

# Лабораторная работа №5 по курсу «Радиотехнические устройства и системы»

## Моделирование АМ детектора и балансного смесителя в программе Qucs

Кузнецов В.В., ассистент кафедры ЭИУ1-КФ

13 ноября 2013 г.

### 1 Цель работы

Цель данного лабораторной работы — изучение функционирования детектора амплитудно - модулированных (АМ) колебаний (амплитудного детектора) и балансного смесителя с помощью моделирования в программе Qucs.

Данная программа основана на вновь разработанном ядре схемотехнического моделирования (разработка совместно с Берлинским институтом высокочастотной техники) и работает под управлением операционных систем (ОС) Linux и Windows. В данной программе возможно моделирование аналоговых и цифровых схем, моделирование на постоянном и переменном токе и моделирование переходного процесса. Недостатком программы является разделение аналогового и цифрового моделирования.

Родной операционной системой для Qucs является Linux, и при работе на этой системы следует ожидать наибольшей производительности. Настоятельно рекомендуется использовать для работы программы ОС Linux.

Версию Qucs для Linux можно установить в один клик, используя пакетный менеджер, а версию для Windows можно скачать бесплатно с сайта разработчика <http://qucs.sourceforge.net>.

### 2 Амплитудный детектор

#### 2.1 Амплитудная модуляция

Для передачи низкочастотных сигналов (например, звуковых) по радиоканалу применяются *модулированные сигналы*. Прямая передача низкочастотного сигнала по радиоканалу невозможна, так длина волны для низких частот слишком большая и аппаратура для передачи такой низкочастотной радиоволны была бы слишком громоздкой. Чтобы передать низкочастотный сигнал по радиоканалу, необходимо его каким-то образом перенести на высокие частоты. Для этого служит модуляция. В модулированном сигнале амплитуда, частота или фаза синусоидального высокочастотного сигнала (сигнала) изменяется в такт с низкочастотным. Низкочастотный сигнал как бы накладывается на несущую.

Примером модулированного сигнала является амплитудно-модулированный (АМ) сигнал, который представляет собой произведение огибающей  $U(t)$  (низкочастотный сигнал)

на высокочастотное заполнение  $\cos(\omega_0 t + \phi_0)$ :

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

При амплитудной модуляции связь между огибающей и модулирующим полезным сигналом  $s(t)$  выражается уравнением:

$$U(t) = U_m [1 + Ms(t)] \quad (2)$$

Где  $U_m$  — амплитуда несущей в отсутствии модулирующего сигнала,  $M$  — коэффициент амплитудной модуляции.

Чем выше  $M$ , тем больше глубина модуляции. Пример АМ сигнала при  $M = 0,5$  и  $M = 0,2$  показан на рис. 1.

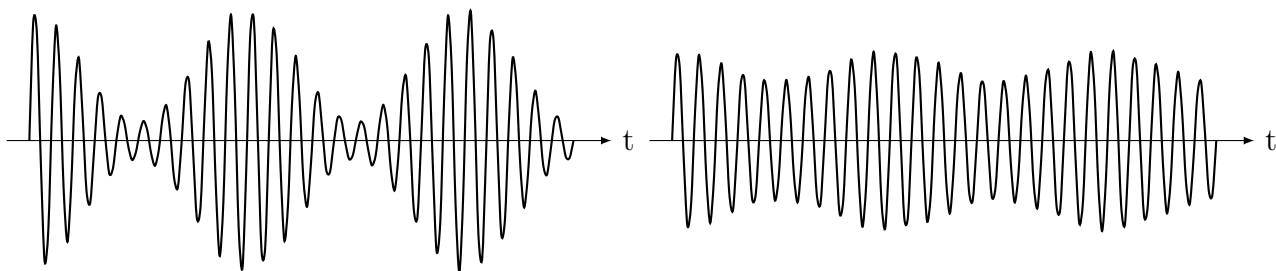


Рис. 1. Амплитудно-модулированный сигнал при  $M = 0.5$  (слева) и  $M = 0.2$  (справа).

Амплитудная модуляция в настоящее время широко применяется в радиовещании в диапазонах ДВ, СВ и КВ и в телевидении, ранее она широко применялась в телефонной радиосвязи. Амплитудная модуляция имеет низкую помехозащищённость и поэтому её применение в настоящее время сокращается.

## 2.2 Принцип работы амплитудного детектора

Амплитудный детектор нужен для того, чтобы из АМ колебания восстановить сигнал звуковой частоты. АМ детектор является обязательным узлом радиовещательных приёмников прямого усиления и супергетеродинов.

Чтобы восстановить звуковую частоту из АМ сигнала, его нужно пропустить через нелинейный элемент. Простейшим нелинейным элементом является полупроводниковый диод. Схема простейшего АМ детектора показана на рис.2.

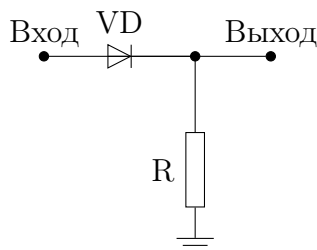


Рис. 2. Простейший АМ детектор

Диод проводит ток только в одном направлении, поэтому отрицательная полуволна АМ колебания, после того как оно пропущено через диод отсекается. В результирующем колебании содержится составляющая со звуковой частотой и составляющая с частотой

ВЧ заполнения. Чтобы отсечь ВЧ составляющую и получить на выходе звуковую частоту, на выходе АМ - детектора включают фильтр низких частот (ФНЧ). Простейшим ФНЧ является блокировочный конденсатор, включаемый параллельно резистору  $R$  на схеме на рис.2. Реактивное сопротивление конденсатора на высокой частоте мало и он как бы замыкает ВЧ токи на землю, а на выходе схемы остаётся напряжение звуковой частоты.

Падение напряжения на р-п переходе диода ( $U_{пр}$ ) в АМ-детекторе должно быть как можно меньше. Поэтому в диодном детекторе используются германиевые диоды ( $U_{пр} = 0.1 \div 0.3\text{В}$ ). У кремниевых диодов  $U_{пр} \approx 0.6\text{В}$ . Чем меньше прямое падение напряжения на диоде, тем меньше искажения звукового сигнала, снимаемого с выхода детектора.

## 2.3 Моделирование амплитудного детектора

Произведём моделирование АМ детектора в программе Qucs. Сначала собираем схему (рис.3). Диод применяем кремниевый типа 1N4148, берём его из библиотеки компонентов. Элементы  $R1$ ,  $R2$ ,  $C2$ ,  $C3$  образуют ФНЧ. Вход схемы — узел  $in$ , выход схемы — узел  $out$ .

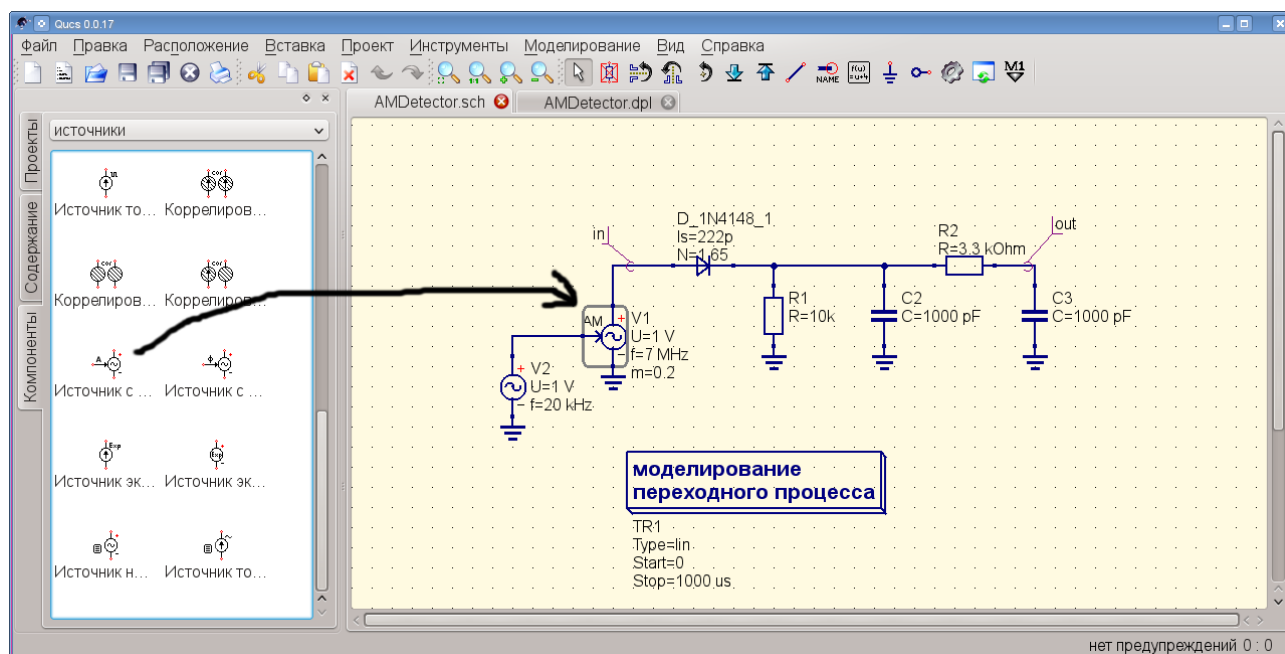


Рис. 3. Схема АМ детектора в программе Qucs

Схема содержит источник амплитудно-модулированных колебаний (выделено на рисунке стрелкой). Для этого источника нужно установить амплитуду, частоту и глубину модуляции. В ходе моделирования примем частоту равной 7 МГц, амплитуду равной 1 В и глубину модуляции равной 0.2. АМ источник нужно связать с источником модулирующей частоты. Это обычный источник синусоидального напряжения с частотой 20 кГц и амплитудой 1 В.

Для схемы проведём моделирование переходного процесса (Transient Analysis). Параметры моделирования: начало моделирования 0мкс, конец моделирования 1мс=1000мкс, число точек для расчёта 10001. И построим осциллограммы переходного процесса на входе ( $in.Vt$ ) и на выходе ( $out.Vt$ ) схемы.

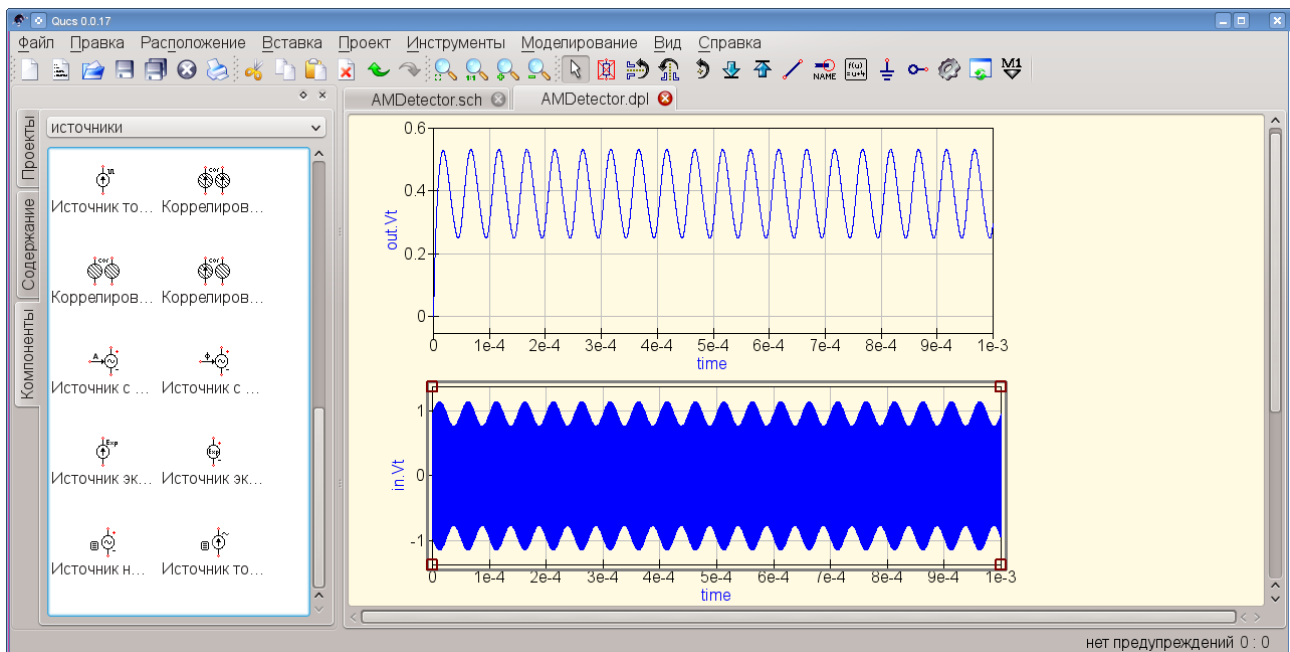


Рис. 4. Результаты работы АМ детектора

### 3 Балансный смеситель

#### 3.1 Принцип работы

*Смеситель* — радиотехническое устройство для преобразование частоты сигналов. Смеситель имеет два входа и один выход. Если на один из его входов подать синусоидальное напряжение с частотой сигнала  $f_c$ , а на другой вход подать синусоидальное напряжение от местного генератора, называемого *гетеродином*, с частотой  $f_r$ , то на выходе смесителя мы получим сумму нескольких синусоидальных колебаний с частотами равными  $m f_c \pm n f_r$ , где  $m$  и  $n$  — целые числа больше или равные нулю (рис.5).

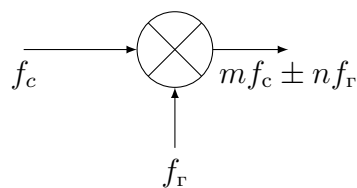


Рис. 5. Схематическое изображение смесителя

Также на выход смесителя в неизменном виде проходят частота сигнала, частота гетеродина и их гармоники (кратные частоты). Наибольшую амплитуду из сигналов с частотой, отличной от частоты сигнала и гетеродина, имеют сигналы суммарной частоты  $f = f_c + f_r$  и разностной частоты  $f = f_c - f_r$ . Таким образом, смеситель преобразует частоту сигнала в разностную или суммарную частоту.

Внутри смесителя всегда содержится нелинейный элемент: диод, транзистор и т.п. Применяется включение нескольких диодов и транзисторов. Простейшим смесителем является полупроводниковый диод. При этом схема смесителя не отличается от схемы амплитудного детектора (рис.2), но на вход схемы подаются два синусоидальных напряжения: от источника сигнала и от гетеродина.

Смеситель является основным узлом всех современных приёмников радиосигналов. Смеситель позволяет переносить частоту радиосигнала из одного диапазона на другой.

*Балансный смеситель* отличается тем, что на его выходе отсутствуют сигналы с частотой входного сигнала и гетеродина, а имеются только суммарные и разностные частоты. Подавление частоты сигнала и гетеродина достигается специальной схмотехникой балансного смесителя. Одна из простейших схем — диодный кольцевой смеситель на четырёх диодах будет рассмотрена в следующем разделе.

*Пассивный смеситель* не содержит источников питания. Пассивный смеситель не может усиливать сигнал. Сигнал после прохождения через такой смеситель всегда ослабляется. К пассивным смесителям относятся диодные смесители и смесители на полевых транзисторах в режиме управляемого сопротивления. Но пассивный смеситель имеет наименьший уровень шумов.

*Активный смеситель* подключается к источникам питания и может усиливать сигнал. Активные смесители содержат полевые или биполярные транзисторы. Уровень собственных шумов активного смесителя ниже, чем у пассивного, так как усиливающие элементы вносят дополнительные шумы.

### 3.2 Моделирование диодного кольцевого смесителя

Диодный кольцевой смеситель относится к пассивным смесителям и не усиливает входной сигнал. В диодном кольцевом смесителе используются специальные кремниевые высокочастотные диоды или диоды Шоттки.

Сначала собираем схему в Qucs (см. рис.6). Схема содержит источники синусоидального напряжения с выходным сопротивлением 50 Ом (стандартный импеданс для ВЧ техники). Они находятся на панели компонентов на закладке «Источники питания». Расположение этого компонента показано стрелкой на рис.6. На один вход смесителя (узел, помеченный **heterodin**) подключен источник частотой  $f_r = 15\text{ МГц}$  и с уровнем сигнала 0 дБмВт. Этот источник имитирует напряжение гетеродина. На другой вход (узел, помеченный **signal**) подключен источник с частотой  $f_c = 7\text{ МГц}$  и уровнем сигнала -40 дБмВт. Этот источник имитирует напряжение сигнала. Выходной сигнал снимается со средней точки трансформатора Tr2. Выход помечен как **out**.

Особенностью диодного кольцевого смесителя является, то что он содержит в своём составе симметрирующие трансформаторы. Чтобы промоделировать трансформаторы, служит компонент «Три индуктивно связанные катушки». Установка параметров данного компонента показана на рис.7. Индуктивность обмоток трансформатора равна 100 мкГн, а коэффициент связи между обмотками равен 0.99. Следует отметить, что полностью промоделировать трансформаторы сложно, и такая модель является приближённой.

Теперь разберём, какие операции выполняет компонент Уравнение1 на рис.6. Чтобы узнать какие частоты присутствуют в выходном сигнале, нужно вычислить спектр. Для вычисления спектра в Qucs служит функция **Time2Freq()**, которая выполняет быстрое преобразование Фурье. Параметром функции является напряжение переходного процесса, полученное в результате моделирования (Transient Analysis). Функция возвращает массив данных в частотной области, который можно затем использовать для построения графиков.

Чтобы узнать спектральный состав напряжения и выразить его в децибелах на выходе нужно поместить на схеме уравнение:

$$S=\text{dB}(\text{Time2Freq}(\text{out.Vt}))$$

В результате в переменной **S** мы получим спектр, который можно вывести на график. Чтобы преобразование Фурье выполнялось точнее, нужно использовать больше точек расчёта переходного процесса.

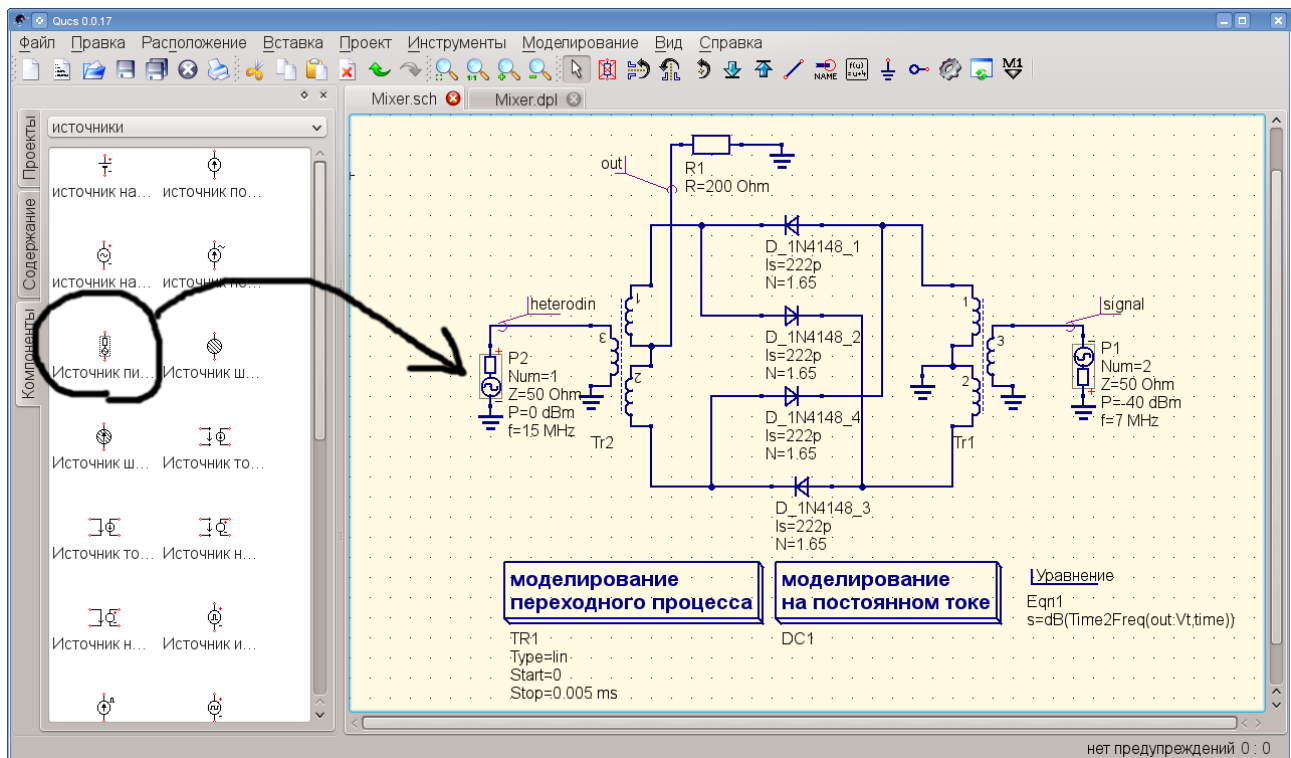


Рис. 6. Кольцевой диодный смеситель в программе Qucs

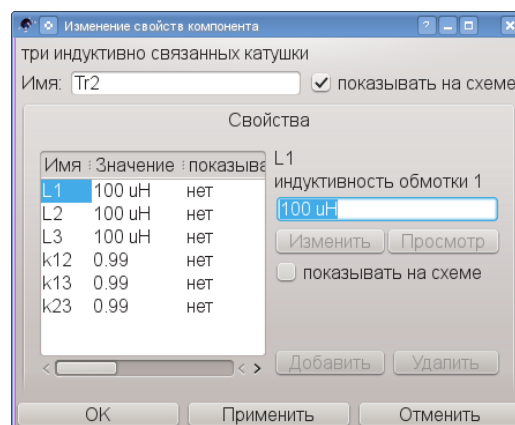


Рис. 7. Установка параметров симметричных трансформаторов

На выходе нашего диодного смесителя должны присутствовать как минимум два сигнала : сигнал с разностной частотой и сигнал с суммарной частотой:

$$f_1 = f_c + f_r = 15 + 7 = 22 \text{ МГц} \quad (3)$$

$$f_2 = f_c - f_r = 15 - 7 = 8 \text{ МГц} \quad (4)$$

То есть на спектральной диаграмме должно быть два пика на частотах 8 МГц и 22 МГц. Ещё будет присутствовать остаток напряжения гетеродина и сигнала.

Собрав схему запускаем моделирование и переходим на страницу просмотра. Размещаем там декартовскую диаграмму, а на ней — рассчитанный спектр (рис.8).

Из полученных результатов видим, что в спектре напряжения на выходе смесителя присутствуют два пика: суммарной (22 МГц) и разностной частоты (8 МГц) и неподав-

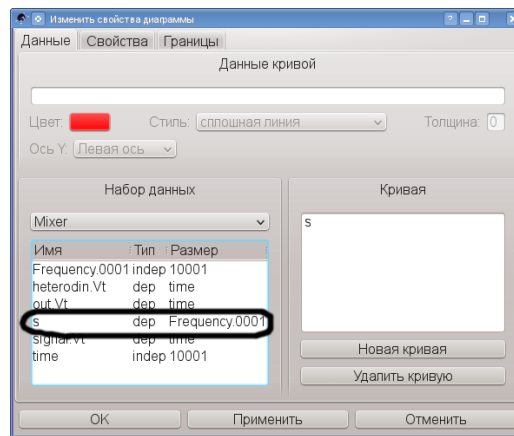


Рис. 8. Установка параметров диаграммы

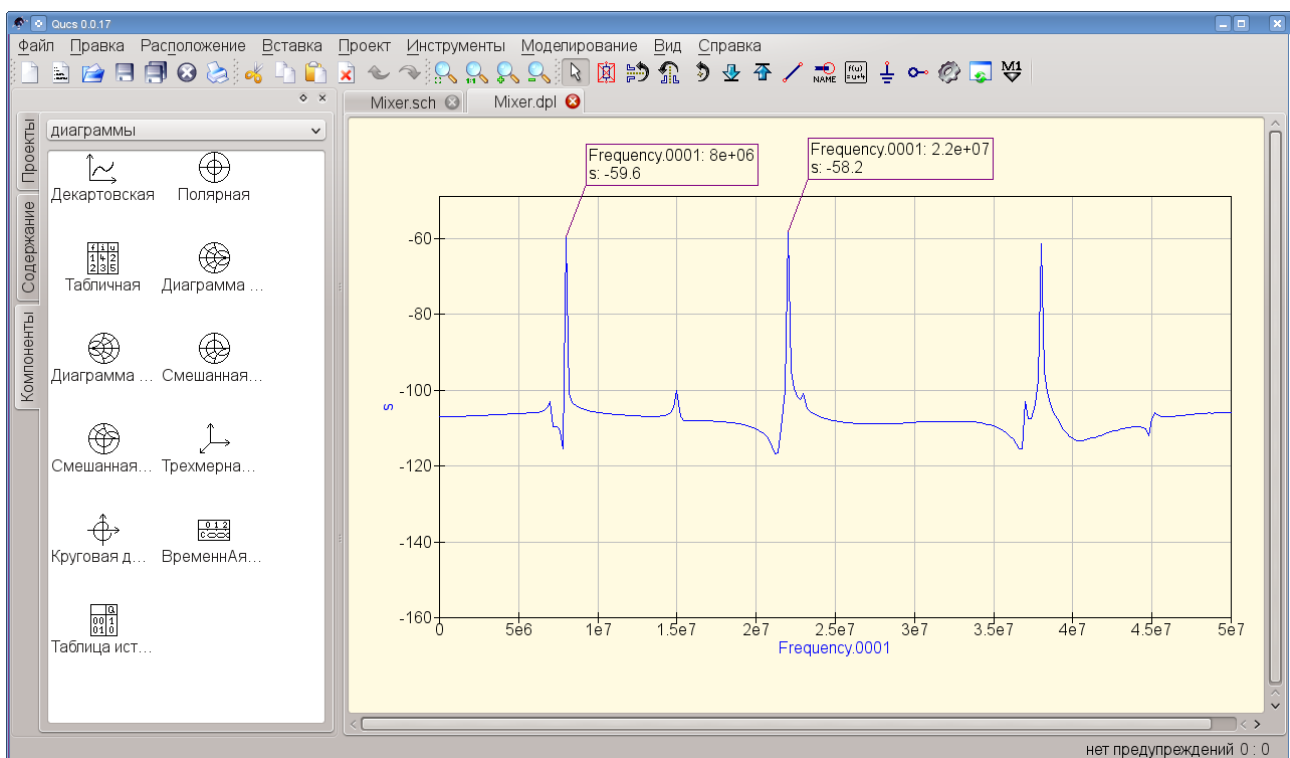


Рис. 9. Спектр напряжения на выходе диодного кольцевого смесителя

ленный остаток напряжения гетеродина (15 МГц). Подавленный остаток частоты гетеродина имеет уровень  $-100$  дБмВт. Напряжение сигнала на выход смесителя не проходит.

### 3.3 Разбалансировка диодного кольцевого балансного смесителя

В промоделированной схеме параметры всех диодов одинаковы, а высокочастотные трансформаторы идеально симметричны. При этом достигается полное подавление на выходе смесителя частоты сигнала и гетеродина. Смеситель идеально отбалансирован.

В действительности все полупроводниковые компоненты имеют разброс параметров, и диоды нельзя считать одинаковыми. Индуктивности обмоток трансформаторов также различаются. Эти факторы вносят в смеситель *разбалансировку*. Разбалансировка проявляется в том, что на выход смесителя начинает проходить неподдавленная частота сигнала

и гетеродина. Если разбалансировку не устранить, то остаток напряжения гетеродина может превысить полезный сигнал (суммарной и разностной частоты) и подавить его.

Для подавления разбалансировки применяют подбор диодов по параметрам или вместо четырёх отдельных диодов диодную матрицу, выполненную на одном кристалле. В схему вводят подстроечные элементы для балансировки.

**Задание:** внести в схему разбалансировку, увеличив индуктивность одной из вторичных обмоток трансформатора Tr2 на 5-10%. Исследовать как меняется спектр напряжения на выходе, какие частоты появляются в спектре. Результат отразить в отчёте.

## 4 Заключение

В результате выполнения лабораторной работы произведен анализ работы амплитудного детектора и балансного смесителя в программе Qucs. Произведён анализ условий балансировки диодного кольцевого смесителя.