

Ознакомление с радиочастотными схемами при помощи Multisim 10.

Лабораторный практикум.

Введение

Это учебное пособие содержит комплекс лабораторных работ по радиотехнике для выполнения в среде Multisim. Практикум по лабораторным работам является обязательным компонентом для усвоения теоретической информации, полученной на лекциях. Это учебное пособие не призвано заменить традиционный практикум, а создано для дополнения практического обучения. Использование компьютерных технологий позволяет внедрять возможности, недоступные для некоторых лабораторных классов: неограниченное количество деталей, составных приборов – все это стирает традиционные препятствия при проектировании электрических схем. В отличие от ограничений, связанных с проектированием и реализацией электрических схем, появляющихся в лаборатории, работа со схемами в среде Multisim значительно проще. Эта простота позволяет расширять границы научных исследований. Лабораторные работы построены таким образом, чтобы максимально совместить теоретический и практический материал.

Среда Multisim позволяет проводить любые по сложности эксперименты. Среда Multisim позволяет легко заменять компоненты цепи, изменять их значения, прогнозировать и отображать полученные результаты. Спроектированные схемы могут быть быстро и легко протестированы и изменены для определения их производительности, а в дальнейшем легко реализованы физически. Таким образом, выявление неисправностей на физическом уровне – минимальны. За долгое время использования среды Multisim её функционал был расширен, новые возможности добавлены. Некоторые из них: пробник (**Instrument probe**), позволяет получить текущее значение величины, без помещения измерительного прибора в схему, множественный выбор (**multiple choice**) и логический выбор (**true/false choice**) вопроса/ответа – поддерживает отправку через почту, а также мастер проектирования фильтров, 555 таймеров, биполярный плоскостной транзистор (**BJT**), операционный усилитель (**Opamp circuitry**) с изменяемыми параметрами.

Функциональные возможности моделирования, ранее представленные инструментами (**Tektronix**) и (**Agilent**), в новой версии пакета Multisim расширились. *Аудио файл доступен из элемента описания SpecIntro.ms10.*

Пакет National Instruments LabVIEW и пакет Multisim создают целостную систему виртуальных приборов с возможностью их физической реализации. Взаимовязь виртуальных и реальных приборов создает многофункциональную платформу для продвижения нового принципа проектирования, реализации поиска неисправностей электрических схем. В среде, где ошибки и неточности минимальны, поиск неисправностей очень прост. Изучение курса, построенного на основе физических и виртуальных приборов, проходит эффективнее. Инструментарий LabVIEW использован в лабораторной работе №10 LabViewHarmonicComposition.ms10.

Все работы написаны в модульной форме, ясно и точно освещают материалы курса. Каждый раздел начинается с введения. В пункте «**Данные для лабораторной работы**» представлены все необходимые таблицы и поля для записи результатов работы, а также поля для эскизов графиков. Учебное пособие содержит расширенные теоретические материалы для дальнейшего обучения этому курсу: фильтры, генераторы, принципы амплитудной и частотной модуляции.

Выполнение работ предполагает использование специальных виртуальных приборов, таких как (**Bode Plotter**) графопостроителя диаграммы Боде, (**Spectrum Analyzer**) анализатора спектра и (**Network Analyzer**) анализатора соединений. Все виртуальные приборы аналогичны – реальным, используемым в радиотехнике. Для выполнения каждой лабораторной работы, за исключением работы с мастером, требуется один файл. Кроме того, к каждой лабораторной работе, по необходимости, приведены:

- рабочие формулы,
- ожидаемые результаты выполнения.
- дополнительное задание, повышенной сложности,
- ответы.

Об авторе

Трейси Шилдс (**Tracy Shields**) начала свою карьеру в области электроники, как технический работник службы поддержки. Она получила диплом инженера – электрика (**Electrical Engineering degree**) и также диплом инженера – электронщика (**Electronics Computer Technician diploma**) и диплом инженера телекоммуникационных технологий (**Electronics Communication Technology diploma**). За время 10-летнего преподавания на кафедре Электроники в колледже Сенесы (**Seneca College**), Торонто (**Toronto**), штат Онтарио (**Ontario**), Канада (**Canada**) она привлекла многих людей в эту область. На сегодняшний день она занимается проектированием схем, для компаний электронной промышленности, а также консультациями по различным вопросам в области коммуникационных технологий.

Благодарность

Спасибо Дениссу, моему мужу, за оказанную помощь, поддержку и терпение, во время написания этой книги

Моим детям, Мари и Саре, посвящается.

Содержание.

Лабораторная работа 1. Введение в спектральный анализ

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 1
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 2. Спектральный анализ гармоник сигнала.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 2
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 2а. Изучение гармоник сигнала с помощью LabVIEW.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Выполнение работы

Фильтры

Лабораторная работа 3. Пассивная режекторная схема с нагрузкой.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 3
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 4. Пассивный полосовой фильтр.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 4
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 5. Проектирование фильтров нижних и высоких частот.

- Цель работы
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат

Генераторы

Лабораторная работа 6. Фазосдвигающий генератор.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 6
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 7. Индуктивный трехточечный генератор.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 8. Трёхточечный генератор с емкостной связью.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 9. Емкостный трехточечный генератор с последовательным питанием (генератор Клаппа).

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 9
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 10. Амплитудная модуляция.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование

- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 10
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 11. Показатель модуляции и анализ усиления.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 11
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 12. Амплитудная демодуляция.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 12
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 13. Анализ боковых полос.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 13
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 14. Введение в частотную модуляцию и распознавание сигнала.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Выполнение работы
- Данные для лабораторной работы 14
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 15. Частотная модуляция.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 15

- Дополнительное задание

Лабораторная работа 16. Анализ рабочей точки усилителя по постоянному и переменному току.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 16
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 17. Параметры рассеивания в двухпортовом соединении.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Данные для лабораторной работы 17
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 18. Коэффициент передачи в прямом направлении в двухпортовом соединении.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Данные для лабораторной работы 18
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 19. Контурные устойчивости.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Данные для лабораторной работы 19
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 20. Согласование сопротивлений.

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование
- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Данные для лабораторной работы 20
- Дополнительное задание

Лабораторная работа 21. Волнорегуляторы

- Цель работы
- Элементная база
- Оборудование

- Рабочие формулы
- Выполнение работы
- Предполагаемый результат
- Данные для лабораторной работы 21
- Дополнительное задание

Ответы к лабораторным работам и дополнительным заданиям.

Лабораторная работа 1
Лабораторная работа 2
Лабораторная работа 3
Лабораторная работа 4
Лабораторная работа 5
Лабораторная работа 6
Лабораторная работа 7
Лабораторная работа 8
Лабораторная работа 9
Лабораторная работа 10
Лабораторная работа 11
Лабораторная работа 12
Лабораторная работа 13
Лабораторная работа 14
Лабораторная работа 15
Лабораторная работа 16
Лабораторная работа 17
Лабораторная работа 18
Лабораторная работа 19
Лабораторная работа 20
Лабораторная работа 21

Лабораторная работа 1. Введение в спектральный анализ

Цель работы

Цель данного моделирования состоит в демонстрации характеристик и принципа действия анализатора спектра в радиочастотных системах. Анализатор спектра является одним из самых необходимым инструментов исследования систем коммуникации. К примеру, осциллограф позволяет исследовать сигналы переменного тока, а также их взаимное влияние друг на друга. Осциллограф измеряет разность фаз сигналов, а также период, амплитуду и позволяет оценить форму сигнала. Однако, изучение зависимости амплитуды от времени не дает полного представления о компонентах сигнала. Анализатор спектра исследует сигнал в частотной области, разделяя его на отдельные компоненты на различных частотах. Теоретически, если идеальный синусоидальный сигнал подать на вход анализатора спектра, то можно увидеть одну вертикальную линию. На основной частоте синусоидального сигнала вертикальная линия. Однако, сигналы от реальных источников искажены и график их спектра содержит дополнительные линии... формируют идеальный сигнал получить невозможно, поэтому на графике спектра сигнала наблюдаются искажения, в виде незначительных спектральных выбросов. Эти линии накладываются на основную частоту и уменьшают амплитуду основной спектральной компоненты. Анализатор спектра в Multisim позволяет проводить спектральный анализ с помощью встроенного анализатора спектра.

Используемые приборы

- Источник напряжения переменного тока (**AC Voltage Source**)
- Осциллограф (**Oscilloscope**)
- Спектральный анализатор (**Spectrum Analyzer**)

Рабочие формулы

Мощность в ваттах

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R_l} \quad \text{уравнение (1-1)}$$

Порядок выполнения работы

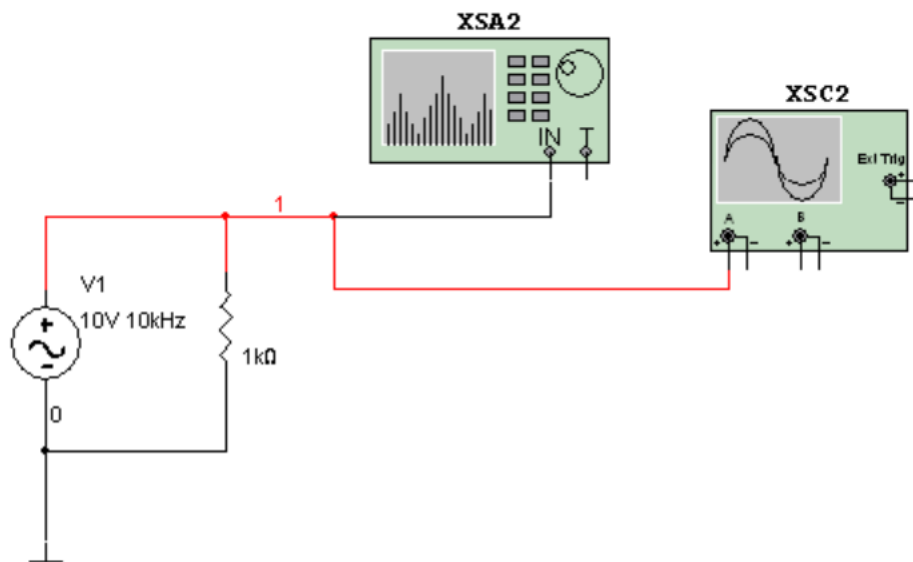


Рис. 1-2

1. Соберите схему, изображенную на рис. 1-2.
2. Двойным щелчком мыши войдите в меню источника напряжения переменного тока. Выберите закладку **Value** (значение) и установите амплитуду (Voltage Pk) = 10В, смещение (Voltage Offset) = 0В и частоту (Frequency) = 1 кГц. Нажмите OK.
3. Двойным щелчком мыши войдите в меню **Oscilloscope** (осциллограф). Установите масштаб временной оси 1 мс/дел и масштаб амплитуд (**Amplitude**) 5 В/Дел. Запустите процесс моделирования и наблюдайте сигнал частотой 1 кГц на графике зависимости амплитуды от времени. Остановите моделирование.
4. Двойным щелчком мыши войдите в меню анализатора спектра). Выберите **Span** (интервал времени) в вкладке **Span Control** (перевод) и **Lin** (перевод) в вкладке **Amplitude**. В вкладке **Frequency** (частота), введите **Start** (начальную) и **End** (конечную) частоты. Так как исследуемая частота равна 1 кГц, введите **Start** = 0 Гц и **End** = 2 кГц, эти параметры частоты зададут начало и конец окна наблюдения таким образом, что значение частоты 1 кГц окажется в центре окна. Нажмите **Enter** для ввода значений. Такой способ установки параметров анализатора спектра называется **Frequency Control method** (метод частоты) (???).
5. Запустите процесс моделирования. Поместите курсор в центр пика отображаемого спектра. В процессе перемещения маркера наблюдайте изменение значения частоты в левой нижней части окна. Запишите значения частоты и напряжения в таблицу 1-1. Удостоверьтесь, что значения амплитуды и частоты соответствуют параметрам сигнала, установленным в источнике сигнала (?) переменного напряжения (**AC Voltage Source**).
6. Остановите моделирование. Двойным щелчком мыши войдите в источника напряжения переменного тока и выберите **Voltage Amplitude** = 10В и **Frequency** = 10 кГц.
7. Так как текущая исследуемая частота равна 10 кГц, установите параметр (?) **Center frequency** (центральную частоту) в 10 кГц. Установите **Span** (диапазон измерений) 10 кГц, таким образом получим общий диапазон окна в 10 кГц. Нажмите **Enter**. Обратите внимание, что значения начальной и конечной частоты вычисляются автоматически. Этот способ называется **Span method** (метод диапазонов). Оба продемонстрированных метода могут быть использованы только раздельно (не одновременно).
8. Запустите процесс моделирования и переместите маркер сначала в левую часть окна, затем в правую, обращая внимание, что частоты начала и конца соответствуют **Start** и **End** параметрам. Для получения значения параметра **Span** (диапазон), вычитите начальное значение частоты из конечного. Запишите результаты в таблицу **Table 1-2**. Проверьте

параметры диапазона. Используя рабочую формулу 1-1, вычислите мощность и запишите значения линейного напряжения и мощности, как в п. 5. Заполните таблицу 1-1.

Предполагаемый результат

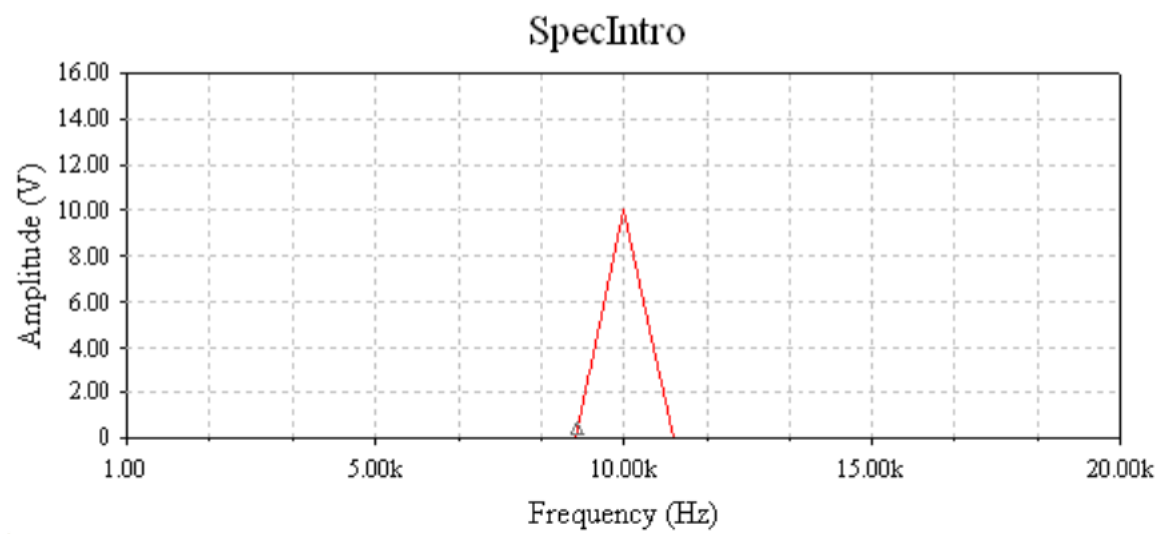


Рис. 2-2 Амплитудный спектр сигнала частотой 1кГц.

Данные для лабораторной работы

Измеренная частота	Измеренное напряжение, В	Мощность, мВт	Ожидаемая частота, Гц	Ожидаемое линейное напряжение, В
1 кГц				
10 кГц				

Таблица 1-1

Таблица 1-2

Частота, Гц	Начальное значение частоты, Гц	Конечное значение частоты, Гц	Измеренный диапазон, Гц	Ожидаемый диапазон, Гц
10 кГц				

Дополнительное задание

1. Установите значения амплитуды источника напряжения переменного тока 1 В и частоты 10 кГц.
2. Установите *Span* (диапазон) = 10 кГц и *Center Frequency* (основную частоту) = 8 кГц. Нажмите **Enter**.
3. Удостоверьтесь, что начальное и конечные значения частоты соответствуют выбранным значениям диапазона и основной частоты.

Лабораторная работа 2. Спектральное представление сигналов.

Цель работы.

Цель моделирования, выполняемого в этой работе, состоит в демонстрации характеристик гармоник сигнала с помощью анализатора спектра и ваттметра. Теоретически синусоидальные сигналы представляются одной спектральной линией на графике зависимости амплитуды от частоты. При искажении исходного сигнала появляются дополнительные гармоники, отличные от основной. Математически, складывая мощность каждой гармоники с мощностью основной гармоники, можно восстановить весь исходный сигнал.

Другие формы сигнала, такие как, прямоугольная, треугольная и пилообразная содержат в себе бесконечное количество гармоник, сложение которых, дает форму сигнала, его амплитуду и частоту. Сколько бы ни было параметров у сигнала, спектральный анализ является основным средством для изучения отдельных его компонентов. В лабораторной работе 9 применяется спектральный анализ амплитудно-модулированного сигнала.

Сигнал пилообразной формы может быть представлен суперпозицией бесконечного количества синусоидальных сигналов, частоты которых кратны основной частоте. Амплитуда и мощность этих синусоид уменьшаются с увеличением их частоты. Ряд Фурье пилообразного сигнала выглядит следующим образом:

$$E_n = \frac{2A}{\pi} \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t - \frac{1}{4} \sin 4\omega t + \dots \right)$$

При вычислении среднеквадратического значения напряжения гармоник будем пользоваться формулой:

$$E_n = \frac{2 \text{ Amplitude}}{n\pi \sqrt{3}}$$

Основная частота:

$$f_0 = \frac{1}{\text{period } \tau}$$

Хотя f_0 могла бы описывать несущую частоту сигнала прямоугольной формы без учета сложения нечетных гармоник, в данном случае это просто синусоида (???). Частота второй гармоники равна $3f_0$, третьей - $5f_0$ и т.д.. По мере добавления каждой гармоники, форма сигнала становится более похожей на прямоугольную. Идеальный сигнал прямоугольной формы включает в себя бесконечное количество нечетных гармоник.

Например, если несущая частота прямоугольного сигнала 1 кГц, тогда $3f_0 = 3$ кГц, $5f_0 = 5$ кГц, $7f_0 = 7$ кГц. В таком случае ряд Фурье выглядит как:

$$E_n = \frac{4A}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \dots \right)$$

В данном случае напряжение, будем вычислять по формуле:

$$E_n = \frac{4 \text{ Amplitude}}{n\pi \sqrt{2}}$$

Так как амплитуда гармоник высоких порядков во много раз меньше амплитуды несущей частоты, то вычисление гармоник, как правило, происходит до 5-го порядка.

Используемые компоненты

Резистор: 1 кОм

Оборудование.

«Генератор функций» (Function Generator)

Осциллограф (Oscilloscope)

Ваттметр (Wattmeter)

Анализатор спектра (Spectrum Analyzer)

Рабочие формулы.

Мощность в ваттах

$$P = V_{rms}^2 / R_L \quad (2-1)$$

Напряжение гармоник прямоугольного сигнала n-го порядка

$$E_n = \frac{4 \text{ Amplitude}}{n\pi\sqrt{2}} \quad (2-2)$$

$$rms = \text{amplitude} \quad (2-3)$$

Напряжение гармоник пилообразного сигнала n-го порядка

$$E_n = \frac{2 \text{ Amplitude}}{n\pi\sqrt{3}} \quad (2-4)$$

$$rms = \frac{\text{amplitude}}{\sqrt{3}} \quad (2-5)$$

Порядок выполнения работы.

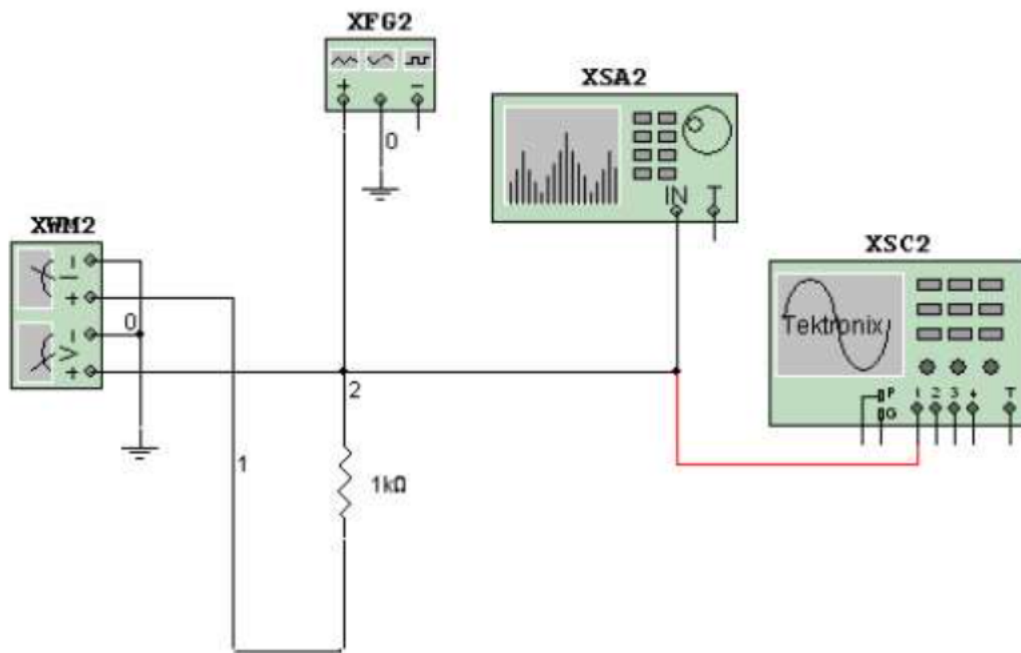


Рис. 2-1

1. Соберите схему, изображенную на рисунке 2-1. Подсоедините «генератор функций», осциллограф, ваттметр и анализатор спектра. При подключении ваттметра помните, что клеммы, обозначенные V, подключается параллельно с нагрузкой, а клеммы, обозначенные I, – последовательно с нагрузкой.
2. Дважды щелкните на осциллографе, для настройки его параметров. Установите масштаб Time Base (Временная ось) равным $50 \mu\text{s}/\text{Div}$, установите значение Channel 1 (Канал 1) равным $10 \text{ V}/\text{Div}$. Выберите режим автоматического запуска (Auto Triggering) и режим пропуска постоянного составляющей сигнала (DC coupling).
3. Дважды щелкните на «генераторе функций», для настройки его параметров. Выберите Frequency (Частота) = 10 кГц , Duty Cycle (Производительность) = 50%, Amplitude (Амплитуда) = 10 V , Offset = 0, Выберите Square Wave (Прямоугольная форма).
4. Двойным щелчком на анализаторе спектра откройте его дисплей. Выделите Set Span. Установите Start (Начало) = 10k , End (Конец) = 100k и Amplitude (Амплитуда) = Lin. Нажмите Enter.
5. Начните моделирование.
6. Два раза щелкните на осциллографе и убедитесь, что значение амплитуды равно 10V .
7. Дважды щелкните на анализаторе спектра. Сдвиньте **вертикальный маркер в левую часть окна** и измерьте частоту и амплитуду несущего сигнала с частотой 10 кГц . Эти значения будут отображаться в левом нижнем углу окна. Рассчитайте общую мощность в мВт, используя формулу (2-1).
8. Вычислите предполагаемое среднеквадратическое (rms) напряжение по формуле (2-3). Рассчитайте предполагаемую мощность. Проведите такие же измерения и вычисления для 3-ей и 5-ой гармоник. Увеличьте мощность 3-ей и 5-ой гармоник и вычислите суммарную мощность. Сверьте полученные результаты, нажав два раза на Wattmeter. Полученные результаты занесите в таблицу 2-1.
9. Два раза нажмите на Function Generator (Генератор функций) и выберите Triangle Waveform (Треугольная форма сигнала).
10. Понаблюдайте за экраном в окне Oscilloscope (Осциллограф).
11. Опишите спектр, включающий множество гармоник.
12. Ещё раз дважды нажмите на Function Generator и выставьте производительность равным 80%. Понаблюдайте за дисплеем Oscilloscope (Осциллограф) отмечая изменения формы сигнала.

13. Два раза щелкните на Spectrum Analyzer (Спектральный Анализатор) и наблюдайте за спектром пилообразной формы сигнала.
14. Заполните таблицу 2-2 для пилообразной формы сигнала.

Предполагаемый результат.

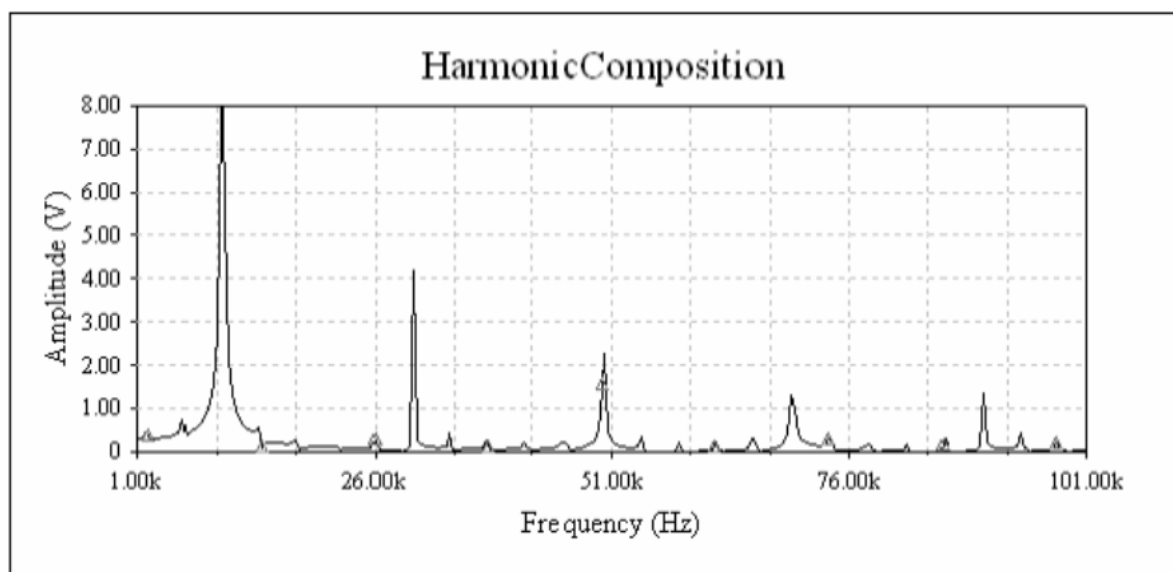


Рис. 2-2. Частотный спектр сигнала прямоугольной формы частотой 10 кГц.

Данные для лабораторной работы 2.

	Измеренная частота (Гц)	Измеренное среднеквадратическое напряжение (В)	Измеренная мощность (мВт)	Предполагаемое среднеквадратическое напряжение (В)	Предполагаемая мощность (мВт)
f_0					
f_3					
f_5					

Таблица 2-1. Результаты для сигнала прямоугольной формы.

Общая мощность в мВт (измеренная) _____

Показания общей мощности в мВт с Ваттметра _____

	Измеренная частота (Гц)	Измеренное среднеквадратическое напряжение (В)	Измеренная мощность (мВт)	Предполагаемое среднеквадратическое напряжение (В)	Предполагаемая мощность (мВт)
f_0					
f_2					
f_3					

Таблица 2-2. Результаты для сигнала пилообразной формы.

Общая мощность в мВт (измеренная) _____

Показания общей мощности в мВт с Ваттметра _____

Дополнительное задание.

Дважды щелкните на Function Generator. Выберите сигнал треугольной формы при частоте равной 1 кГц, амплитуде равной 5 В, а значение производительности поставьте 50%. Повторите пункты 2-5 для измерения характеристик.

Фильтры

Фильтры используются для пропускания одних частот и подавления всех остальных. Решение о том пропустить частотную составляющую или задержать принимается на основании значения амплитуды частотной характеристики фильтра. Для определения отклика фильтра рассматривается точка на кривой зависимости амплитуды от частоты, в которой спад амплитуды составляет 3 дБ от максимального значения тока или амплитуды. Эту точку называют точкой среза на 3 дБ или точкой половинной и мощностью и ее легко можно пронаблюдать при помощи построителя амплитудно-частотных характеристик. Частота среза представляет собой 0,707 от максимального выходного напряжения или тока ($20 \log 0.707 = 3$ дБ) и она эквивалентна половине максимальной мощности [$10 \log (0.707)^2 = 3$ дБ]. Диапазон частот или полоса пропускания полосового фильтра обычно ограничивается частотами между значениями выше и ниже точек спада на 3 дБ.

И наконец, частотная характеристика любого фильтра определяется тем, насколько быстро спадает кривая после прохождения центральной частоты. Это явление обычно выражается в децибелах на декаду (значение частоты изменяется в 10 раз) или в децибелах на октаву (удвоение частоты). Фильтры с одиночным полюсом характеризуются наклоном кривой в 20 дБ/дек или 6 дБ/окт. Фильтры второго порядка или двухполюсные фильтры характеризуются наклоном, близким к 40 дБ/дек или 12 дБ/окт. Число полюсов заложенных в основу заданного фильтра является определяющим фактором для числа содержащихся внутри него активных элементов. Более резкий спад амплитудно-частотных характеристик обеспечивается фильтрами более высоких порядков, подвергая некоторые частоты большему подавлению, что бывает нежелательно. Пассивные полосовые и режекторные фильтры – два типа фильтров, представляющих собой особый интерес в радиотехнических коммуникациях – исследуются в данном разделе. В лабораторной работе 12 (для АМ детектора огибающей) используется фильтр нижних частот.

Лабораторная работа 3: Пассивная режекторная схема с нагрузкой.

Цель работы

Цель моделирования состоит в демонстрации характеристик и принципа действия пассивной режекторной схемы. Используемая схема состоит из параллельной LC-цепочки и нагрузки, которая является необходимой на практике для того, чтобы обеспечить эффективную реализацию. Подобные подстроечные контуры часто используются в приемниках, поскольку они позволяют увеличивать сигналы точно определенных резонансных частот. Поэтому термин «подстроечные схемы» также часто называют «резонансными контурами». LC-режекторная схема отличается от ряда LC-схем параллельным соединением элементов. Она характеризуется резким возрастанием импеданса сети на резонансной или центральной частоте. В результате полный ток равен нулю на резонансной частоте - как только выравниваются токи в индуктивной и емкостной ветвях цепи.

На резонансной частоте фазовый сдвиг схемы равен нулю. На частотах выше резонансной полное сопротивление режекторной схемы убывает, поэтому ток через нее возрастает. Полный ток опережает приложенное напряжение на частотах, превосходящих резонансную и отстает от приложенного напряжения на частотах, меньших резонансной.

Для определения числа полюсов фильтра используется преобразование Лапласа. Преобразование Лапласа, полученное для передаточной функции схемы, изображенной на рис.3-1, описывается нижеследующим выражением. Это выражение строится на предположении, что индуктивность обладает активным сопротивлением r_L .

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{s^2 + \frac{1}{LC}}{s^2 + s\frac{1}{LC} + \frac{1}{LC}}$$

Частота среза определяется на уровне 0,707 от максимального полного выходного сопротивления. Также как и для других полосовых фильтров, ширина полосы заграждения режекторной LC-схемы определяется для частот, соответствующих спаду характеристики на 3 дБ. Для фильтров первого порядка в данной лабораторной работе спад должен быть около 40 дБ на декаду вблизи исследуемой частоты.

Компоненты схемы

Источник напряжения переменного тока (**AC Voltage Source**)

Резисторы: возможно 10 Ом (2) (**Resistors**)

Катушки индуктивности: возможно 200 мкТл (**Inductor**)

Конденсатор: возможно 220 пкФ (**Capacitor**)

Осциллограф (**Oscilloscope**)

Построитель амплитудно-частотных характеристик (**Bode Plotter**)

Рабочие формулы

Центральная частота:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{уравнение (3-1)}$$

Полное сопротивление:

$$X_L = 2\pi f_c L \quad \text{уравнение (3-2)}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_c} \quad \text{уравнение (3-3)}$$

Децибелы:

$$dB = 20 \log V \quad \text{уравнение (3-4)}$$

Выполнение работы

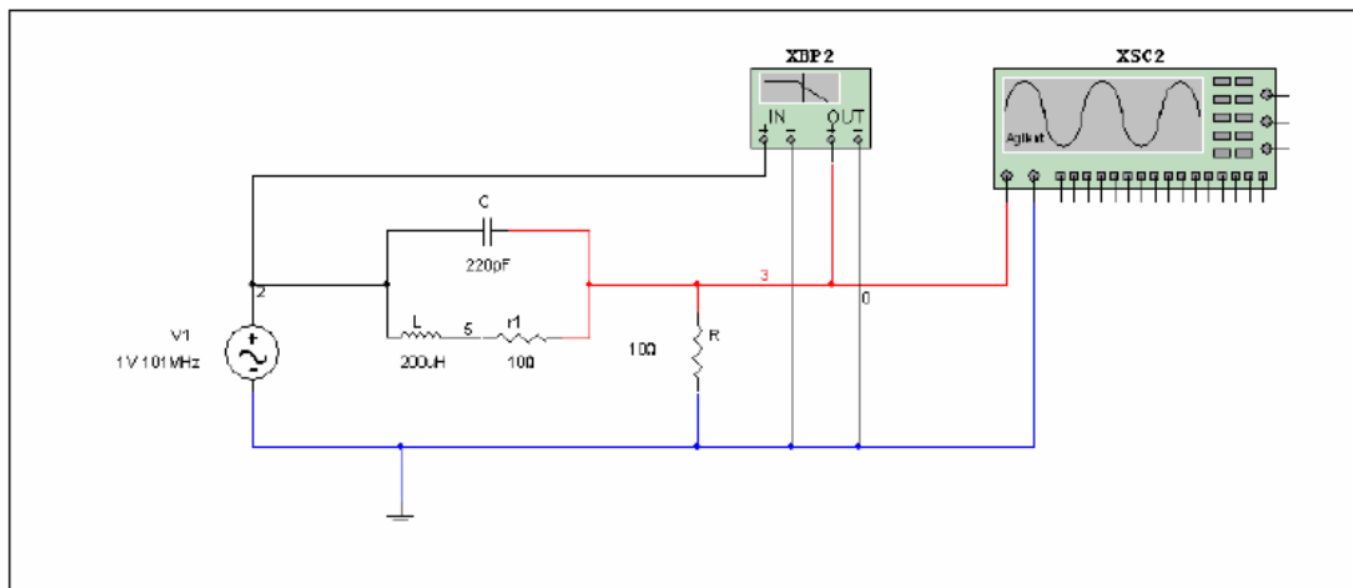


Рис.3-1

1. Соберите схему, изображенную на рисунке 3-1.
2. Рассчитайте резонансную частоту режекторной схемы и внесите полученное значение в таблицу 3-1.
3. Двойным щелчком мыши откройте источник напряжения переменного тока и введите рассчитанное значение резонансной частоты.
4. Двойным щелчком мыши откройте экран осциллографа. Установите масштаб по временной оси 10 нс/дел и по амплитудной оси **Channel 1** - 500 мВ/дел как обозначено вверху окна.
5. Запустите процесс и измерьте частоту колебаний на выходе. Значение соответствующей данной частоте амплитуды занесите в таблицу 3-1.
6. Согласно таблице 3-1 изменяйте частоту в источнике переменного напряжения последовательно на каждую из частот приведенных в списке, а амплитуду установите равной единице. Измерьте и запишите амплитуду соответствующую каждой из заданных частот. Рассчитайте значение в дБ согласно уравнению 3-4. Вам необходимо всякий раз запускать процесс заново для проведения измерений. Нарисуйте график зависимости амплитуды от частоты, основываясь на полученных Вами данных. Прокомментируйте результаты.
7. Двойным щелчком мыши откройте построитель амплитудно-частотных характеристик и выберите Magnitude, LOG, F = 0 дБ, 1 ГГц, I = -200 дБ, 1 мГц.
8. Перезапустите процесс моделирования и оцените полосу пропускания фильтра путем перетаскивания красного маркера к точкам при спаде на 3 дБ, обратите внимание на значения частоты и дБ в нижней правой секции построителя АЧ характеристик. Сравните нарисованный Вами график с полученными при помощи построителя АЧ характеристик результатами.

Предполагаемый результат

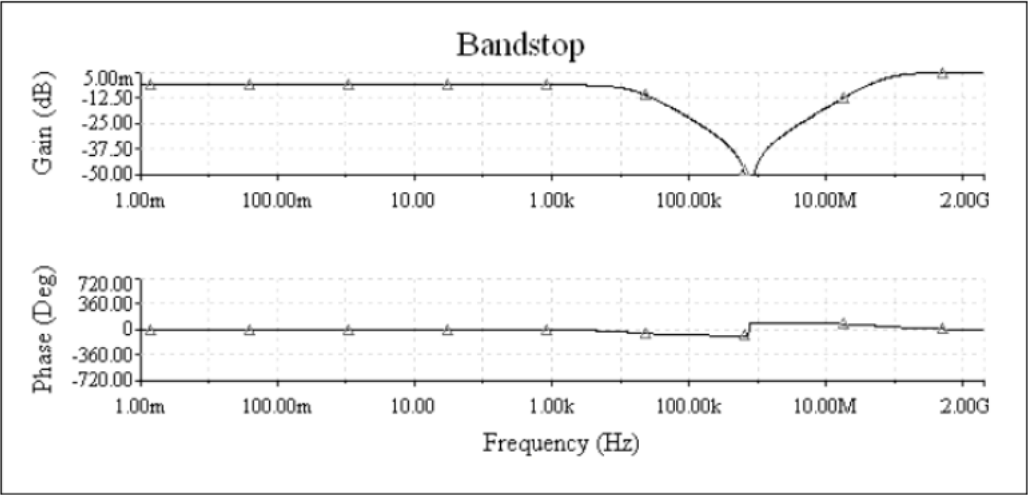


Рис. 3-2. Логарифмическая кривая режекторной схемы.

Данные для Лабораторной работы 3

Частота	Амплитуда (мВ)	Значение в децибелах (дБ)
7.6 кГц		
76 кГц		
$f_c=$		
760 кГц		
7.6 МГц		
76 МГц		

Таблица 3-1

Дополнительное задание

Для схемы рис.3-1 рассчитайте емкость конденсатора С так, чтобы схема резонировала на частоте $f_c=1010$ кГц. Заполните таблицу по аналогии с таблицей 3-1 для частот 10.1 кГц, 101 кГц, 1010 кГц, 10.1 МГц и 101 МГц. Измените текущие параметры моделирования, дважды щелкнув мышью на нужном виртуальном компоненте. Запустите моделирование и прокомментируйте результаты.

Лабораторная работа №4 Пассивный полосовой фильтр

Цель работы

Цель данного моделирования состоит в демонстрации характеристик и принципа действия пассивного полосового фильтра. Полосовые фильтры задерживают сигналы всех частот за исключением тех, которые находятся в полосе пропускания фильтра. Частота входного сигнала, при которой выходной сигнал максимален, называется основной частотой или резонирующей частотой.

В пассивной полосовой схеме маленький коэффициент LC обеспечивает широкую полосу пропускания, а большой коэффициент LC вызывает сужение полосы.

Ширина полосы пропускания LC цепей определяется частотами, входящими в полосу 3Дб. В полосовом фильтре, изображенном на Рис. 4-1, спад амплитудно-частотной характеристики наблюдается с обеих сторон основной частоты.

Преобразование Лапласа используется для вычисления полюсов заданного фильтра.

В данной лабораторной работе для фильтра второго порядка спад амплитудно-частотной характеристики должен достигать 40 Дб/дек вблизи интересующей нас частоты. В результате преобразования Лапласа, заданная функция для схемы на рис. 4-1 будет иметь вид:

$$\frac{v_0}{v_i} = \frac{R}{L} \left(\frac{s}{s^2 + s \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}} \right)$$

Изменение значений R, L, или C отразится на расположении полюсов. Изменение значения сопротивления R отразится на изменении полосы пропускания, но не основной частоты. Изменение емкости конденсатора C2 повлияет на изменение резонансной частоты, но не полосы пропускания. Изменение значения индукции L вызовет изменение и основной частоты и полосы пропускания.

Элементная база

Источник переменного напряжения (AC Voltage Source)

Резисторы (Resistors): 1.1 Ом, 1 Ом

Катушка индуктивности (Inductor): 33 мкГн μH

Конденсатор (Capacitor): 2.4 нФ

Оборудование

- Осциллограф (Oscilloscope)
- Графопостроитель диаграммы Боде(Bode Plotter)

Рабочие формулы

Ширина полосы пропускания

$$BW = \frac{R}{2\pi L} \quad \text{формула (4-1)}$$

добротность

$$Q = \frac{f_c}{BW} = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{формула (4-2)}$$

Основная частота

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{формула (4-3)}$$

Децибелы

формула (4-4)

$$dB = 20 \log V$$

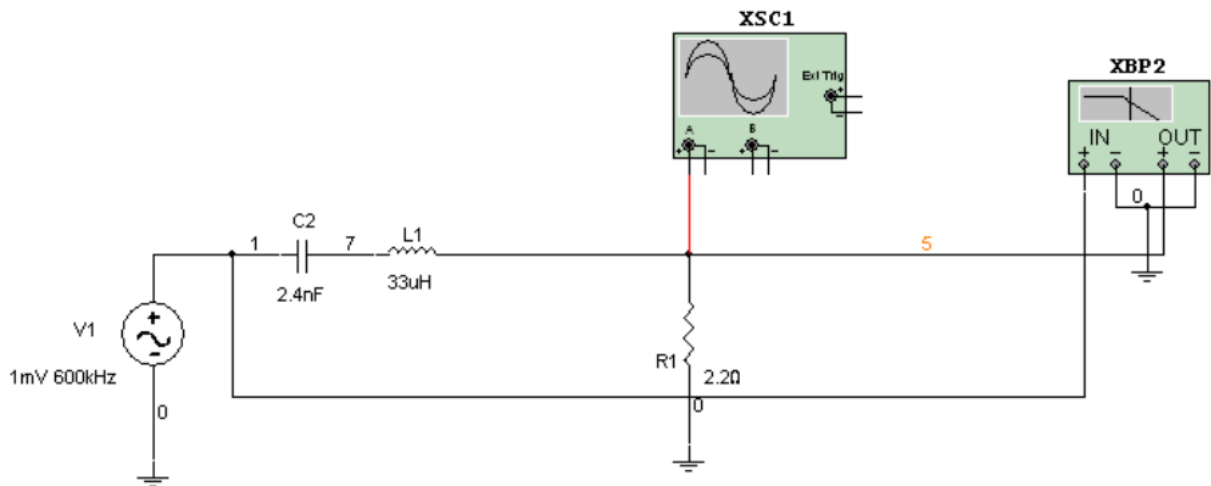


Рис. 4-1

Выполнение работы

1. Соберите схему как показано на рисунке Рис. 1-4.
2. Вычислите резонансную частоту и запишите значение в таблицу 4-1.
3. Двойным щелчком мыши войдите в меню AC Voltage Source (источника переменного напряжения) и введите полученное значение Frequency (частоты).
4. Двойным щелчком мыши войдите в меню Oscilloscope (осциллографа), установите масштаб по оси времени 5 мкс/дел и Channel A (канал A) в 200 мкВ/дел. Поставьте флажки Auto triggering (автоматический запуск) и DC coupling (связь по постоянному току).
5. Запустите процесс моделирования и измерьте частота колебаний выходного сигнала. Запишите соответствующие значения амплитуды в таблицу 4-2.
6. Изменяя частоту (при значении амплитуды =1) AC Voltage Source (источника переменного напряжения), в соответствии с данными таблицы 4-2, измерьте и запишите напряжение выходного сигнала при всех частотах. С помощью формулы 4-5, вычислите соответствующие значения в дБ. Необходимо запускать процесс моделирования для каждого измерения. Изобразите амплитудно-частотный спектр для полученных данных. Прокомментируйте полученные результаты.
7. Двойным щелчком мыши войдите в меню Bode Plotter (графопостроитель диаграммы Боде) и установите значения Magnitude LOG F = 5 дБ, 1.3 МГц, I = -60дБ, 200 КГц.
8. Перезапустите процесс моделирования и рассчитайте ширину полосы пропускания фильтра, перемещая красный маркер к уровню 3дБ и к уровню в нижней правой части Bode Plotter. Сравните полученные амплитудно-частотные спектры с результатами, полученными с помощью Bode Plotter.
9. Сравните полученные значения ширины полосы пропускания с теоретическими и заполните таблицу 4-1.

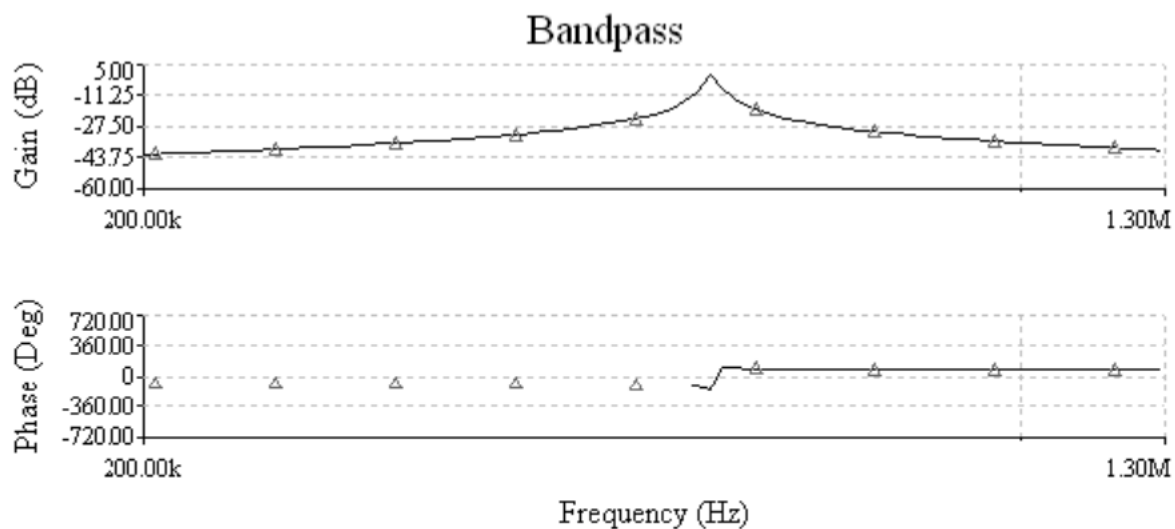


Рис. 4-2. Диаграмма Бode полосового фильтра

Данные для лабораторной работы

	Measured Value (измеренные значения)	Calculated Value (вычисленные значения)
BW		
fc		
Q		

Таблица 4-1

Frequency (частота)	Amplitude (V) (амплитуда)	Decibel Gain (dB) (коэффициент)
fc = _____		
600 Гц		
6 кГц		
60 кГц		
600 кГц		
6 МГц		
60 МГц		
600 МГц		

Таблица 4-2

Дополнительное задание

При помощи приведенных формул, изменяя значения элементов схемы на рис. 4-1, получите значение $f_c = 455$ кГц. Замена элементов моделирования осуществляется двойным нажатием на интересующем элементе. Запустите процесс моделирования и сравните получившиеся данные с ожидаемыми.

Генераторы

Генераторы используются как источники сигналов переменного тока. Они преобразуют мощность постоянного тока, получаемую от источника, в сигнал переменного тока. Генераторы порождают на выходе синусоидальные и несинусоидальные непрерывные формы сигналов, поддерживая желаемую частоту в пределах схемы. Известно, что нежелательные колебания встречаются в схемах, не предназначенных для колебательных сигналов. Таким образом, полное понимание основных принципов действия генераторов может помочь в предотвращении колебаний.

Генераторы играют важную роль в развитии любой коммуникационной системы. С их помощью генерируются сигналы с высокой несущей частотой, которые рассматриваются в разделе об АМ системах связи данного пособия. Низкочастотные модулирующие тестовые сигналы также получают с использованием колебательных контуров. Такие контуры лежат в основе импульсных генераторов, генераторов пилообразного сигнала и таймерных счетчиков. Будет рассмотрено несколько различных генераторов синусоидальных сигналов. Некоторые из них названы в честь своего создателя.

Генераторы нуждаются в единичном усилении на входе и выходе, а также (для всех случаев) в нулевом фазовом сдвиге в контуре обратной связи. Перечисленные требования соответствуют критерию Баркгаузена. Входная мощность, полученная от источника переменного тока, требуется также для поддержания собственных колебаний. Генераторы не только поставляют мощность на нагрузку, но, по сути, и сами ее (мощность) потребляют. Генераторы обеспечивают положительную обратную связь и усиление. Усиление предназначено для компенсации затуханий в схеме. Малые начальные напряжения подаются на входные клеммы генератора, где происходит усиление и запуск колебаний. Как правило, такие напряжения появляются в результате всплесков, получаемых при первом включении источника постоянного тока. В Multisim подобные малые начальные напряжения воспроизведены искусственно.

Лабораторная работа 5. Проектирование фильтров нижних и высоких частот.

Цель работы.

Цель данной работы состоит в демонстрации характеристик и операций, относящихся к формированию фильтров нижних и высоких частот, используя встроенную функцию Multisim 10. Будут рассмотрены характеристики активных и пассивных схем. С помощью встроенной в Multisim 10 функции, будут сформированы фильтры Баттерворта и Чебышева. Фильтр нижних частот не пропускает частоты, которые выше заданной частоты. Фильтр высоких частот не пропускает частоты, находящиеся ниже заданной частоты. Значение -3дБ или угловая частота, это такая частота, где амплитуда сигнала ослабляется до 0.707 или -3дБ.

Оборудование.

Bode Plotter (графопостроитель диаграммы Боде)

Источник переменного напряжения

Рабочие формулы.

$$\text{Угловая частота} = 0,707V_{in} \quad (5-1)$$

Выполнение работы.

1. Выберите Tools/Circuit Wizards/Filter Wizard из главного меню. Выберите Low Pass Filter (Фильтр нижних частот), нижнюю частоту задайте около 9 кГц, а запирающую частоту примерно 19 кГц, также укажите Butterworth Type и Active Topology. Когда вы выбираете тип Active, вы выбираете проектирование вашего фильтра по операционному усилителю. Если вы выберете Passive, то проектирование фильтра будет происходить посредством пассивных компонентов, т. е. резисторов, индукторов и конденсаторов.
2. Нажмите Verify (Проверить). Если вычисления успешны, нажмите Build Circuit (Построить схему), схема будет построена автоматически. Укажите на рабочее пространство, где бы вы хотели все это разместить. Какого порядка схема? Какой набор фильтров вы выберете, чтобы построить схему более высоких порядков?
3. Выберите AC Source (Источник переменного тока) вверху, на панели компонентов источников энергии. Два раза нажмите на нем и выставьте частоту в 500 Гц и напряжение 12 В.
4. Выберите Bode Plotter (графопостроитель диаграммы Боде) из панели инструментов (в правой части рабочей области). IN соединения Bode Plotter (графопостроитель диаграммы Боде) должны находиться напротив входа, а OUT соединения должны находиться напротив выхода. Запустите моделирование. Вы должны увидеть обычный выход фильтра нижних частот, как показано на рисунке 5-1.
5. Выберите правый красный указатель и перетащите его до точки -3дБ. Посчитайте число дБ на декаду.
6. Повторите то же самое, выбрав High Pass Filter (Фильтр высоких частот) с верхней частотой равной 3 кГц и запирающей частотой в 3,75 кГц, выберите Chebyshev Type и Passive Topology. Какой набор фильтров вы выберете, чтобы получить схему более низкого порядка? Перезапустите моделирование, наблюдая за выходом фильтра высоких частот.
7. Переключите дисплей Bode Plotter на PHASE (Фаза) и измерьте фазовый сдвиг (опережения или запаздывания) на частотах, установленных ранее.
 - а) Фазовый сдвиг, когда выход равен 90% = _____ градусов
 - б) Фазовый сдвиг, когда выход равен 70,7% = _____ градусов
 - в) Фазовый сдвиг, когда выход равен 10% = _____ градусов

Предполагаемый результат.

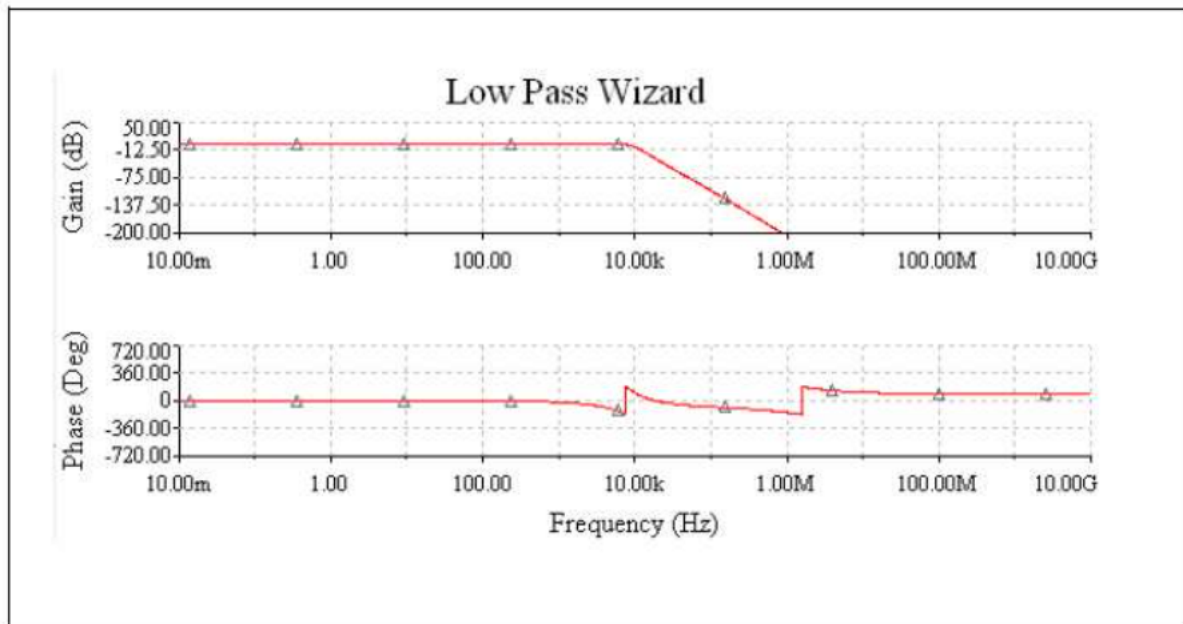


Рис. 5-1.

Лабораторная работа 6: Фазосдвигающий генератор

Цель работы

Цель моделирования состоит в демонстрации характеристик и принципа действия фазосдвигающего генератора. Схема на рис.6-1 представляет собой высокочастотную RC-схему третьего порядка с обратной связью как точную модель генератора. Также как и для любого другого генератора, критерий Баркгаузена определяет необходимость сдвига по фазе в 360 градусов между входным и выходным сигналами, а также общий коэффициент усиления в данной схеме должен быть не меньше единицы. На рис. 5-1, инвертирующий операционный усилитель обеспечивает фазовый сдвиг в 180 градусов. RC-цепь должна обеспечивать дополнительные 180 градусов для итогового фазового сдвига со значением ноль градусов. Каждый из блоков схемы обеспечивает примерно по 60 требуемых для сдвига градусов. Часть фильтра, состоящая из RC-цепочки, вносит затухания, которые должны быть выровнены при помощи операционного усилителя для достижения единичного коэффициента усиления в схеме.

Минимальный необходимый коэффициент усиления операционного усилителя, который должен поддерживать колебания, равен 29. Поддержание коэффициента усиления в районе 29 (насколько это возможно) предотвратит попадание максимальных значений кривой в нелинейную область. Посредством этого достигается минимизация обрезания синусоидального сигнала на выходе.

Компоненты схемы

Источник питания: +10 В, -10В (DC Supplies)
Операционный усилитель: 741-DIV (Opamp)
Резисторы: 10 кОм (3), 1 МОм потенциометр (Resistors)
Конденсатор: 10 нФ (3) (Capacitor)
Осциллограф (Oscilloscope)
Анализатор спектра (Spectrum Analyzer)

Рабочие формулы

Частота колебаний:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}} \quad \text{уравнение (6-1)}$$

$$\frac{R_F}{R} = 29 \quad \text{- для поддержания колебаний} \quad \text{уравнение (6-2)}$$

Выполнение работы

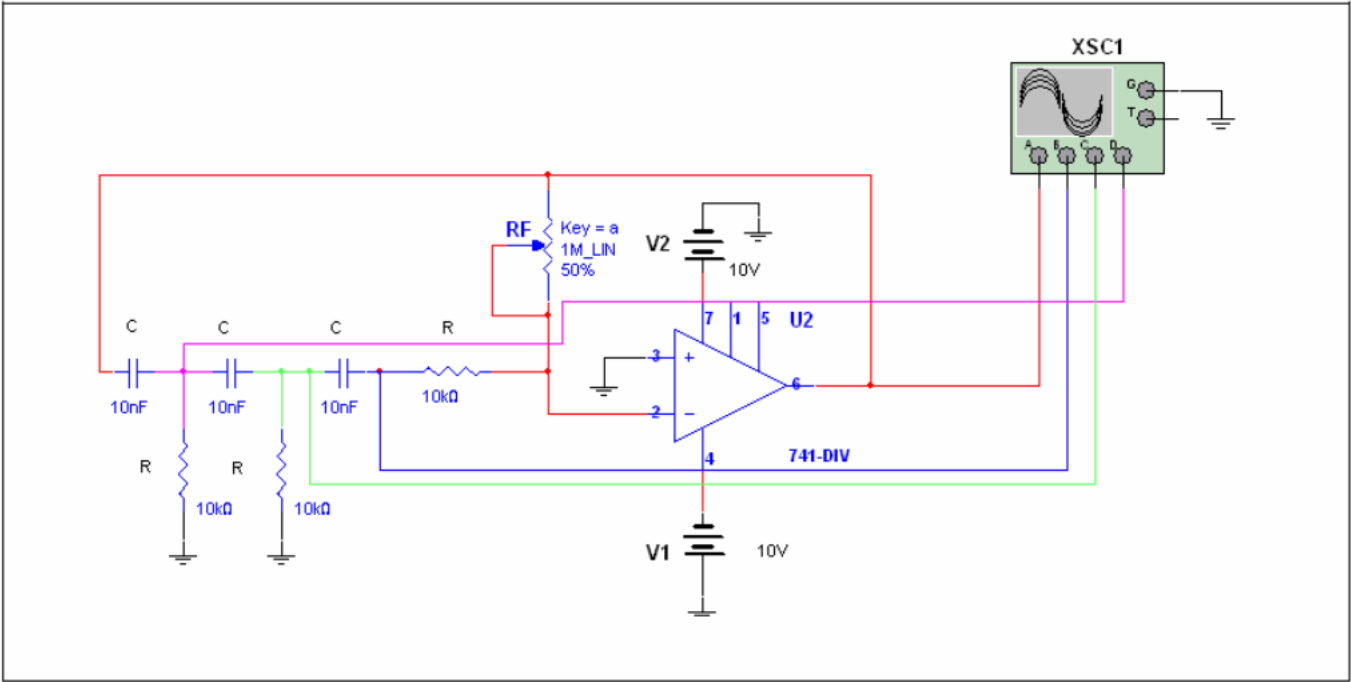


Рис.6-1

1. Соедините элементы схемы так как это показано на рис.6-1.
2. Двойным щелчком мыши откройте экран осциллографа. Установите масштаб на временной оси 2 мс/дел, на амплитудной оси **Channel A** - 2 В/дел и **Channel B** - 200 мВ/дел.
3. Откройте **Simulate/Interactive Simulation Settings** (диалоговые установки моделирования) и выберите **Set to Zero for Initial Conditions** (нулевые начальные условия).
4. Запустите процесс моделирования и измерьте частоту колебаний.
5. Остановите процесс моделирования, разместите на рабочей области анализатор спектра и подсоедините его вход к проводу с выхода осциллятора.
6. Двойным щелчком мыши откройте анализатор спектра.
7. Выберите **Set Span** (установка диапазона измерений). Установите параметры **Start** = 0 кГц (начальная частота), **End** = 1 кГц (конечная частота), **Amplitude** = LIN (амплитуда) и **Range** = 2 В/дел (масштаб). Нажмите **Enter**.
8. Перезапустите процесс моделирования. Когда колебания станут устойчивыми, сдвиньте красный маркер на позицию наблюдаемой спектральной линии. Запишите значение частоты, указанное в левом нижнем углу окна анализатора спектра.
 $f_c =$ _____.
9. Разместите потенциометр в точку где **начинаются колебания**. Измерьте значение сопротивления потенциометра в этой точке и заполните приведенную ниже таблицу.
10. Откройте окно осциллографа. Измерьте и запишите фазовый сдвиг на его входах.

Данные для Лабораторной работы 6

	Измеренное значение	Вычисленное значение
Частота (Гц)		
R_f/R в точке начала колебаний		

Таблица 6-1

Предполагаемый результат

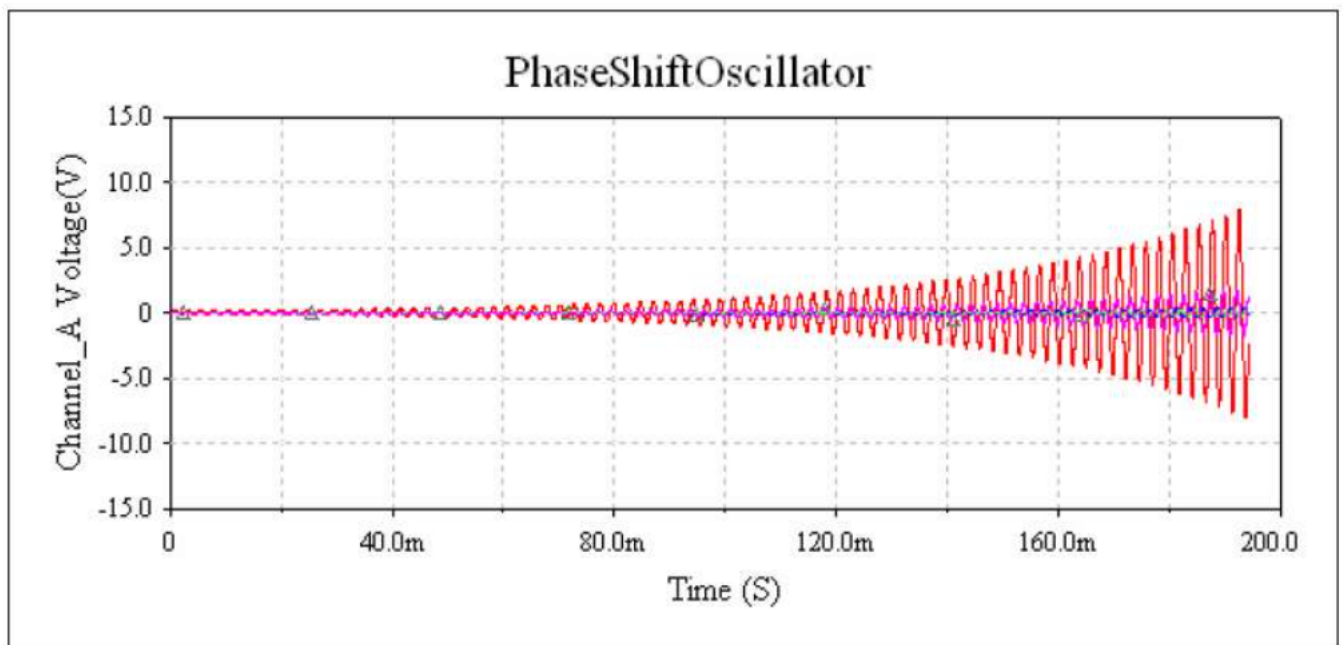


Рис.6-2. Начальные колебания фазосдвигающего генератора на экране осциллографа.

Дополнительное задание

Для схемы на рис.6-1 рассчитайте необходимое значение емкости конденсатора C для обеспечения колебаний с частотой 900 Гц. Измените текущие параметры моделирования, дважды щелкнув мышью на нужном виртуальном компоненте. Запустите моделирование и сравните результаты с ожидаемыми теоретическими значениями.

Лабораторная работа 7. Индуктивный трехточечный генератор.

Цель работы.

Цель данной работы состоит в демонстрации характеристик индуктивного трехточечного генератора. Такой генератор характеризуется индуктивным делителем напряжения, состоящим из параметров L_1 и L_2 . Это напряжение обратной связи используется для поддержания колебаний. Напомним, что параллельная LC-резонирующая цепь отвечает за частоту генератора. Как с другими индуктивно-емкостными генераторами, критерий Баркгаузена должен соблюдаться в порядке, для возникновения колебания. А именно, усиление от входа к выходу должно быть единичным, а общая фаза вокруг схемы должна быть нулевой. В схеме, изображенной на рисунке 7-1, биполярный плоскостной транзистор (BJT) должен иметь прирост в напряжении значительно выше, чем отношение L_1/L_2 в порядке, чтобы удерживать колебания. Другими словами, усиление биполярного плоскостного транзистора (BJT) должно компенсировать ослабление созданное обратной дробью:

$$B = L_2/L_1, \quad A_v B > 1, \quad \text{далее } A_v B > 1/B = L_1/L_2$$

Элементная база.

Источник питания постоянного тока 12 В.

Транзистор: Ideal BJT

Резисторы: 500 Ом, 10 кОм

Индуктор: virtual 0.5 мН, 2.5 мН

Конденсатор: virtual 1 мФ

Оборудование.

Осциллограф

Рабочие формулы.

Частот колебаний

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}} \quad (7-1)$$

Усиление

$$A_v > \frac{L_1}{L_2} \quad (7-2)$$

Общая индуктивность

$$L = L_1 + L_2 \quad (7-3)$$

Выполнение работы.

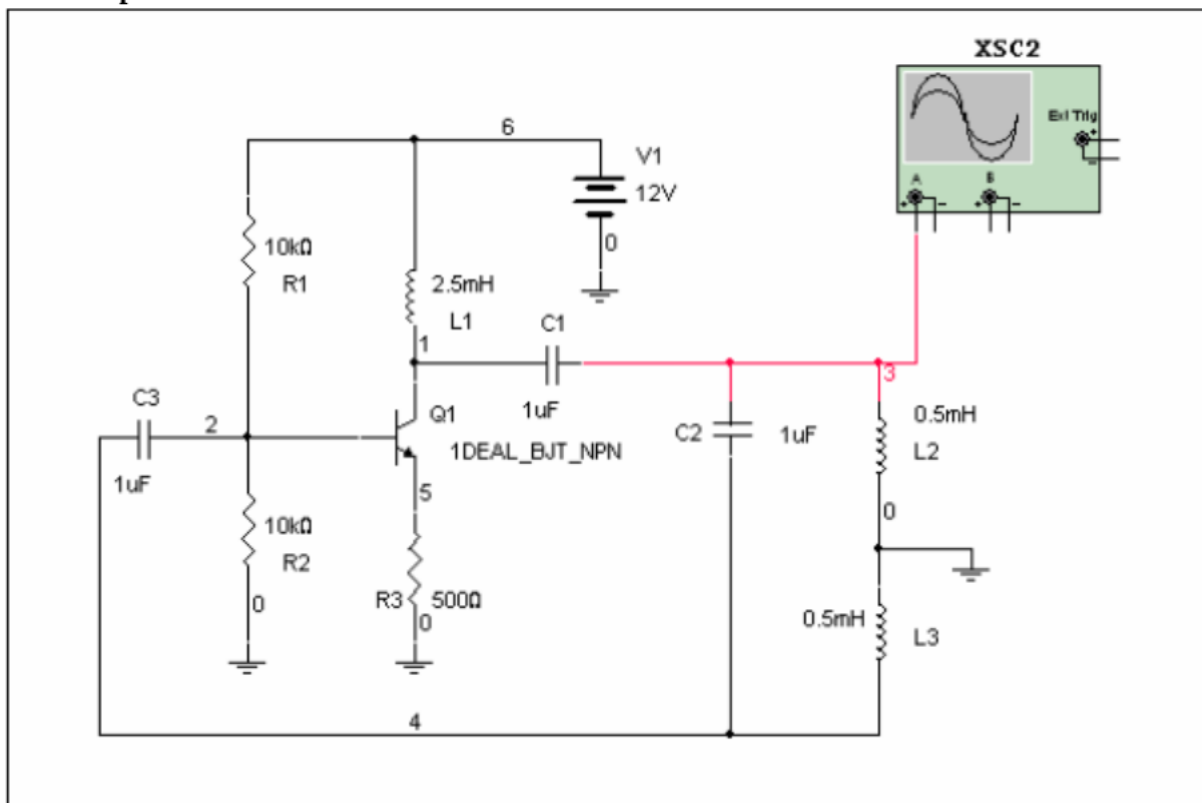


Рис. 7-1.

1. Соедините компоненты цепи, изображенные на рисунке 7-1.
2. Два раза нажмите на Oscilloscope (Осциллограф) для вывода его параметров. Выставьте параметр Time Base (Временная ось) равным 200 $\mu\text{s}/\text{Div}$, а значение Channel A (Канал A) равным 2V/Div. Выберите Auto Triggering и DC coupling.
3. Выберите Simulate/Interactive Simulation Settings (Моделирование/Параметры интерактивного моделирования) и выберите Set to Zero (Установить в 0) для начальных условий (Initial Conditions).
4. Запустите моделирование. Стабилизация генератора может занять несколько секунд. Измерьте частоту колебаний.
5. Сравните с теоретическими расчетами:
 $f_c = \underline{\hspace{2cm}}$ измеренная = $\underline{\hspace{2cm}}$ рассчитанная.
6. Остановите моделирование и переместите Спектральный Анализатор (Spectral Analyzer) в рабочую область.
7. Подсоедините выходной провод генератора ко входу Спектрального Анализатора (Spectral Analyzer). Два раза нажмите на Спектральном Анализаторе (Spectral Analyzer) для вывода его окна.
8. Нажмите Set Span (Установить разницу). Выставьте параметр Span (Разница) равным 10 кГц, Center (Центр) = 5 кГц и Amplitude (Амплитуда) = Lin. Нажмите Enter.
9. Перезапустите моделирование. Когда генератор стабилизируется, перетащите красный указатель к положению наблюдаемой спектральной линии. Запишите частоту (в левом нижнем углу окна Спектрального анализатора (Spectrum Analyzer))
 $f_c = \underline{\hspace{2cm}}$
10. Посчитайте усиление в цепи и проверьте, что оно больше, чем 1/V.
11. Рассчитайте значение L_2 , необходимое для достижения частоты колебаний равной 3,5 кГц. Возвратите смоделированные значения существующих компонентов, нажав два раза на интересующем Вас компоненте. Запустите моделирование для сравнения Ваших результатов.

Предполагаемый результат.

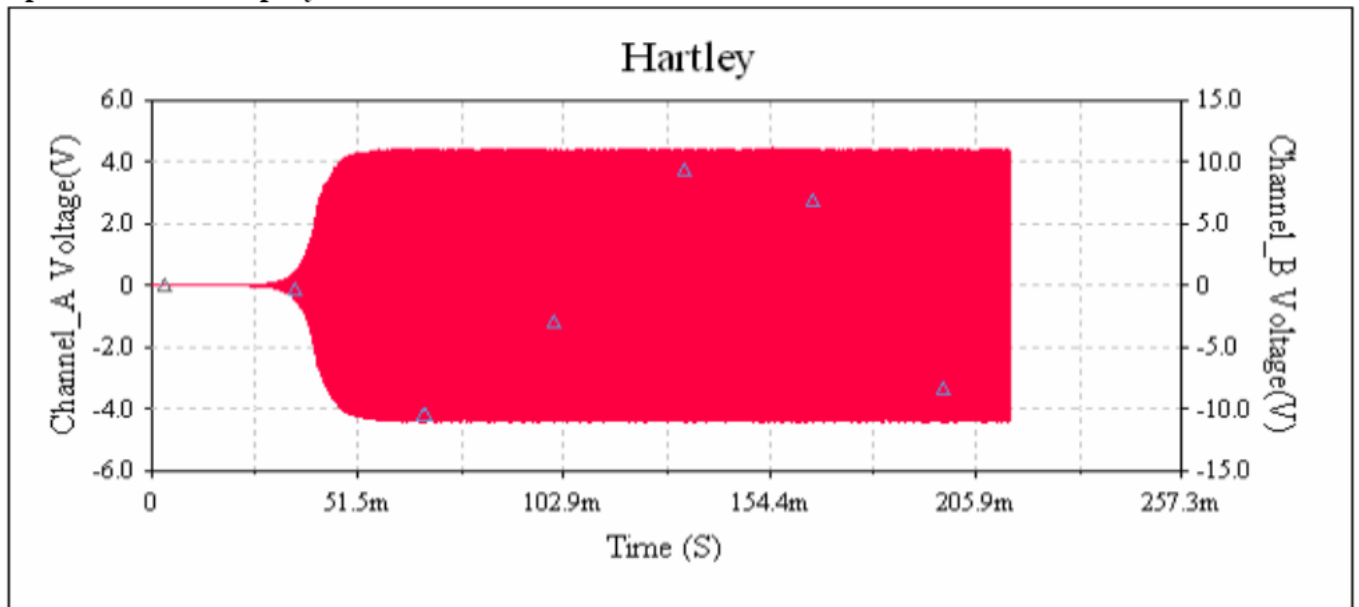


Рис. 7-2. Дисплей осциллографа исходных колебаний индуктивного трехточечного генератора.

Дополнительное задание.

Перестройте схему, изображенную на рисунке 7-1 так, чтобы достичь наименьшего усиления, а именно 10. Замена элементов моделирования осуществляется двойным нажатием на интересующем элементе. Запустите моделирование и сравните конечные данные с предполагаемыми теоретическими значениями.

Лабораторная работа 8. Трёхточечный генератор с емкостной связью.

Цель работы.

Цель данной работы состоит в демонстрации характеристик и операций трехточечного генератора с емкостной связью. Так же, как в случае с индуктивно-емкостными генераторами, трехточечный генератор с емкостной связью используется для более высоких частот, обычно в интервале от 1 до 500 МГц. Генератор характеризуется емкостным делителем напряжения, состоящего из C_1 и C_2 . Это напряжение с обратной связью используется для колебаний. Трехточечные генераторы с емкостной связью могут быть спроектированы посредством биполярных плоскостных транзисторов (BJT) и канальных транзисторов с р-п – переходом (JFET). В схеме, изображенной на рисунке 8-1, используя проектирование на основе биполярных плоскостных транзисторов (BJT), эффект нагрузки значительно сокращен благодаря высокому входному импедансу.

Как с другими индуктивно-емкостными генераторами, критерий Баркгаузена должен соблюдаться в порядке, для возникновения колебания. А именно, усиление от входа к выходу должно быть единичным, а общая фаза вокруг схемы должна быть нулевой. В схеме, изображенной на рисунке 8-1, спроектированной на основе канальных транзисторов с р-п – переходом (JFET), должно показываться абсолютное значение напряжения разомкнутой цепи, которое должно быть во много раз больше или равным пропорции C_1/C_2 для поддержания колебаний. Другими словами, усиление должно компенсировать ослабление созданное обратной связью:

$$B = C_2/C_1, \text{ начиная с } A_v B = 1, \text{ далее } A_v B = 1/B = C_1/C_2$$

Вследствие изменения частоты колебаний, L_1 тоже должно изменяться. Если замените C_1 или C_2 , то учитывайте эту замену в дроби $B = C_2/C_1$.

Элементная база.

Источник питания постоянного тока 12 В.

Транзистор: Ideal N JFET

Резисторы: 1 кОм, 120 кОм

Индуктор: virtual 60 μ H, 5.1 mH

Конденсатор: virtual 22 pF, 180 pF

Оборудование.

Осциллограф

Спектральный анализатор

Рабочие формулы.

Частота колебаний

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{L_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (8-1)$$

Усиление

$$A_v = -g_m r_d \quad (8-2)$$

Условие для существования колебаний

$$A_v \geq \frac{C_2}{C_1} \quad (8-3)$$

Выполнение работы.

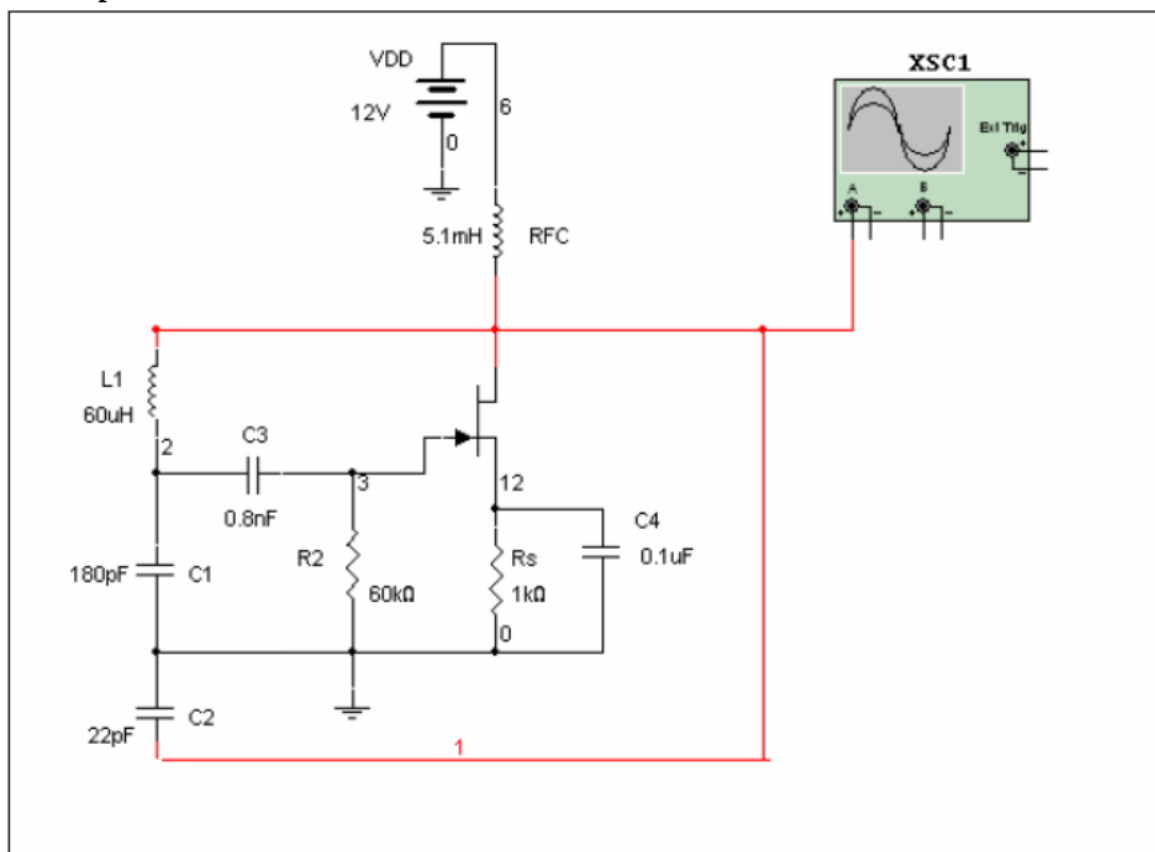


Рис. 8-1.

1. Соедините компоненты, как показано на рисунке 8-1.
2. Два раза нажмите на Oscilloscope (Осциллограф) для вывода на экран его параметров. Выставьте параметр Time Base (Временная ось) равным 200 ns/Div, а значение Channel A (Канал A) равным 10V/Div. Выберите Auto Triggering и DC coupling.
3. Выберите Simulate/Interactive Simulation Settings (Моделирование/Параметры интерактивного моделирования) и выберите Set to Zero (Установить в 0) для начальных условий (Initial Conditions).
4. Запустите моделирование. Когда осциллограф установится, измерьте частоту колебаний.
5. Сравните с теоретическими расчетами:

$$f_c = \text{измеренная} = \text{рассчитанная}.$$
6. Остановите моделирование и переместите Спектральный Анализатор (Spectral Analyzer) в рабочую область.
7. Подсоедините выходной провод осциллографа ко входу Спектрального Анализатора (Spectral Analyzer).
8. Два раза нажмите на Спектральном Анализаторе (Spectral Analyzer) для вывода его окна.
9. Нажмите Set Span (Установить разницу). Установите Start (Начало) = 10 kHz, End (Окончание) = 10 MHz. Amplitude (Амплитуда) = Lin, Range (Предел) = 2V/DIV. Нажмите Enter.
10. Перезапустите моделирование. Когда колебания стабилизируются, перетащите красный указатель к положению наблюдаемой спектральной линии. Запишите частоту (в левом нижнем углу окна Спектрального анализатора (Spectrum Analyzer))

$$f_c =$$
11. Рассчитайте значение L_1 , необходимое для достижения частоты колебаний равной 8 МГц. Замените L_1 , для этого щелкните на L_1 два раза и выберите Replace (Заменить). Запустите моделирование и сверьте полученный результат с Вашим расчетом.
12. Возьмите $g_m = 1.6 \text{ мС}$ и $r_d = 12 \text{ кОм}$ и выясните, будут ли в таком случае поддерживаться колебания.

Предполагаемый результат.

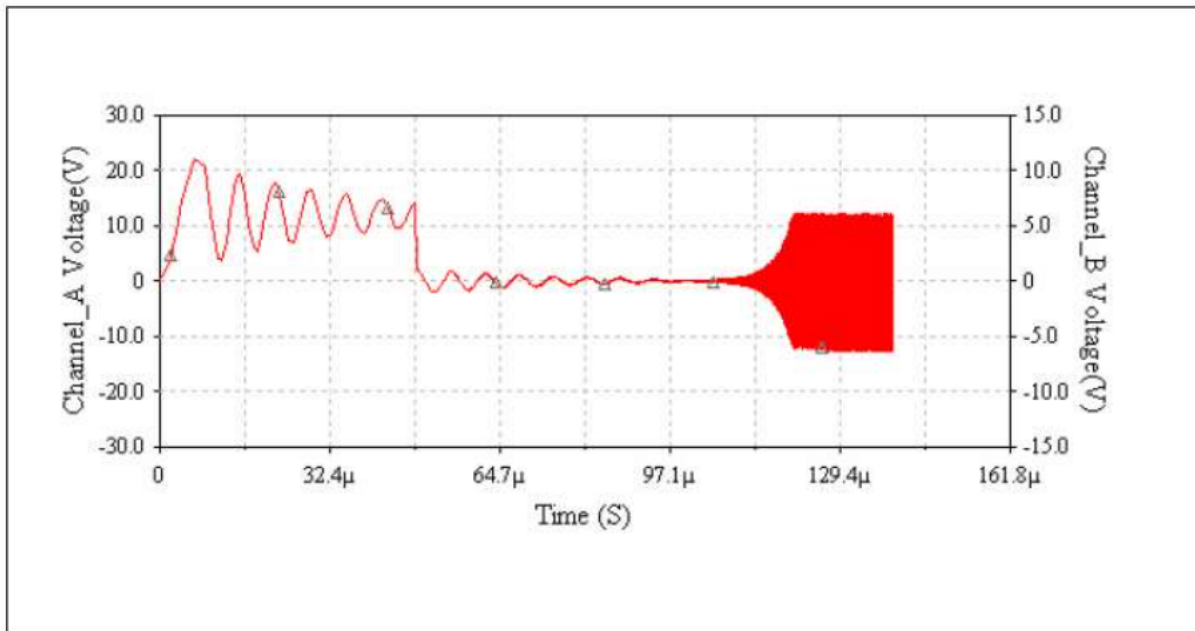


Рис. 8-2. Дисплей осциллографа исходных колебаний трехточечного генератора с емкостной связью.

Дополнительное задание.

Перестройте схему, изображенную на рисунке 8-1 так, чтобы значение $\Delta v\beta$ было равным 10, а частота колебаний 3 МГц (чтобы в будущем вернуть существовавшее смоделированное значение компонентов, достаточно нажать два раза на интересующем Вас элементе). Запустите моделирование и сравните конечные данные с предполагаемыми теоретическими значениями.

Лабораторная работа 9: Генератор Клапша.

Цель работы

Цель данного моделирования состоит в демонстрации характеристик и принципа действия генератора Клаппа (емкостного трехточечного генератора с последовательным питанием). Данный генератор очень похож на генератор Колпица с емкостным делителем напряжения вырабатывающий сигнал в цепи обратной связи. Последовательное соединение дополнительного конденсатора с индуктивностью L_1 вносит различия, что делает схему генератора Клаппа уникальной. Как и для любого генератора, критерий Баркгаузена определяет необходимость единичного коэффициента усиления и нулевой фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами.

Если не учитывать емкостной эффект транзистора между базой и коллектором, резонансная частота может быть рассчитана с использованием эквивалентной ёмкости:

$$C_{EQ} = \frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

Но поскольку емкость конденсатора C обычно значительно меньше чем C_1 и C_2 , то их вклад является незначительным. Отсюда:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Как уже было отмечено ранее, добавление емкости C и ее малое значение придает генератору Клаппа уникальные характеристики – устойчивость к влиянию помех и емкости

транзистора, которые в противном случае изменили бы значение C_1 и C_2 . Это выражается в гораздо более устойчивых и достаточно точных колебаниях. Допустимая для проведения операций область частот в генераторе Клаппа ограничена, тем не менее, надежность данной схемы делает ее широко применимой. C_1 и C_2 подбираются с целью улучшения характеристик обратной связи. Частота колебаний зависит от выбранного значения емкости C .

Компоненты схемы

Источник питания 10 В (**DC 10 V Supply**)

Транзистор: BJT 2N4401 (**Transistor**)

Резисторы: 20 кОм, 3.9 кОм, 1.2 кОм (**Resistors**)

Индуктивность: 2.4 мГл, 68 мкГл (**Inductor**)

Конденсатор: 12 нФ, 750 пФ, 3.9 нФ, 120 пФ (**Capacitor**)

Осциллограф (**Oscilloscope**)

Анализатор спектра (**Spectrum Analyzer**)

Рабочие формулы

Частота колебаний:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{уравнение (9-1)}$$

Выполнение работы

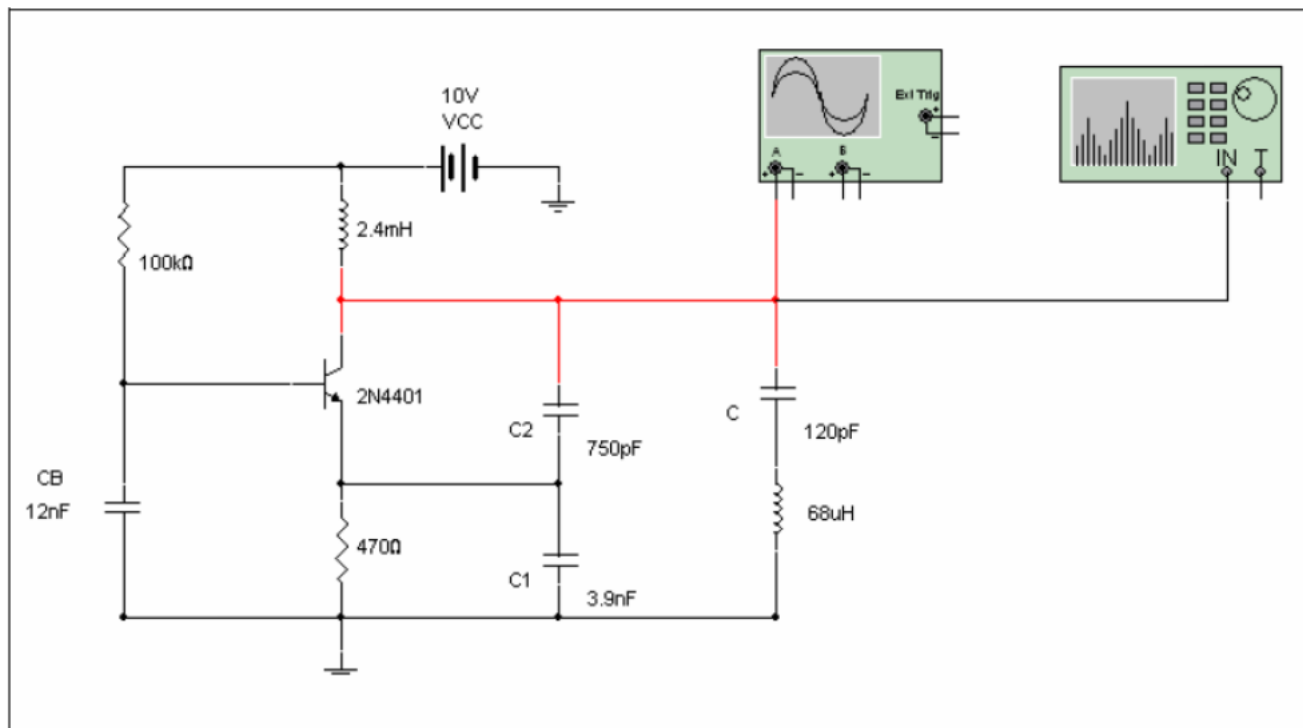


Рис.9-1

11. Соедините элементы схемы так как это показано на рис.9-1.
12. Двойным щелчком мыши откройте экран осциллографа. Установите масштаб на временной оси 500 мс/дел, на амплитудной оси **Channel A** - 5 В/дел. Выберите **Auto triggering and DC coupling** (автозапуск и связь по постоянному току). Установите **AC coupling** (связь по переменному току).
13. Откройте **Simulate/Interactive Simulation Settings** (диалоговые установки моделирования) и выберите **Set to Zero for Initial Conditions** (нулевые начальные условия). Проверьте максимальный шаг по времени и установите 3.6 e-008.
14. Запустите процесс моделирования. Потребуется около 20 секунд для того, чтобы колебательный процесс установился. Измерьте частоту колебаний. Вычислите значение емкости конденсатора C , необходимое для достижения частоты колебаний в 2 МГц. Измените значение C (двойным щелчком мыши на нем) и запустите процесс моделирования для того, чтобы проверить полученные Вами результаты.
15. Сравните данные с теоретическими расчетами и занесите результаты в таблицу 9-1.
16. Остановите процесс моделирования и поместите в рабочей области анализатор спектра.
17. Подсоедините провод с выхода генератора к входу анализатора спектра.
18. Двойным щелчком мыши вызовите окно меню анализатора спектра.
19. Выберите **Set Span** (установка диапазона измерений). Установите параметры **Start** = 1 МГц (начальная частота), **End** = 4 МГц (конечная частота), **Amplitude** = LIN (амплитуда) и **Range** = 1В/дел (масштаб). Нажмите **Enter**.
20. Перезапустите процесс моделирования. Когда колебания станут устойчивыми, сдвиньте красный маркер на позицию наблюдаемой спектральной линии. Запишите значение частоты, указанное в левом нижнем углу окна анализатора спектра.
 $f_c =$ _____.

Предполагаемый результат

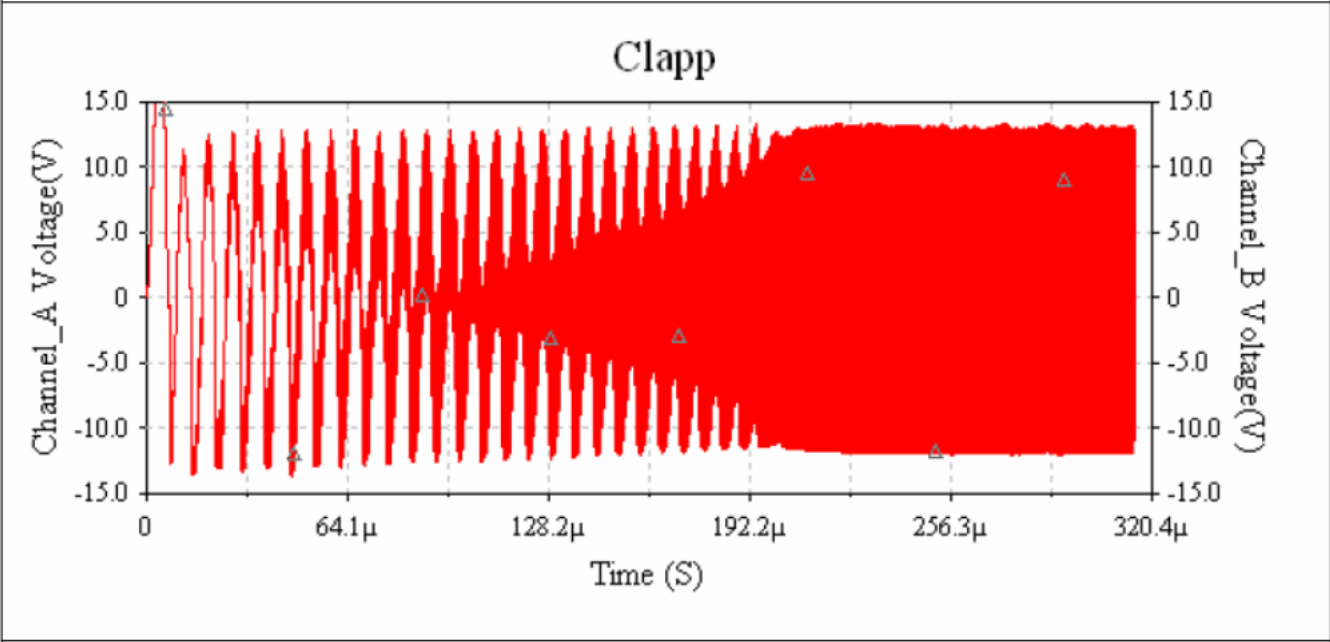


Рис.9-2. Начальные колебания генератора Клаппа на экране осциллографа.

Данные для Лабораторной работы 9

	Измеренное значение	Вычисленное значение
f_c (шаг 2)		
f_c (шаг 3)		

Таблица 9-1

Дополнительное задание

Замените конденсатор С конденсатором переменной ёмкости. Выделите С, щелкните правой кнопкой мыши и выберите **Delete** (удалить). Найдите переменный конденсатор на панели инструментов и установите значение 120 пФ. Выделение элемента и последующее нажатие «а» или «А» приведет к изменению коэффициента ёмкости. Определите верхнюю возможную частоту путем изменения значения С.

Лабораторная работа №10 Введение в амплитудную модуляцию

Цель работы

Цель моделирования заключается в демонстрации характеристик и принципа действия амплитудной модуляции. Развитие телекоммуникационных технологий является одной из важных задач. К примеру, самый большой технический прогресс в 20 веке был сделан в сфере телекоммуникаций.

Передача информации с помощью амплитудной модуляции является методом, при котором сигнал совмещается (модулируется) с высокочастотным сигналом и посылается в передающую среду, а в приемнике восстанавливается. Аудио сигналы нуждаются в модулировании по двум причинам. Диапазон частот, воспринимаемый человеческим ухом 20-20 000 Гц, значительно мал. Поэтому для передачи сигнала на этих частотах потребуется более большая антенна, чем при передаче на высоких частотах. Такое ограничение накладывается из-за требования к длине антенны, длина антенны должна равняться половине длины волны. Так как длина волны равна

$$\lambda = \frac{c}{f_c}, \text{ то для передачи сигнала с частотой } 2 \text{ кГц потребуется антенна длиной } 75 \text{ км!}$$

Если этот же сигнал смешать с высокочастотным 1050 кГц сигналом, длина антенны необходимой для приема значительно уменьшится. Вторая причина, по которой необходимо использование несущей частоты является требование к разделению сигналов приемником. При настройке радиоприемника на определенную станцию, роль разделителя сигналов играет несущая частота. Жесткие требования к приему/передаче сигналов регламентируют использование высокочастотных несущих с маленькой шириной и именно благодаря этому предотвращается наложение информационных сигналов (для амплитудно модулированных сигналов, частота несущего сигнала – 10кГц). При условии, что информационный сигнал – неискаженная синусоида, в процессе модуляции получим несущую частоту с нижней боковой полосой $f_c - f_m$, f_c , и верхней боковой полосой $f_c + f_m$. При этом на амплитудный спектр несущей будет представлен 3 линиями. С ограничением на ширину полосы сигнала, каждая боковая полоса уменьшится до 5 кГц. Это означает, что на практике ширина полосы аудио сигнала ограничена 5 кГц.

В среде Multisim есть амплитудный модулятор, который позволяет получить модулированный сигнал из низкочастотного информационного сигнала и высокочастотной несущей f_c . Наблюдение модулированного сигнала проведем во временной и частотной областях.

Используемые приборы

- Амплитудный модулятор (**AM Modulator**)
- Осциллограф (**Oscilloscope**)
- Анализатор спектра (**Spectrum Analyzer**)

Рабочие формулы

нижняя боковая полоса
 $f_{lower} = f_c - f_m$

формула 10-1

верхняя боковая полоса
 $f_{upper} = f_c + f_m$

формула 10-2

Выполнение работы

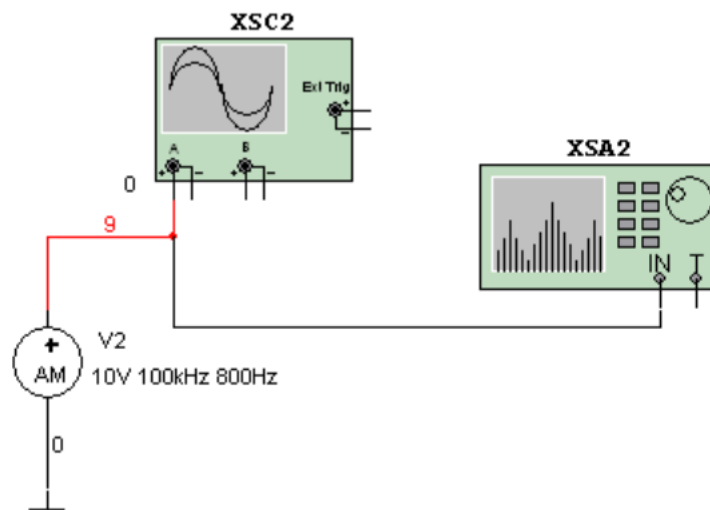


Рис. 10-1. Схема амплитудного модулятора.

1. Соберите схему, изображенную на рис. 10-1.
2. Кликните на пиктограмме амплитудного модулятора. Установите значение несущей амплитуды (**Carrier Amplitude**) 10 В, значение несущей частоты (**Carrier Frequency**) 100 кГц, частоту модуляции (**Modulating Frequency**) 800 Гц коэффициент модуляции (**Modulation Index**) 0.6.
3. Кликните на пиктограмме осциллографа Установите масштаб по оси времени 1 мс/дел., а канала А (**Channel A**) 10 В/дел. Выберите автоматический пуск и связь по постоянному току.
4. Кликните на пиктограмме спектрального анализатора. Установите параметры масштаба: диапазон частот (**Span**) 10 кГц, центральная частота 100 кГц и амплитуду (**Amplitude**) = LIN.
5. Запустите процесс моделирования, по полученным данным нарисуйте график кривой. Измерьте частоты несущей и модулированного сигнала, сравните полученные результаты с частотами амплитудного модулятора.
6. Кликните на пиктограмме спектрального анализатора. В открывшемся окне-экране, используя вертикальный маркер исследуйте амплитудный спектр, измерьте частоты частоты нижней и верхней боковой полосы, а также частоту несущей. Сравните с теоретическими значениями, запишите полученные результаты.

Предполагаемый результат

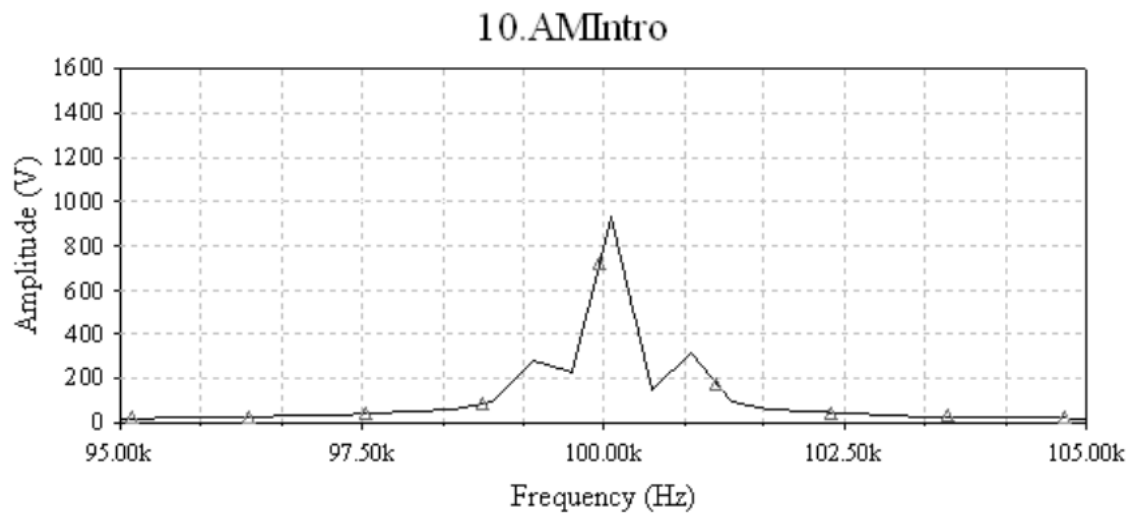


Рис. 10-2. Амплитудный спектр амплитудно-модулированного сигнала.

Данные для лабораторной работы

	Измеренные значения	Аналитические значения
Нижняя частота боковой полосы		
Верхняя частота боковой полосы		

Таблица 10-1

Дополнительное задание

Кликните на пиктограмме амплитудного модулятора. Установите значение несущей частоты 200кГц, частоту модуляции 500 Гц, коэффициент модуляции 1. Запустите процесс моделирования и исследуйте полученные результаты во временной и частотной областях. Измените коэффициент модуляции 1.2 и проанализируйте полученные результаты. Как изменится изображение на осциллографе?

Лабораторная работа 11. Показатель модуляции и анализ усиления.

Цель работы.

Цель данного моделирования состоит в демонстрации различных характеристик АМ модуляции, способов её измерения и выхода по энергии в АМ спектре. Показатель модуляции модулированного по амплитуде сигнала пропорционален несущей амплитуде передаваемого сигнала.

Важной частью процесса модуляции является его показатель модуляции или процентное соотношение модуляции. Нижесмодулированный АМ сигнал не является эффективным способом передачи информации, вследствие, потери мощности. При показателе модуляции 1, верхняя и нижняя боковые полосы имеют амплитуды равные половине несущей амплитуды. Перемодуляция происходит, когда показатель модуляции больше 1. Причинами перемодуляции являются помехи, возникающие на приемнике, вследствие, вмешательства нежелательных частот боковых полос других станций. В идеале желателен показатель модуляции 1. На практике огибающая должна модулироваться незначительно, чтобы можно было пренебречь потерями при падении напряжения на диоде в процессе демодуляции.

Показатель модуляции может быть определен своей огибающей, которая будет отображена на дисплее осциллографа. По мере увеличения амплитуды передаваемого сигнала, на огибающей появятся дополнительные полуволны. Эти полуволны указывают на перемодуляцию. **Как только амплитуда передаваемого сигнала уменьшится ниже 100% модуляции, измерения максимума и минимума огибающей амплитуды удовлетворяют показателя модуляции:**

$$m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}}$$

Показатель модуляции определяется как:

$$\frac{\text{Амплитуда модулируемого сигнала}}{\text{Несущая амплитуда сигнала}}$$

Процент модуляции вычисляется путем умножения показателя модуляции на 100. Показатель модуляции также может быть определен из частоты спектра, посредством измерения разницы в дБ между амплитудой несущей частоты и амплитудой частоты боковых полос. Эта разница используется для вычисления показателя модуляции:

$$m = 2/10^{[(\text{несущая, дБ} - \text{боковой полосы, дБ})/20]}$$

Амплитудная модуляция не является эффективным средством передачи голосовой и музыкальной информации. При показателе модуляции 1, АМ-модуляторы дают только 33% эффективности. Это связано с тем, что боковые полосы содержат только 1/3 общей мощности. Остальные 2/3 используются несущей, которая не несет полезной информации. Иногда используются другой, более эффективный метод, такой как использование двух боковых полос, подавляющий несущую, а также может использоваться метод одной боковой полосы, которая подавляет несущую и одну боковую полосу. Неотъемлемой проблемой этих 2-х методов является сложность приемников, необходимых для демодуляции сигналов. Амплитудная модуляция остается популярным методом модуляции, из-за простоты приемников, их дешевизной и маленькими размерами.

Общая мощность, содержащаяся внутри АМ сигнала, является суммой (в мВт) мощности боковой полосы и несущей мощности:

$$P_T = P_{USB} + P_{LSB} + P_C$$

Эффективность передачи есть сравнение полезной мощности, содержащейся в боковых полосах с неиспользуемой мощностью, содержащейся в несущей. Эффективность передачи также может быть определена через показатель модуляции m :

$$u = m^2 / (2 + m^2)$$

То есть при показателе модуляции 1, максимальная эффективность равна:

$$\eta = 1^2 / (2 + 1^2) = 1/3$$

Используемые приборы.

Источник амплитудной модуляции (AM Source).

Осциллограф (Oscilloscope).

Спектральный анализатор (Spectrum Analyzer).

Рабочие формулы.

Показатель модуляции

$$m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}} \quad (11-1)$$

$$m = 2/10^{[(\text{несущая, дБ} - \text{боковой полосы, дБ})/20]} \quad (11-2)$$

$$m = \frac{\text{Амплитуда модулируемого сигнала}}{\text{Несущая амплитуда сигнала}} \quad (11-3)$$

Эффективность

$$\mu = \frac{P_{USB} + P_{LSB}}{P_T} = m^2 / (2 + m^2) \quad (11-4)$$

Мощность, Вт

$$P_T = P_{USB} + P_{LSB} + P_C \quad (11-5)$$

$$P = V_{rms}^2 / R_L \quad (11-6)$$

$$P_T = P_C (1 + m^2/2) \quad (11-7)$$

Порядок выполнения работы.

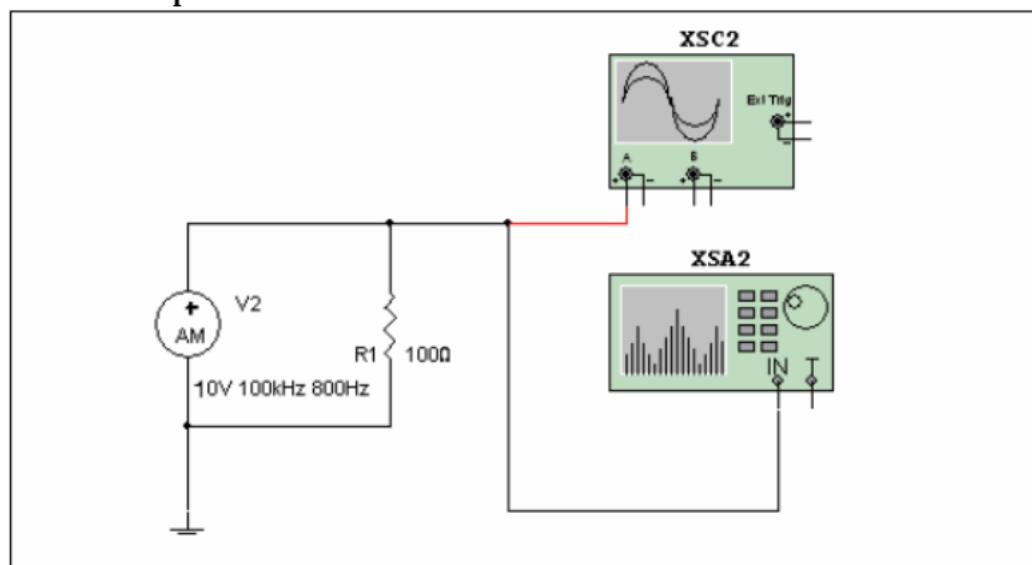


Рис. 11-1. Образец показателя модуляции и мощности.

1. Соберите схему, изображенную на рисунке 1.
2. Дважды щелкните на источнике амплитудной модуляции. Выберите несущую частоту (Carrier Frequency) = 100 кГц, частоту модуляции (Modulation Frequency) = 800 Гц, показатель модуляции (Modulation Index) = 0,6.
3. Двойным щелчком мыши откройте экран осциллографа. Установите масштаб временной оси 1 ms/Div и по амплитудной оси (Channel A) 10 V/Div. Выберите режим автоматического запуска (Auto Triggering) и режим пропускания постоянной составляющей сигнала (DC coupling).
4. Двойным щелчком мыши откройте анализатор спектра. Выберите Set Span (установка диапазона измерений). Установите параметры Span (диапазон) = 10 кГц, Center (центр) = 100 кГц, и Amplitude (амплитуда) = LIN. Нажмите Enter.
5. Запустите моделирование и двойным щелчком мыши откройте экран осциллографа. Измерьте v_{max} , которое представлено максимальным размахом амплитуды несущей частоты в модулированной форме сигнала. Измерьте v_{min} , которое представлено минимальным размахом амплитуды несущей частоты в модулированной форме сигнала. Вычислите показатель модуляции и сравните его со значением показателя модуляции АМ-источника. Запишите Ваши результаты в таблицу 11-1.
6. Двойным щелчком мыши откройте анализатор спектра. Сдвиньте красный вертикальный флажок над значением несущей частоты и измерьте амплитуду (в дБ). Измерьте число децибелов, приходящихся на одну из боковых полос, используя тот же метод. Вычислите показатель модуляции и запишите Ваши результаты в таблицу 11-1. Вычислите амплитуду модулируемого сигнала и запишите Ваши результаты в таблицу 11-1.
7. Прделайте то же самое при показателе модуляции 0,33.
8. Дважды щелкните на источнике амплитудной модуляции. Установите несущую амплитуду (Carrier Amplitude) = 20 В, несущую частоту (Carrier Frequency) = 100 кГц, частоту модуляции (Modulation Frequency) = 500 Гц, показатель модуляции (Modulation Index) = 0,5.
9. Перезапустите моделирование и наблюдайте за огибающей на экране осциллографа и за спектром на экране анализатора спектра. Используя спектральный анализатор, сдвиньте красный указатель к каждой боковой полосе и несущей. Запишите уровни напряжения. Посчитайте мощность каждого, затем значение P_T . Определите измеренное значение μ .
10. Установите значение показателя модуляции АМ-источника = 0,5, для того, чтобы определить вычисленное значение эффективности. Запишите Ваши результаты в таблицу 11-2.
11. Поменяйте показатель модуляции на 0,7 и повторите. Запишите Ваши результаты в таблицу 11-2. Повторите действие, описанное выше, для показателей модуляции 0,8 и 1. Запишите Ваши результаты в таблицу 11-2.

Предполагаемый результат.

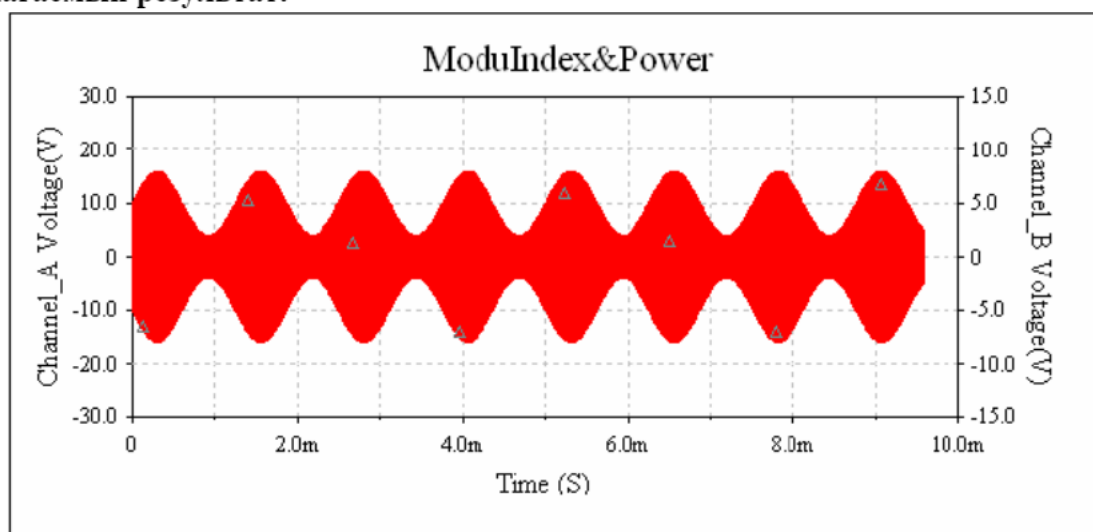


Рис. 11-2. Дисплей осциллографа при $m=0,5$.

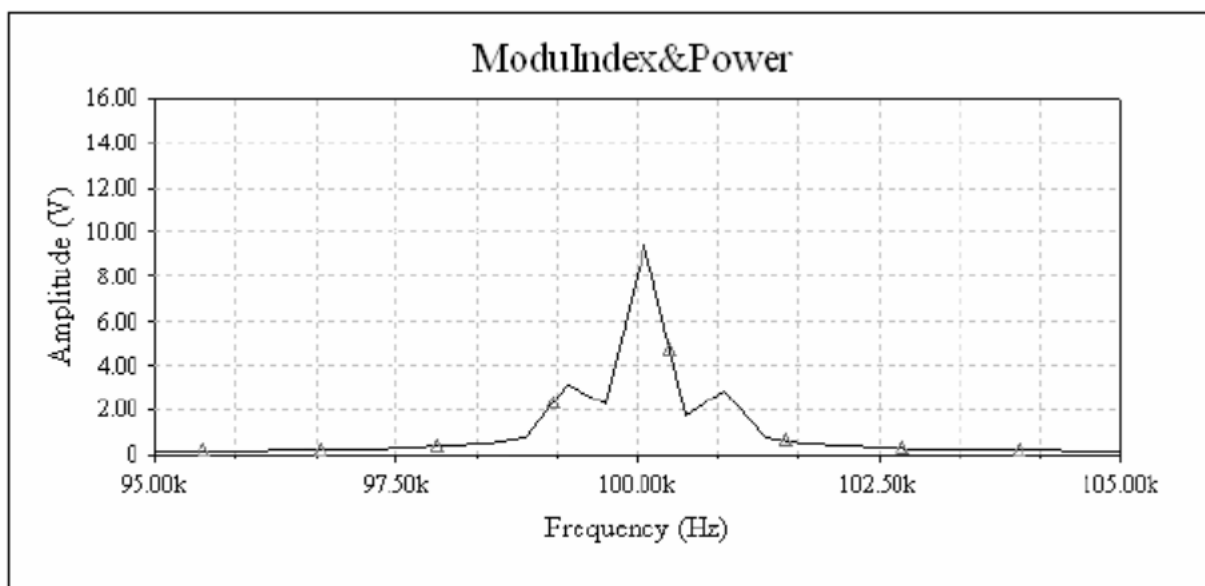


Рис. 11-3. Частотный спектр при $m=0,5$.

Данные для лабораторной работы 11.

	V_{\max}	V_{\min}	$m_{\text{изм}}$	Несущая, дБ	Боковая полоса, дБ	$m_{\text{изм}}$	$m_{\text{предполагаемое}}$	%m	Амплитуда модулированного сигнала
$m=0,6$									
$m=0,33$									

Таблица 11-1.

Эффективность

	Измеренное значение	Вычисленное значение
$m = 0,5$		
$m = 0,7$		
$m = 0,8$		
$m = 1$		

Таблица 11-2.

Дополнительное задание.

Повторите шаг 2 для показателя модуляции 0,80. Установите показатель модуляции равным 1,2, на экране осциллографа и анализатора спектра наблюдайте за эффектами перемодуляции. Установите показатель модуляции равным 0,6. Вычислите эффективность амплитуды модулированного сигнала, используя измерения мощности несущей и боковых полос, взятых из частоты спектра. Используйте анализатор спектра для того, чтобы получить Ваши данные и формулы, приготовленные для Ваших вычислений.

Лабораторная работа 12: Амплитудная демодуляция.

Цель работы

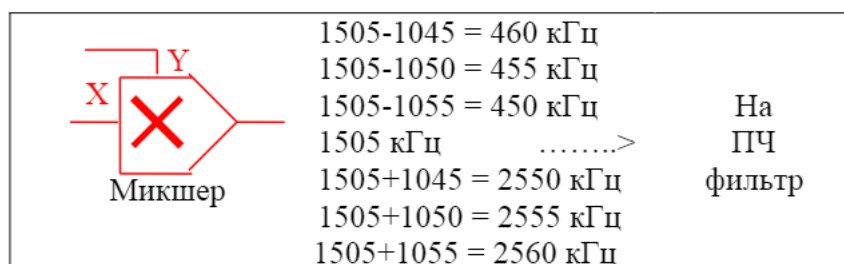
Цель моделирования состоит в демонстрации характеристик и принципа действия детектора огибающей, а также в получении представления о стадиях воздействия которому подвергается модулированный сигнал в приемнике, вследствие чего восстанавливается исходная переданная информация.

При получении приемником, АМ-сигнал подвергается нескольким стадиям обработки в процессе демодуляции. Рисунок 12-1 иллюстрирует стадию получения и фильтрации сигнала с использованием простого диодного детектора. Другие более сложные детекторы, использующие в большинстве своем ФАПЧ-схемы (с фазовой автоматической подстройкой частоты) обеспечивают, совместно с АРУ-схемами (автоматической регулировки усиления), индекс модуляции близкий к единице.

Поскольку схемы осуществляющие процесс детектирования неизменны, фундаментальное требование к сигналу на входе детектора заключается в том, что полоса частот должна лежать по другую сторону от фиксированной частоты. Эта фиксированная частота называется ПЧ или промежуточной частотой и получается в результате микширования частоты колебаний гетеродина с РЧ (радиочастотой) спектра, которая была отфильтрована на РЧ-стадии процесса демодуляции. Фиксированное значение промежуточной частоты равно 455 кГц. Этот сигнал с промежуточной частотой подается на вход тщательно подобранного усилителя промежуточной частоты (УПЧ).

Частота колебаний гетеродина (ГТ) в распространенных супергетеродинных приемниках регулируется при помощи управления настройкой на 455 кГц выше несущей РЧ, $f_{ГД} = f_c + f_{ПЧ}$. Зачем необходим гетеродин? Помните, что детектор требует, чтобы частота передаваемого сигнала была транслирована на другую сторону фиксированной промежуточной частоты. Пропускание РЧ спектра и частоты гетеродина через микшер в результате даст сумму или разность поданных на вход частот. Эта разность частот - именно та, которая требуется ПЧ спектром. Рассмотрим несущую частоту 1050 кГц передающую информационный сигнал с частотой 5 кГц.

$$\begin{aligned} ГД &= 1050 \text{ кГц} + 455 \text{ кГц} \\ &= 1505 \text{ кГц} \\ &\dots\dots\dots > \\ &1045 \text{ кГц} \\ &1050 \text{ кГц} \dots\dots\dots > \\ &1055 \text{ кГц} \end{aligned}$$



Особенностью ПЧ-фильтра является крутой спад характеристик, что обеспечивает отсеечение любых частот, отличных от ПЧ частоты транслированного спектра. Сигнал с выхода фильтра является входным сигналом для детектора. Детектор огибающей, представленный на рис. 12-1, предназначен главным образом для детектирования полуволны сигнала. Постоянная времени RC должна обеспечивать быстрое нарастание сигнала и медленный спад. Тем самым будет обеспечено регистрирование детектором колебаний амплитуды огибающей. Постоянную времени RC детектора огибающей следует определять так:

$$RC = \frac{1}{2\pi m f_m}$$

На рис.12-1 не показана АРУ-схема, помогающая контролировать уровень входного сигнала детектора.

Одним из главных недостатков детектора огибающей является эффект падения напряжения на диоде V_d . Эти 0,7 В представляют собой задержку между точкой, где сигнал достигает входа и где конденсатор способен предоставить выходному сигналу реагировать на входной сигнал. В конечном счете, это выражается в потере мощности, поскольку индекс модуляции не может достичь оптимального значения – единицы. Детектор представленный на рис.12-2 будет регистрировать модулированные сигналы за границами полосы частот с использованием особого фильтра нижних частот, поддерживающего частоту среза на уровне 2 кГц (с целью ознакомления).

Компоненты схемы

Резисторы: 330 Ом, 620 Ом, 3.3 кОм, 5.2 кОм, 15 кОм, 33 кОм (**Resistors**)

Конденсаторы: 2 нФ, 4.7 нФ, 2.2 нФ, 12 нФ (**Capacitors**)

Диод: 1N4148 (**Diode**)

Идеальный (образцовый) операционный усилитель (**Ideal Opamps**)

Амплитудный модулятор (**AM Modulator**)

Осциллограф (**Oscilloscope**)

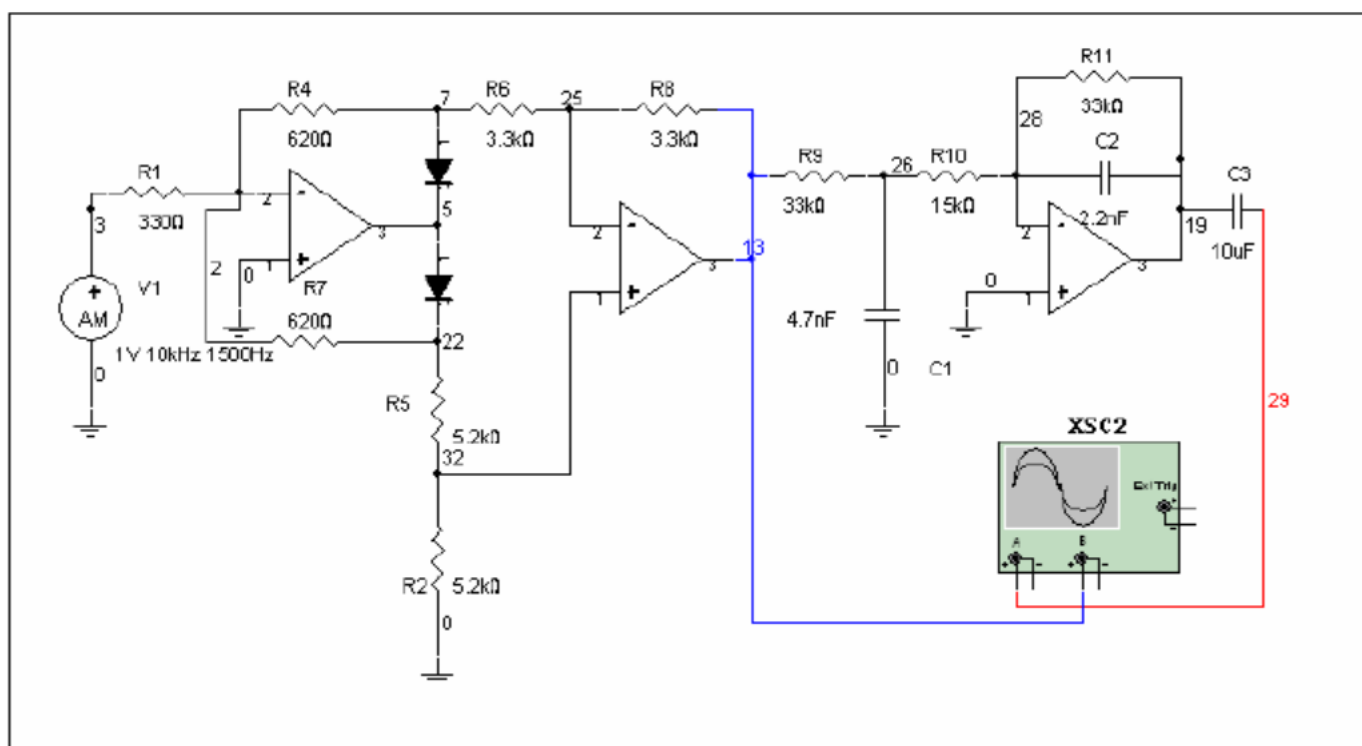
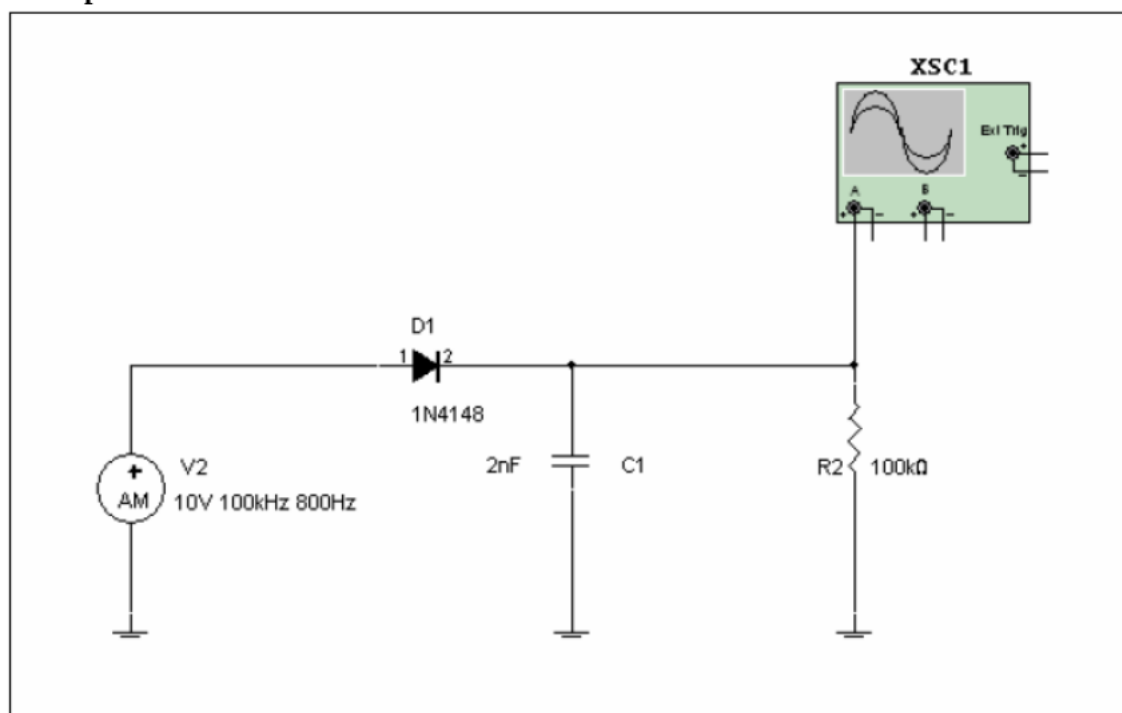
Рабочие формулы

Постоянная времени RC:

$$RC = \frac{1}{2\pi m f_m}$$

уравнение (12-1)

Выполнение работы



1. Соедините элементы схемы как это показано на рисунке 12-1.
2. Двойным щелчком мыши откройте окно осциллографа. Установите масштаб на временной оси 10 мс/дел и на амплитудной оси **Channel A** - 10 В/дел. Выберите **Auto triggering and DC coupling** (автозапуск и связь по постоянному току).
3. Дважды щелкните мышью по иконке источника АМ-сигналов для изменения его параметров. Установите **carrier amplitude** (амплитуду несущей) = 10 В, **carrier frequency** (несущую частоту) = 100 кГц, **modulation index** (показатель модуляции) = 0.6 и **modulation frequency** (частоту модуляции) = 800 Гц.
4. Запустите процесс моделирования и измерьте частоту демодулированного сигнала, сравните это значение с предполагаемым. Запишите Ваши результаты в разделе Данные к лабораторной работе.
5. Дважды щелкните мышью на резисторе для того, чтобы изменить его значение. Выберите резистор в 500 кОм. Запустите процесс моделирования заново. Зарисуйте форму сигнала, соответствующего слишком большому значению постоянной времени. Далее, замените сопротивление резистора с 500 кОм на 10 кОм. Запустите процесс моделирования и зарисуйте форму сигнала, соответствующего слишком низкому значению постоянной времени.
6. Измените схему детектора так, чтобы обеспечить оптимальное детектирование 500 герцового модулированного сигнала. Замените компоненты, переустановите параметр частоты модуляции в источнике АМ-сигналов и запустите процесс моделирования.
7. Соедините элементы схемы в соответствии с тем, что изображено на рисунке 12-2. Подключите оба канала осциллографа так, как это показано. Установите масштаб 500 мкс/дел по временной оси, по амплитудной оси **Channel A** - на 500 мВ/дел и **Channel B** – на 5 В/дел. Установите источник АМ-сигналов как указано на рис.12-2. Запустите процесс моделирования. Запишите Ваши наблюдения.

Предполагаемый результат

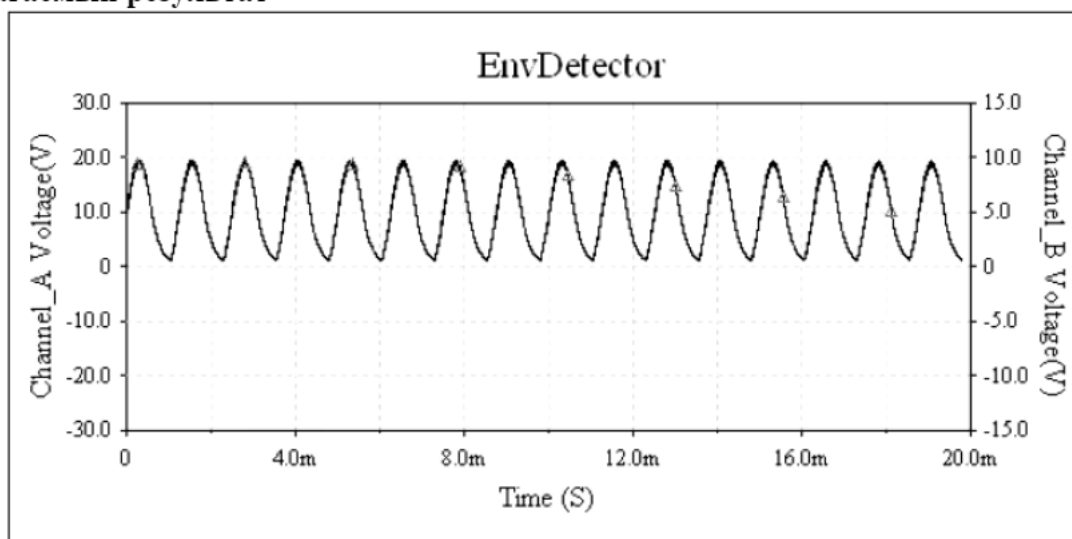


Рис.12-3. Выходной сигнал детектора огибающей при $m=0.6$.

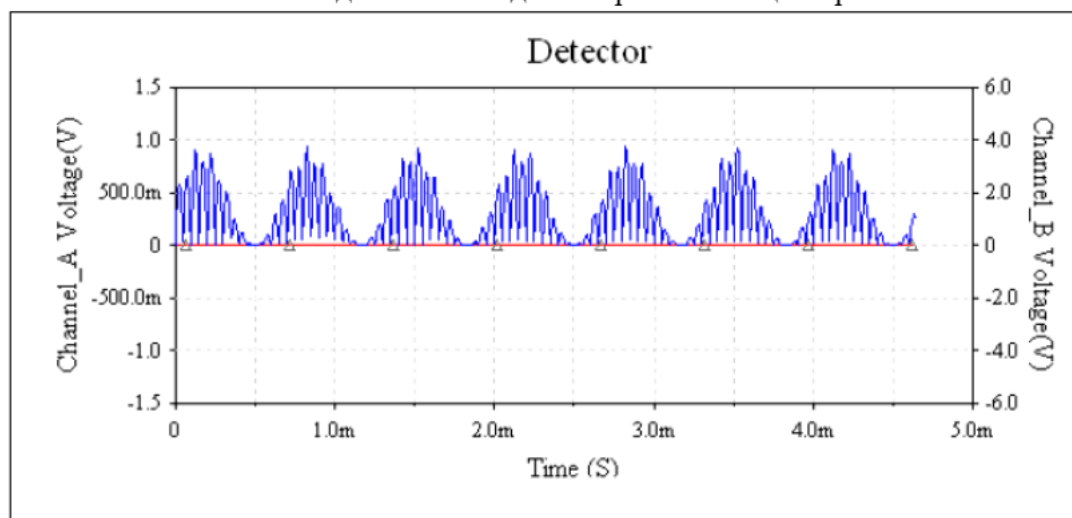


Рис.12-4. Выходной сигнал на стадии детектирования (схема с рис.12-2).

Данные для Лабораторной работы 12

f_m на выходе детектора _____

f_m предполагаемая _____

Форма сигнала для слишком большого значения постоянной времени RC:



Форма сигнала для слишком низкого значения постоянной времени RC:



Для шага 6, новые значения R = _____ и C = _____.

Шаг 7 _____.

Дополнительное задание

Двойным щелчком мыши откройте источник АМ-сигналов (рис.12-1) и измените параметр показателя модуляции на 1. Запустите процесс моделирования и опишите разницу в форме сигнала на выходе детектора. Измените коэффициент модуляции на 1.4. Запустите процесс моделирования и опишите разницу в форме сигнала на выходе детектора.

Лабораторная работа № 13 Анализ боковых полос

Цель работы

Цель работы состоит в демонстрации характеристик процесса передачи боковых полос. Как говорилось ранее, основное назначение несущей частоты – передача информации от источника к приемнику в пределах ограниченной зоны приема. Для этого, при амплитудной модуляции сигнала, обе боковые полосы посылаются вместе с частотой, равной несущей. Исходя из того, что только 2/3 всей мощности сигнала используется для передачи сигнала и учитывая денежные затраты на создание мощного передатчика, подавление несущей частоты является эффективным средством в процедуре передачи сигнала. При передаче двух боковых полос сжатый носитель сигнала обрабатывается и восстанавливаются в приемнике. Следует заметить, что при передаче одной боковой полосы сжимаются основная и боковые частоты. Таким образом, для восстановления обоих видов передачи сигнала требуются сложные технические устройства. Для того чтобы сдвиг фаз восстановленной несущей частоты совпадал со сдвигом фаз сжатого сигнала при передаче двух боковых полос используется контрольная несущая.

В данной работе модулирующий сигнал и несущая частота будут складываться с умножителем, который используется для моделирования подавленной несущей.

Используемые приборы

- Резистор 1 кОм
- Блок умножения (Multiplier), в блоке функций (Control Function Blocks)
- Источник напряжения переменного тока (AC Voltage Source)
- Амплитудный модулятор
- Осциллограф
- Анализатор спектра (Spectrum Analyzer)

Рабочий формулы

Мощность в ваттах

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R_l} \quad \text{уравнение (13-1)}$$

Выполнение работы

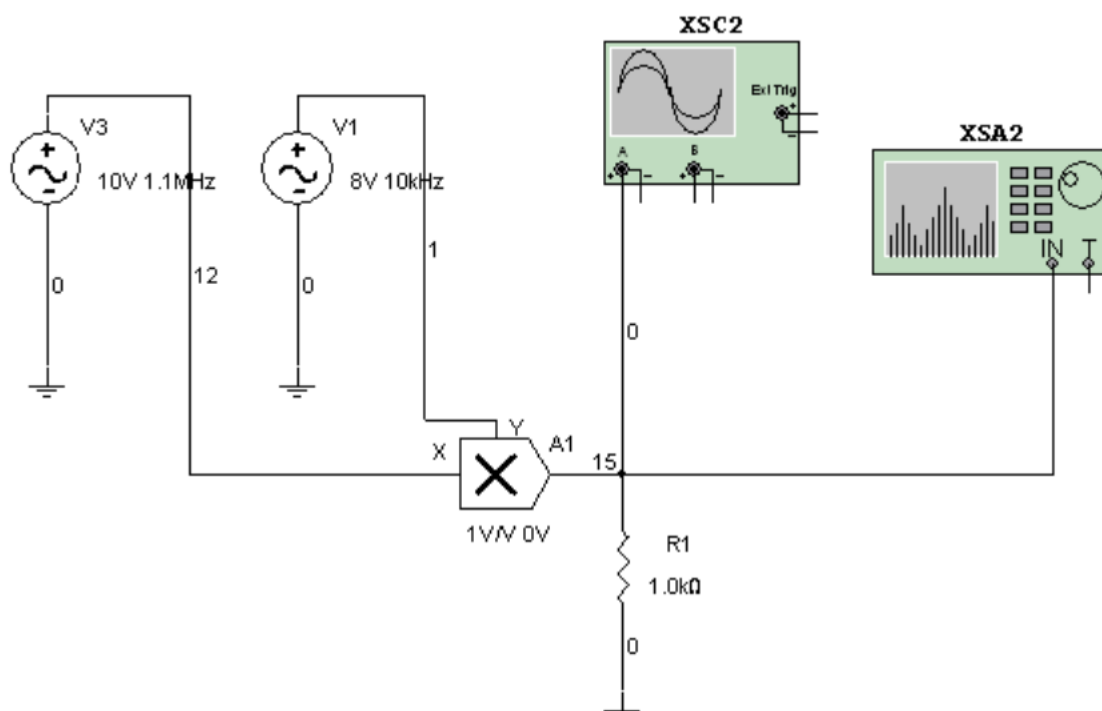


Рис.13-1 Две боковые полосы при помощи умножителя.

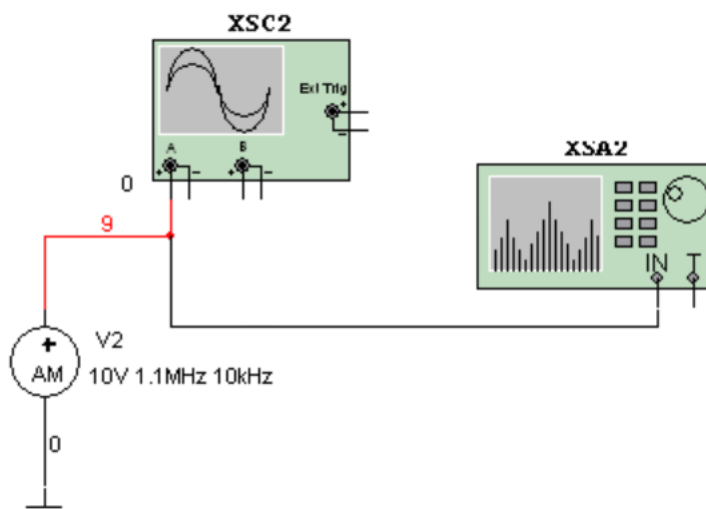


Рис.13-2 Амплитудный модулятор

7. Соберите схему, изображенную на рис. 13-1.
8. Кликните на первом источнике напряжения переменного тока и установите амплитуду несущей 10В, а частоту несущей 1,1 МГц. Кликните на втором источнике напряжения переменного тока и установите частоту модуляции 10 кГц, а амплитуду модуляции 8 В.
9. Кликните на пиктограмме осциллографа. Установите масштаб по оси времени 20мс/дел., а масштаб для канала А (**Channel A**) – 50В/дел. Выберите автоматический пуск и связь по постоянному току.
10. Кликните на пиктограмме спектрального анализатора. Установите параметры масштаба: начальную частоту (**Start**) измерений 980 кГц, конечную частоту (**End**) 1,2 МГц, масштаб (**Range**)

20В/дел, разрешающая способность по частоте (**Resolution Frequency**) 3.906 кГц и амплитуду (**Amplitude**) = LIN.

11. Запустите процесс моделирования. Двойным щелчком по пиктограмме осциллографа запустите его экран. Пронаблюдайте сигнал с двумя боковыми полосами и сравните его с графиком на рис.13-3.

12. Кликните на пиктограмме спектрального анализатора, исследуйте спектр соединенной частоты. Измерьте частоту каждой боковой полосы. Для этого передвигайте красный вертикальный маркер вдоль каждой из боковых полос и наблюдайте значение частоты в на экране анализатора спектра. Сравните и удостоверьтесь, что полученные результаты совпадают с теоретическими. Запишите результаты в таблицу 13-1.

13. Запишите уровни напряжения боковых полос, вычислите мощность каждой боковой полосы. Результаты запишите в таблицу 13-2.

14. Соберите схему амплитудного модулятора, изображенную на рис. 13-2. Установите значение коэффициента модуляции в 1. Таким образом можно определить максимальную производительность модулятора. Удостоверьтесь, что все параметры амплитудного модулятора соответствуют схеме на рис.13-1.

15. Кликните на пиктограмме спектрального анализатора. Установите диапазон измерений 100 кГц, центральную частоту 1.1 МГц.

16. Запустите процесс моделирования и измерьте уровень напряжения каждой боковой полосы. Вычислите значение мощности и сравните с данными снятыми с двойных боковых полос. Запишите полученные результаты в таблицу 13-2.

17. Прокомментируйте полученные результаты.

Предполагаемый результат

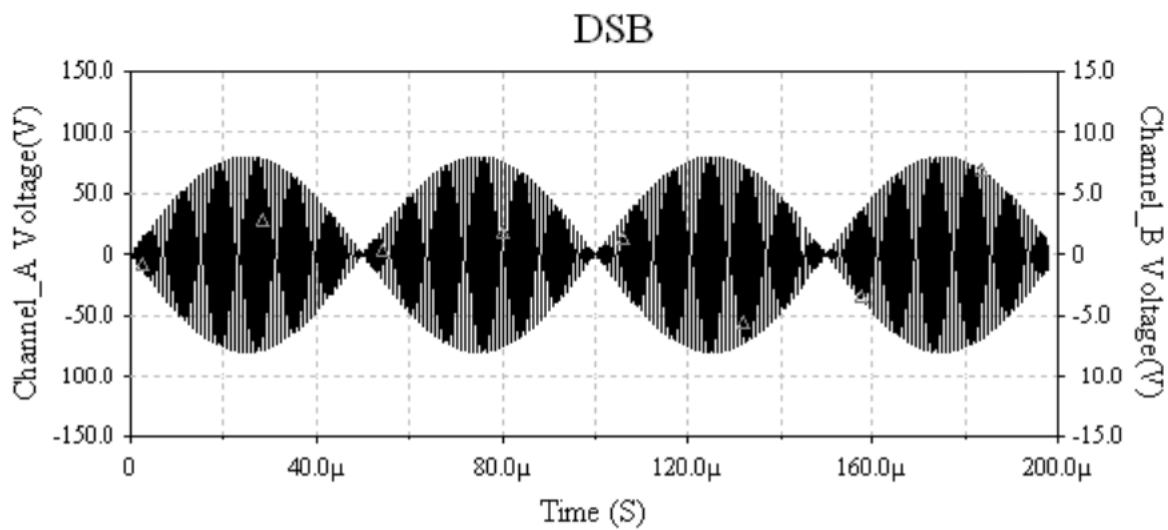


Рис. 13-3 График двухполосного сигнала.

Данные для лабораторной работы

	Измеренные значения	Аналитические значения
Нижняя частота боковой полосы		
Верхняя частота боковой полосы		

Таблица 13-1

	нижняя боковая полоса, В	верхняя боковая полоса, В	нижняя боковая полоса, мВ	верхняя боковая полоса, мВ
Две боковые полосы				
амплитудная модуляция				

Таблица 13-2

Дополнительное задание

Повторите шаги 2-6 для значений частоты модуляции 12 кГц и основной частоты 1 МГц. Измените параметры осциллографа и анализатора спектра для лучшего отображения данных. Запустите процесс моделирования и проанализируйте полученные результаты.

Лабораторная работа 14. Введение в частотную модуляцию и распознавание сигнала.

Цель работы.

Цель данной работы состоит в демонстрации характеристик и операций с простейшим частотным модулятором и детектором. В работе с амплитудной модуляцией мы рассматривали амплитуду модулированной волны, изменяющейся пропорционально изменениям в посланном сигнале. В частотной модуляции увеличение несущей частоты появляется, когда увеличена амплитуда модулируемого сигнала. FM-модулятор (FM Modulator), использующийся в данной работе состоит из управляемого напряжением генератора синусоидальных волн, встроенного в Multisim. Этот генератор синусоидальных волн действует как генератор, управляемый напряжением. Он управляется модулируемой частотой равной 500 Гц, которая подается «генератором функций» (Function Generator), как видно из рисунка 14-1. **Параметры синусоидальных волн, управляемые напряжением выставляются, когда нулевое управляющее напряжение производит выходную частоту равную 200 Гц**. Если управляющее напряжение будет 12 В, то частота на выходе составит 25 кГц.

[Схема детектора, изображенная на рисунке 14-2, является примером простейшего FM-демодулятора...]. Эта схема осуществляет основную демодуляцию для сигнала сгенерированного FM-модулятором, встроенного в Multisim, в результате на выходе будет уменьшенная амплитуда оригинального модулируемого сигнала. Для практических целей этот сигнал обычно усиливается аудио усилителем.

Элементная база.

Резисторы: 50 Ом, 220 Ом, 1 кОм, 50 кОм.

Конденсаторы: 35 нФ, 51 нФ, 1.5 мкФ, 15 мкФ, 20 мкФ, 30 мкФ.

Индукторы: 12 мкГн, 30 мкГн, 3 мГн.

Идеальный детекторный кристалл

Идеальные диоды

FM-модулятор

Оборудование.

Осциллограф (Oscilloscope)

«Генератор функций» (Function Generator)

Выполнение работы.

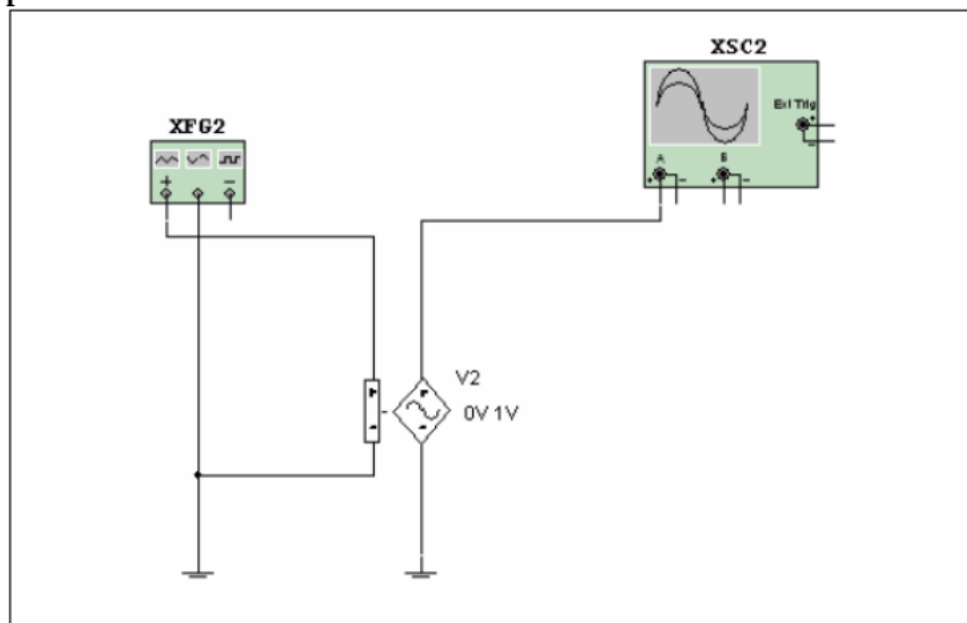


Рис. 14-1. Образец детектирования генератора, управляемого напряжением.

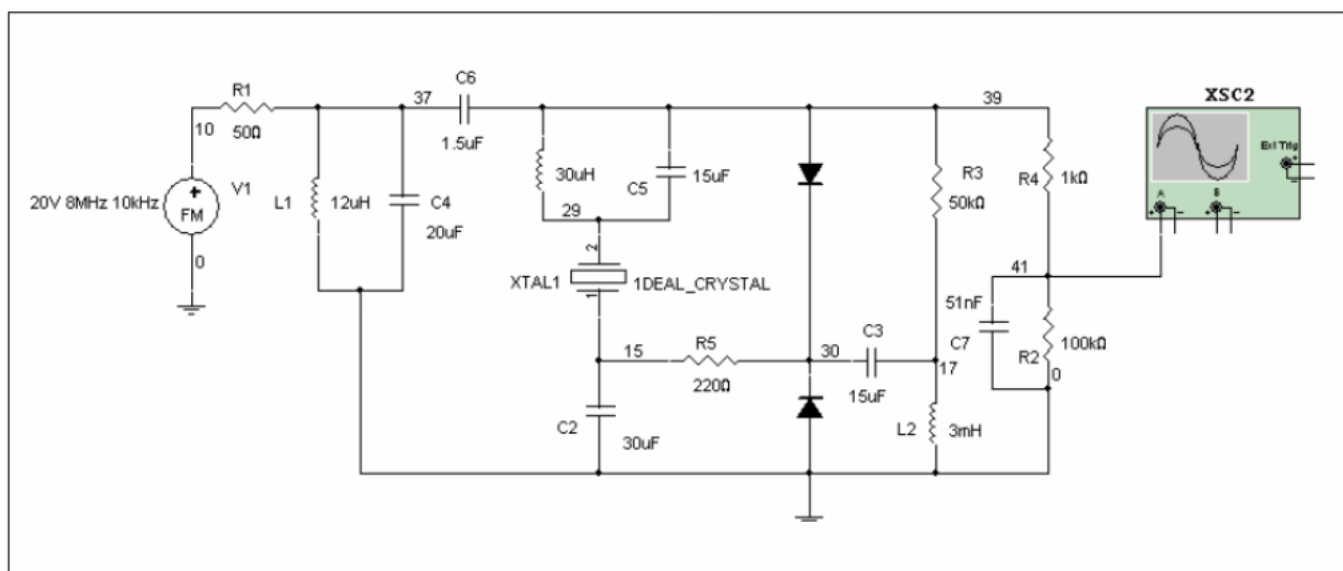


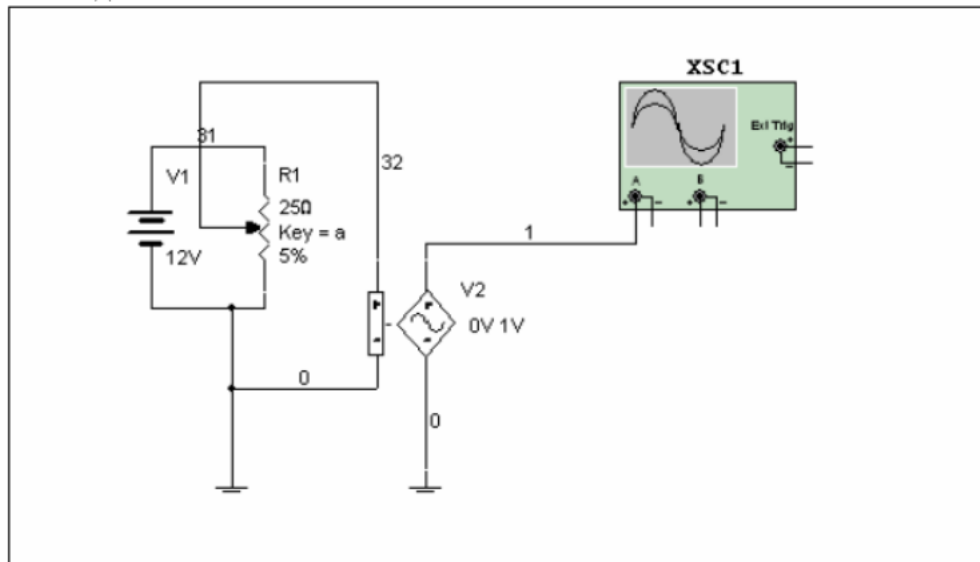
Рис. 14-2. Образец простейшего FM-демодулятора

1. Соберите схему, изображенную на рисунке 14-1.
2. Дважды щелкните на «генераторе функций» для настройки его параметров. Выберите треугольный тип сигнала (Triangle Wave), значение частоты (Frequency) выставьте равным 500 Гц, производительность (Duty Cycle) задайте равной 50%, значение амплитуды (Amplitude) установите равным 6 В, смещение (Offset) сделайте равным 7 В.
3. Дважды щелкните на генераторе синусоидальных волн, управляемого напряжением (Voltage Controlled Sine wave generator) для настройки его параметров. □.
4. Запустите моделирование и наблюдайте за частотой модулированного сигнала в амплитудно-временной области. □.
5. Соберите схему, изображенную на рисунке 14-2.
6. Дважды щелкните на FM-модуляторе для настройки его параметров и установите амплитуду напряжения (Voltage Amplitude) = 20 В, значение несущей частоты (Carrier Frequency) = 8 МГц, показатель модуляции (Modulation Index) = 5, частота сигнала (Signal Frequency) = 10 кГц.
7. Дважды щелкните на осциллографе для настройки его параметров. Установите временную ось (Time Base) в значение 100 μs/Div, а значение канала A (Channel A) выставьте равным 100 μs/Div. Выберите Auto Triggering и DC coupling. Запустите моделирование, наблюдая за частотой синусоидального сигнала на выходе детектора. Сравните эту частоту с входной частотой модуляции и убедитесь, что они одинаковы.

Данные для лабораторной работы 14.

□
 $f_m =$ _____

Дополнительное задание.



Соберите схему, изображенную на рисунке 14-3. В этой структуре генератор, управляемый напряжением, контролируется работой потенциометра, который будет моделировать низкочастотный передаваемый сигнал. Запустите моделирование и, наблюдая за выходом осциллографа, выделите потенциометр и удерживайте клавишу «А». Вы также можете, удерживая курсор над потенциометром, передвигать появившуюся панель прокрутки. □

Лабораторная работа 15. Частотная модуляция.

Цель работы

Цель моделирования состоит в демонстрации характеристик и принципа действия частотной модуляции с использованием встроенного частотного модулятора (**Frequency Modulator**) Multisim. В частотной модуляции (ЧМ), колебания частоты в модулированной волне наблюдаются вместе с изменениями в информационном (передаваемом) сигнале. Амплитудная модуляция легко подвергается воздействию шумов в атмосфере, а также помехам со стороны близкорасположенных источников, которые генерируют сигналы с частотой из полосы модулирующего сигнала. Эти ложные частоты оказывают влияние на модулированный сигнал даже после демодуляции и имеют вид радиопомех. Шум также изменяет амплитуду и ЧМ-сигналов, но поскольку модулирующие взаимоотношения проявляются именно в частотных (а не амплитудных) колебаниях, то помехи, в сущности, не приносят никакого вреда и с легкостью устраняются в процессе демодуляции. Даже если шум попадает между синусоидальными волнами несущей, таким образом потенциально влияя на частоту, почти полное подавление помехи возможно благодаря гарантированно большому отклонению несущей. Девияция частоты – это величина частотного отклонения от несущей частоты. ЧМ-радиопередача ограничивает максимальное значение девииции частоты до 75 кГц.

Модулирующий сигнал большой амплитуды приводит к большой максимальной девииции частоты. Модулирующий сигнал с малой амплитудой приводит к малой максимальной девииции частоты. Амплитуда информационного сигнала не влияет на амплитуду модулированной волны. Индекс модуляции устанавливается отношением максимального значения отклонения частоты несущей к частоте модулирующего сигнала $m = \Delta f / f_m$.

Поскольку колебания амплитуды прямопропорционально влияют на частотную девиицию в ЧМ, отсюда следует, что низкочастотный модулирующий сигнал повлечет за собой меньшее отношение частотного отклонения, так как ЧМ-сигнал будет подвергаться меньшим колебаниям амплитуды информационного сигнала в секунду, чем при высокочастотном информационном сигнале. Поэтому, важно отметить, что отношение частотного отклонения зависит от частоты информационного сигнала. Правилom ЧМ радиопередачи является ограничение максимальной частоты звуковой волны до 15 кГц. Ширина полосы пропускания W ЧМ-сигнала зависит от числа пар боковых частот с ослаблением не более 20 дБ от высоты наибольшей спектральной линии. Боковые всплески наиболее значительны и представляют собой примерно 98 % общей мощности. Число пар боковых частот зависит от индекса модуляции и это значение предсказуемо. Например, при индексе модуляции равном 3 предполагается наличие шести существенных пар боковых частот.

Связанные во времени колебания можно наблюдать при помощи осциллографа. Вернемся к тому, что частотный спектр АМ-волны содержит две боковых частоты для каждого модулирующего сигнала. Одна боковая частота равна $f_c - f_m$ и располагается ниже несущей частоты. Другая боковая частота равна $f_c + f_m$ и располагается выше несущей частоты. В ЧМ, однако, в добавление к основным боковым частотам образуемых единственно модулирующим сигналом, появляется большое количество дополнительных боковых частот. $f_c - 3f_m, f_c - 2f_m, f_c - f_m, f_c, f_c + f_m, f_c + 2f_m, f_c + 3f_m$ – лишь несколько спектральных линий, наблюдаемых в частотном диапазоне. Мощность спектральных линий убывает с удалением от несущей частоты. Увеличение индекса модуляции приводит к распределению мощности между большим числом спектральных линий.

Компоненты схемы

ЧМ модулятор (**FM Modulator**)

Осциллограф (**Oscilloscope**)

Анализатор спектра (**Spectrum Analyzer**)

Рабочие формулы

Ширина полосы пропускания:

6 существенных пар боковых частот соответствуют $m=3$.

$W = 2(\# \text{ существенных пар боковых частот})f_m$.

уравнение (15-1)

Индекс модуляции:

$$m = \Delta f / f_m$$

уравнение (15-2)

Выполнение работы

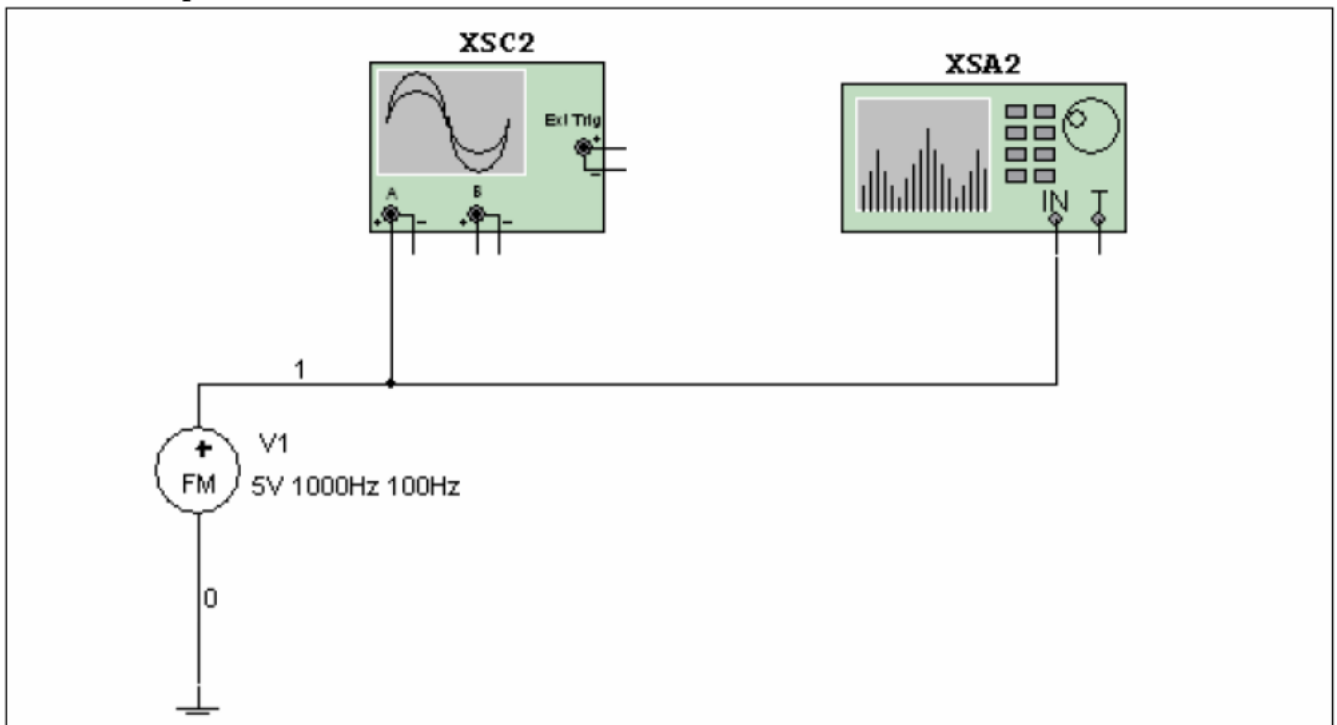


Рис.15-1. ГУН (генератор, управляемый напряжением) АМ-модулятора (VCO AM Modulator).

1. Соедините элементы схемы как это показано на рисунке 15-1.
2. Дважды щелкните мышью на иконке частотного модулятора для изменения его параметров. Установите **Voltage Amplitude** (амплитуду напряжения) = 10 В, несущую **Carrier Frequency** (несущую частоту) = 100 кГц, **Modulation Index** (индекс модуляции) = 5 и **Signal Frequency** (частоту сигнала) = 10 кГц.
3. Двойным щелчком мыши откройте экран осциллографа. Установите масштаб на временной оси 20 мкс/дел и на амплитудной оси **Channel A** 10 В/дел. Выберите **Auto triggering and DC coupling** (автозапуск и связь по постоянному току).
4. Запустите процесс моделирования и наблюдайте частотно модулированный сигнал в области зависимости амплитуды от времени. Зарисуйте соответствующую форму выходного сигнала в разделе Данные к лабораторной работе.
5. Дважды щелкните мышью на иконке частотного модулятора и измените значение **Modulation Index** (индекса модуляции) на 3.
6. Двойным щелчком мыши войдите в меню дисплея анализатора спектра. Во вкладке **Set Span** (установка диапазона измерений) установите **Span** (диапазон) = 125 кГц и **Central** (центральная частота) = 100 кГц. Нажмите **Enter**. Это позволит Вам наблюдать несущую частоту вместе с некоторыми из боковых. Рассчитайте и запишите предполагаемую девиацию частоты.
7. Изучите частотный спектр. Используйте вертикальный красный маркер для определения несущей частоты на 100 кГц. Проверьте, что выше и ниже лежащие боковые частоты соответствуют значениям $f_c - 3f_m$, $f_c - 2f_m$, $f_c - f_m$, f_c , $f_c + f_m$, $f_c + 2f_m$, $f_c + 3f_m$ и т.д. Передвигайте красный маркер через несущую для определения их положения.
8. Делая заметки об амплитуде каждой из спектральных линий, найдите наибольшую справа от несущей частоты. Запишите её значение и посчитайте число спектральных линий справа от несущей, чья амплитуда не более чем на 20 дБ ниже наибольшей. Рассчитайте ширину полосы пропускания в разделе Данные к лабораторной работе.
9. Установите индекс модуляции равным 5, запустите процесс моделирования и изучите спектр. Измените индекс модуляции на 1.5 и опишите Ваши наблюдения.

Предполагаемый результат

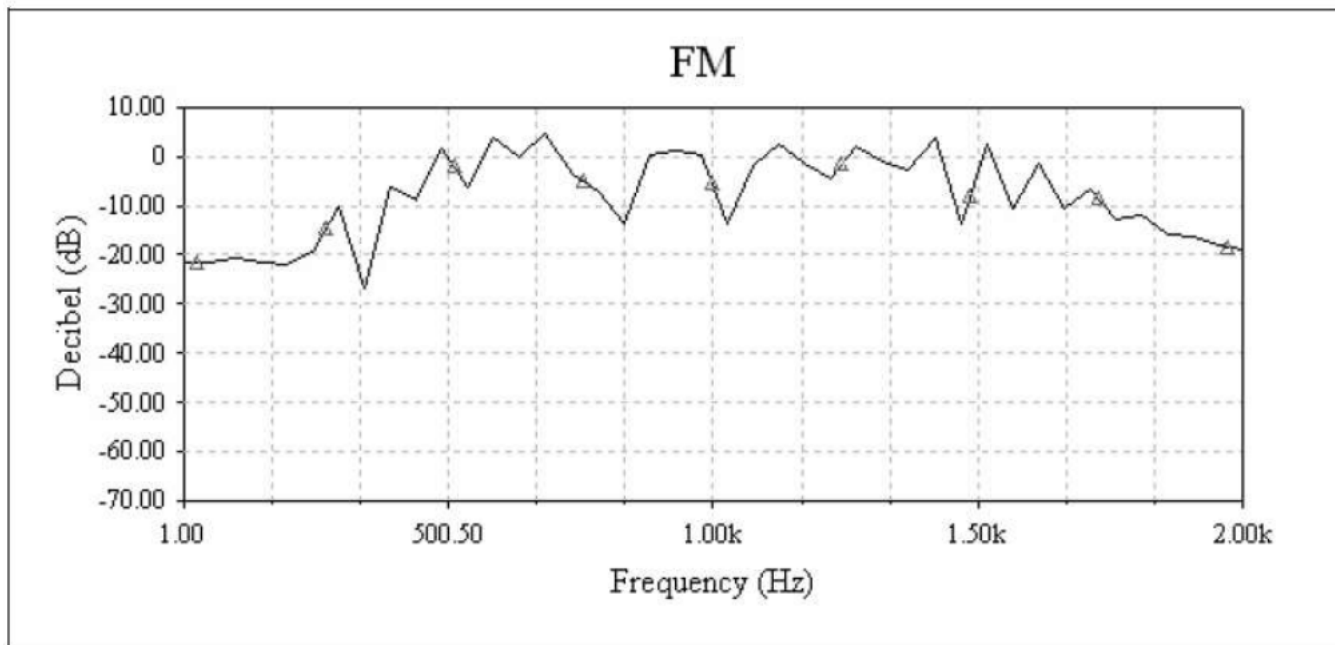
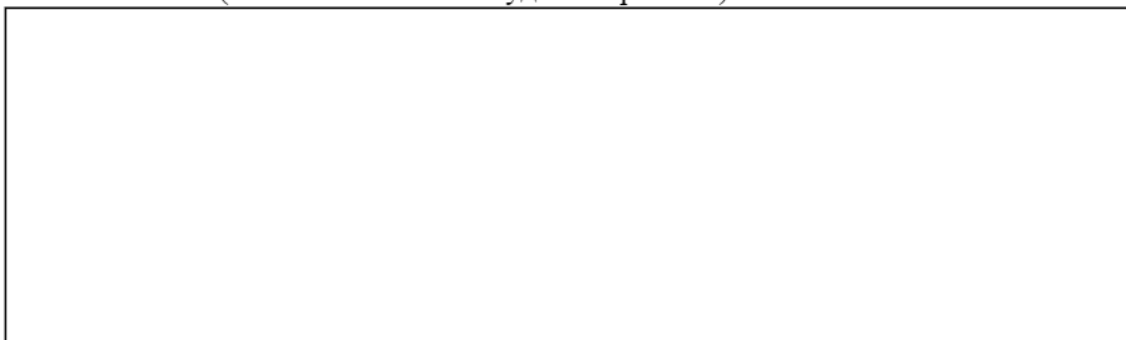


Рис.15-2. Частотный спектр ЧМ-сигнала.

Данные для Лабораторной работы 15

График ЧМ-сигнала (зависимость амплитуды от времени):



$\Delta f (m=3_{calculated}, f_m=10 \text{ кГц}) =$ _____

Ширина полосы пропускания $W (m=3, f_m=10 \text{ кГц}) =$ _____

Опишите разницу между частотными спектрами для индекса модуляции $m=5$ и $m=1.5$

Дополнительное задание

Дважды щелкните мышью на иконке частотного модулятора и измените значение **Modulation Index** (индекса модуляции) на 2.4. Запустите процесс моделирования. Опишите спектр и объясните основные характеристики (для объяснения воспользуйтесь коэффициентами Бесселя).

Лабораторная работа № 16 . Анализ рабочей точки усилителя высокой частоты по постоянному и переменному току.

Цель работы

Цель моделирования состоит в демонстрации характеристик и принципа действия рабочей точки усилителя высокой частоты по постоянному и переменному току. По названию усилителя частоты можно судить о выполняемых им функциях. Они усиливают избранную узкую полосу радиочастот. Благодаря большому количеству свойств они получили широкое распространение в радиотехнике. Усилители мощности, напряжения, частоты, буферный усилитель получили широко используются в электронной промышленности. На рис. 16-1 изображена схема радиочастотного усилителя, используемого для усиления сигналов в диапазоне 1,5 МГц. Для описания характеристик постоянного напряжения схемы, будем пользоваться анализатором рабочей точки по постоянному току (**Multisim's DC Operating Point Analysis**). При этом все источники напряжения переменного тока установлены на нуль, все конденсаторы открыты. Далее, мы будем использовать анализатор по переменному току (**Multisim's AC Analysis**) для получения примерного вида графика выходного напряжения в заданном диапазоне частот. Такие операции позволяют инженеру получить общее представление о параметрах схемы, избегая при этом лишних вычислений.

Используемые приборы

- Резисторы (**Resistors**): 10 кОм, 1 кОм, 5 кОм, 50 кОм
- Катушка индуктивности (**Inductor**): 125 мкГн
- Конденсаторы (**Capacitors**): 80 пФ, 1 мкФ
- Биполярный плоскостной транзистор n-p-n структуры (**BJT NPN Transistor IDEAL**)
- Источник напряжения переменного тока (**AC Voltage Source**)
- Осциллограф (**Oscilloscope**)

Рабочие формулы

По постоянному току формула 16-1

$$V_{bb} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{cc}$$

$$I_B = \frac{V_{BB} + V_{BE}}{R_{BB} + (\beta + 1)R_E} \quad \text{формула 16-2}$$

$$I_C = \beta I_B \quad \text{формула 16-3}$$

По переменному току формула 16-4

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$|Z| = \frac{L}{RC} \quad \text{формула 16-5}$$

$$Q = \frac{|Z|}{X_L} \quad \text{формула 16-6}$$

$$BW = \frac{f_c}{Q} \quad \text{формула 16-7}$$

Выполнение работы

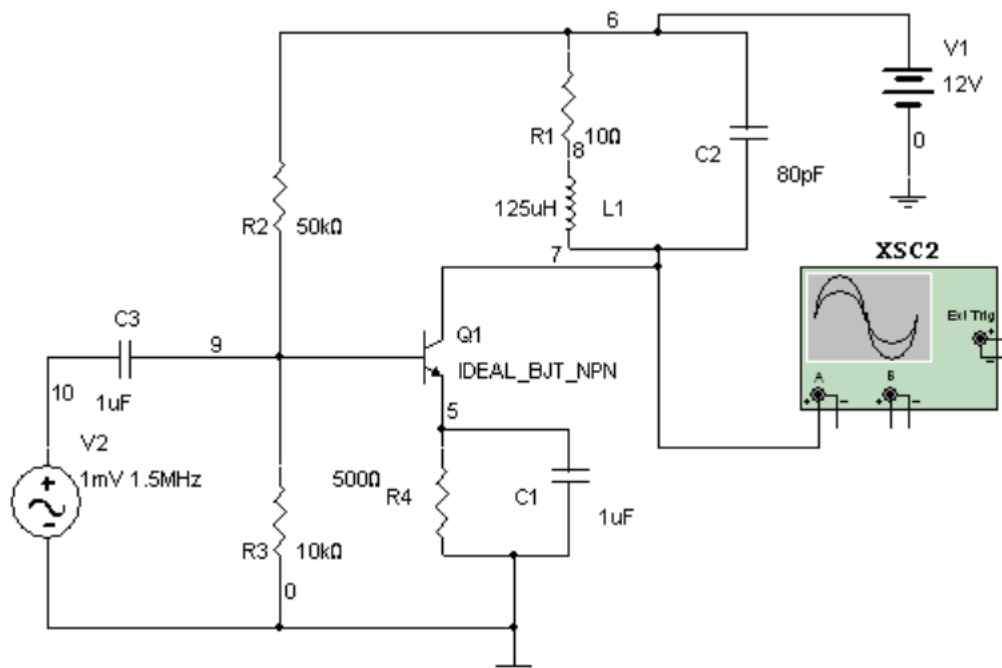


Рис.16-1. Усилитель частоты

1. Соберите схему, изображенную на рис. 16-1.
2. Кликните на пиктограмме осциллографа. Установите масштаб по оси времени 1мс/дел., а канала A (**Channel A**) 5 мВ/дел. Выберите автоматический пуск и связь по постоянному току. Выберите установки моделирования (**Simulate/Interactive Simulation Settings**) и в начальных условиях (**Initial Conditions**) установите - автоматически определять исходные состояния (**Automatically determine initial conditions**).
3. Запустите процесс моделирования и измерьте частоту осцилляции на выходе усилителя частоты. Для этого используйте приведенные рабочие формулы. Для исследования по постоянному току используйте соответствующие формулы.
4. Выберите Моделирование/Анализ/Рабочая точка по постоянному току. (**Simulate/Analyses/DC Operating Point**). Соедините выходной узел с коллектором транзистора, а узел подачи напряжения к базе.
5. Запустите процесс моделирования и сравните исследования по постоянному току с вашими вычислениями.
6. Выберите Моделирование/Анализ/Анализ по переменному току (**Simulate/Analyses/AC Analysis**). Выберите вывод в таблицу (**Output Variable tab**) и установите номер выходного порта. Запустите процесс моделирования и получите эскиз амплитудного спектра в заданном диапазоне частот. Вычислите ширину полосы частот, сравните результаты с полученными ранее.

Предполагаемый результат

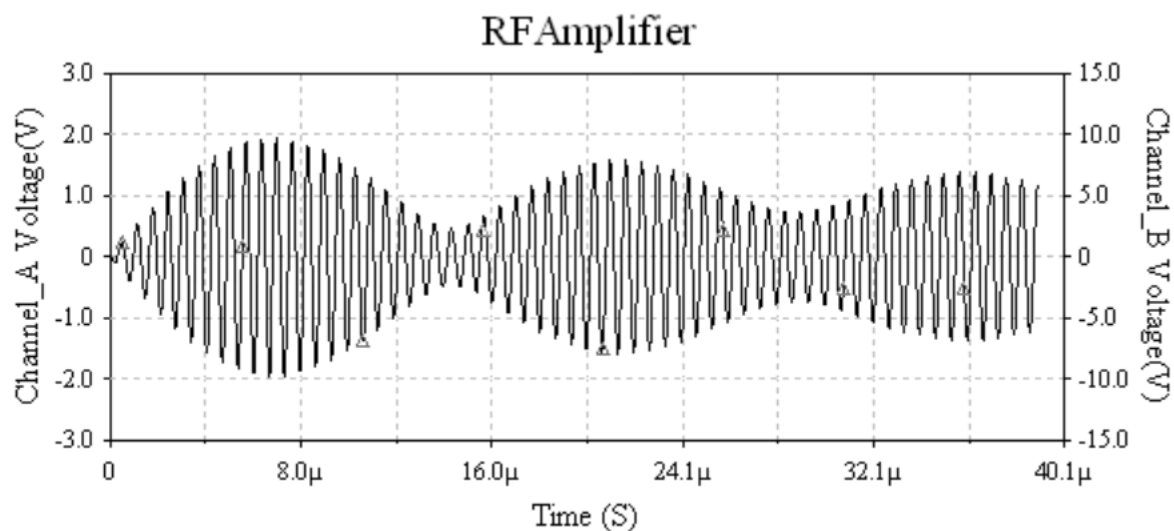


Рис. 16-2. Зависимость выходного напряжения усилителя от времени.

Данные для лабораторной работы

	Измеренные значения	Аналитические значения
f_c		
V_c		
V_b		
BW		

Таблица 16-1

Дополнительное задание

Переделайте схему усилителя частоты, для усиления частоты 1.3 МГц.

Запустите процесс моделирования включая анализ рабочей точки по переменному току для проверки рассчитанных параметров.

Лабораторная работа №17 Параметры рассеяния в двухпортовом соединении

Цель работы

Цель моделирования состоит в демонстрации характеристик параметров рассеяния при помощи анализатора соединений (Multisim's Network Analyzer). При разгоне субатомных частиц, происходят столкновения с атомами, характеризующиеся параметрами рассеяния.

Несмотря на то, что теория параметров рассеяния впервые появилась в физике, некоторая её часть используется в теории передачи информации и микроволновых устройствах. В теории передачи информации рассеяние в прямом направлении соответствует режиму передачи, а обратное рассеяние - отражению сигнала. Перекроссировка источника и нагрузки позволяет получить обратные коэффициенты S_{22} и S_{12} . Коэффициенты передачи и отражения обозначаются S_{21} и S_{11} . Известные значения коэффициентов рассеяния позволяют проектировать цепь с прибором, при этом не имеет значения внутренняя работа прибора.

Отражение или рассеяние электромагнитных волн является фундаментом для анализа и проектирования микроволновых схем. В данной работе вычисление значений параметров рассеяния будет производиться на примере двухпортового соединения при помощи анализатора соединений.

Используемые приборы

- Резисторы 25 Ом, 50 Ом, 100 Ом
- Катушка индуктивности 30нГн
- Осциллограф (**Oscilloscope**)

Рабочие формулы

$$S_{11} = \Gamma_i \quad \text{формула 17-1}$$

$$S_{12} = \frac{V_i}{V_0^+} \quad \text{формула 17-2}$$

$$S_{21} = \frac{V_0}{V_i^+} \quad \text{формула 17-3}$$

$$S_{22} = \Gamma_0 \quad \text{формула 17-4}$$

Выполнение работы

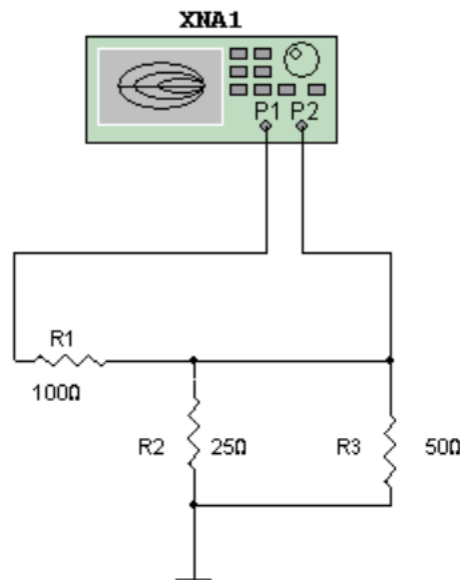


Рис. 17-1 Пример двухпортового соединения.

- 18. Соберите схему, изображенную на рис. 17-1.
- 19. Кликните на пиктограмме анализатора соединений.
- 20. **Убедитесь, что режим (Mode box) анализатора соединений установлен в режим измерения (Measurement)** и запустите процесс моделирования. В выпадающем меню параметров (**Parameters**) и выберите параметры рассеяния. Выберите отображение в полярной системе координат. Запишите значения, полученных коэффициентов S_{11} , S_{12} , S_{21} и S_{22} в таблицу 17-1. Вычислите коэффициенты аналитически и сравните с полученными.

Данные для лабораторной работы

	Измеренные значения	Аналитические значения
S_{11}		
S_{12}		
S_{21}		
S_{22}		

Таблица 17-1

Дополнительное задание

Замените резистор 100 Ом на катушку индуктивности 30нГн. Запустите процесс моделирования. Нажмите правую стрелку горизонтальной полосы прокрутки в секции маркеров (**Marker section**) анализатора соединений, и наблюдайте частоту 158.49 МГц. Это значение соответствует индуктивному сопротивлению $+j30$ Ом. Запишите параметры рассеяния, коэффициент прямого усиления, и сравните полученные результаты с результатами вычислений, если вместо резистора 100 Ом, использовать импеданс $+j30$ Ом.

Лабораторная работа 18. Коэффициент передачи в прямом направлении в двухпортовом соединении.

Цель работы

Цель данного моделирования состоит в демонстрации характеристик усиления мощности в прямом направлении для двухпортовых цепей. В радиотехнических приложениях усиление тока и напряжения зачастую бывает необходимым с целью обеспечения достаточной мощности для определенных нагрузок. В Multisim оба источника и входное полное сопротивление нагрузки имеют значение по умолчанию 50 Ом. Анализатор сети (Network Analyzer) вычисляет общее усиление по мощности (УМ), допустимое усиление по мощности (ДУМ), усиление по мощности в приемнике (УМП) для определенной частоты. Для вычисления этих усилений используются s-параметры матрицы рассеяния. В данной лабораторной работе мы будем использовать анализатор сети (Network Analyzer) для получения коэффициента усиления по мощности в приемнике (УМП), который является отношением мощности на нагрузке к мощности, доступной на источнике. Это представляет собой коэффициент передачи в прямом направлении в двухпортовом соединении и выражается в дБ как $10 \log |УМП|$. УМП вычисляется через параметр рассеяния $|S_{21}|$.

Компоненты схемы

Резисторы: 25 Ом, 50 Ом, 100 Ом (**Resistors**)

Катушки индуктивности: 30 нТл, 60 нТл (**Inductor**)

Анализатор сети (**Network Analyzer**)

Рабочие формулы

Усиление по мощности в прямом направлении = $|S_{21}|^2$

уравнение (18-1)

$S_{21} = V_o / V_i^+$

уравнение (18-2)

Выполнение работы

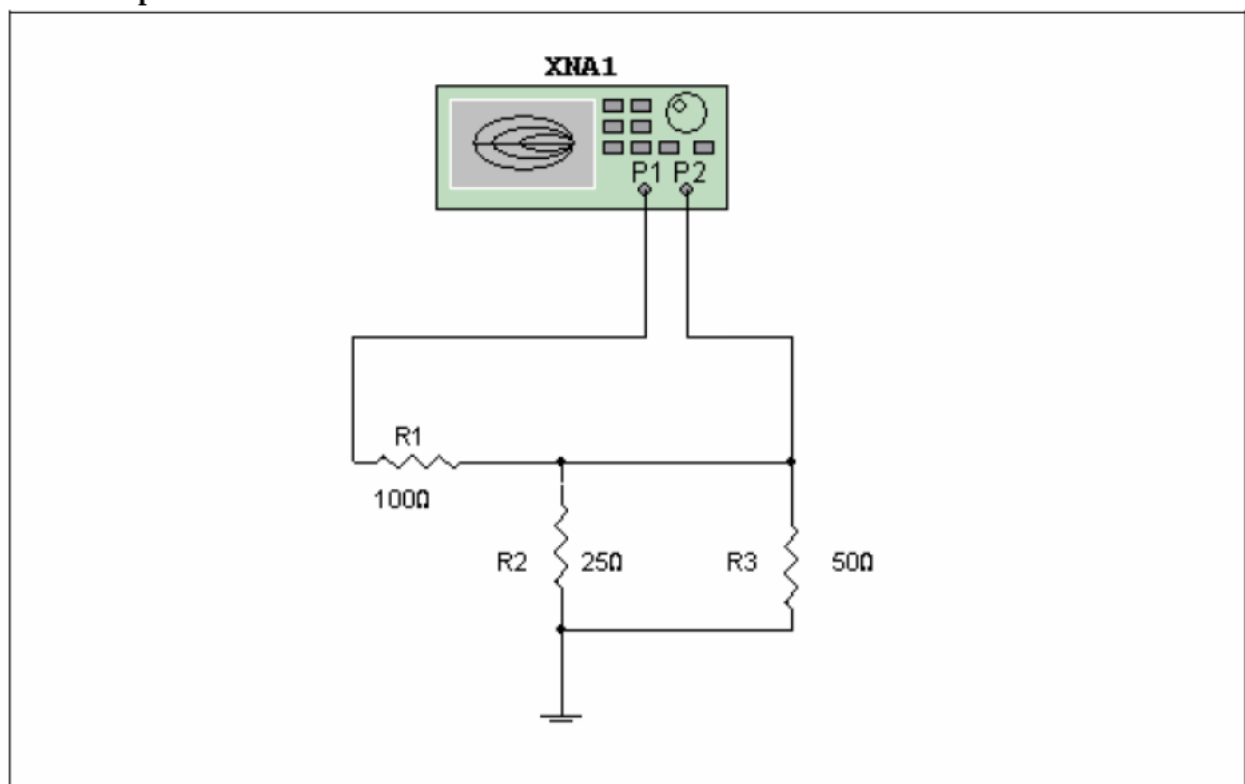


Рис.18-1. Простая двухпортовая цепь.

1. Соедините элементы схемы как это показано на рисунке 18-1.
2. Двойным щелчком мыши на виртуальном компоненте, откройте **Network Analyzer** (Анализатор сети).
3. Запустите процесс моделирования и убедитесь, что вкладка установлена на **RF Characterizer** (Отображение радиочастотных характеристик).
4. Запишите значение усиления в приемнике по мощности (УПМ).

- Изучите двухпортовую схему и сравните рассчитанные значения с измеренными.
- Замените 100-Омный резистор на 30 нТл индуктивности и перезапустите процесс моделирования. Нажмите правую стрелку на полосе прокрутки в разделе маркеров (**Marker Section**) анализатора сети и найдите частоту равную 158.4893 МГц. Это значение соответствует импедансу в $j30 \text{ Ом}$.
- Рассчитайте новое значение УМП и сравните с измеренными данными.

Данные для Лабораторной работы 18

	Измеренное значение	Ожидаемое значение
Усиление по мощности в прямом направлении $R1=100$		
Усиление по мощности в прямом направлении $L1=30 \text{ нТл}$		

Таблица 18-1

Дополнительное задание

Замените 100-Омный резистор на 60 нТл индуктивность. Запустите процесс моделирования. Нажмите правую стрелку на полосе прокрутки в разделе маркеров (**Marker Section**) анализатора сети и найдите частоту равную 251.19 МГц. Это значение соответствует индуктивному импедансу в $+j50 \text{ Ом}$. Запишите s-параметры и сверьте результаты с вычислениями используя импеданс в $+j50 \text{ Ом}$ вместо 100-Омного резистора.

Лабораторная работа 19 Контуров устойчивости.

Цель работы

Цель данного моделирования состоит в демонстрации характеристик и принципа действия контуров устойчивости. Для того, схема была устойчивой, несмотря на любые скачки в усилителе, частота осцилляции или же частота самого прибора должна быть меньше частоты выходного сигнала. Контуров устойчивости используют различные частоты для определения устойчивости исследуемых схем.

Контуров устойчивости в Multisim использует круговую диаграмму полных сопротивлений, (диаграмму Водьперта – Смита) входной и выходной устойчивой схемы. Любые неустойчивые участки отображаются на диаграмме электрическими шумами. Термин безусловно устойчивая означает, что любой источник тока (напряжения), любое входное сопротивление может быть использовано и в этом случае никаких помех не будет. Термин потенциально неустойчивая означает, что любое входное сопротивление выбранное для проектирования схемы должно быть за границей шума **ВХОДНОГО КРУГА УСТОЙЧИВОСТИ**, а выходное сопротивление должно быть за границей шума **ВЫХОДНОГО КРУГА УСТОЙЧИВОСТИ**.

По значения параметров Δ и K в окне **Match Net** также можно судить о условиях устойчивости. Если $K > 1$ и $\Delta < 1$, схема – абсолютно устойчива. Если $K < 1$ или $\Delta > 1$, то будут происходить хаотические колебания, и усилитель будет потенциально неустойчивым.

Используемые приборы

- Резисторы (**Resistors**): 10 Ом, 1 кОм, 5 кОм, 25 кОм
- Катушка индуктивности – значение будет вычислено во время выполнения работы
- Конденсаторы: 0.01 Ф, значение будет вычислено во время выполнения работы
- Радиотехнический транзистор n-p-n структуры (**RF NPN Transistor MMBR901L**)
- Анализатор соединения (**Network Analyzer**)

Рабочие формулы

Условие устойчивости
 $\Delta < 1 \text{ and } K > 1$

формула 19-1

Частота резонанса

формула 19-2

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Выполнение работы

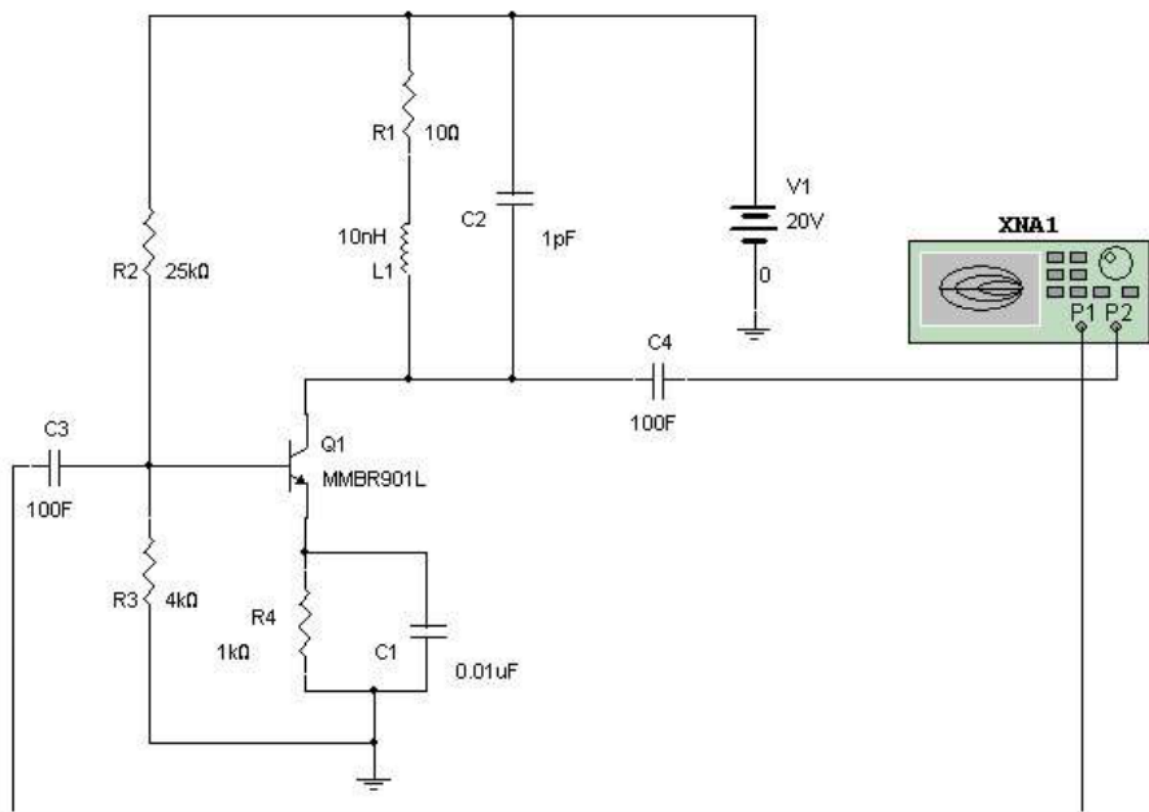


Рис. 19-1. Усилитель радиочастоты

1. На рис. 19-1 изображена схема радиочастотного усилителя. Переделайте её таким образом, чтобы она резонировала на частоте 1.59 ГГц. Замените идеальный (**NPN transistor**) п-р-п транзистор на радиочастотный транзистор. Выберите транзистор MMBR901L. Добавьте конденсаторы емкостью 100Ф. Добавьте оставшиеся компоненты L_1 и C_2 с рассчитанными значениями.
2. Кликните по пиктограмме анализатора соединения.
3. Запустите процесс моделирования. Выберите условие устойчивости (*Stability Factor*) в меню параметров (*Parameter*). Измените частоту до 2.29 ГГц и запишите значения коэффициентов delta и K для этой частоты.
4. Выберите *Match Net Designer* в меню *Mode*. Измените частоту до 2.29 ГГц. Проследите появление шумов на диаграмме Водьперта – Смита. Что это означате?
5. Увеличьте частоту до 3.981 ГГц. Исследуйте параметры шума и запишите значения коэффициентов delta и K. Уменьшите частоту до частоты резонанса - 1.59 ГГц и запишите значения коэффициентов delta и K. Опишите параметры шумов.

Данные для лабораторной работы

Рассчитанное значение $C_2 @ f = 1.59 \text{ ГГц}$ _____

Рассчитанное значение $L_1 @ f = 1.59 \text{ ГГц}$ _____

	Delta	X
$f = 2.29 \text{ ГГц}$		
$f = 3.36 \text{ ГГц}$		
$f = 1.59 \text{ ГГц}$		

Таблица 19-1

Что показывает область шумов? _____

Опишите параметры шума при резонирующей частоте – 1,59 ГГц.

Дополнительное задание

Переделайте схему таким образом, чтобы она резонировала на частоте 5 ГГц. Добавьте необходимые элементы. Повторите шаг 1. Прокомментируйте полученные результаты.

Лабораторная работа 20. Согласование сопротивлений.

Цель работы.

Цель данного моделирования заключается в демонстрации характеристик согласования сопротивлений. Анализ входного и выходного импеданса, как правило, осуществляется с передачей мощности и требованиям к полосе пропускания. Согласование сопротивлений играет важную роль, потому что не подходящее соответствие входа или выхода может явиться результатом потери мощности. Идеальная передача мощности без потерь невозможна из-за внутреннего сопротивления, присущего источникам напряжения и тока. Это внутреннее сопротивление ограничивает ток, который предоставляется источником тока и уменьшает выходное напряжение, переданное нагрузке. Значение оптимального импеданса достигается в тот момент, когда достигнута максимальная мощность. Максимальное значение передачи мощности ограничивает возможности схемы к более узкой полосе пропускания []

[]

Элементная база.

Резисторы: 10 Ом, 1 кОм, 5 кОм, 25 кОм

Индукторы: вычисляются

Конденсаторы: 100 Ф, вычисляются

Радиочастотный п-р-п транзистор MMBR901L

Оборудование.

Сетевой анализатор (Network Analyzer)

Рабочие формулы.

Условие стабильности

$$\Delta < 1 \text{ и } K > 1 \quad (20-1)$$

Резонирующая частота

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (20-2)$$

Выполнение работы.

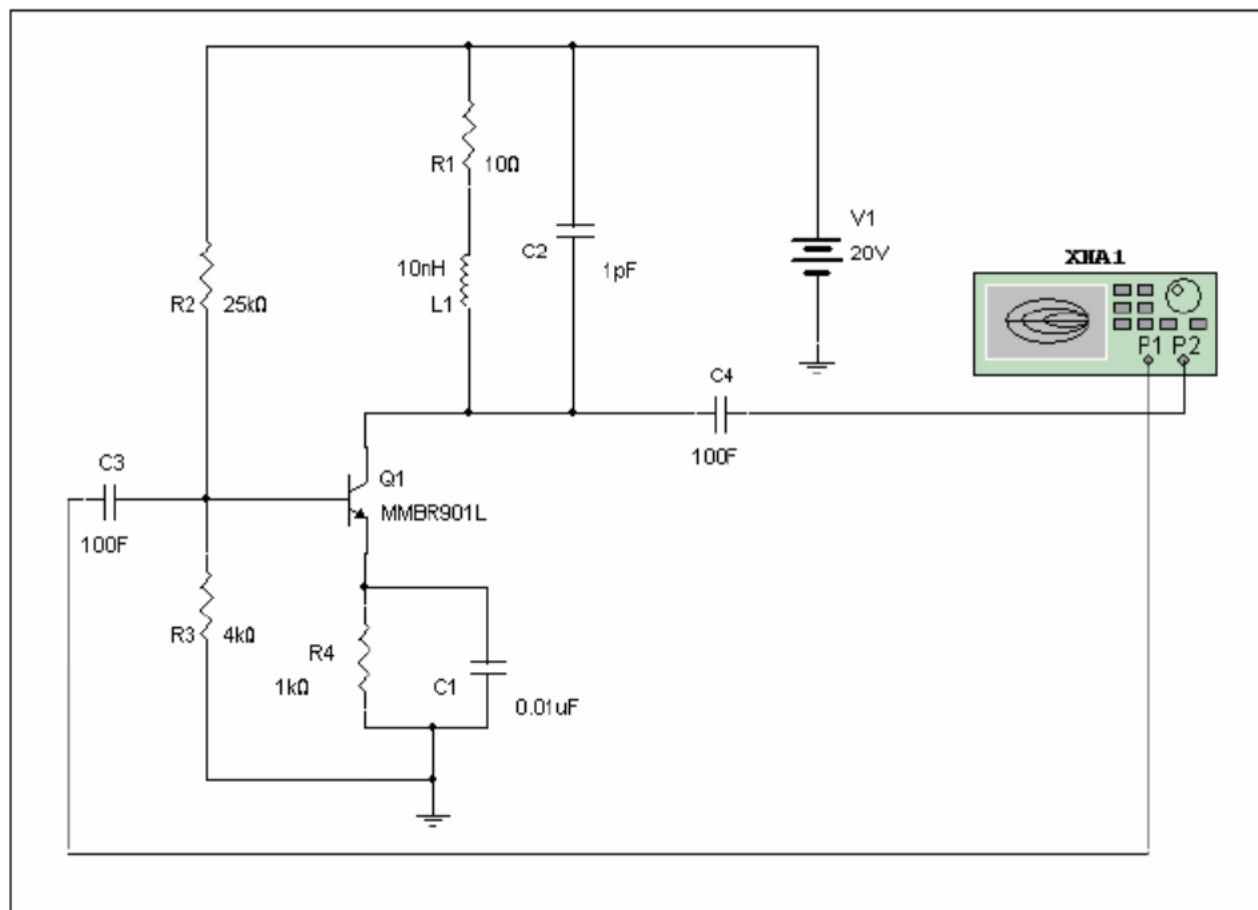


Рис. 20-1. Образец радиочастотного усилителя.

1. Цепь, изображенная на рисунке 20-1 похожа на модель схемы, которую мы рассмотрим в нашем эксперименте с радиочастотным усилителем. Перестройте схему, изображенную на рисунке 20-1, чтобы резонирующая частота была равна 5.3 ГГц. Замените радиочастотный транзистор с идеальным п-р-п транзистором. Выберите транзистор MMBR901L. Вставьте конденсаторы емкостью 100 Ф. Выберите остальные компоненты из панели компонентов, включающие в вашу схему значения L_1 и C_2 .
2. Двойным щелчком на сетевом анализаторе (Network Analyzer) откройте его дисплей.
3. Запустите моделирование и выберите «Коэффициент устойчивости» (Stability Factor) в качестве «Параметра» (Parameter). Используя панель прокрутки, измените частоту до 5.2481 ГГц. Запишите значения для δ и для K при такой частоте. Проверьте, что усилитель «безоговорочно устойчивый» при этой частоте.
4. Выберите (Match Net Designer) в качестве «Режима» (Mode). Измените частоту до 5.2481 ГГц в качестве желаемой рабочей точки и выберите ярлык «Согласование сопротивлений» (Impedance Matching). Включите параметр «Авто согласование» (Auto Matching). □
5. Перестройте схему, чтобы резонирующая частоты была равна 7 ГГц.
6. Перезапустите моделирование и «Коэффициент устойчивости» в качестве «Параметра». Используя панель прокрутки, измените частоту до 6.9183 ГГц. Повторите шаги 2-4, используя эту частоту.

Данные для лабораторной работы 20.

Расчетные данные для $C_2, f = 5.3 \text{ ГГц}$ _____
Расчетные данные для $L_1, f = 5.3 \text{ ГГц}$ _____
Расчетные данные для $C_2, f = 7 \text{ ГГц}$ _____
Расчетные данные для $L_1, f = 7 \text{ ГГц}$ _____

Дополнительное задание.

Перестройте радиочастотный усилитель так, чтобы значение резонирующей частоты было равным 1.59 ГГц. Выполните модель, заменяя необходимые компоненты. Повторите шаги 2-4, используя значение рабочей частоты как можно ближе к 1.59 ГГц.

Лабораторная работа 21. Волноводы.

Цель работы

Цель моделирования состоит в демонстрации характеристик волноводов. Волноводом является любая среда, проводящая волны. Волноводы применяются для частот свыше нескольких гигагерц, когда использование коаксиального кабеля приводит к скин-эффекту, затуханию радиоизлучения и потерям сигнала. Электромагнитная волна, подаваемая на вход при помощи пусковой установки, ограничивается волноводом и отражается от его проводящих стенок. Предусматривается большой разброс, позволяющий передавать сотни тысяч ватт мощности без пробоя каких-либо несуществующих диэлектрических барьеров между проводниками, как в случае с коаксиальным кабелем. Это выражается в очень малых потерях. Затем сигнал принимается поглотителем сигналов. Очень важно обратить внимание на размеры волновода. Полосы частот волновода имеют определенные буквенные обозначения для диапазонов указанных размеров, частот и критических длин волн. Критическая частота волновода – наименьшая частота, с которой сигнал распространяется по проводящему каналу действующего волновода. Эта частота обычно выражается как длина волны, которая ограничивает её (волны) способность к распространению. Поведение действующих волноводов очень схоже с фильтрами верхних частот, обеспечивая высокое подавление сигнала на частотах меньше критической.

Характеристический импеданс – это полное сопротивление, которое может быть измерено на входе волновода бесконечной длины, и выражается следующим

образом:

$$Z_{OL} = \frac{120\pi}{\left[1 - \left(\frac{\lambda_{fs}}{\lambda_{CL}}\right)^2\right]^{1/2}}, \text{ где } \lambda_{fs} = \frac{c}{f} - \text{произвольная длина волны,}$$

и $\lambda_{CL} = 2(\text{broadwall dimension of the waveguide})$????

Компоненты схемы

Резисторы: 55 Ом (**Resistors**)

Образцовый волновод (**Sample Waveguide**)

Источник напряжения переменного тока (**AC Voltage Source**)

Осциллограф (**Oscilloscope**)

Рабочие формулы

Характеристический импеданс:

$$Z_{OL} = \frac{120\pi}{\left[1 - \left(\frac{\lambda_{fs}}{\lambda_{CL}}\right)^2\right]^{1/2}} \quad \text{уравнение (21-1)}$$

1)

$$\lambda_{fs} = \frac{c}{f} - \text{произвольная длина волны} \quad \text{уравнение (21-2)}$$

2)

$$\lambda_{CL} = 2(\text{broadwall dimension of the waveguide}) - \text{критическая длина волны} \quad \text{уравнение (21-3)}$$

3)

$$f_{CL} = c / \lambda_{CL} - \text{критическая частота, где} \\ c = 2.9974 \times 10^{10} \text{ см / с} \quad \text{уравнение (21-4)}$$

4)

Волновод прямоугольного сечения (C-band waveguide)

Диапазон частот = 4,9 – 7,05 ГГц

Broadwall dimension of the waveguide в см = 4,039 ???

Волновод круглого сечения (P-band waveguide)

Диапазон частот = 18 – 26,5 ГГц

Broadwall dimension of the waveguide в см = 1,580 ???

Выполнение работы

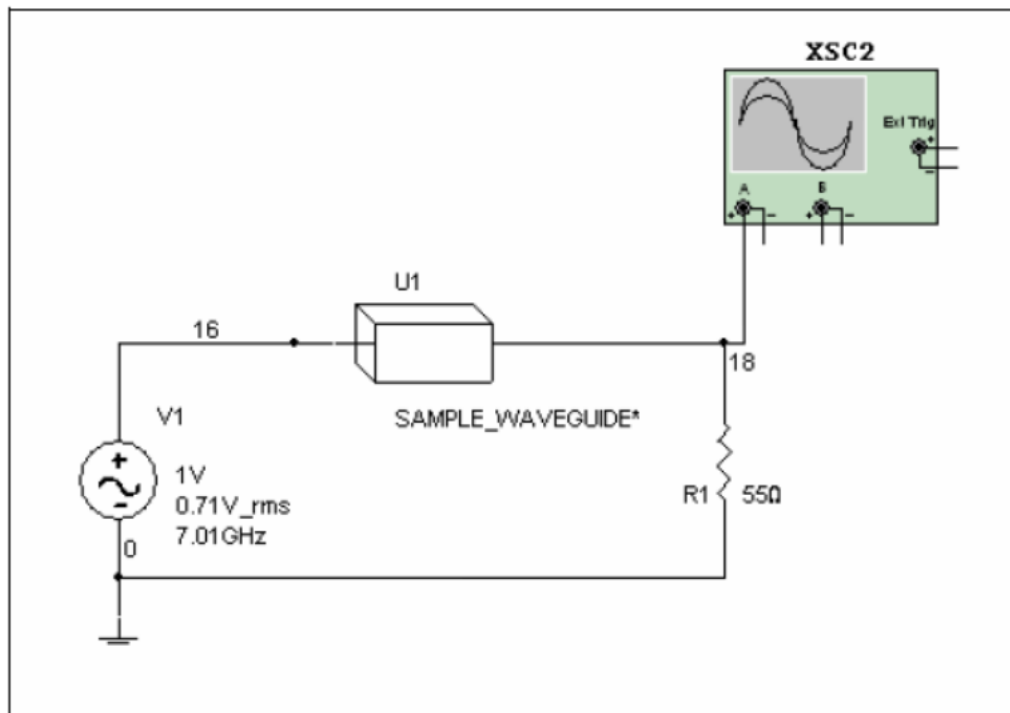


Рис.21-1. Пример работы волновода.

1. Соберите схему, изображенную на рис. 21-1.
2. Вычислите нижнюю допустимую для распространения сигнала частоту для волновода прямоугольного сечения. Запишите результаты в разделе Данные для лабораторной работы. Задайте частоту для источника напряжения переменного тока равную 4,9 ГГц.
3. Дважды щелкните на образцовом волноводе. Выберите **Edit Model** (изменить модель). Измените **Spice (?)**- параметры так, чтобы $LEN=4,039 \text{ e-}002$.
4. Двойным щелчком мыши откройте окно осциллографа. Установите масштаб по временной оси 0,2 нс/дел и на амплитудной оси **Channel A** = 1 В/дел. Запустите процесс моделирования и изучите сигнал на выходе. Измерьте частоту для того, чтобы убедиться в правильности распространения сигнала смоделированным волноводом. Запишите результаты.
5. Задайте частоту для источника напряжения переменного тока равную 7,05 ГГц. Перезапустите процесс моделирования и запишите результаты. Убедитесь в правильности распространения сигнала смоделированным волноводом. Снова запустите процесс моделирования и запишите результаты.
6. Вычислите характеристический импеданс для волновода прямоугольного сечения. Запустите процесс моделирования.

Предполагаемый результат

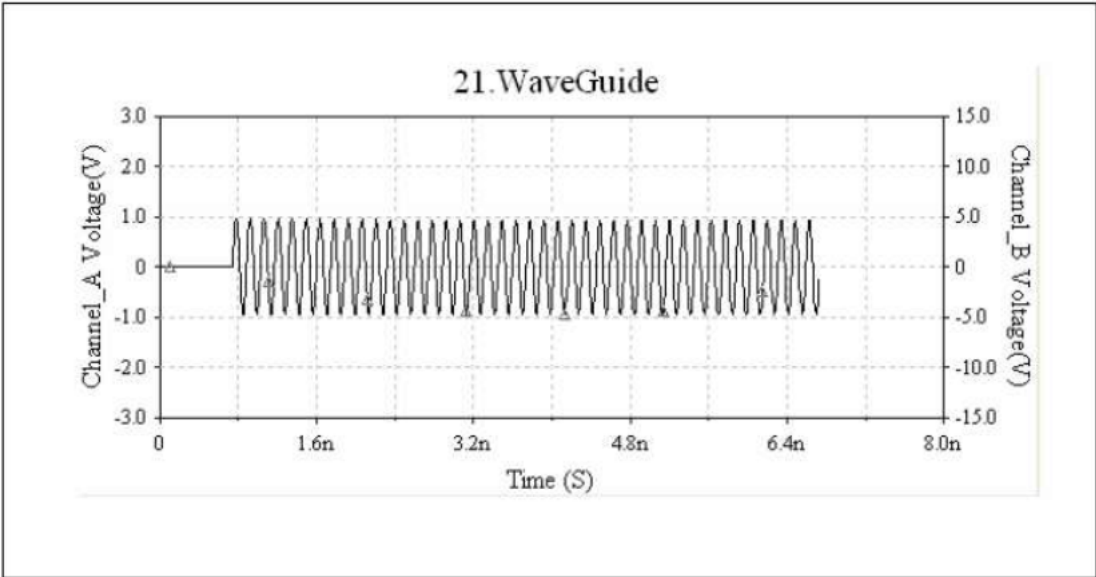


Рис.21-2. Зависимость амплитуды от времени для сигнала на выходе волновода.

Данные для Лабораторной работы 21

$f_{CL} =$ _____

	Предполагаемая (нижняя)	Измеренная (нижняя)	Предполагаемая (верхняя)	Измеренная (верхняя)
Частота распространения (волновод прямоугольного сечения)				

Таблица 21-1

$Z_{OL} =$ _____

Дополнительное задание

Повторите все перечисленные шаги для волновода круглого сечения. Сверьте результаты.

ОТВЕТЫ

Лабораторная работа 1.

Используя $P = V^2/R_L$

Расчет мощности (1 кГц) = $(9,997 \text{ В})^2 / 1 \times 10^3 \text{ Ом} = 99,9 \text{ мВт}$

Расчет мощности (10 кГц) = $(9,875 \text{ В})^2 / 1 \times 10^3 \text{ Ом} = 97,5 \text{ мВт}$

Частота, кГц (измеренная)	Линейное напряжение, В (измеренное)	Мощность, мВт (Рассчитанная)	Частота, кГц (Полагаемая)	Линейное напряжение, В (Полагаемое)
1	9.997	99.9	1	10
10	9.875	97.5	10	10

Таблица 1-1.

Разница = Конец – Начало = 15 кГц – 5 кГц = 10 кГц

Частота, кГц	Начало, кГц	Конец, кГц	Разница, кГц (Измеренная)	Разница, кГц (Полагаемая)
10	5	15	10	10

Дополнительное задание к лабораторной работе 1

□

Лабораторная работа 2

Сигнал прямоугольной формы

Используя формулу 2-2

Среднеквадратическое напряжение = $4 (10) / 4,44 = 9 \text{ В}$, затем

Мощность $P = V^2/R_L = 9^2 / 1 \times 10^3 = 81 \text{ мВт}$

	Измеренная частота	Измеренное среднеквадратическое напряжение (В)	Измеренная мощность (мВт)	Предполагаемое среднеквадратическое напряжение (В)	Предполагаемая мощность (мВт)
f ₀	10 кГц	8,045	64,7	9	81
f ₃	30 кГц	3,6	12,96	3	9
f ₅	50 кГц	2,187	4,783	1,8	3,24

Таблица 2-1. Результаты для сигнала прямоугольной формы.

$P_{общая} (\text{мВт}) = 64,7 + 12,96 + 4,783 =$

= *Общая мощность в мВт (измеренная)* 82,44

Показания общей мощности в мВт с Ваттметра 100

Сигнал пилообразной формы

$$r_{ms} = \frac{\text{amplitude}}{\sqrt{3}}$$

Используя формулу 2-4

Среднеквадратическое напряжение = $2 (10) / 5,44 = 3,68 \text{ В}$, затем

Мощность $P = V^2/R_L = 3,68^2 / 1 \times 10^3 = 13,54 \text{ мВт}$

	Измеренная частота	Измеренное среднеквадратическое напряжение (В)	Измеренная мощность (мВт)	Предполагаемое среднеквадратическое напряжение (В)	Предполагаемая мощность (мВт)
f_0	10 кГц	4,295	18,45	3,68	13,54
f_2	20 кГц	1,736	3	1,84	3,39
f_3	30 кГц	0,77	0,59	1,23	1,5

Таблица 2-2. Результаты для сигнала пилообразной формы.

$$P_{общая} (мВт) = 18,45 + 3 + 0,59 = 22,04$$

$$= \text{Общая мощность в мВт (измеренная)} \quad \underline{22,04}$$

$$\text{Показания общей мощности в мВт с Ваттметра} \quad \underline{33}$$

Дополнительное задание к лабораторной работе 2

	Измеренная частота	Измеренное Среднеквадратическое напряжение (В)	Измеренная мощность (мВт)
f_0	1 кГц	2,34	5,47
f_3	3 кГц	0,26	0,068
f_5	5 кГц	0,087	0,0075

$$P_{общая} (мВт) = 5,47 + 0,068 + 0,0075 = 5,55$$

$$\text{Показания общей мощности в мВт с Ваттметра} \quad \underline{8,33}$$

Лабораторная работа 3

Используя уравнение (3-1):

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{(200e-6)(220e-12)}} = 758.7 \text{ кГц}$$

Децибелы, соответствующие частоте $f = 8 \text{ кГц} = 20 \log 490 \times 10^{-3} = -6.2 \text{ дБ}$

Частота	Амплитуда (мВ)	Значение в децибелах (дБ)
7.6 кГц	900	-0.915
76 кГц	100	-20
$f_c =$	0.260	-71.7
760 кГц	0.300	-70.46
7.6 МГц	100	-20
76 МГц	800	-1.94

Таблица 3-1

Наклон превышает -40 дБ/дек вблизи центральной частоты для данного фильтра 2-го порядка.

Дополнительное задание к лабораторной работе 3

Преобразованное уравнение (3-1):

$$C = 1/4Bf_c^2 L = 124 \text{ нФ}$$

Частота	Амплитуда (мВ)	Значение в децибелах (дБ)
10.1 кГц	490	-6.19
101 кГц	700	-3.1
1010 кГц	0.20	-73.98
10.1 МГц	75	-22.4
101 МГц	600	-4.44

Наклон превышает предполагаемое значение -40 дБ/дек вблизи f_c .

Лабораторная работа 4

Используя формулы 4-1 и 4-2:

$$BW = \frac{2,2}{2\pi(33e-6)} = 10,6 \text{ кГц} \quad Q = \frac{1}{2,2} \sqrt{\frac{33e-6}{2,4e-9}} = 53,3$$

Используя формулу 4-4:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2,4e-9)(33e-6)}} = 565 \text{ кГц}$$

	Измеренные значения	Вычисленные значения
BW	10 кГц	10,6 кГц
f _c	565,5 кГц	565,5 кГц
Q	-----	53,3

Таблица 4-1

Децибелы, соответствующие частоте $f_c = 20 \log 600 \times 10^6 = -64$

Частота	Амплитуда, В	Коэффициент, дБ
f _c = 565,5 кГц	600×10 ⁶	-64
600 Гц	1×10 ⁻⁹	-180
6 кГц	1×10 ⁻⁶	-120
60 кГц	2,5×10 ⁻⁶	-112
600 кГц	140×10 ⁻⁶	-77
6 МГц	2,5×10 ⁻⁶	-112
60 МГц	1×10 ⁻⁶	-120
600 МГц	1×10 ⁻⁹	-180

Таблица 4-2

Для этого фильтра 2-го порядка наклон приближается к значению -40 дБ/дек вблизи f_c

Лабораторная работа 5

Лабораторная работа 6

Используя уравнение (6-1)

$$f_c = \frac{1}{2\pi(10e-9)(10e3)\sqrt{6}} = 649.7 \text{ Гц}$$

	Измеренное значение	Вычисленное значение
Частота (Гц)	650	649.7
R _f /R в точке начала колебаний	29	29

Таблица 6-1

Дополнительное задание к лабораторной работе 6

Преобразуя уравнение (6-1):

$$C = \frac{1}{2\pi(900)(10e3)\sqrt{6}} = 7.2 \text{ нФ}$$

Лабораторная работа 7

Используя формулу 7-1

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0,5+0,5)e-3(1e-6)}} = 5032,9 \text{ Гц} \quad (\text{Вычисленное})$$

$$f_c = 5 \text{ кГц} \quad (\text{Измеренное})$$

Шаг 5.

$$f_c = 5033 \text{ Гц}$$

Шаг 6.

$$I_B = V_B - V_{BE}/R_{BB} + (\beta+1)R_E = 5,3/5e3 + (101)500 = 95 \text{ мкА}$$

$$I_E = 9,5 \text{ мА}$$

$$r_e = 25 \text{ мВ}/9,5 \text{ мА} = 2,6$$

$$A_v = R_C/r_e = 78,5/2,6 = 30,2 > 1/\beta = 1 \text{ поэтому колебания будут непрерывны}$$

Шаг 7.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}} \text{ соответствует } L_1 = 0,5 \text{ мГн, } C = 1 \text{ мкФ и } f = 3,5 \text{ кГц}$$

$$f_c^2 = 1/4\pi^2(L_1 + L_2)C \quad L_2 = (1 - 4\pi^2 f_c^2 C L_1)/(4\pi^2 C f_c^2) = 1,57 \text{ мГн}$$

Дополнительное задание к лабораторной работе 7.

$$L = 822 \text{ мкГн}$$

Лабораторная работа 8.

Используя формулу 8-1:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{(60e-6)(180e-12)(22e-12)}{180e-12+22e-6}}} = 4,64 \text{ МГц}$$

Преобразуя формулу 8-1, получим:

$$L_1 = (C_1 + C_2)/4\pi^2 C_1 C_2 f_c^2 = 20,2 \text{ мкГн}$$

$$A_v = -g_m r_d = (-1,6 \text{ мС})(12e3) = -19,2 \quad C_1/C_2 = 180/22 = < |A_v| = 19,2$$

колебания будут непрерывны

Дополнительное задание к лабораторной работе 8.

$$\text{Выберите } C_1 = 200 \text{ нкФ} \quad f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}, \text{ тогда}$$

$$C_2 = C_1/4\pi^2 f_c^2 L_1 C_1 - 1 = 61 \text{ нкФ}$$

Лабораторная работа 9

Преобразуя уравнение (9-1):

$$C_3 = 1/4\pi^2 L f_r^2 = 1/4\pi^2 (68e-6)(2e6)^2 = 93 \text{ нФ}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{(68e-6)(120e-12)}} = 1,76 \text{ МГц}$$

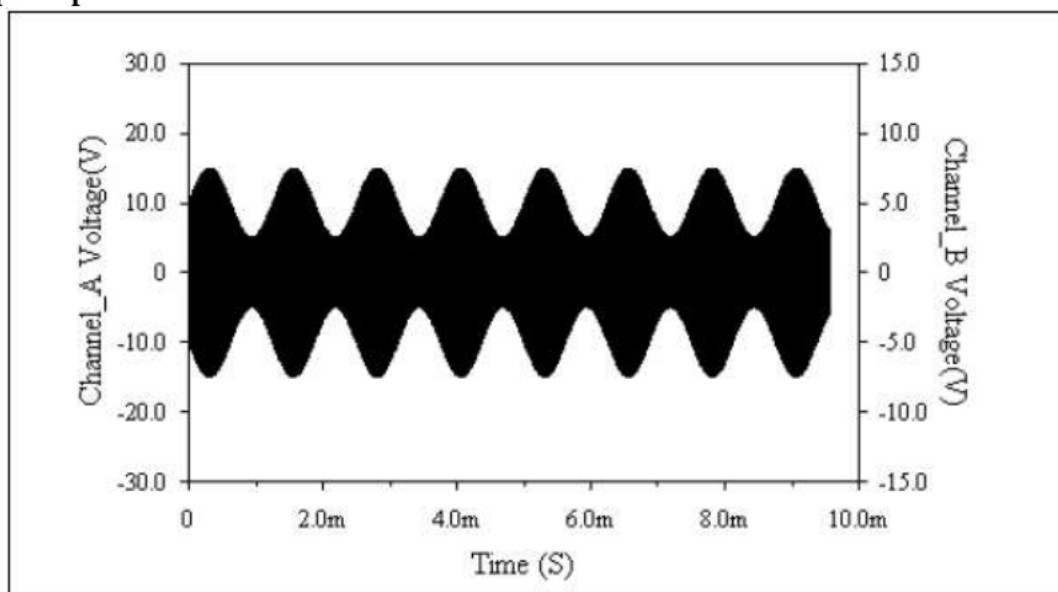
	Измеренное значение	Вычисленное значение
f_c (шаг 2)	1.6 МГц	1.76 МГц
f_c (шаг 3)	2.06 МГц	2 МГц

Таблица 9-1

Дополнительное задание к лабораторной работе 9.

Измеренное значение верхней предельной частоты = 3.5 МГц

Лабораторная работа 10.



$$f_{\text{нижняя}} = 100 \times 10^3 - 800 = 99200 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{верхняя}} = 100 \times 10^3 + 800 = 100800 \text{ Гц}$$

Дополнительное задание к лабораторной работе 10.

Требуется только наблюдение.

Лабораторная работа 11.

Используя формулы 11-1 и 11-3

$$m = (32-8)/(32+8) = 0.6 m_{\text{измеренное}} = 2/10^{[(20-10)/20]} = 0.63$$

Амплитуда модулированного сигнала = m (несущей амплитуды) = 0,6(10) = 6 В.

$$m = (26-13)/(26+13) = 0.33 m_{\text{измеренное}} = 2/10^{[(18,8-3,2)/20]} = 0,33$$

Амплитуда модулированного сигнала = m (несущей амплитуды) = 0,33(10) = 3,3 В.

	V_{max} , В	V_{min} , В	$m_{\text{изм}}$	Несущая, дБ	Боковая полоса, дБ	$m_{\text{изм}}$	$m_{\text{предполагаемое}}$	%m	Амплитуда модулированного сигнала, В
m=0,6	32	8		0,6	20	10	0,63	60	6
m=0,33	26	13		0,33	18,8	3,2	0,33	33	33

Таблица 11-1.

Используя формулы 11-1 и 11-3

$$m = 0.5 P_{\text{LSB}} = 3.356^2/100 = 0.1126 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{USB}} = 2.314^2/100 = 53 \text{ мВт} \quad P_{\text{C}} = 9.881^2/100 = 976 \text{ мВт} \quad P_{\text{T}} = 1.142$$

$$\mu = (112.6 + 53) \text{ мВт}/1,142 \text{ Вт} = 0,145$$

Используя формулу 11-4:

	Измеренное значение	Вычисленное значение
$m = 0,5$	0,172	0,11
$m = 0,7$	0,213	0,197
$m = 0,8$	0,261	0,24
$m = 1$	0,341	0,33

Таблица 11-2.

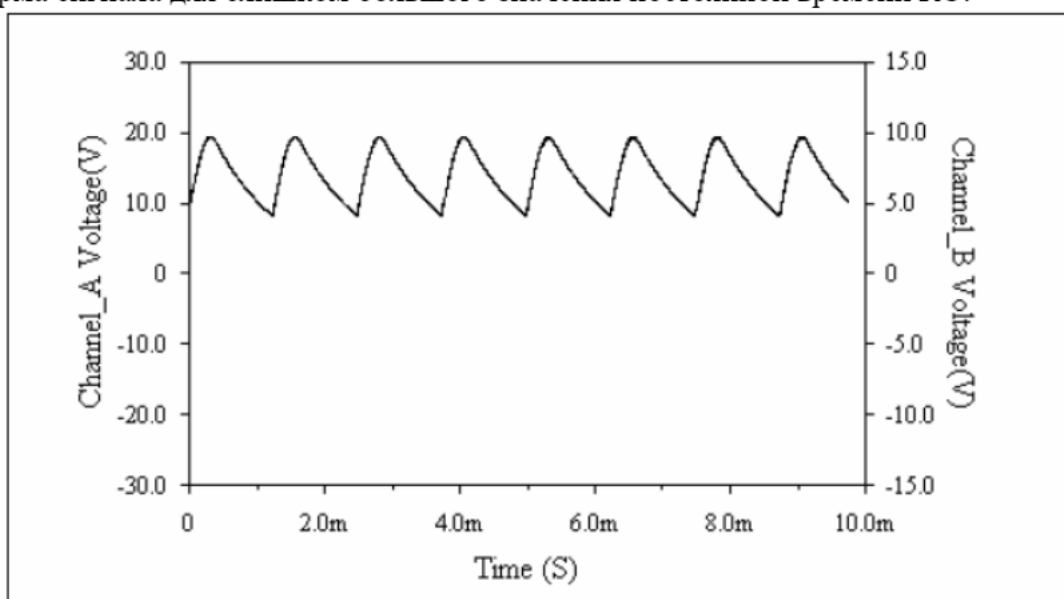
Дополнительное задание к лабораторной работе 11.

	V_{\max} , В	V_{\min} , В	$m_{\text{изм}}$	Несущая, дБ	Боковая полоса, дБ	$m_{\text{изм}}$	$m_{\text{предполагаемое}}$	%m	Амплитуда модулированного сигнала, В
$m=8$	34	0,79	0,8	19	9	0,8	0,8	80	8

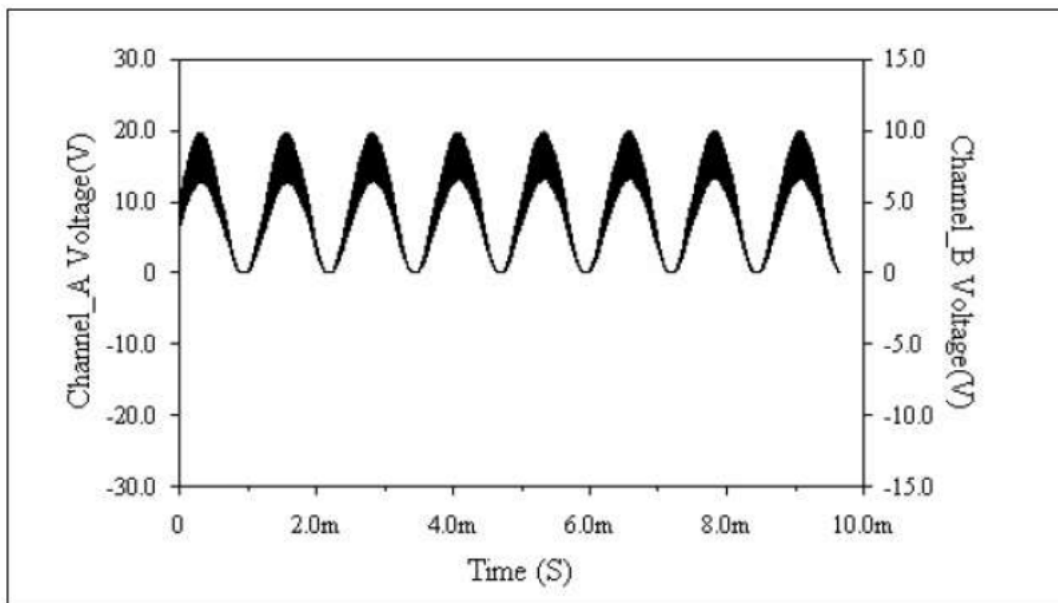
Лабораторная работа 12

f_m на выходе детектора 800 Гц f_m предполагаемая 800 Гц

Форма сигнала для слишком большого значения постоянной времени RC:



Форма сигнала для слишком низкого значения постоянной времени RC:



Используя уравнение (12-4):

$$RC = \frac{1}{2\pi(0.6)500} = 530.5 \times 10^{-6} ; \text{ для } R = 100 \text{ кОм } C = 530.5 \times 10^{-6} / 100 \times 10^3 = 5.3 \text{ нФ}$$

Дополнительное задание к лабораторной работе 12

Требуются только наблюдения.

Лабораторная работа 13.

$$f_{LSB} = 1.1 \text{ МГц} - 10 \text{ кГц} = 1090000 \text{ Гц} \quad f_{USB} = 1.1 \text{ МГц} + 10 \text{ кГц} = 1110000 \text{ Гц}$$

	Измеренное значение, МГц	Вычисленное значение, МГц
Частота нижней боковой полосы	1,09	1,09
Частота верхней боковой полосы	1,11	1,11

Таблица 13-1

Используя формулу 13-1:

$$P_{LSB} = 38.552^2 / 1 \times 10^3 = 1,486 \text{ Вт}$$

$$P_{USB} = 40.756^2 / 1 \times 10^3 = 1,666 \text{ Вт}$$

$$P_{LSB} = 4.74^2 / 1 \times 10^3 = 22,47 \text{ мВт}$$

$$P_{USB} = 5.377^2 / 1 \times 10^3 = 28,9 \text{ мВт}$$

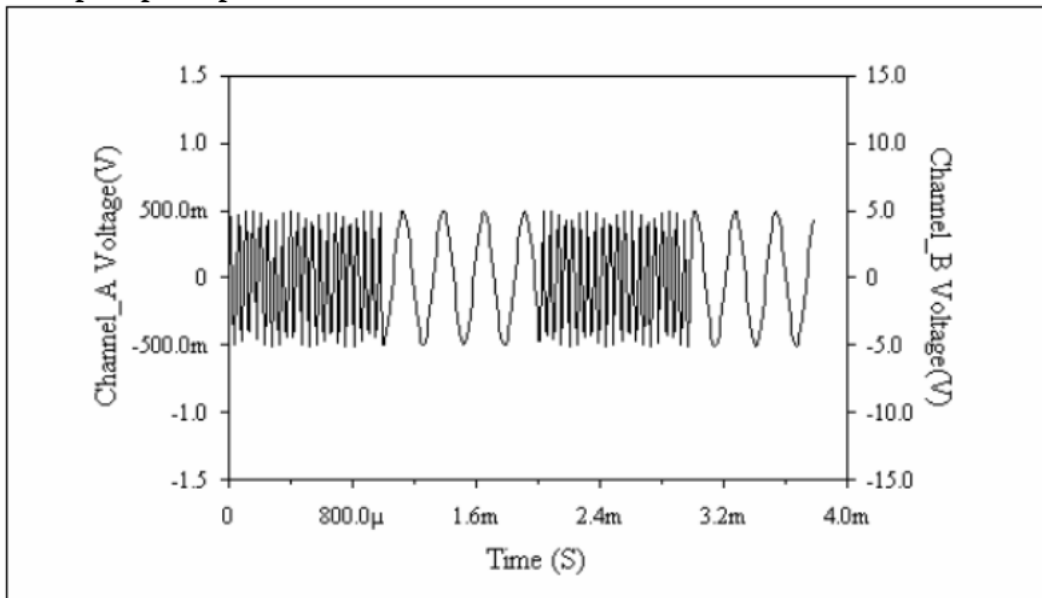
	Нижняя боковая полоса, Vrms	Верхняя боковая полоса, Vrms	Нижняя боковая полоса, Вт	Верхняя боковая полоса, Вт
Двойная боковая полоса	38,552	40,746	1,490	1,660
Амплитудная модуляция	4,740	5,377	22,470 мВт	28,9 мВт

Таблица 13-2.

Дополнительное задание к лабораторной работе 13.

$$f_{LSB} = 1 \text{ МГц} - 12 \text{ кГц} = 988000 \text{ Гц} \quad f_{USB} = 1 \text{ МГц} + 12 \text{ кГц} = 1012000 \text{ Гц}$$

Лабораторная работа 14.



$$f_m = 10 \text{ kHz}$$

Лабораторная работа 15

Используя уравнения (15-1) и (15-2):

$$\Delta f (m=3_{\text{calculated}}, f_m=10 \text{ кГц}) = \Delta f = m / f_m = 3 / 10e3 = 300e-6$$

$$\text{Ширина полосы пропускания } W (m=3, f_m=10 \text{ кГц}) = 2(6)(10 \text{ кГц}) = 120 \text{ кГц}$$

Для $m=1.5$, мощность распределяется среди меньшего числа спектральных линий.

Дополнительное задание к лабораторной работе 15

Для индекса модуляции равного 2.4, несущая пропадает. Это описывается коэффициентом Бесселя (J_0), который равен нулю при индексе модуляции, равном 2.4.

Лабораторная работа 16.

$$Z \parallel = L/RC = 156.25 \text{ кОм}$$

$$Q = Z \parallel / X_L = 124.6$$

$$X_L = 2\pi(1.6e6)(125e-6) = 1.26 \text{ кОм}$$

$$BW = 1.6 \text{ МГц} / 124.6 = 12.84 \text{ кГц}$$

	Измеренное значение	Вычисленное значение
f_c	1,4 МГц	1,6 МГц
V_c	12 В	11,98 В
V_B	1,9 В	2 В
Полоса пропускания (BW)	-----	12,84 кГц

Таблица 16-1.

Дополнительное задание к лабораторной работе 16.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{выберите } L = 100 \text{ мкГн}$$

$$C = 1 / 4\pi^2 f_c^2 L = 1 / 4\pi^2 (1.3e6)^2 (100e-6) = 150$$

Лабораторная работа 17.

$$R = 100$$

$$Z_1 = 100 + j16.67 = 116.67$$

$$S_{11} = \Gamma_i = (Z_1 - 50) / (Z_1 + 50) = (116.67 - 50) / (116.67 + 50) = 66.67 / 166.67 = 0.4 + j0$$

$$S_{22} Z_2 = (50 + j100) || 25 = 21.43$$

$$S_{22} = \Gamma_o = (21.43 - 50) / (21.43 + 50) = -0.4 = -0.4 + j0$$

$$S_{21} = V_o / V_i^+ \quad V_o = (25 || 50) 2V_i^+ / (25 || 50) + 150 \quad V_o / V_i^+ = 0.2 + j0$$

Дополнительное задание к лабораторной работе 17.

$$L = 30 \text{ нГн}, f = 158.4893 \text{ МГц}, \text{ затем } X_L = j30$$

Ограничьте выходной сигнал входными 50-ью Омами и вычислите Z_1 и Γ_i на входе

$$Z_1 = j30 + 16.67 \quad S_{11} = \Gamma_i = (Z_1 - 50) / (Z_1 + 50) = (16.67 + j30) - 50 / (16.67 + j30) + 50$$

$$= -33.33 + j30 / 66.67 + j30$$

$$= 44.8 \pi 138 E / 73.1 \pi 24.23 E = 0.613 \pi 113.77 E = -0.247 + j0.56$$

Ограничьте вход 50-ью Омами и вычислите Z_2 и Γ_o на выходе

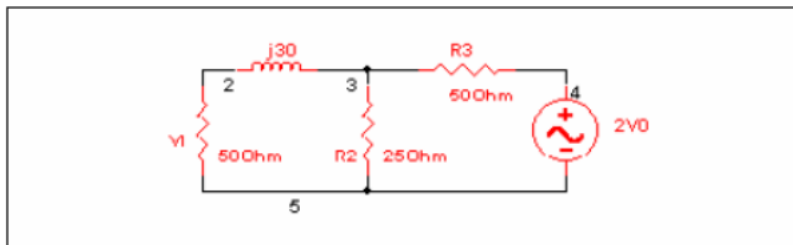
$$S_{22} Z_2 = (40 + j30) || 25 = 16.97 + j3.05 \text{ then}$$

$$S_{22} = \Gamma_o = Z_2 - 50 / Z_2 + 50 = -33.03 + j3.05 / 66.97 + j3.05 = -0.49 + j0.68$$

Подведите к порту 1 напряжение разомкнутой цепи в $2V_i^+$ и источник полного сопротивления в 50 Ом.

$$S_{21} V_o = 16.67 (2V_i^+) / (50 + j30) + 16.67 = 0.457 V_i^+ \pi - 24.22 E$$

$$S_{21} = V_o / V_i^+ = 0.457 \pi - 24.22 E = 0.417 - j 0.188$$



(A)

Thevenize (A) в узлах 3 и 5

$$\text{Тогда, } R_{TH} = 25 || 50 = 16.67 \text{ Ом. } V_{TH} = 25(2V_o^+) / (25 + 50) = 0.67 V_o^+$$

$$\text{Тогда, } S_{12} = V_i = 50(0.67) V_o^+ / 50 + j30 + 16.67 \text{ и } V_i / V_o^+ = 33.5 / 66.67 + j30 = 0.46 \pi - 24.22 E$$

Лабораторная работа 18

$$\text{Усиление мощности в прямом направлении} = \text{УПМ} = |S_{21}|^2 = 0.457^2 = 0.21 = -10 \log 0.21 = -6.8 \text{ дБ. Измеренное значение потерь} = -6.8153 \text{ дБ.}$$

Дополнительное задание к лабораторной работе 18

$$\text{Для } L = 60 \text{ нГн}, f = 251.19 \text{ МГц, тогда } X_L = j50.$$

Ограничьте выходной сигнал входными 50-ью Омами и вычислите Z_1 и Γ_i на входе

$$Z_1 = j50 + 16.67$$

$$S_{11} = \Gamma_i = (Z_1 - 50) / (Z_1 + 50) = (16.67 + j50) - 50 / (16.67 + j50) + 50 = -33.33 + j50 / 66.67 + j50 = 60.1 / 123.7^\circ / 83.336 / 36.9^\circ = 0.7 / 286.8^\circ = 0.039 + j0.72$$

Ограничьте вход 50-ью Омами и вычислите Z_2 и Γ_o на выходе

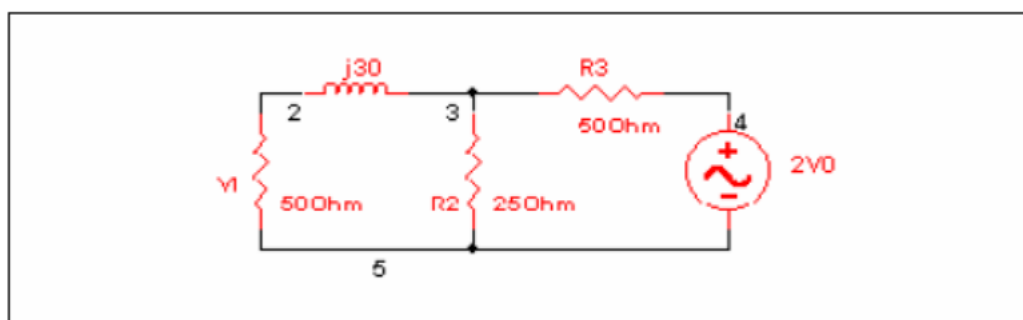
$$S_{22} Z_2 = (50 + j50) || 25 = 19.5 + j0.39 \text{ тогда}$$

$$S_{22} = \Gamma_o = Z_2 - 50 / Z_2 + 50 = -30.4 + j0.39 / 69.6 + j0.39 = -0.437 + j0.008$$

Соедините порт1 с напряжением разомкнутой цепи $2V_i^+$ и 50-ью Омами полного внутреннего сопротивления источника

$$S_{21}V_o = 16.67(2V_i^+)/ (50 + j50) + 16.67 = 0.457V_i^+ / 36.9^\circ$$

$$S_{21} = V_o / V_i^+ = 0.4 / 36.9^\circ = 0.32 - j0.24$$



(A)

Thevenize (A) в узлах 3 и 5

$$\text{Тогда, } R_{TH} = 25 || 50 = 16.67 \text{ Ом. } V_{TH} = 25(2V_o^+) / (25 + 50) = 0.67 V_o^+$$

$$\text{Тогда, } S_{12} = V_i = 50(0.67) V_o^+ / 50 + j50 + 16.67 \text{ и } V_i / V_o^+ = 33.5 / 83.336 / 36.8^\circ = 0.4 / 36.8^\circ = 0.32 - j0.24$$

Усиление мощности в прямом направлении УПМ = $|S_{21}|^2 = 0.4^2 = 0.16 = -10 \log 0.16 = -7.96$ дБ потерь. Измеренное значение = - 7.94 дБ.

Лабораторная работа 19.

Смоделируйте значение для C_2 при $f = 1.59 \text{ ГГц}$, выберите $L_1 = 10 \text{ нГн}$, затем преобразуйте формулу 19-2.

$$C_2 = 1 / 4\pi^2 f_C^2 L_1 = 1 / 4\pi^2 (1.59 \text{ ГГц})^2 10e-9 = 1 \text{ пФ}$$

	Delta	X
$f = 2.29 \text{ ГГц}$	0,239	0,9104
$f = 3.63 \text{ ГГц}$	0,4908	0,4957
$f = 1.59 \text{ ГГц}$	0,1791	1,3738

Таблица 19-1

Штрихованная область показывает потенциально нестабильную частоту, зависящую от смоделированного согласования сопротивлений входа/выхода.

При резонирующей частоте 1,59 ГГц, штрихования нет.

Дополнительное задание к лабораторной работе 19.

Смоделируйте значение для C_2 при $f = 5 \text{ ГГц}$, выберите $L_1 = 1 \text{ нГн}$, затем преобразуйте формулу 19-2.

$$C_2 = 1 / 4\pi^2 f_C^2 L_1 = 1 / 4\pi^2 (5 \text{ ГГц})^2 1e-9 = 1 \text{ пФ}$$

При рабочей частоте 5 ГГц, усилитель близок к потенциально нестабильному.

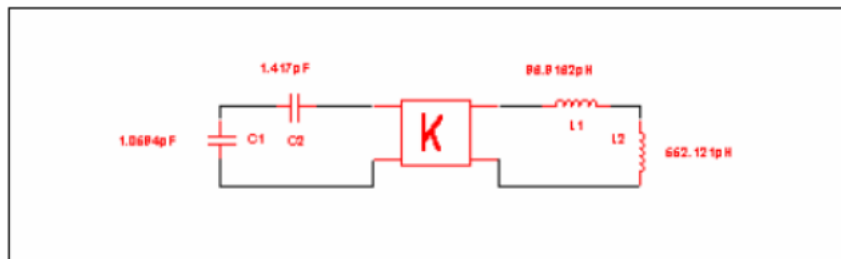
Лабораторная работа 20.

Преобразуя формулу 20-2:

$$\text{При } C = 1 \text{ пФ и } f = 5,3 \text{ ГГц}$$

$$L = 1 / 4\pi^2 f_C^2 C = 1 / 4\pi^2 (5.3e9)^2 (1e-12) = 0.9 \text{ нФ,}$$

затем на рабочей частоте в 5,2481 ГГц

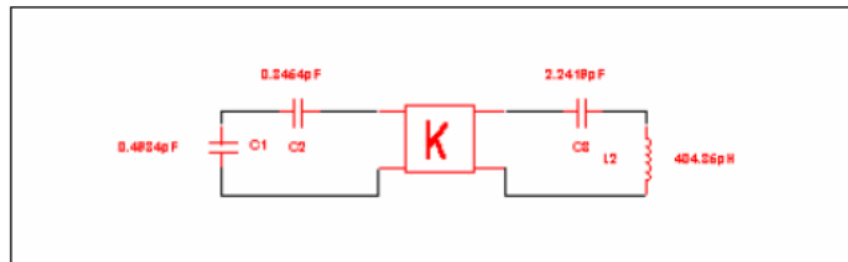


Преобразуя формулу 20-2:

При $C = 1 \text{ нФ}$ и $f = 7 \text{ ГГц}$

$$L = 1/4\pi^2 f_c^2 C = 1/4\pi^2 (7e9)^2 (1e-12) = 0.5 \text{ нФ},$$

затем на рабочей частоте в 6,9183 ГГц

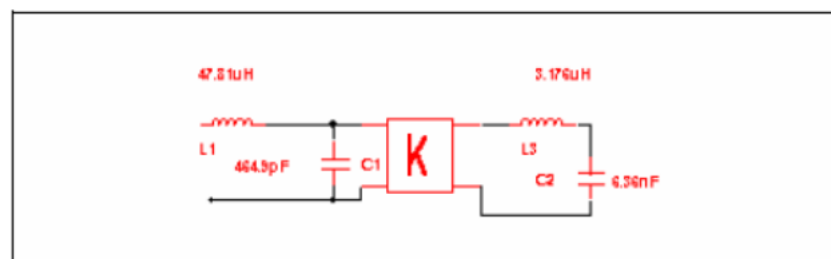


Дополнительное задание к лабораторной работе 20.

Преобразуя формулу 20-2:

При $C = 1 \text{ нФ}$ и $f = 1,59 \text{ ГГц}$

$$L = 1/4\pi^2 f_c^2 C = 1/4\pi^2 (1.59e9)^2 (1e-12) = 10 \text{ нФ},$$



Лабораторная работа 21

Используя уравнение (21-2):

$$f = \frac{c}{\lambda_{fs}} = \frac{2.9974e10 \frac{см}{с}}{2(4.039)_{см}} = 3.7 \text{ ГГц}$$

	Предполагаемая (нижняя)	Измеренная (нижняя)	Предполагаемая (верхняя)	Измеренная (верхняя)
Частота распространения (волновод прямоугольного сечения)	4.9 ГГц	4.9 ГГц	7.05 ГГц	7.05 ГГц

Таблица 21-1

Используя уравнение (21-1) для 4.9 ГГц:

$$Z_{OL} = \frac{120\pi}{[1 - (\frac{\lambda_{fs}}{\lambda_{CL}})^2]^{1/2}} = \frac{120\pi}{[1 - (\frac{6.12}{8.078})^2]^{1/2}} = 577 \text{ Ом}$$