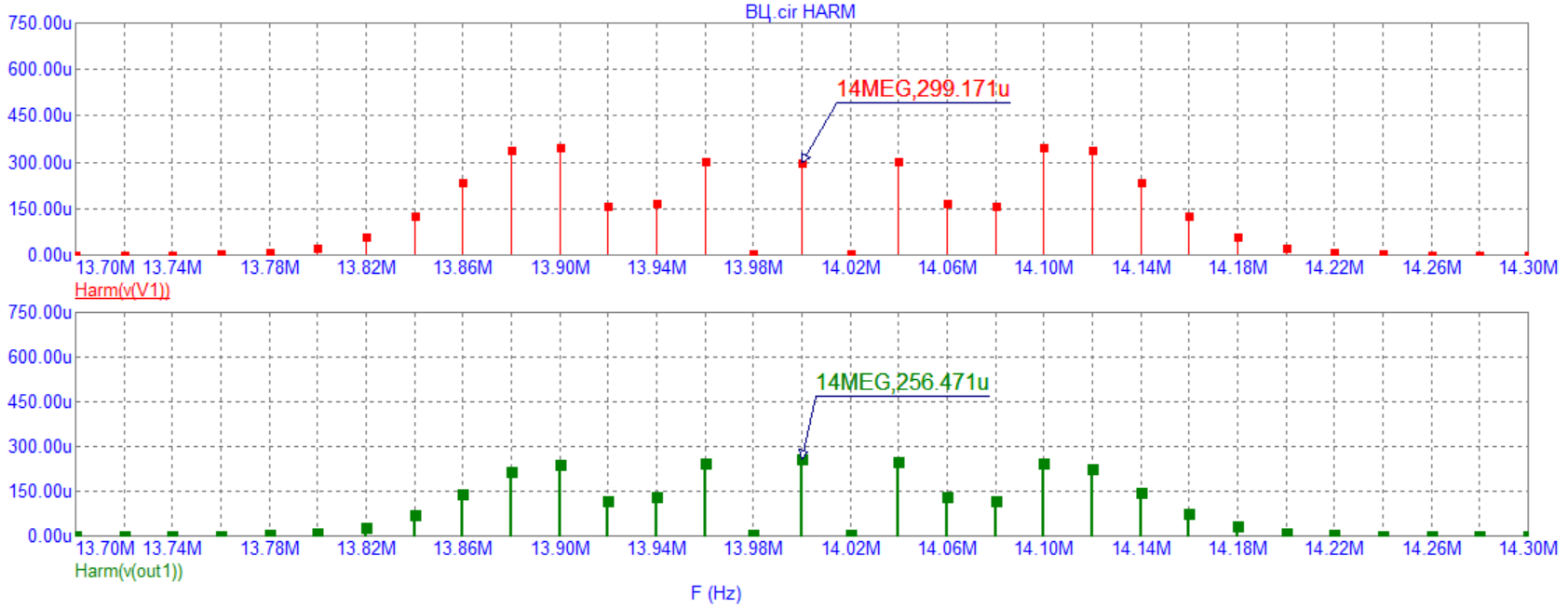


Рисунок 6 - Сигнал на входе (верхний) и выходе (нижний) ВЦ в частотной области

На рисунках 6 и 7 представлены амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики входной цепи.

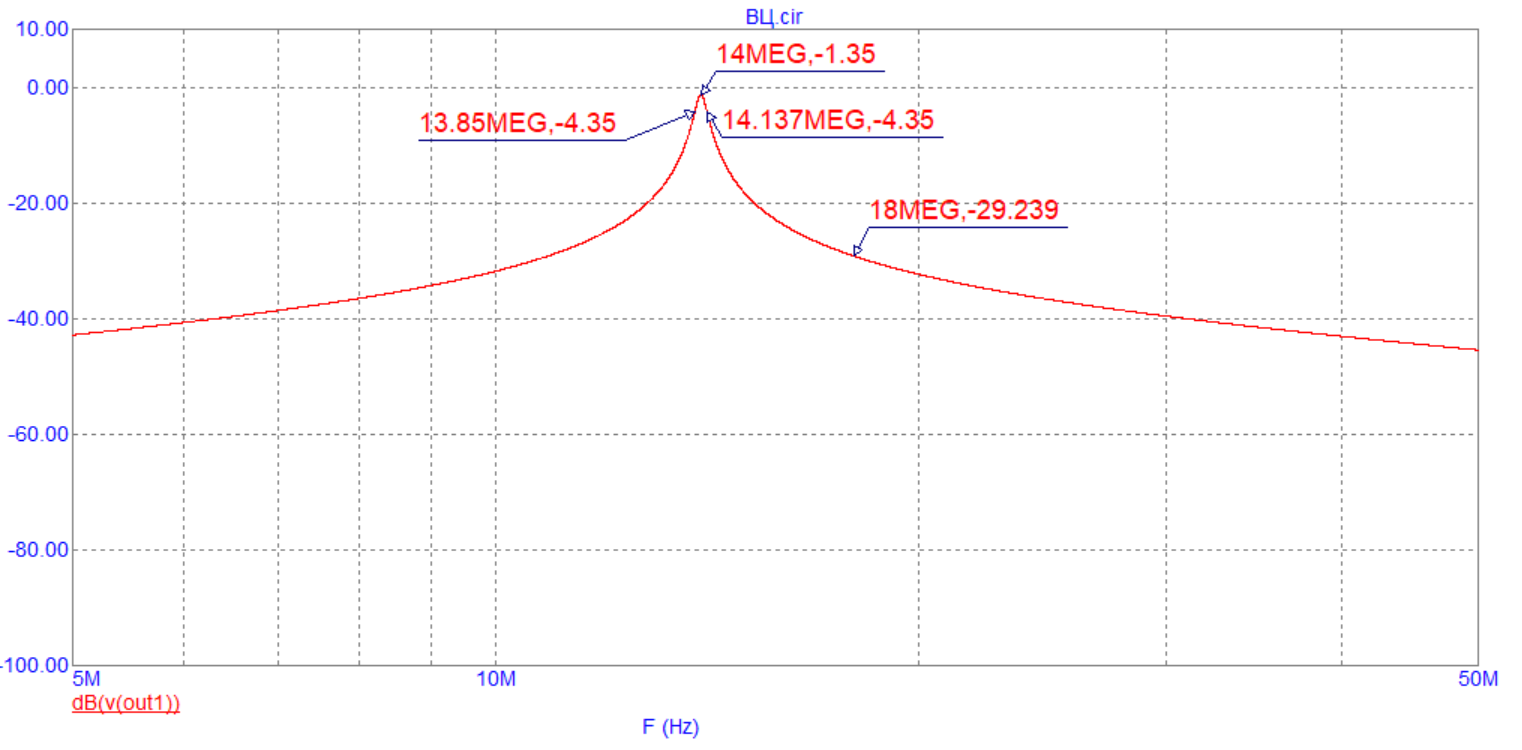


Рисунок 6 - АЧХ входной цепи

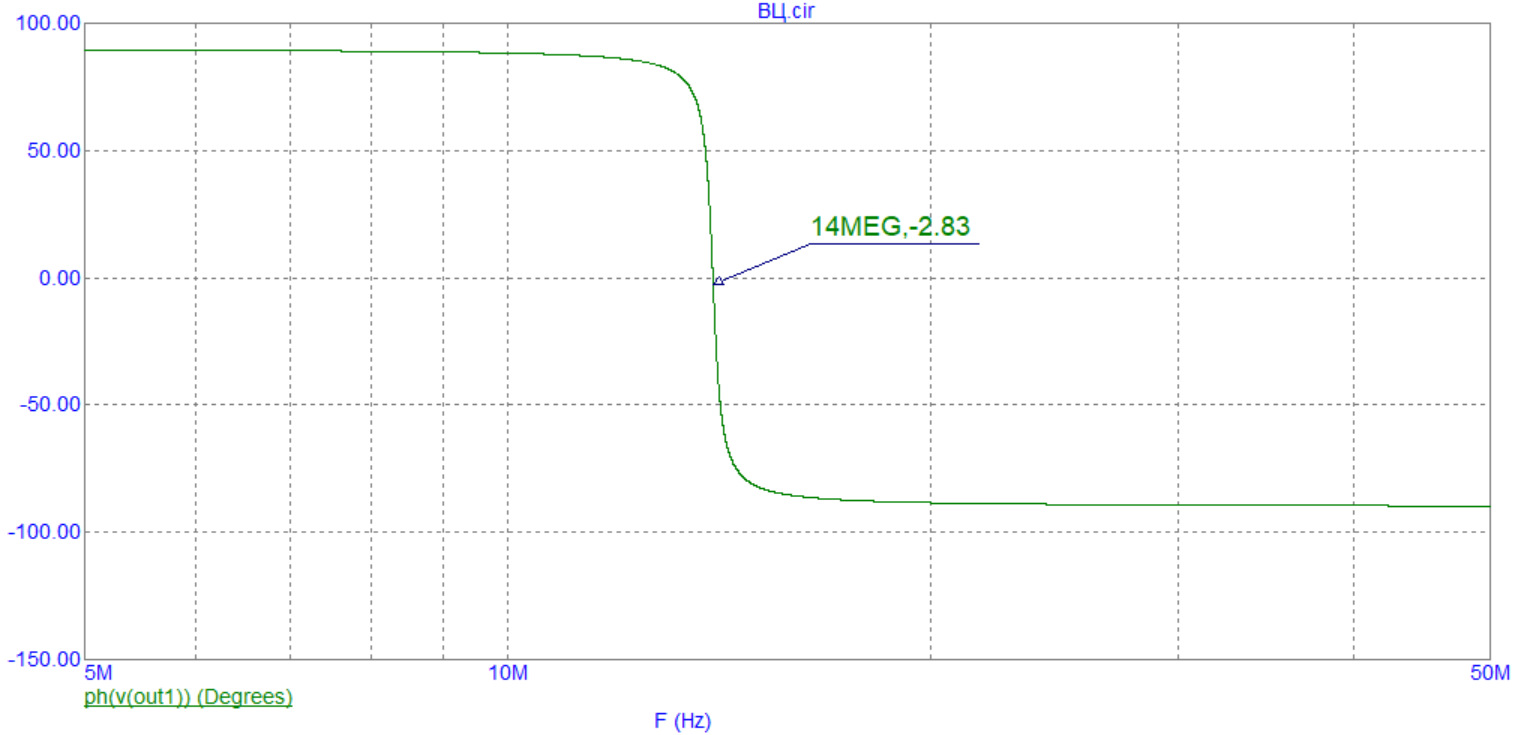


Рисунок 7 - ФЧХ входной цепи

Добротность, полученная при моделировании:

= 48.7

Расчетное значение:

Расчетное и экспериментальное значения добротности близки.

# 4. Усилитель радиочастоты

В качестве активного элемента был выбран биполярный транзистор 2N2102, характеристики которого представлены в Приложении.

Характеристики транзистора 2N2102

* Структура - **n-p-n**
* Напряжение коллектор-эмиттер, не более: **65** В
* Напряжение коллектор-база, не более: **120** В
* Напряжение эмиттер-база, не более: **7** V
* Ток коллектора, не более: **1** А
* Рассеиваемая мощность коллектора, не более: **1** Вт
* Коэффициент усиления транзистора по току (*hfe*): от **10**
* Граничная частота коэффициента передачи тока: **30** МГц

Напряжение питания *E*0 = 1.5 В задано в техническом задании.

Схема усилителя радиочастоты (УРЧ) на биполярном транзисторе 2N2102 представлена на рисунке 8.

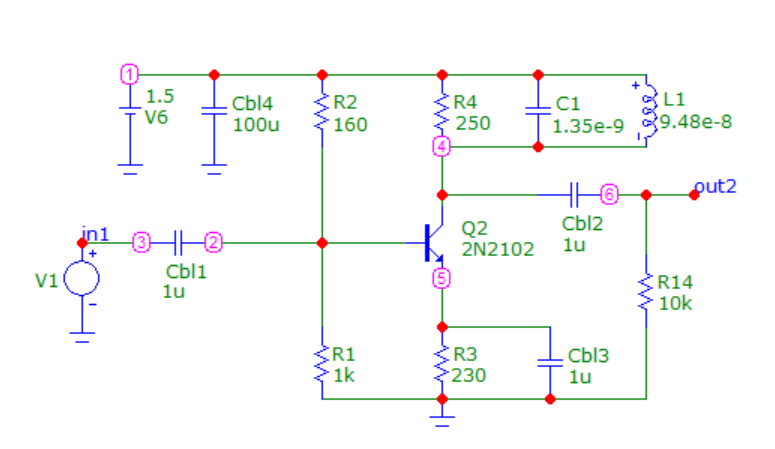


Рисунок 8 – Схема УРЧ

1. Зададим нагрузку как параллельное сопротивление 𝑅4 и входного импеданса следующего каскада |𝑍in|:

𝑅Н = 𝑅4 ∥ |𝑍in|.

Если |𝑍in| ≫ 𝑅4, то 𝑅Н ≈ 𝑅4 = 500 Ом; |𝑍in| = 10 кОм.

1. Определим требуемую крутизну входной вольт-амперной характеристики транзистора.

Принимая во внимание, что 𝐾0 = |𝑆|𝑅Н. Тогда:

|𝑆| =𝐾0/𝑅Н

Необходимо получить 𝐾0 = 20, следовательно |𝑆| = 0,04 См

3. Определим допустимое значение постоянного тока через транзистор. Учитывая, что для минимизации нелинейных искажений рассеваемая постоянная мощность транзистора должна быть примерно в 10 раз больше переменной составляющей выходной мощности, то есть должны выполняться следующие условия:

𝑃= ≥ 10𝑃~, 𝑈=𝐼= ≥ 10𝑈~𝐼~

𝑈= ≈ √10𝑈~ ≈ 3𝑈ВЫХ𝑚, 𝐼= ≈ √10𝐼~ ≈ 3𝐼ВЫХ𝑚,

где 𝑈= соответствует постоянной составляющей выходного напряжения транзистора, то есть напряжению «коллектор-эмиттер» 𝑈КЭ; 𝐼= соответствует постоянной составляющей выходного тока транзистора, то есть тока коллектора 𝐼К.

4. Определим максимальную амплитуду выходного сигнала по известному динамическому диапазону входного сигнала:

𝑈ВЫХ𝑚 𝑚𝑎𝑥 = 𝐾0𝑈ВХ𝑚 𝑚𝑎𝑥 = 20·15 мВ = 300 мВ.

5. Определяется максимальная амплитуда выходного тока:

𝐼ВЫХ𝑚 𝑚𝑎𝑥 = 𝑈ВЫХ𝑚 𝑚𝑎𝑥/𝑅Н = 300 мВ / 250 Ом = 1,2 мА

6. Зададим значения 𝑈КЭ и 𝐼К согласно условиям пункта 3.

𝐼К = 𝐼= ≈ 3𝐼ВЫХ𝑚 = 3,6 мА

𝑈КЭ = 𝑈= ≈ 3𝑈ВЫХ𝑚 = 900 мВ

7. Построим входную вольт-амперную характеристику транзистора.

Входная вольт-амперная характеристика (ВАХ) транзистора представлена на рисунке 9.

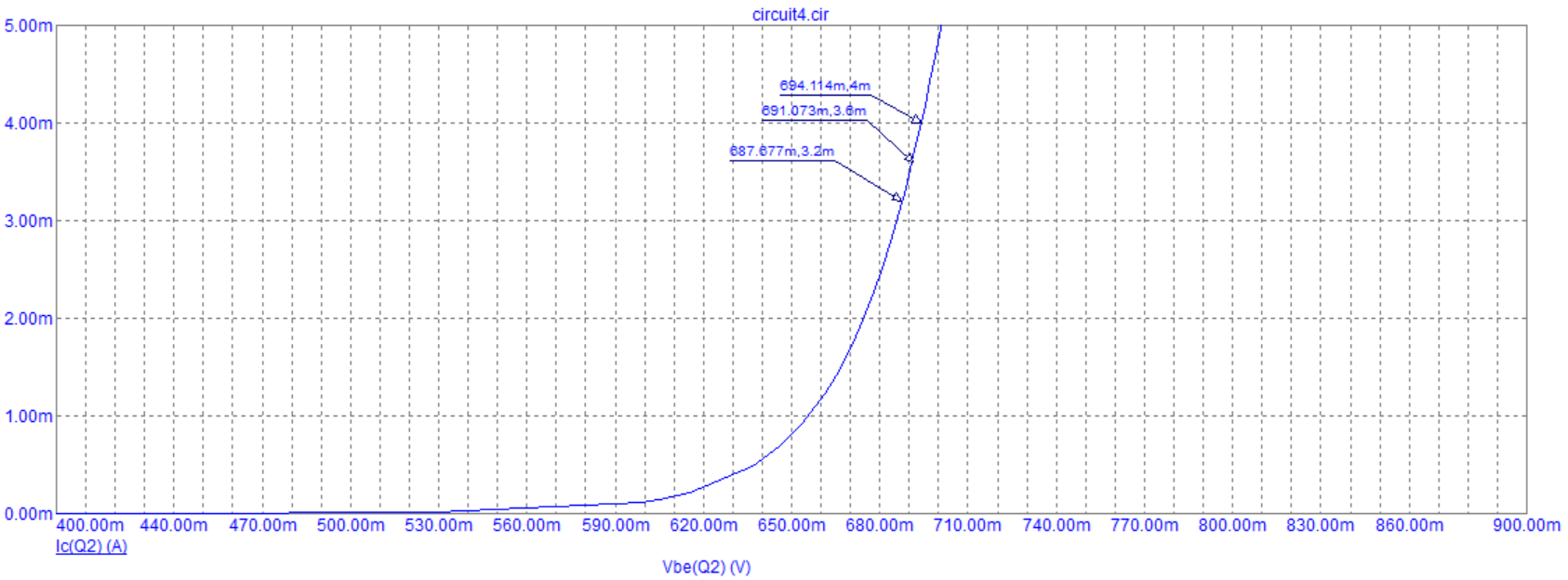


Рисунок 9 - Входная ВАХ транзистора 2N2102

Из рисунка 9 следует, что экспериментальное значение крутизны S= 0,038

Параметры рабочей точки: *U*бэ0=691,073 мВ, *I*к0 =3,6 мА

8. Рассчитаем значение резистора 𝑅3 из выражения по постоянному току:

𝐸ПИТ = 𝑅3𝐼К + 𝑈КЭ + 𝑅4𝐼К;

𝑅3 = 230 Ом

9. Рассчитаем базовый резистивный делитель. Для этого необходимо определить постоянное напряжение (узловой потенциал) на базе транзистора 𝑈Б, которое связано с потенциалом эмиттера 𝑈Э выражением:

𝑈Б = 𝑈Э + 𝑈ЭБ = 𝑅3𝐼К + 𝑈бэ0 = 207 мВ

Далее зададим значение 𝑅2 = 1 кОм и определим значение 𝑅1 из выражения для базового делителя:

𝑈Б = (𝑅2 / (𝑅1 + 𝑅2)) ·𝐸ПИТ

𝑅2 = 160 Ом.

Возьмем добротность контура равную *Q* = 50, тогда рассчитаем параметры контура:





Экспериментальный коэффициент усиления *K*0 = 22,4

АЧХ УРЧ представлена на рисунке 10.

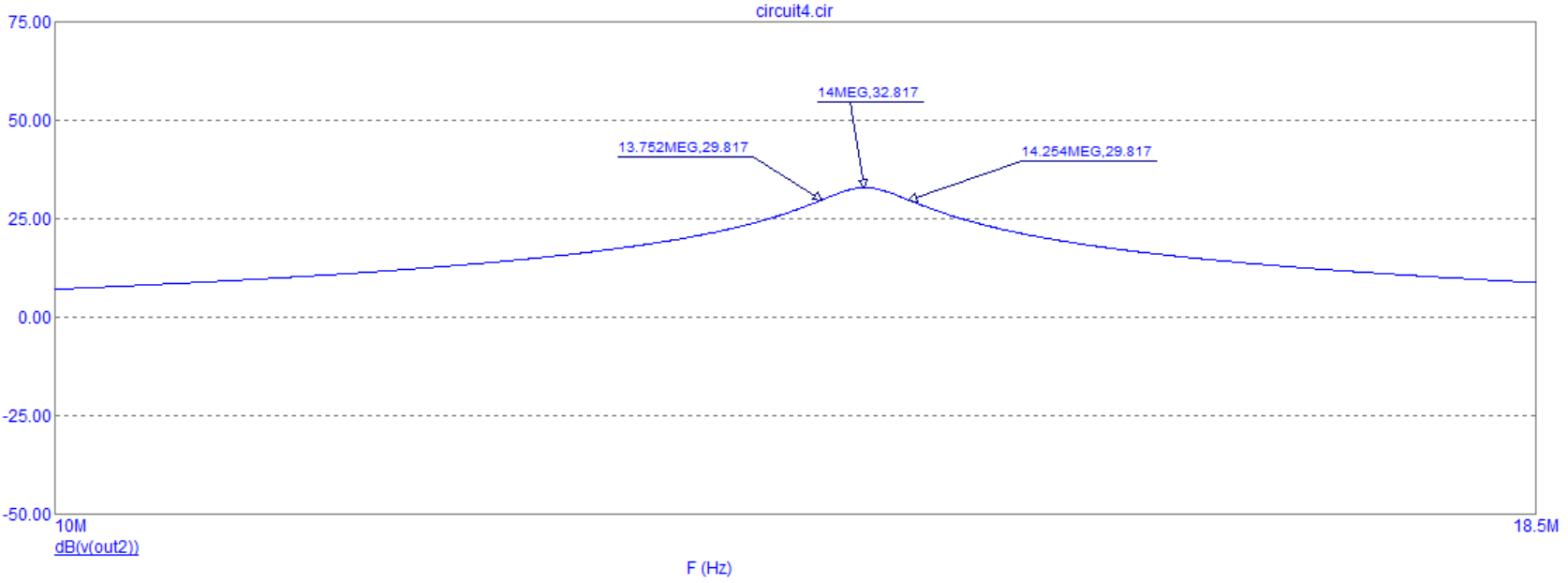


Рисунок 10 – АЧХ УРЧ

Из рисунка 10 следует, что полоса усиления усилителя: ∆*f* = 502 кГц.

Для определения верхней границы динамического диапазона УРЧ была построена его динамическая характеристика, представленная на рисунке 11. Данные, на основе которых построен данный график, представлены в Приложении.

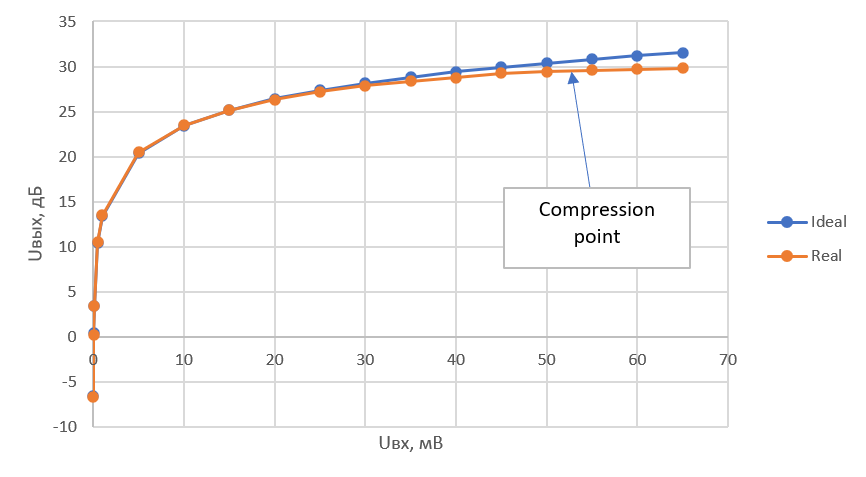


Рисунок 11 – динамическая характеристика УРЧ

Из рисунка 11 можно сделать вывод, что при амплитуде напряжения на входе *U*вх = 52.5 мВ амплитуда реального (полученного, в ходе моделирования) напряжения на выходе УРЧ становится меньше идеального (равного *U*вых = *КU*вх) на 1 дБ. Следовательно, 52.5 мВ соответствует верхней границе динамического диапазона УРЧ.

Форма и спектр сигналов на входе и выходе усилителя (после входной цепи) представлены на рисунках 12 и 13.

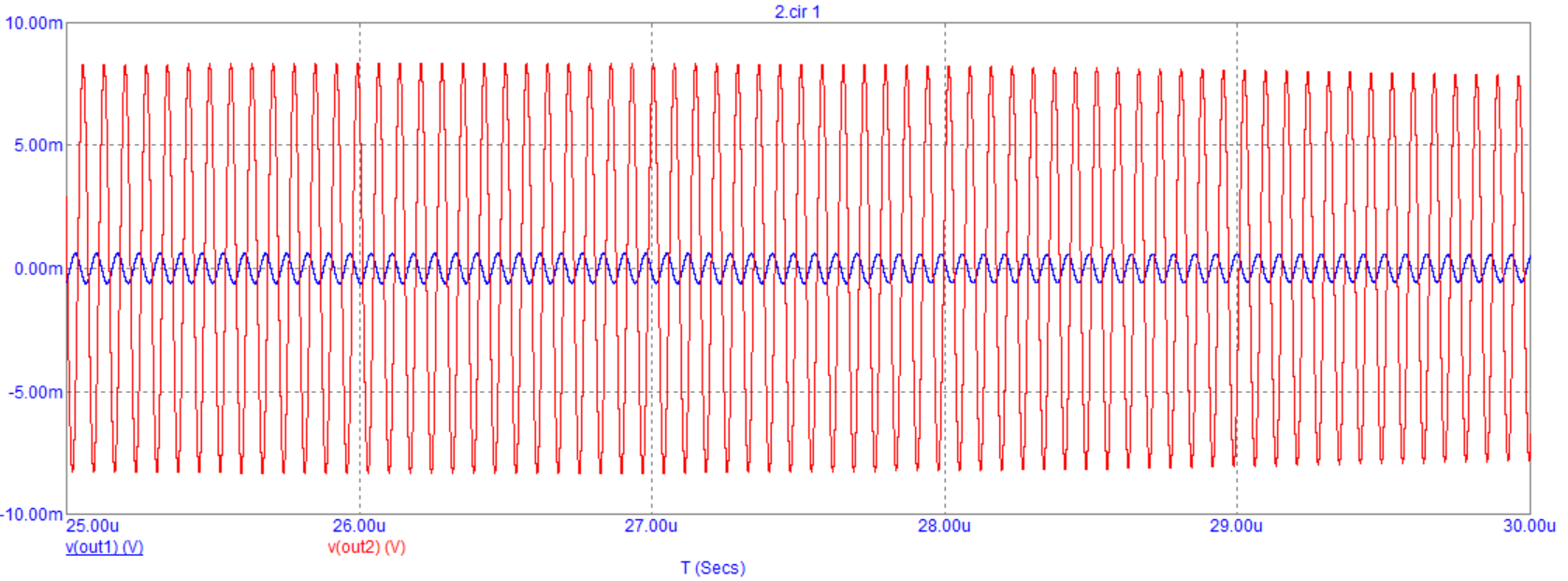


Рисунок 12 – Сигналы на входе (синий) и на выходе (красный) пресселектора

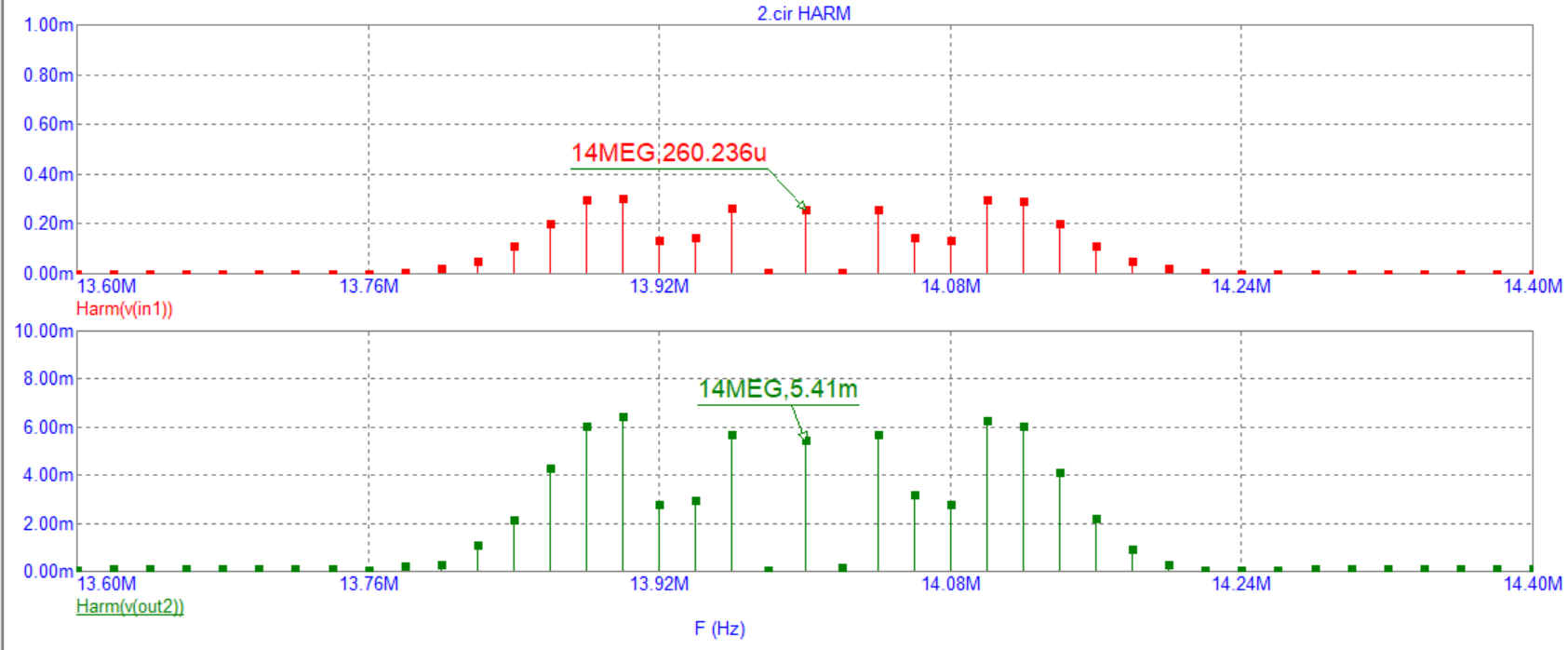


Рисунок 13 – Спектр сигналов на входе (верхний) и на выходе (нижний) пресселектора

В данном случае экспериментальный коэффициент усиления равен 18.

АЧХ пресселектора представлена на рисунке 14.

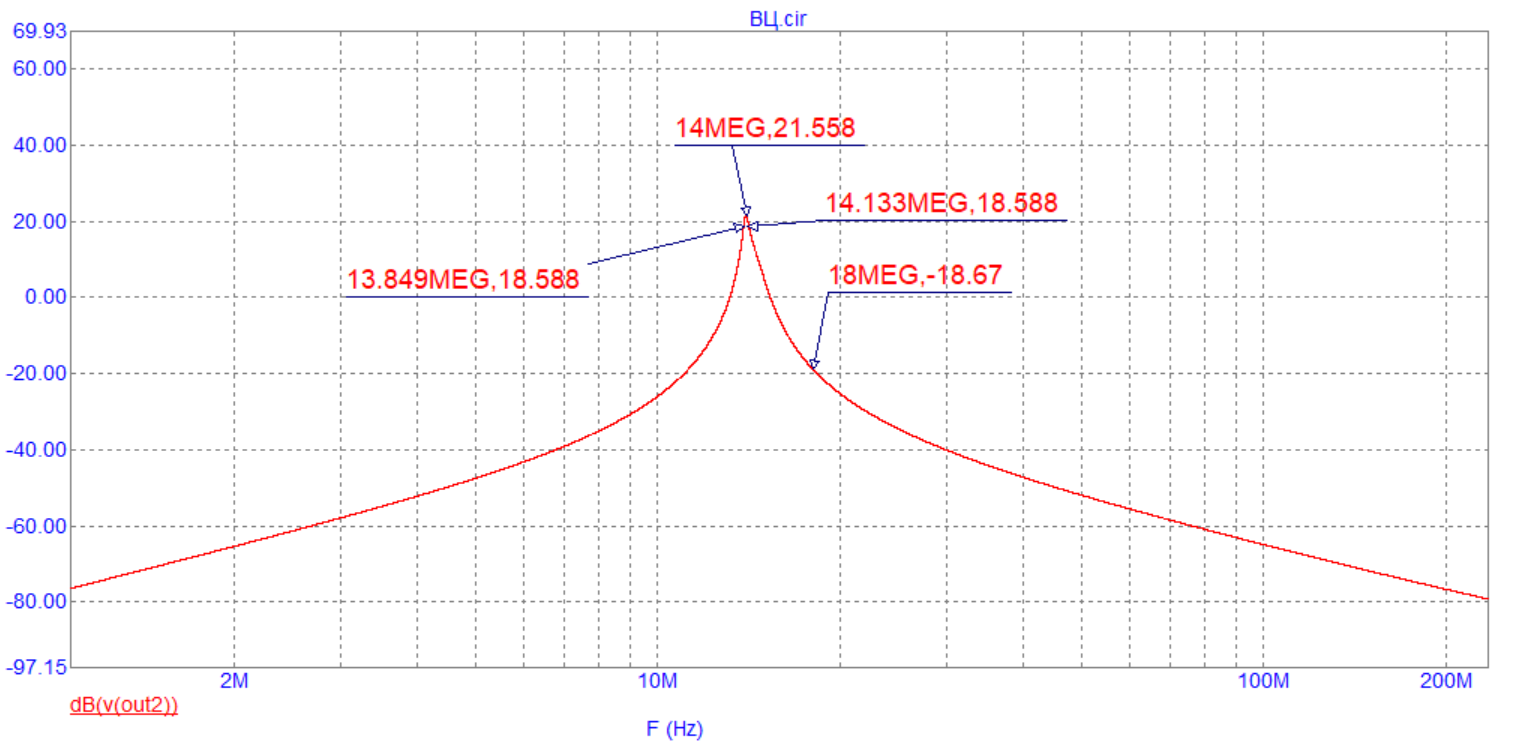


Рисунок 14 – АЧХ пресселектора

Из рисунка 14 видно, что подавление зеркального канала составляет -40.258 дБ, что удовлетворительно соответствует условию.

# 5. Гетеродин

**Расчет параметров гетеродина:**

* - частота гетеродина
* - индуктивность
* – добротность
* - частота параллельного резонанса контура

Технологические параметры для материала подложки (для кремния) и металла, из которого изготавливаются витки катушки (алюминий):

* - удельная ёмкость подложки
* - удельная проводимость подложки
* - удельное сопротивление металла
* - абсолютная магнитная проницаемость металла
* - удельная проводимость металла
* - диэлектрическая постоянная оксида кремния
* - глубина скин-слоя металла

Геометрические размеры индуктивности:

* - ширина
* - толщина
* - толщина диэлектрика
* - толщина оксида

Крутизна зависимости добротности от частоты:

Сопротивление эквивалентных потерь:

Длина индуктивности:

Ёмкость оксида кремния между *L*s и SUB:

Полная ёмкость индуктивности:

Сопротивление кремниевой подложки:

Емкость кремниевой подложки:

Параметры эквивалентной схемы на :

Емкость перекрытия:

Расчет элементов резонансного контура и параметров транзисторов:

Условие K→∞ выполняется, если:

Предположим, что входное сопротивление активного элемента велико и, следовательно, величиной  можно пренебречь. Тогда, условие  выполняется, если справедливо соотношение:

Предполагая, что имеют место следующие допущения:

Условие представим в виде системы уравнений для реальной и мнимой составляющих:

Решая систему уравнений, получаем:

Ёмкость конденсатора в контуре:

Схема гетеродина представлена на рисунке 15.

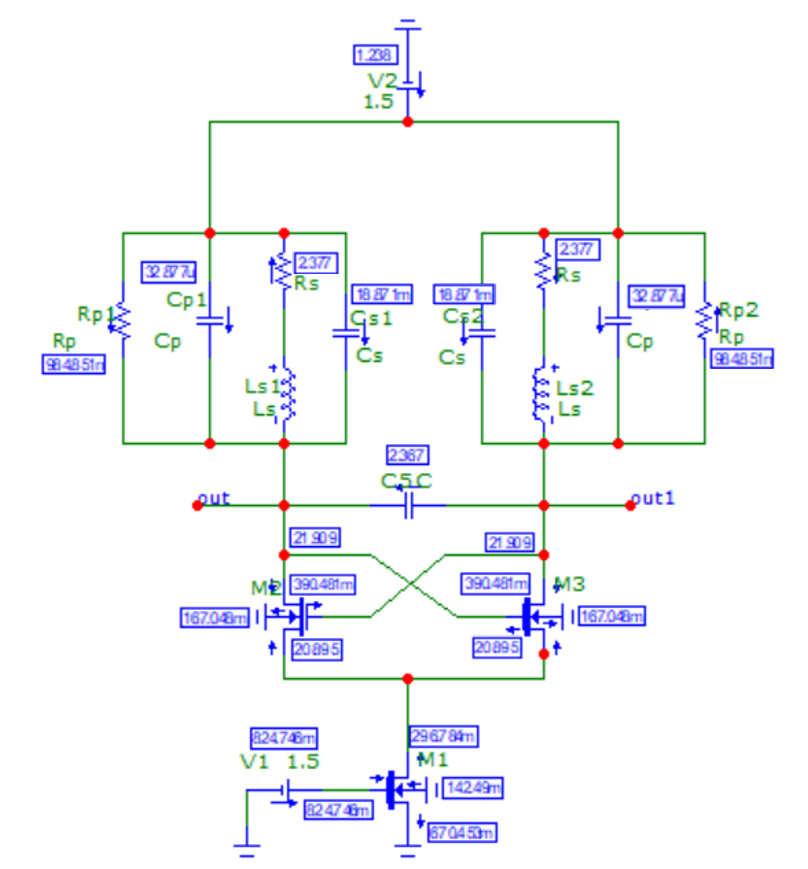


Рисунок 15 – Схема гетеродина

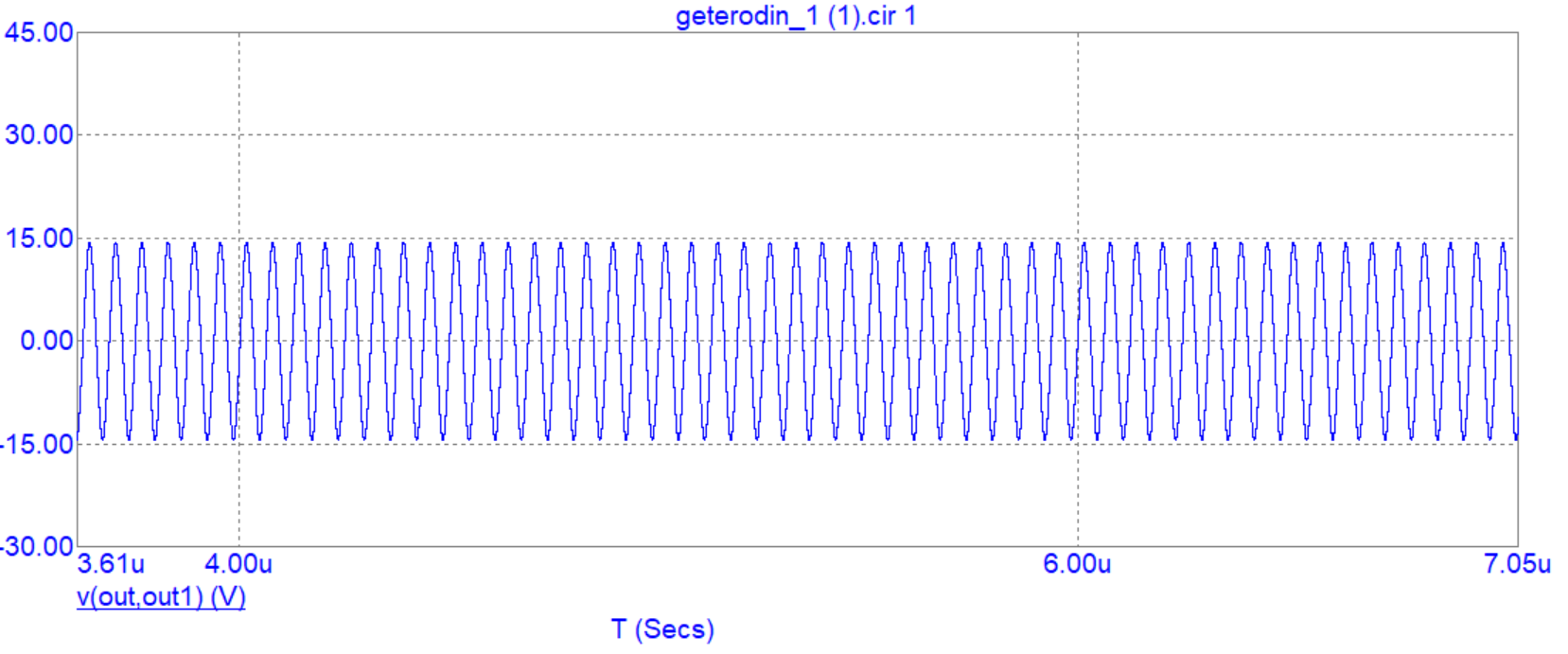


Рисунок 16 – Сигнал на выходе гетеродина

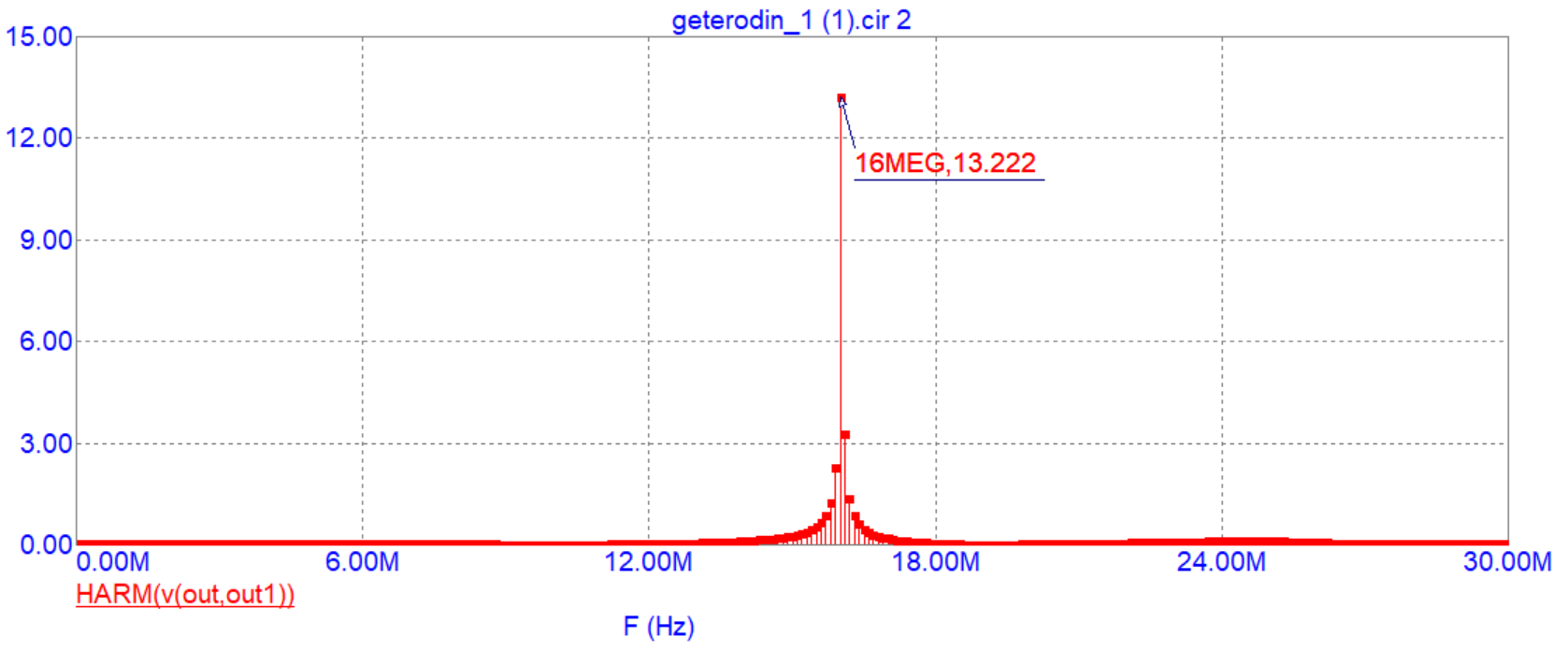


Рисунок 17 – Спектр сигнал на выходе гетеродина

Из рисунков 16 и 17 видно, что частота гетеродина равна 16 МГц, что соответствует частоте, заданной в условии.

# 6. Смеситель

Смеситель осуществляет преобразование ВЧ входного сигнала приемника с частотой 14 МГц в НЧ сигнал промежуточной частоты 2 МГц. Основное достоинство схемы Гильберта – высокий уровень развязки между всеми входами смесителя, что определяется двойной балансной структурой схемы. Схема смесителя представлена на рисунке 18.

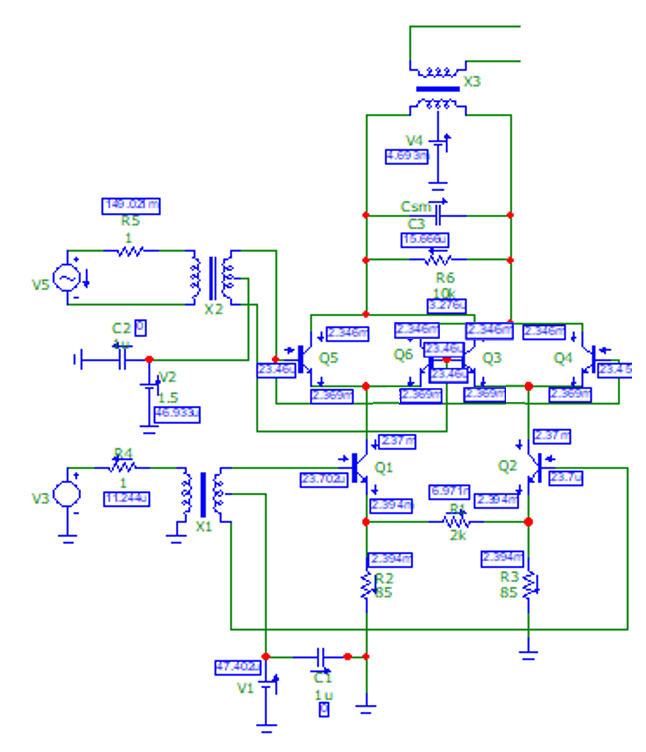


Рисунок 18 – Схема смесителя

Зададим напряжение коллектор-эмиттер транзисторов *Q*3,4,5,6 и *Q*1,2:

𝐸кэ3,4,5,6 = 15 В;

𝐸кэ5,9 = 1 В.

Вольт-амперные характеристики транзисторов представлены на рисунках 19 и 20, определим рабочую точку:

Для транзисторов *Q*3, *Q*6, *Q*4, *Q*5 (модель 2N918A):

1. *I*к0 = 2.35 мА.
2. *U*бэ0 = 928.921 мВ.

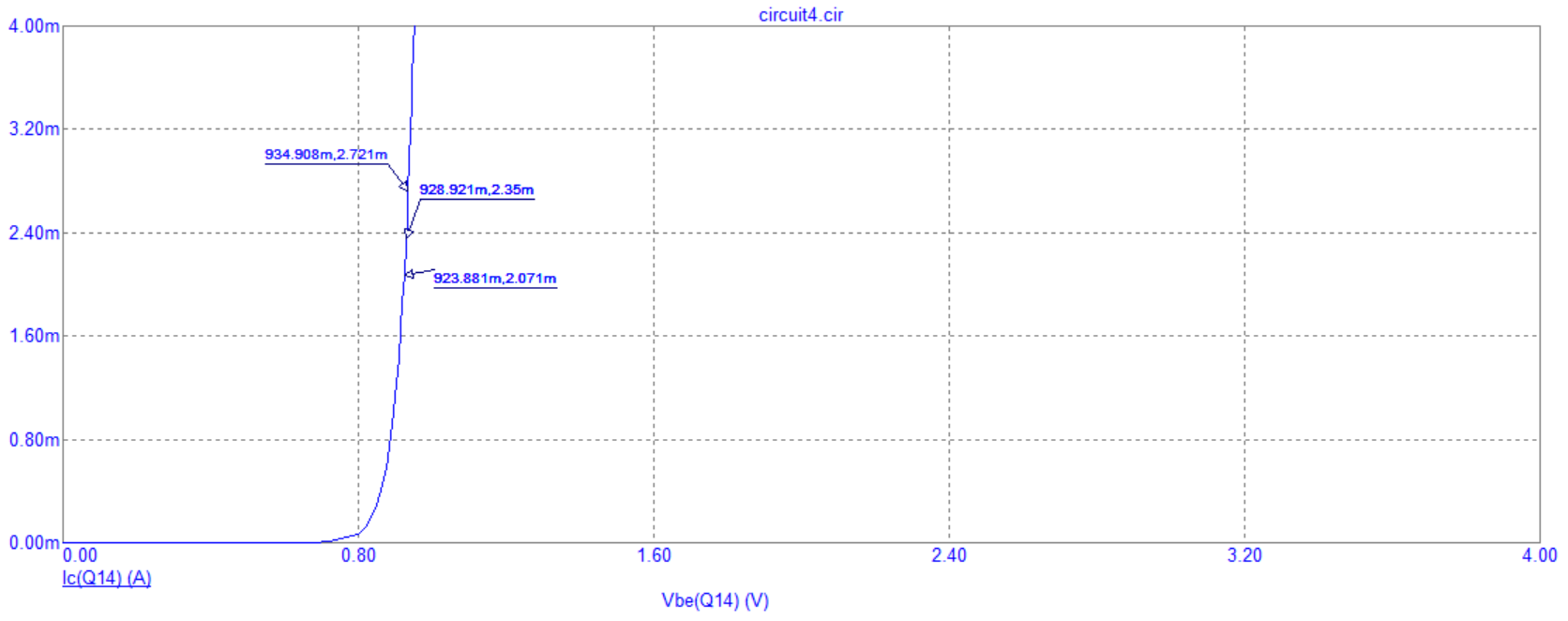


Рисунок 19 – Передаточная характеристика для транзисторов *Q*3, *Q*4, *Q*5, *Q*6

Для транзисторов *Q*1, *Q*2 (модель 2N918A):

1. *I*к0 = 2.4 мА.
2. *U*бэ0 = 645.07 мВ.

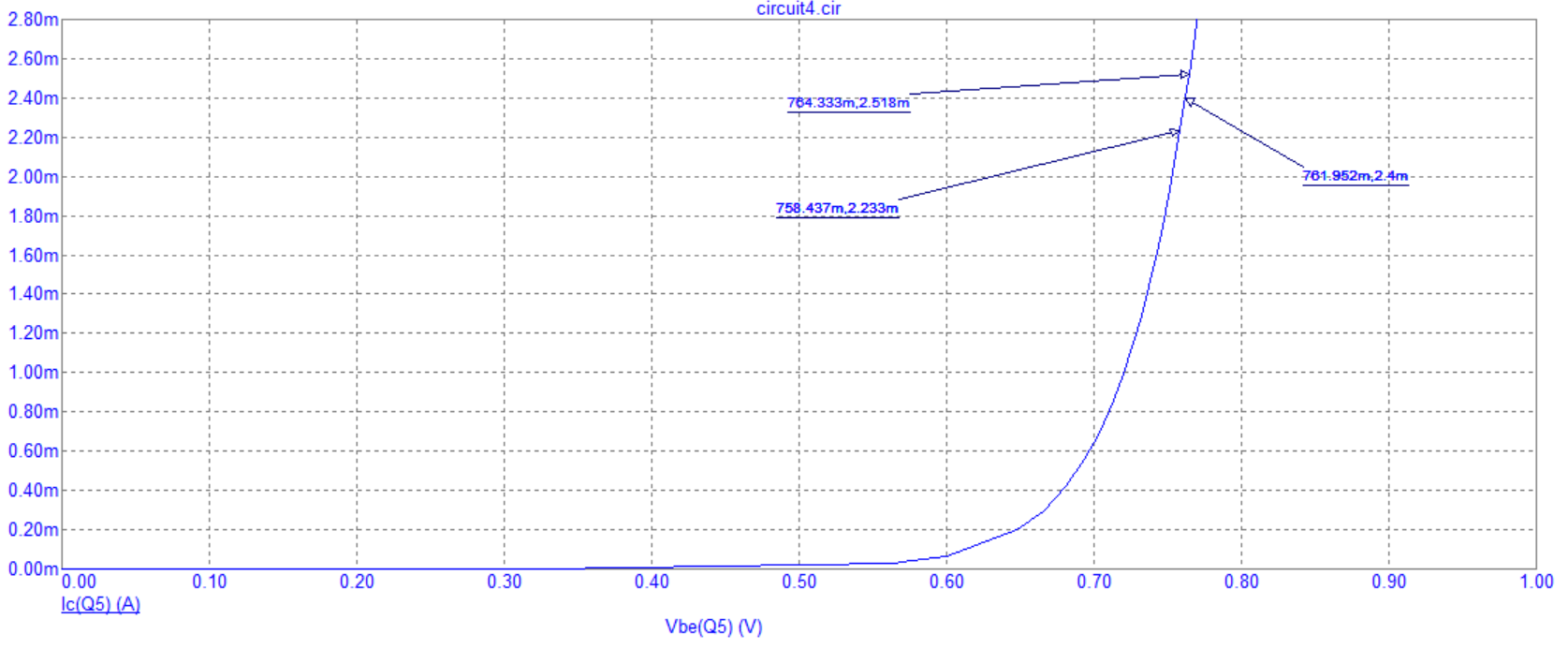


Рисунок 20 – Передаточная характеристика для транзисторов *Q*1, *Q*2

Колебательный контур в нагрузке смесителя настраивается на промежуточную частоту *f*пч =2 МГц.

Тогда, если *Q* = 20, *R* = 10 кОм:

*С*3 =

Сопротивление на выходе смесителя:

= 502.7 Ом

Результат моделирование работы смесителя представлен на рисунках 21 и 22.

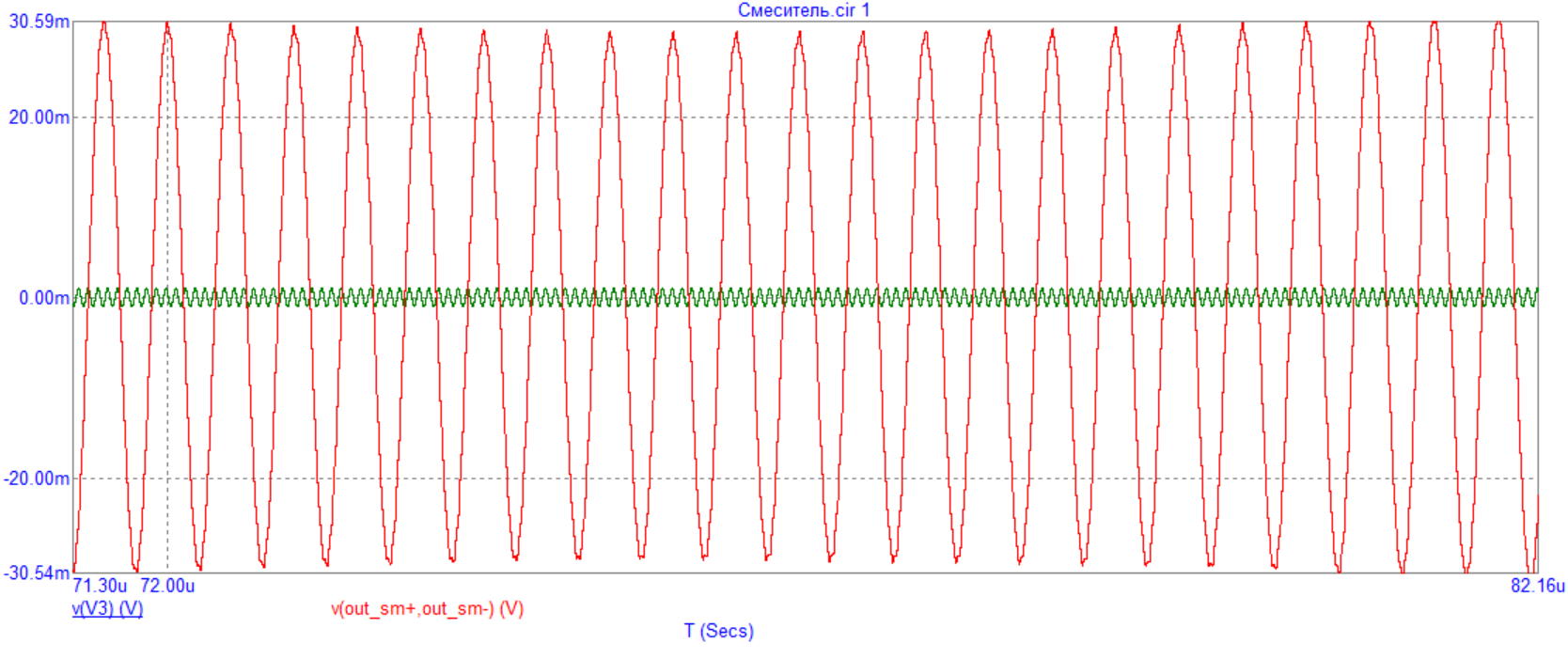


Рисунок 21 – Сигнал на входе (зеленый) и на выходе (красный) смесителя

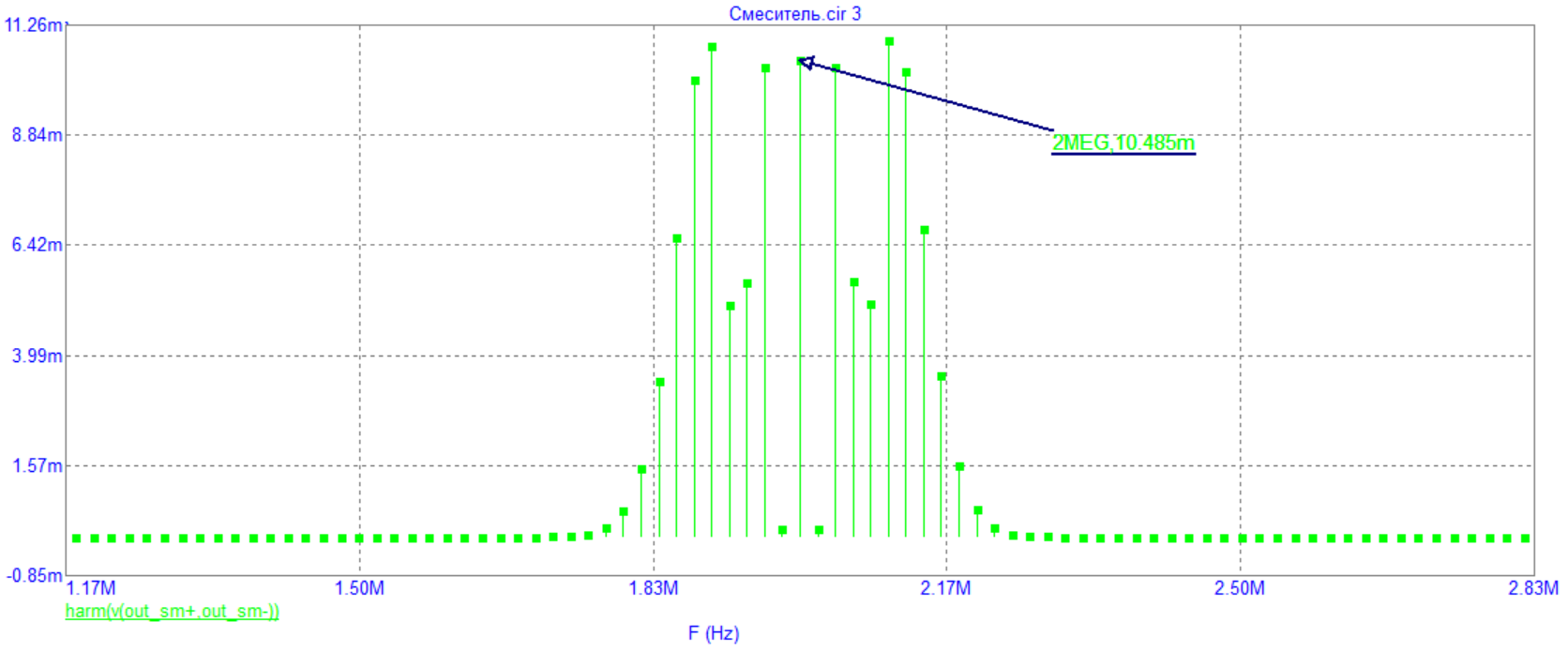


Рисунок 22 – Спектр сигнала на выходе смесителя

Практический коэффициент передачи смесителя *KU* = 30

# 7. Усилитель промежуточной частоты

Схема усилителя промежуточной частоты (УПЧ) на биполярном транзисторе 2N2102 представлена на рисунке 23.

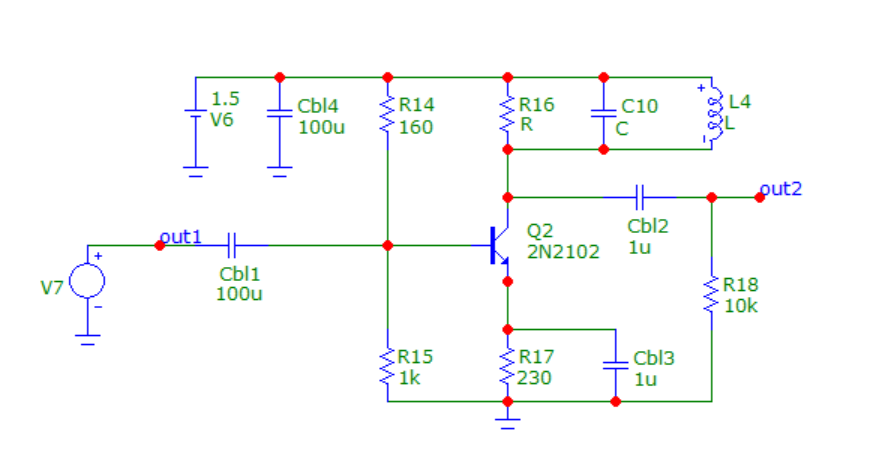


Рисунок 23 – Схема УПЧ

Данная схема отличается от схемы УРЧ только номиналами *С*10 и *L*

Возьмем добротность контура равную *Q* = 50, тогда рассчитаем параметры контура:





Экспериментальный коэффициент усиления *K*0 = 22,4

АЧХ УПЧ представлена на рисунке 24.

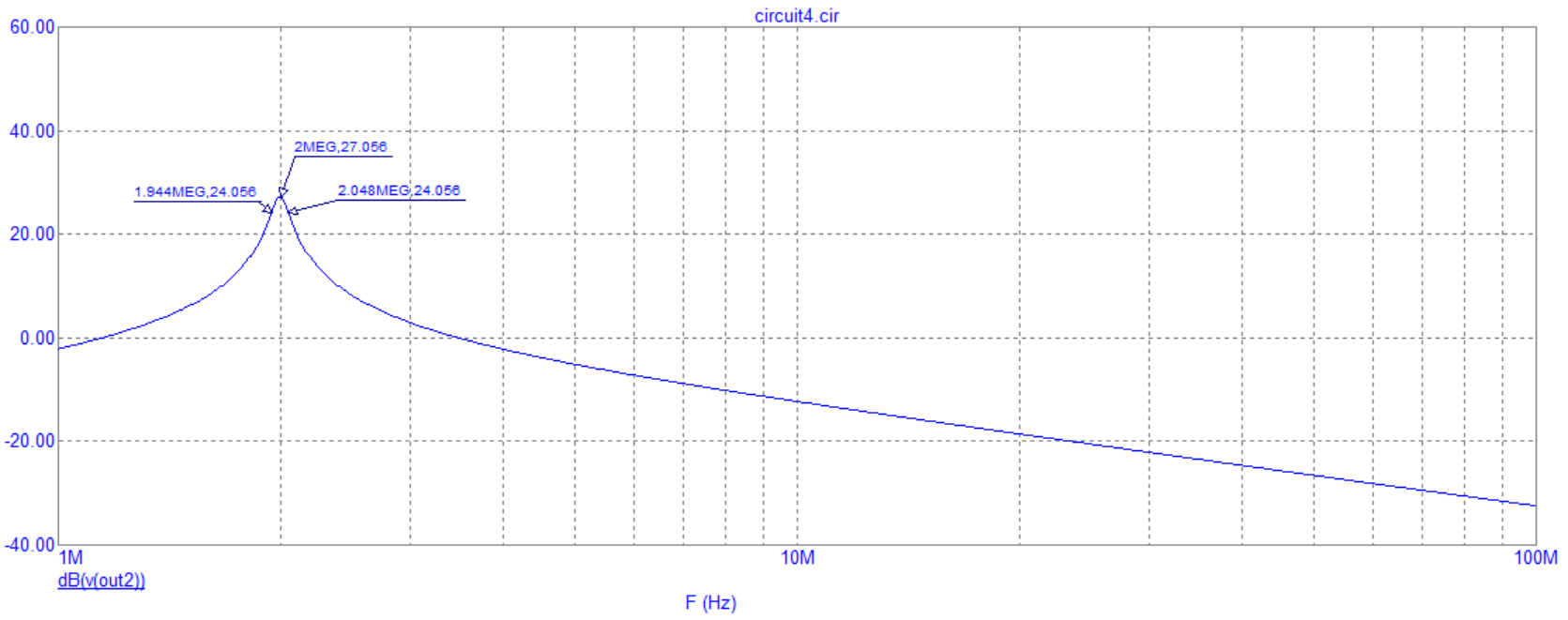


Рисунок 24 – АЧХ УПЧ

Из рисунка 24 следует, что полоса усиления усилителя: ∆*f* = 502 кГц.

Форма и спектр сигналов на входе и выходе усилителя (без входной цепи) представлены на рисунках 25 и 26.

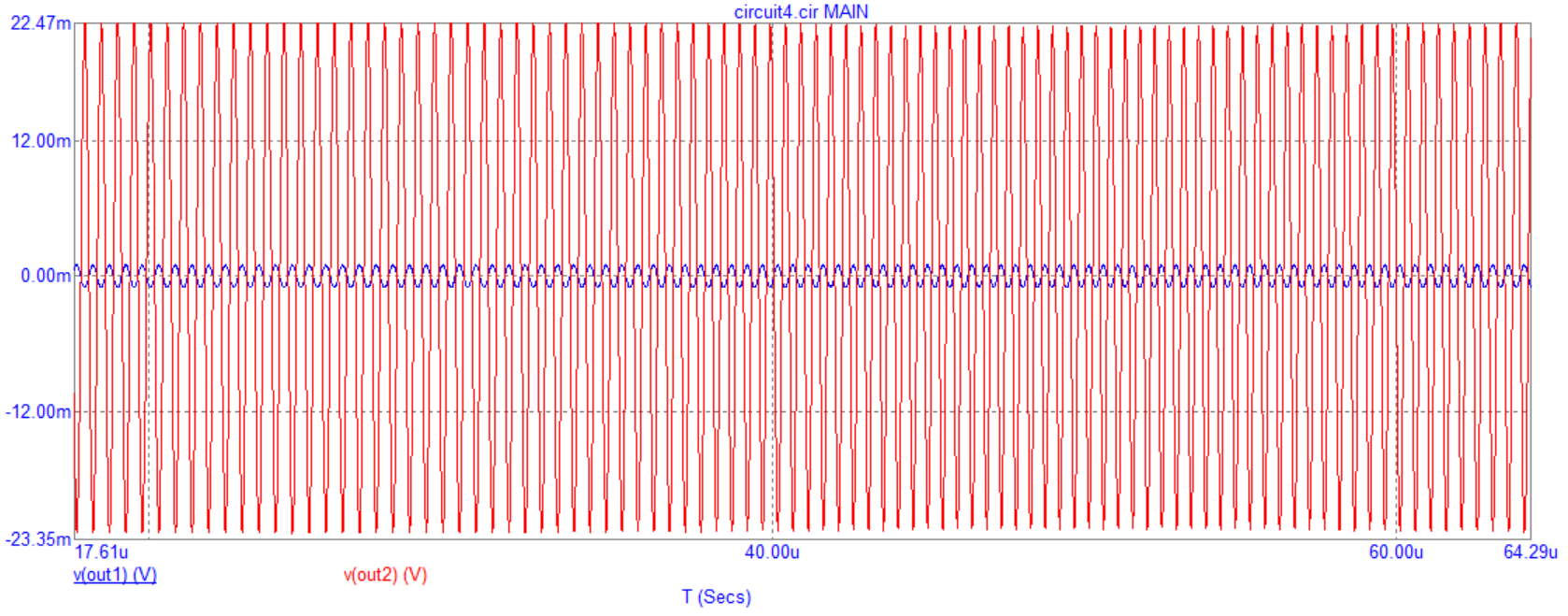


Рисунок 25 – Сигналы на входе (зеленый) и на выходе (розовый) УПЧ

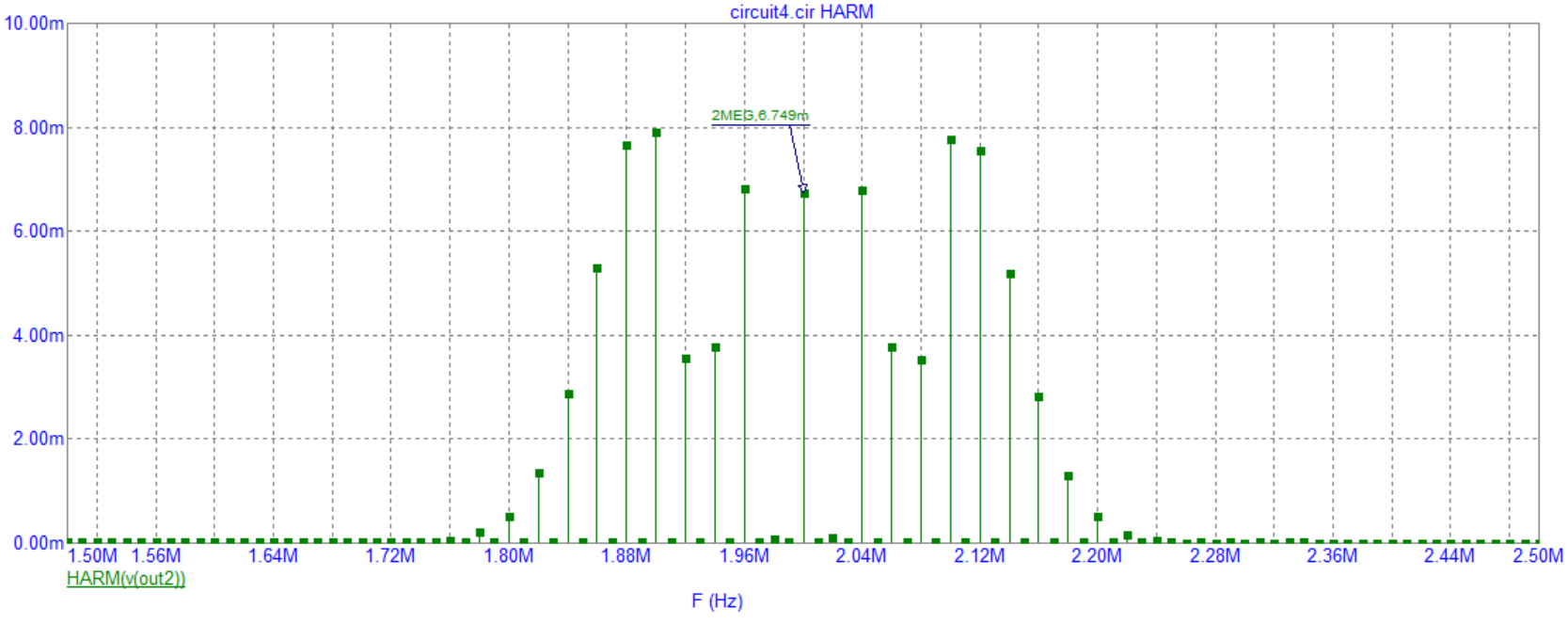


Рисунок 26 – Спектр сигналов на входе (красный) и на выходе (зеленый) УПЧ

8. Дробный детектор

Схема дробного детектора представлена на рисунке 27.

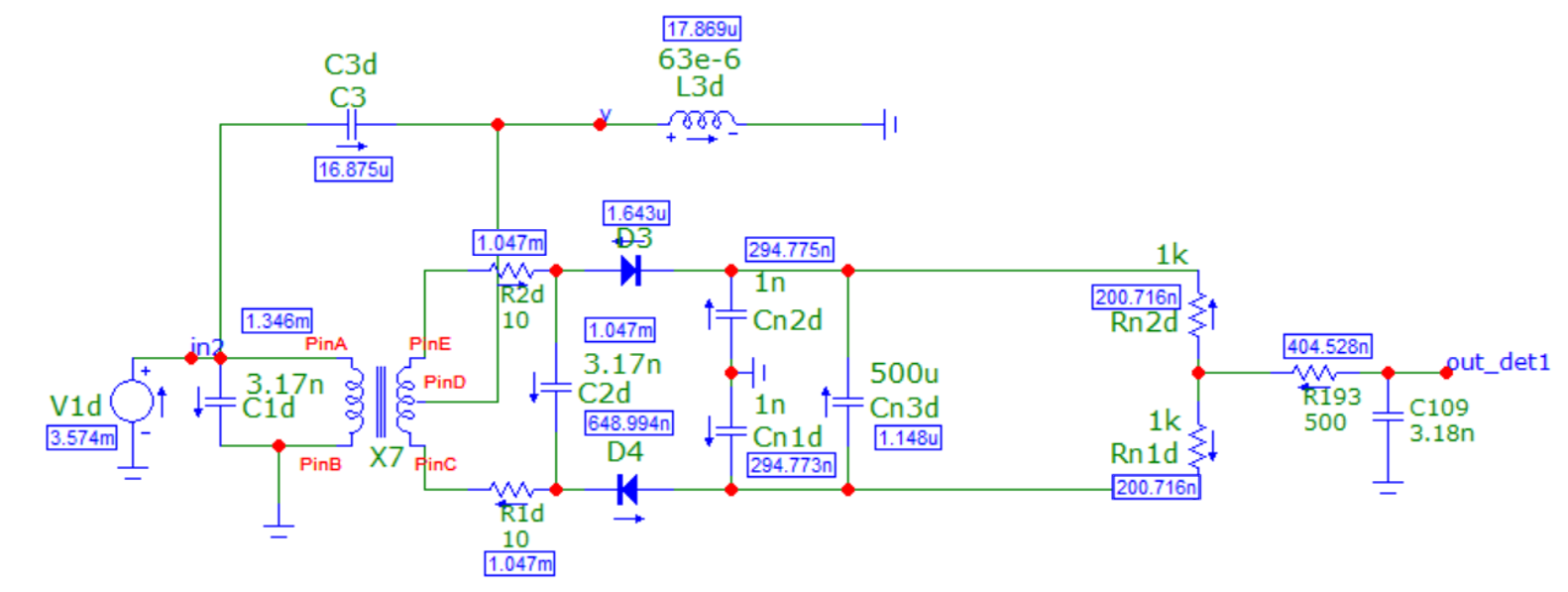


Рисунок 27 – Схема дробного детектора

Два резонансных контура в детекторе настроены на промежуточную частоту *F* = 2 МГц:

*L*1 = *L*2 = 2 мкГн

*С*1d = *С*2d =

Настройка контура связи осуществляется с учетом *С*3>>*C*1, *С*3>>*C*2, *L*3>>*L*1, *L*3>>*L*2.

*C*3d =1 мкФ

*L*3d =

В нагрузке *R*n1d = *R*n2d и *C*n1d = *C*n1d выбираются из соотношения для постоянной времени *RC*:

Кроме того, в нагрузку включен конденсатор *С*n3d большой емкости обеспечивающий с нагрузочными резисторами постоянную времени:

Такое включение нагрузки позволяет снизить чувствительность к изменению уровня входного сигнала и уменьшить паразитную амплитудную модуляцию на выходе.

Графики сигнала (в частотной и временной областях) на выходе дробного детектора представлены на рисунках 28 - 35.

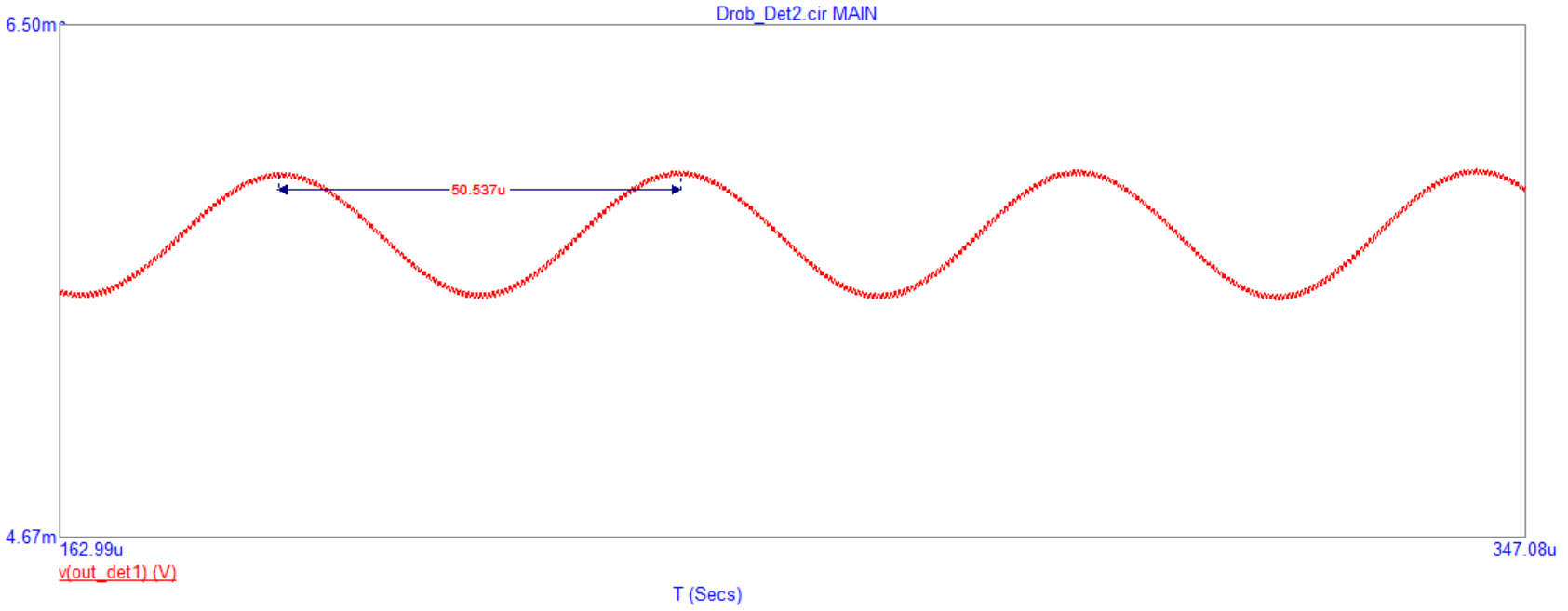


Рисунок 28 – Выходной сигнал на частоте 20 кГц

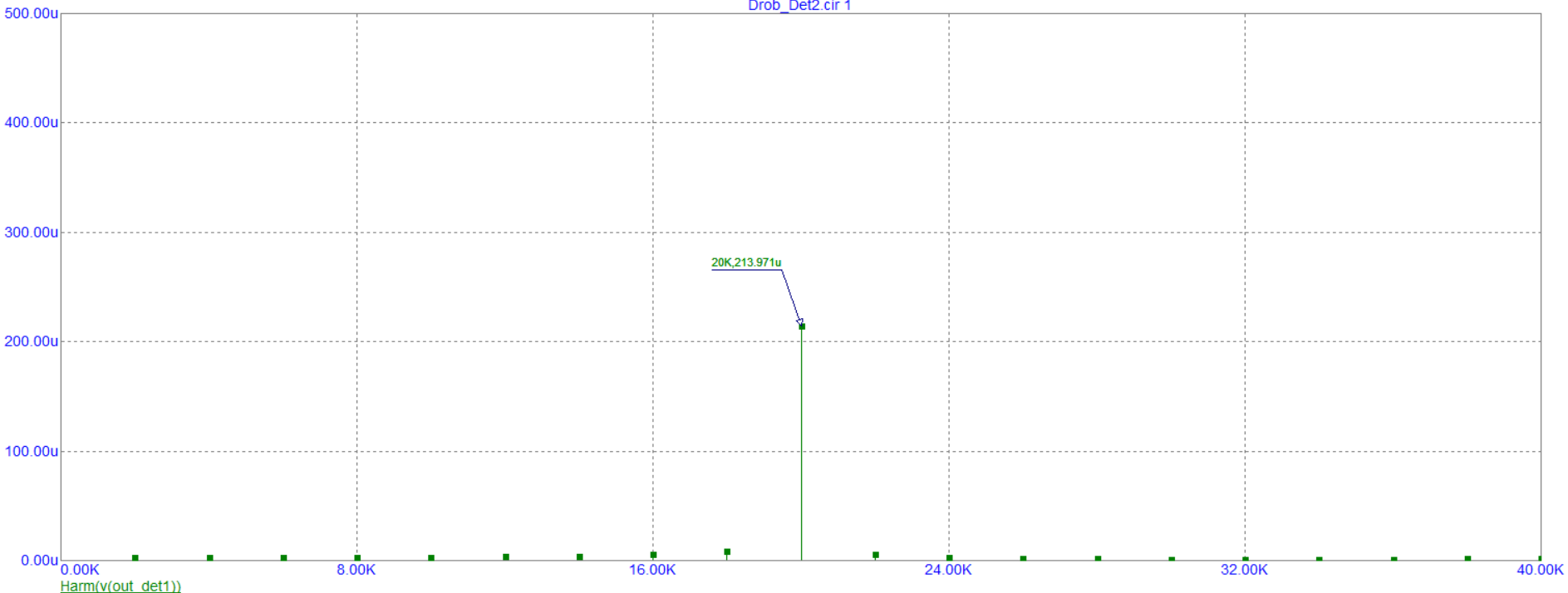


Рисунок 29 – Спектр на частоте 20 кГц

Проверка работы детектора на других частотах:

Выходной сигнал при отличии частоты на 20%:

*F*1 = 20 – 0.2·20 = 16 кГц;

*F*2 = 20 + 0.2·20 = 24 кГц.

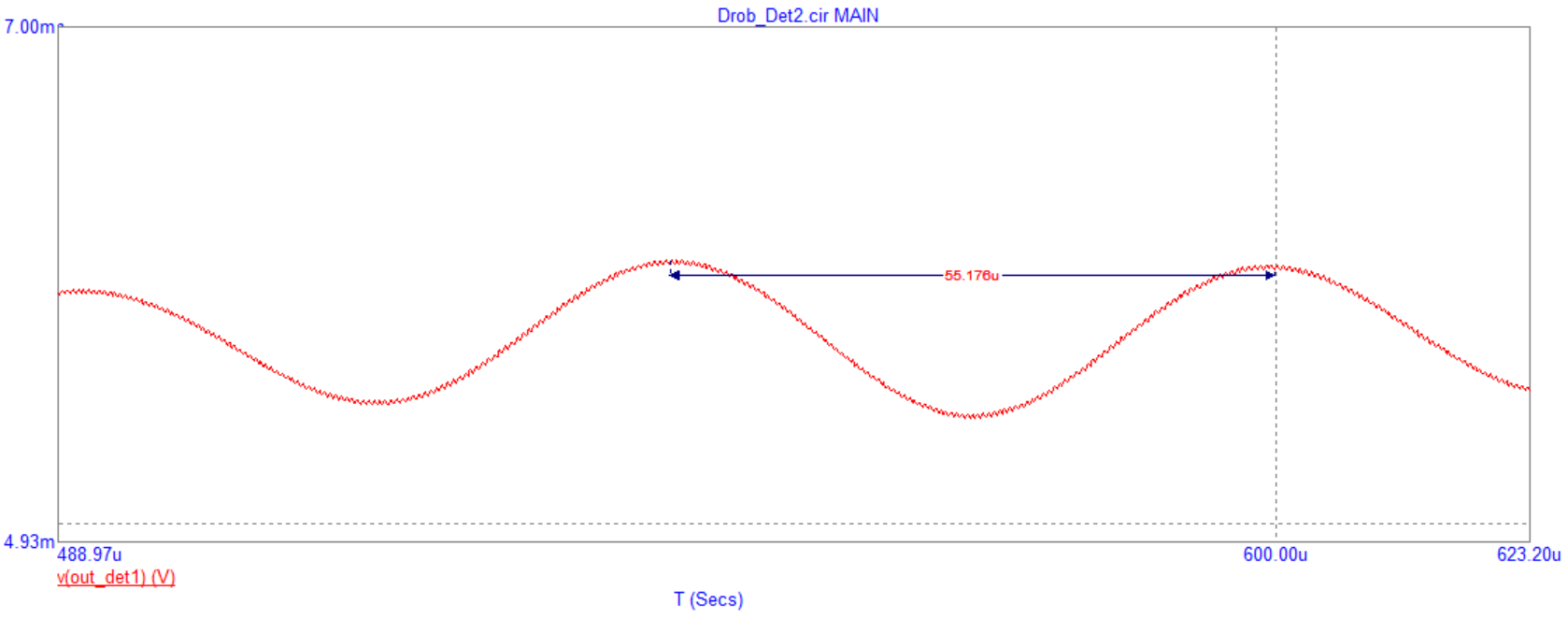


Рисунок 30 - Выходной сигнал на частоте 16 кГц

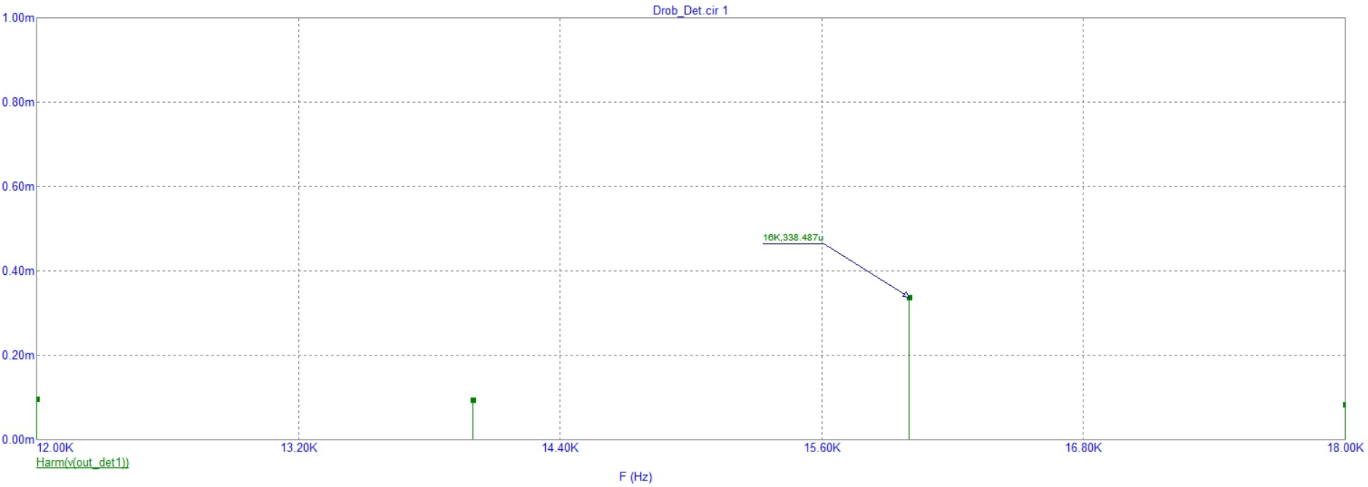


Рисунок 31 – Спектр выходного сигнала на частоте 16 кГц

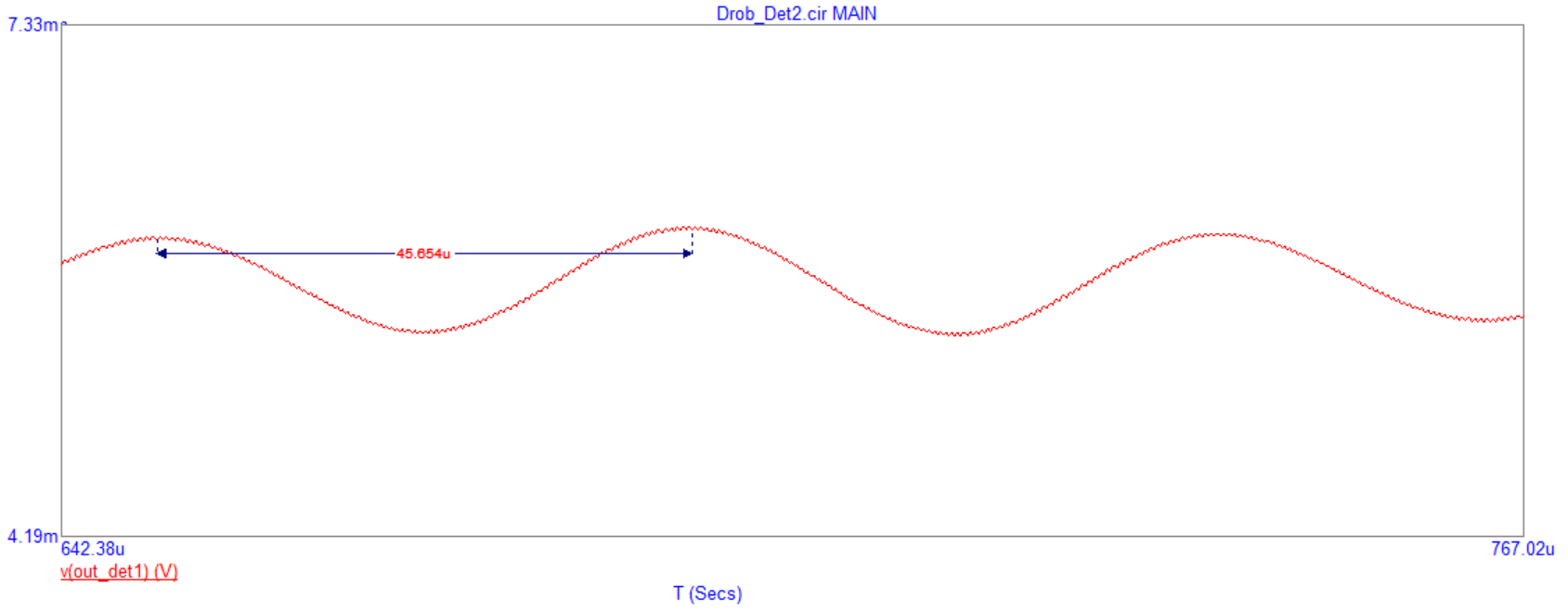


Рисунок 32 - Выходной сигнал на частоте 24 кГц

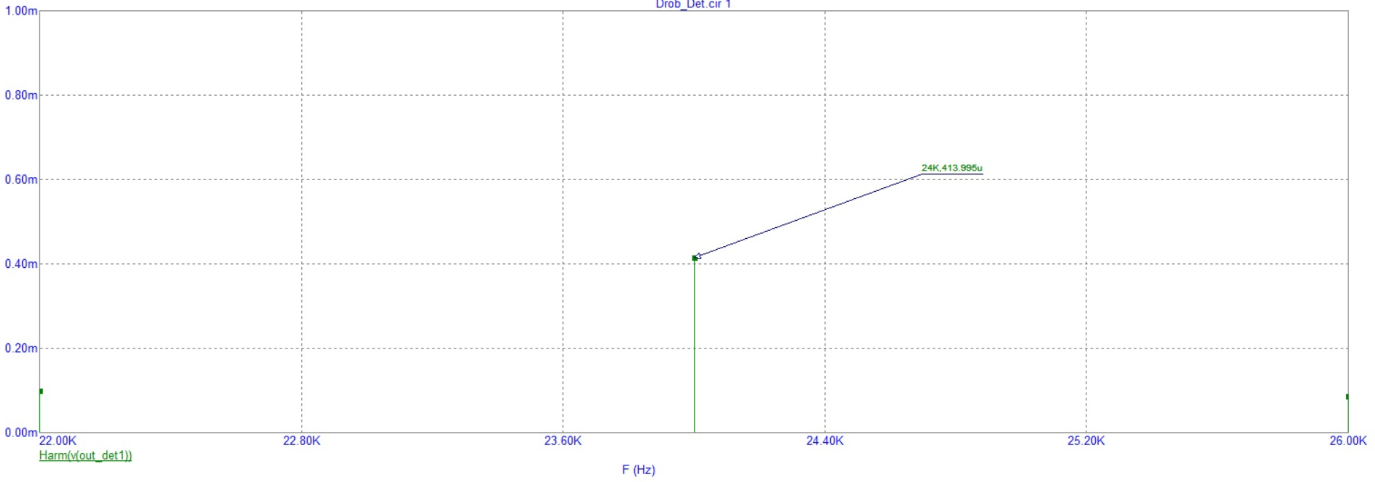


Рисунок 33 - Спектр выходного сигнала на частоте 24 кГц

# Заключение

В ходе выполнения курсовой работы по дисциплине «Основы построения устройств приема и обработки сигналов» была построена в среде Microcap схема, представленная на рисунке 36, состоящая из входной цепи, усилителя радиочастоты, смесителя, гетеродина, усилителя промежуточной частоты и дробного частотного детектора. При подаче вход схемы частотно-модулированного сигнала, на выходе получается гармоника, частота которой соответствует модулирующей частоте.

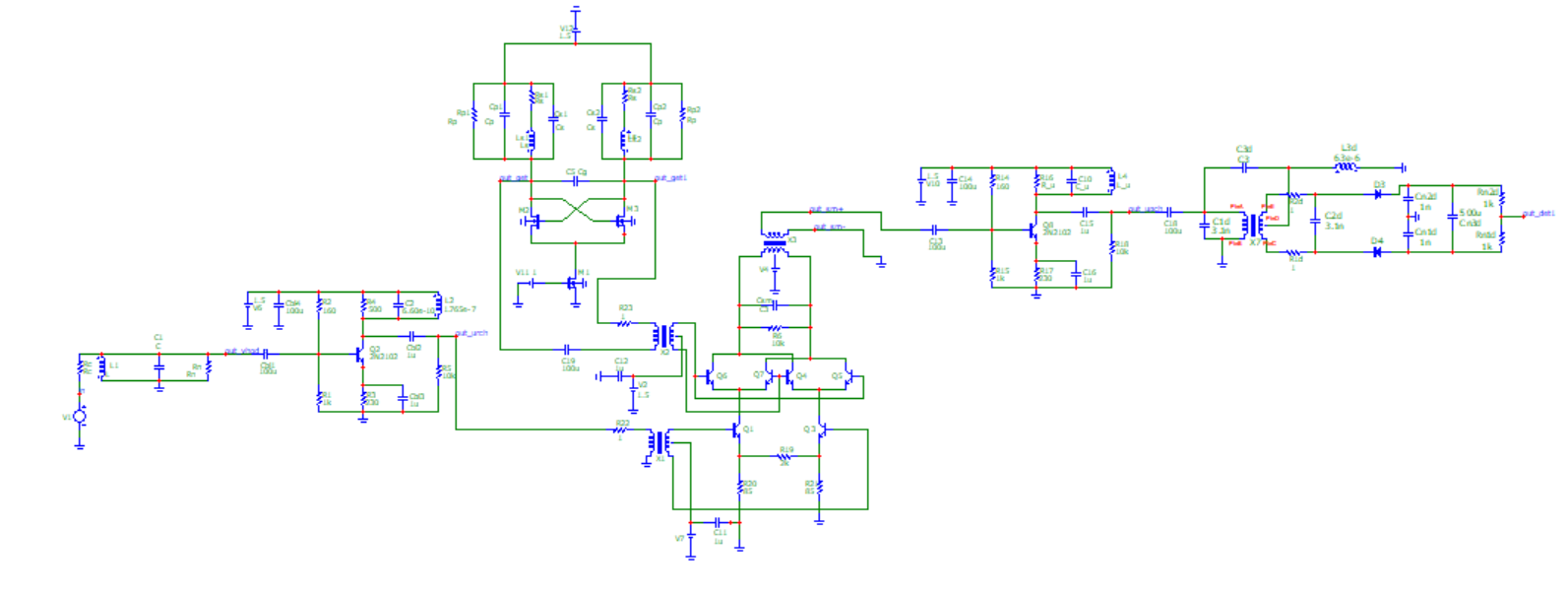
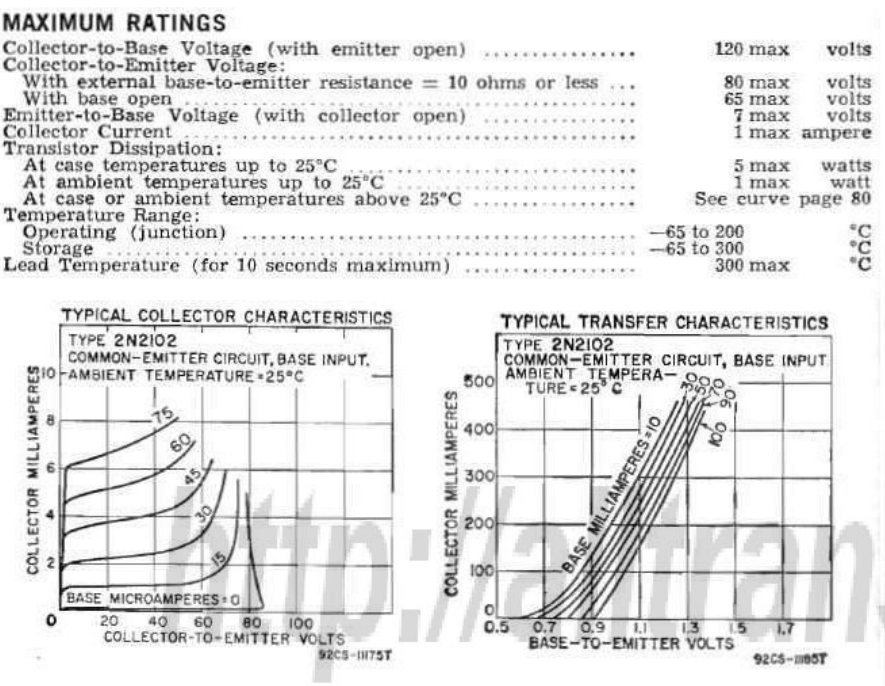


Рисунок 36 – Схема приемного тракта

Приложение

Основные характеристики транзистора 2N2102:



Данные, на основе которых построен график, показанный на рисунке 11, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Данные для построения динамической характеристики УРЧ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *U*вх, мВ | *U*вых = *К*· *U*вх, дБ | *U*вых\_реал, мВ |
| 0,01 | -6,60708 | -6,69586 |
| 0,05 | 0,382624 | 0,216027 |
| 0,1 | 3,392924 | 3,406424 |
| 0,5 | 10,38262 | 10,46846 |
| 1 | 13,39292 | 13,46294 |
| 5 | 20,38262 | 20,49144 |
| 10 | 23,39292 | 23,48005 |
| 15 | 25,15384 | 25,1539 |
| 20 | 26,40322 | 26,33346 |
| 25 | 27,37232 | 27,17047 |
| 30 | 28,16414 | 27,83503 |
| 35 | 28,8336 | 28,34634 |
| 40 | 29,41352 | 28,75148 |
| 45 | 29,92505 | 29,25108 |
| 50 | 30,38262 | 29,39763 |
| 55 | 30,79655 | 29,58691 |
| 60 | 31,17444 | 29,69358 |
| 65 | 31,52206 | 29,82355 |