

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

М.Ю. Лишак

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ В РАДИОПРИЁМНОМ УСТРОЙСТВЕ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ

Лабораторные работы № 1 – 3

Методические указания

по курсам «Основы приёма и обработки сигналов», «Основы приёма и обработки сигналов в медицинских приборах и системах» и «Устройства приёма и обработки сигналов» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 11.03.01 «Радиотехника», 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» и специалистов 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Москва
Издательство МЭИ
2023

УДК 621.396.62

ББК 32.849

Л_____

Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ» в качестве производственно-практического издания

Подготовлено на кафедре формирования и обработки радиосигналов

Лишак, М.Ю.

Л_____ Характеристики сигналов в радиоприёмном устройстве с преобразованием частоты. Лабораторные работы № 1 - 3: методические указания / М.Ю. Лишак – М.: Издательство МЭИ, 2023. – 41 с.

Приводятся описания цикла из трёх лабораторных работ, посвященных компьютерному схемотехническому моделированию радиосигналов в радиоприёмном устройстве с преобразованием частоты с помощью программного пакета Micro-Cap.

Пособие предназначено для студентов ИРЭ, обучающихся по направлениям бакалавриата «Радиотехника», «Биотехнические системы и технологии» и специалитета «Радиоэлектронные системы и комплексы» и выполняющих лабораторные задания по дисциплинам «Основы приёма и обработки сигналов», «Основы приёма и обработки сигналов в медицинских приборах и системах» и «Устройства приёма и обработки сигналов».

УДК 621.396.62

ББК 32.849

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. РАБОТА № 1. ТИПОВЫЕ РАДИОСИГНАЛЫ И ИХ СПЕКТРЫ.	7
1.1. Методические указания.....	7
1.2. Домашняя подготовка	13
1.3. Лабораторное задание	16
1.4. Контрольные вопросы и задания	20
2. РАБОТА № 2. ПРОХОЖДЕНИЕ АМ СИГНАЛА ЧЕРЕЗ ТРАКТ РАДИОПРИЁМНИКА С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ	21
2.1. Методические указания	21
2.2. Домашняя подготовка	25
2.3. Лабораторное задание	26
2.4. Контрольные вопросы и задания	29
3. РАБОТА № 3. ВЛИЯНИЕ ПОМЕХИ ПО ЗЕРКАЛЬНОМУ КАНАЛУ НА ПРИЁМ СИГНАЛА В СУПЕРГЕТЕРОДИННОМ РАДИОПРИЁМНИКЕ	31
3.1. Методические указания	31
3.2. Домашняя подготовка	34
3.3. Лабораторное задание	35
3.4. Контрольные вопросы и задания	38
Приложение 1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	40
ЛИТЕРАТУРА	41

ВВЕДЕНИЕ

Включённые в данное методическое пособие лабораторные работы № 1-3 – это первая часть комплекса компьютерных лабораторных работ, выполняемых студентами при изучении дисциплин «Основы приёма и обработки сигналов» (по программе бакалавриата по направлению «Радиотехника»), «Основы приёма и обработки сигналов в медицинских приборах и системах» (по программе бакалавриата по направлению «Биотехнические системы и технологии») и «Устройства приёма и обработки сигналов» (по программе специалитета по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы», 8-й семестр). Выполнение каждой работы рассчитано на два часа лабораторных занятий.

Моделирование радиосигналов и устройств их обработки выполняется с помощью свободно распространяемого программного пакета Micro-Cap версии 10.2 и старше компании Spectrum Software (www.spectrum-soft.com). Для работы с пакетом компьютер должен удовлетворять следующим требованиям: не менее 180 МБ свободного пространства на жёстком диске, оперативная память не менее 256 МБ, операционная система Windows 2000 и старше. Методические указания по моделированию сформулированы для версии Micro-Cap 10.2, как наиболее удобной для использования в учебном процессе [1, 2]. В тех случаях, когда для версии Micro-Cap 12.2 (последней в семействе Micro-Cap^{*)}) имеются отличия, они поясняются отдельно.

Описание каждой лабораторной работы имеет методические указания, в которых приведены необходимые теоретические сведения, а также изложена методика получения исследуемых характеристик с помощью пакета Micro-Cap. В данном пособии для большей наглядности электрические принципиальные схемы, а также обозначения компонентов на них выполнены не в соответствии с ЕСКД, а приведены в том виде, в каком они изображаются в редакторе схем пакета Micro-Cap.

По результатам каждой лабораторной работы студентами оформляется индивидуальный отчёт. Требования к отчёту и порядок выполнения работы приведены в Приложении 1.

При выполнении моделирования нужно придерживаться следующих общих правил.

1. При построении графиков пределы по осям следует задавать таким образом, чтобы максимально использовать пространство окна и

^{*)} В 2019 г. компания Spectrum Software прекратила дальнейшую разработку пакета Micro-Cap и разместила на своём сайте последние версии для свободного использования.

при этом иметь возможность провести необходимые измерения параметров графика.

2. В тех случаях, когда по заданию требуется измерение параметров графика (например, измерение полосы пропускания цепи по амплитудно-частотной характеристике), на графике должны быть показаны маркеры, по которым производится измерение.

3. В режиме анализа переходных процессов **Transient Analysis** параметр **Maximum Time Step** (*максимальный шаг по времени*) должен быть задан таким образом, чтобы в периоде самого высокочастотного колебания было не менее 10 отсчётов. Чем меньше шаг по времени, тем точнее моделирование, но и больше требуемое время. Заданное по умолчанию значение параметра 0 указывает на то, что максимальная величина шага определяется программой автоматически. Такой режим использовать не следует, так как при этом обычно устанавливается слишком большая величина шага и следовательно при моделировании возникают большие ошибки.

4. Для правильного изображения эпюр колебаний нужно задать режим автоматического масштабирования – поставить «галочку» в поле **Auto Scale Ranges**.

5. Необходимо помнить, что расчёт спектра колебания в какой-либо точке схемы возможен только после моделирования этого колебания в режиме **Transient Analysis**.

6. При расчёте амплитудно-частотных характеристик необходимо задавать по оси частот линейный масштаб, а не логарифмический, как установлено по умолчанию.

7. При задании на вкладке **FFT** параметров расчёта спектра нужно учитывать то, что при недостаточном количестве точек дискретного преобразования Фурье (параметр **Number of Points**) возможно появление на графике спектра ложных составляющих, которые в действительности в спектре сигнала отсутствуют. Для того чтобы исключить такую ошибку, нужно сначала рассчитать спектр при установленном по умолчанию значении этого параметра, а затем перейти к большему по величине значению, получить новый спектр и сравнить его с полученным ранее. Если на графике спектра в заданном интервале частот произойдут какие-либо изменения, то нужно ещё увеличить количество точек и так продолжать до тех пор, пока не будет получен неизменный спектр. При этом нужно иметь в виду, что таким способом можно получить истинный спектр сигнала в заданной области частот. За пределами этой области в спектре могут быть ложные составляющие, для устранения которых нужно ещё увеличивать количество точек.

8. Для большей наглядности при построении графиков частотных характеристик и спектров целесообразно задавать увеличенную толщину

линий – для параметра **Width** на вкладке **Colors, Fonts, and Lines** выбирать значение 2 или 3. При построении нескольких графиков нужно задавать различные цвета линий.

9. При построении графика спектра нужно выбирать на вкладке **Colors, Fonts, and Lines** нормальный (**Normal**) стиль (**Style**) изображения, при котором отсчёты спектра соединяются прямыми линиями.

10. Для того чтобы на построенном графике изменить параметры изображения, нужно дважды щёлкнуть левой кнопкой мыши в поле графика, сделать исправления на соответствующих вкладках и нажать клавишу **OK**.

11. Для сохранения в буферной памяти изображения всего активного окна в формате **BMP** нужно выбрать соответствующий пункт меню в следующей последовательности:

Edit → Copy to Clipboard → Copy the Visible Portion of Window in BMP Format

Для сохранения изображения части активного окна (схемы) следует выделить нужную часть в режиме **Select Mode** и выполнить команду

Edit → Copy to Clipboard → Copy the Select Box Part in BMP Format

РАБОТА № 1. ТИПОВЫЕ РАДИОСИГНАЛЫ И ИХ СПЕКТРЫ

Цель лабораторной работы: моделирование типовых радиосигналов и расчёт их спектров; оценка влияния параметров сигналов на вид спектра; определение ширины спектра сигналов и сопоставление с теоретическими значениями.

1.1. Методические указания

1.1.1. Функции блоков радиоприёмного устройства

Радиоприёмное устройство выполняет следующие основные операции:

- усиление сигнала;
- фильтрацию;
- преобразование частоты сигнала;
- демодуляцию (детектирование);
- последетекторную обработку.

Операции усиления, фильтрации и преобразования частоты сигнала выполняются в блоке высокой частоты (БВЧ) радиоприёмника. Демодуляция выполняется демодулятором. Последетекторная обработка выполняется в блоке низкой частоты.

Блок высокой частоты – это линейное устройство. Для того чтобы не происходило искажение сигнала при его прохождении через блок высокой частоты, полоса пропускания БВЧ должна быть не меньше ширины спектра сигнала. Чрезмерное расширение полосы пропускания приведёт к ухудшению фильтрации сигнала, принимаемого на фоне шумов и помех. Следовательно, для правильного выбора полосы пропускания БВЧ необходимо уметь рассчитывать ширину спектра сигнала.

В данной лабораторной работе на модели определяются характеристики следующих сигналов:

- сигнала с гармонической амплитудной модуляцией (АМ);
- сигнала с гармонической частотной модуляцией (ЧМ);
- радиоимпульса с прямоугольной огибающей.

1.1.2. Моделирование сигналов и расчёт их спектров

Моделирование сигналов производится в режиме анализа переходных процессов **Transient Analysis**. В этом режиме задаются следующие параметры:

- время моделирования (Time Range);
- максимальный шаг по времени (интервал дискретизации) Maximum Time Step.

Для расчёта спектра сигнала нужно сначала выполнить его моделирование в режиме анализа переходных процессов, а затем в окне **Transient Analysis** выбрать:

Transient → FFT Windows → Add FFT Window...

После этого в окне **Properties for FFT (свойства БПФ^{*)}** задаются параметры расчёта спектра. Ниже в качестве примера приведены значения этих параметров для расчёта спектра АМ сигнала в модели, схема которой показана на рис. 1.1:

- на вкладке **Plot (график)**:
 - в поле **What to Plot (что построить)**: Harm;
 - в поле **Expression (выражение)**: V(2);
- на вкладке **FFT (БПФ)**:
 - в поле **Upper Time Limit (верхний предел времени)**: TMAX;
 - **Lower Time Limit (нижний предел времени)**: TSTART (или 0);
 - **Frequency Step (шаг по частоте)^{**}**: 250;
 - в поле **Number of Points (количество точек, т.е. объём БПФ)** выберите 8192;

На вкладках **Scales and Formats (масштабы и форматы)** и **Colors, Fonts, and Lines (цвета, шрифты и линии)** задаются параметры, определяющие масштаб графика и его оформление. Пределы графика по горизонтальной оси нужно задать таким образом, чтобы он находился в центре экрана и его ширина позволяла выполнить необходимые измерения.

Отличия в версии Micro-Cap 12:

Создание окна задания параметров:

Transient → Fourier Windows → Add Fourier Window...

Задание параметров расчёта спектра в окне **Properties for Fourier (свойства преобразования Фурье)**:

- на вкладке **Plot (график)**:
 - изменено название поля **What Function to Plot (какую функцию построить)**;
- на вкладке **Fourier (преобразование Фурье)**:
 - добавлен выбор метода вычисления спектра **Method: FFT**.

^{*)} БПФ – быстрое преобразование Фурье – алгоритм, с помощью которого вычисляется дискретное преобразование Фурье отсчётов сигнала; количество точек, по которым вычисляется БПФ, задаётся как 2^p , где p – целое число.

^{**)} Необходимо иметь в виду, что шаг по частоте определяется длительностью сигнала и поэтому не может быть задан произвольно.

1.1.3. Модель сигнала с гармонической амплитудной модуляцией

Сигнал с гармонической АМ математически записывается как

$$u(t) = U(t) \cos 2\pi f_0 t, \quad (1.1)$$

где $U(t) = U_0 (1 + m \cos 2\pi F_m t)$ – закон амплитудной модуляции,

U_0 – амплитуда несущего колебания (несущей),

f_0 – частота несущей,

F_m – частота модуляции,

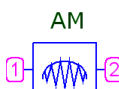
m – коэффициент модуляции.

Частотный состав этого сигнала определяется выражением

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 (\cos 2\pi f_0 t + m \cos 2\pi F_m t \cdot \cos 2\pi f_0 t) = \\ &= U_0 \cos 2\pi f_0 t + \frac{1}{2} m U_0 \cos 2\pi (f_0 - F_m) t + \frac{1}{2} m U_0 \cos 2\pi (f_0 + F_m) t. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Видно, что АМ сигнал имеет три частотные составляющие: несущую на частоте f_0 , нижнюю боковую составляющую на частоте $f_n = f_0 - F_m$ и верхнюю боковую составляющую на частоте $f_b = f_0 + F_m$. Следовательно, ширина спектра сигнала равна $\Delta f_{\text{АМС}} = f_b - f_n = 2F_m$, т.е. удвоенной частоте модуляции. Амплитуда несущей равна U_0 , амплитуда боковых составляющих равна $\frac{1}{2} m U_0$.

Схема модели сигнала с гармонической АМ приведена на рис. 1.1.

Элемент , моделирующий генератор с управляемой амплитудой колебаний, выбирается в группе модуляторов:

Component → Analog Primitives → Modulators → AM.

Для него задаются следующие параметры: частота несущей FS, амплитуда несущей VPEAK, коэффициент модуляции MODINEX, смещение модулирующего напряжения OFFSET, тип несущего колебания (синусоида или косинусоида) TYPE. Значения параметров FS, VPEAK и MODINEX задаются в соответствии с заданием, смещение равно 1. Для моделирования колебания, которое описывается косинусоидой, нужно задать тип CM.

Отличия в версии Micro-Cap 12:

некоторые параметры элемента АМ имеют другие обозначения: частота несущей FC, амплитуда несущей VC, коэффициент модуляции KA.

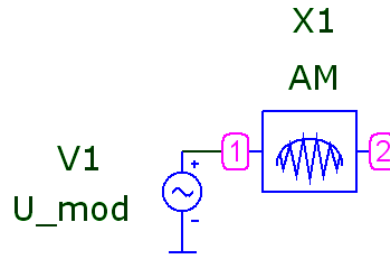


Рис. 1.1. Модель сигнала с гармонической амплитудной модуляцией

Модель источника модулирующего напряжения выбирается в группе источников:

Component → Analog Primitives → Waveform Sources → Sine Source.

Для неё задаются следующие параметры: амплитуда A , постоянная составляющая DC, частота F , начальная фаза φ . Для получения модулирующего колебания в виде косинусоиды следует задать начальную фазу $\pi/2$.

1.1.4. Модель сигнала с гармонической частотной модуляцией

Сигнал с гармонической ЧМ определяется выражением

$$u(t) = U_0 \cos\left(\int 2\pi f(t) dt\right) = U_0 \cos \varphi(t), \quad (1.3)$$

где $f(t) = f_0 + \Delta f_m \cos 2\pi F_m t$ – мгновенная частота сигнала; Δf_m – девиация частоты (максимальное отклонение частоты сигнала от несущей частоты f_0); F_m – частота модуляции; $\varphi(t) = \int 2\pi f(t) dt$ – полная фаза сигнала. Эпюра мгновенной частоты показана на рис. 1.2.

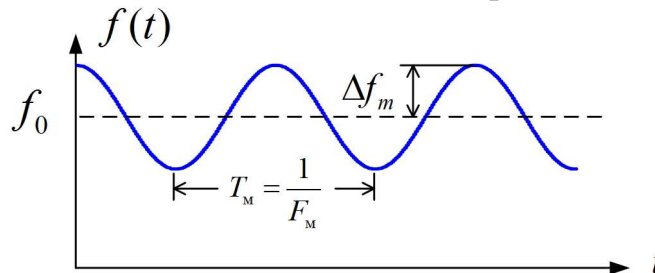


Рис. 1.2. Эпюра мгновенной частоты при гармонической ЧМ

При гармонической ЧМ полная фаза определяется выражением

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \int 2\pi (f_0 + \Delta f_m \cos 2\pi F_m t) dt = 2\pi f_0 t + \frac{\Delta f_m}{F_m} \sin 2\pi F_m t = \\ &= 2\pi f_0 t + \beta_{\text{ЧМ}} \sin 2\pi F_m t, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где $\beta_{\text{ЧМ}} = \frac{\Delta f_m}{F_m}$ – индекс частотной модуляции. Геометрический смысл индекса ЧМ – максимальное значение (в радианах) угла, на который по-

ворачивается вектор комплексной огибающей сигнала в результате модуляции.

Спектр сигнала с гармонической ЧМ определяется на основе следующего выражения для такого сигнала в виде бесконечного тригонометрического ряда:

$$u(t) = U_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta_{\text{ЧМ}}) \cos 2\pi(f_0 + nF_m)t, \quad (1.5)$$

где $J_n(x)$ – функция Бесселя n -го порядка (при этом считается, что $J_{-n}(x) = (-1)^n J_n(x)$). Из (1.5) следует, что спектр ЧМ сигнала имеет бесконечно много составляющих с частотами $f_0 \pm nF_m$, поэтому его ширина теоретически бесконечна. Однако, начиная с некоторого номера n частотной составляющей её уровень быстро убывает, поэтому при практических расчётах ширину спектра считают конечной. Ширина спектра ЧМ сигнала рассчитывается по-разному в зависимости от индекса частотной модуляции $\beta_{\text{ЧМ}}$: при $\beta_{\text{ЧМ}} \gg 1$ она приближённо равна $\Delta f_{\text{ЧМС}} \approx 2F_m(1 + \beta_{\text{ЧМ}})$; при $\beta_{\text{ЧМ}} \ll 1$ амплитудный спектр ЧМ сигнала имеет практически такой же вид, как и спектр АМ сигнала, поэтому его ширина считается равной $\Delta f_{\text{ЧМС}} = 2F_m$. При промежуточных значениях $\beta_{\text{ЧМ}}$ расчётной формулы для ширины спектра нет.

Схема модели сигнала с гармонической ЧМ приведена на рис. 1.3.

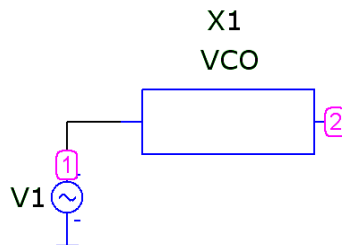


Рис. 1.3. Модель сигнала с гармонической частотной модуляцией

Генератор косинусоидального колебания с управляемой частотой моделируется элементом **VCO** (*Voltage Controlled Oscillator – генератор, управляемый напряжением*). Он выбирается в группе макросов:

Component → Analog Primitives → Macros → VCO.

Отличия в версии Micro-Cap 12: в этой версии добавлена ещё одна промежуточная группа VCOs:

Component → Analog Primitives → Macros → VCOs → VCO.

Для модели генератора задаются следующие параметры: амплитуда V_P , несущая частота F_0 , крутизна модуляционной характеристики K_F .

Параметры модели источника модулирующего напряжения задаются так же, как при моделировании АМ сигнала.

1.1.5. Модель радиоимпульса с прямоугольной огибающей

Радиоимпульс математически определяется как

$$u(t) = U(t) \cos 2\pi f_0 t, \quad (1.6)$$

где $U(t) = \begin{cases} U_0 & \text{при } t \in [0, \tau_{\text{и}}] \\ 0 & \text{при } t \notin [0, \tau_{\text{и}}] \end{cases}$ – огибающая радиоимпульса,

U_0 – амплитуда несущего колебания,

f_0 – частота несущей,

$\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса.

Для моделирования одиночного импульса время моделирования (параметр Time Range) задаётся равным периоду повторения $T_{\text{п}}$. В этом случае амплитудный спектр сигнала определяется выражением

$$S(f) = U_0 \frac{\tau_{\text{и}}}{T_{\text{п}}} \left| \frac{\sin \pi \tau_{\text{и}} (f - f_0)}{\pi \tau_{\text{и}} (f - f_0)} \right|. \quad (1.7)$$

Нулям спектра соответствуют частоты $f_0 \pm n \frac{1}{\tau_{\text{и}}}$, $n = 1, 2, \dots$. Следова-

тельно, ширина спектра по первым нулям (ширина главного лепестка спектра) равна $\Delta f_{\text{имп}} = \frac{2}{\tau_{\text{и}}}$. Максимальное значение спектра на несущей

частоте равно $U_0 \frac{\tau_{\text{и}}}{T_{\text{п}}}$.

Схема модели радиоимпульса приведена на рис. 1.4. В соответствии с (1.6) она состоит из модели огибающей V1, источника несущего колебания V2 и перемножителя X1.

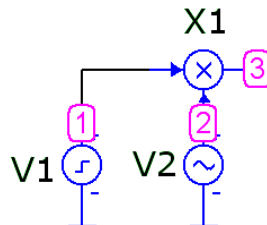


Рис. 1.4. Модель радиоимпульса

Модель перемножителя Mul находится в группе макросов. Модель источника импульсов, определяющих огибающую сигнала, выбирается в группе источников:

Component → Analog Primitives → Waveform Sources → Pulse Source.

Для неё задаются следующие параметры (см. рис. 1.5):

- имя модели MODEL=PULSE,
- время начала фронта импульса P1,
- время окончания фронта и начала плоской вершины импульса P2,
- время окончания плоской вершины и начала спада импульса P3,
- время окончания спада импульса P4,
- период повторения импульсов P5,
- начальное значение напряжения импульса VZERO,
- конечное значение напряжения импульса VONE.

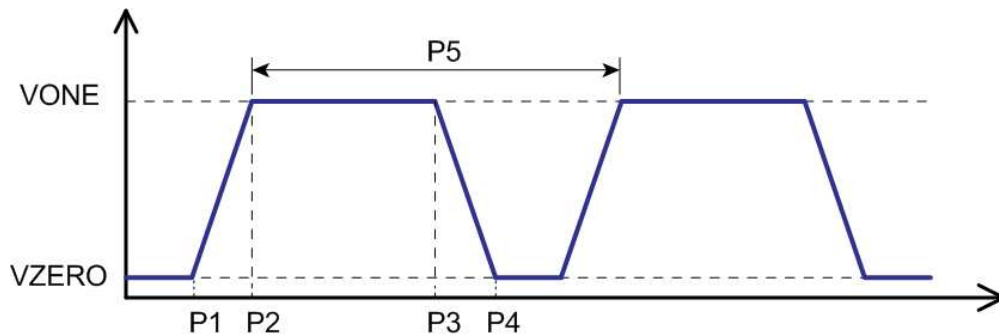


Рис. 1.5. Параметры модели последовательности импульсов

Для формирования прямоугольного импульса, у которого длительности фронта и спада равны 0, должны выполняться следующие условия:

$$P2 = P1, P4 = P3.$$

Время начала импульса $P1=0$, начальное значение напряжения $VZERO=0$.

1.2. Домашняя подготовка

1) В соответствии с номером варианта по табл. 1.1 определите параметры АМ сигнала. Качественно изобразите ожидаемый вид спектра сигнала. Рассчитайте следующие параметры спектра:

- частоты боковых составляющих;
- уровень (амплитуду) несущей и боковых составляющих;
- ширину спектра.

2) В соответствии с номером варианта по табл. 1.2 определите параметры ЧМ сигнала. Рассчитайте индекс модуляции и приближённое значение ширины спектра^{*)}. Повторите расчёт при других значениях девиации частоты сигнала:

а) в 10 раз меньше, чем задано в исходных данных;

б) в 50 раз меньше, чем задано в исходных данных.

Качественно изобразите ожидаемый вид спектра сигнала для каждого случая.

3) В соответствии с номером варианта по табл. 1.3 определите параметры импульсного сигнала. Качественно изобразите ожидаемый вид спектра сигнала. Рассчитайте ширину и максимальное значение главного лепестка спектра.

4) Подготовьтесь к ответу на контрольные вопросы.

Таблица 1.1

Параметры АМ сигнала

Вариант	Параметры				Вариант	Параметры			
	Амплитуда несущей, В	Частота несущей, кГц	Коэффициент модуляции	Частота модуляции, кГц		Амплитуда несущей, В	Частота несущей, кГц	Коэффициент модуляции	Частота модуляции, кГц
1	1,0	525	0,5	12	14	0,9	490	0,5	7
2	1,2	550	0,4	14	15	1,1	530	0,4	12
3	0,8	510	0,5	13	16	1,2	480	0,4	11
4	0,9	505	0,6	8	17	1,3	535	0,5	14
5	1,1	475	0,4	11	18	0,8	510	0,6	9
6	0,9	525	0,6	12	19	1,3	525	0,4	10
7	1,3	450	0,5	6	20	1,2	485	0,5	12
8	1,0	475	0,4	13	21	0,9	450	0,6	7
9	0,8	520	0,6	8	22	1,1	490	0,4	14
10	1,1	515	0,5	11	23	1,2	520	0,5	15
11	0,9	550	0,4	7	24	0,9	535	0,6	12
12	1,2	485	0,6	6	25	0,9	490	0,5	7
13	1,3	540	0,5	9	26	1,1	530	0,4	12

^{*)} Обратите внимание, что приближённая формула для расчёта ширины спектра сигнала должна быть выбрана в соответствии с величиной индекса модуляции $\beta_{\text{ЧМ}}$.

Таблица 1.2

Параметры ЧМ сигнала

Вариант	Параметры				Вариант	Параметры			
	Амплитуда несущей, В	Частота несущей, кГц	Девияция частоты, кГц	Частота модуляции, кГц		Амплитуда несущей, В	Частота несущей, кГц	Девияция частоты, кГц	Частота модуляции, кГц
1	1,0	725	57	12	14	1,0	715	81	8
2	1,2	750	81	14	15	0,8	675	62	6
3	0,8	710	68	13	16	0,9	690	72	7
4	0,9	705	60	8	17	1,1	730	86	12
5	1,1	675	77	10	18	1,2	680	68	11
6	0,9	725	86	12	19	1,3	735	93	14
7	1,3	650	62	6	20	0,8	710	72	9
8	1,0	675	84	13	21	1,3	725	67	10
9	0,8	720	66	8	22	1,2	685	74	8
10	1,1	715	72	11	23	0,9	650	88	7
11	0,9	750	54	7	24	1,1	690	92	14
12	1,2	685	49	6	25	1,2	720	56	8
13	1,3	740	71	9	26	1,3	735	88	12

Таблица 1.3

Параметры импульсного сигнала

Вариант	Параметры			Вариант	Параметры		
	Амплитуда несущей, В	Частота несущей, МГц	Длительность импульса, мкс		Амплитуда несущей, В	Частота несущей, МГц	Длительность импульса, мкс
1	0,8	22	1,2	14	1,2	23	0,9
2	1,0	25	0,8	15	1,0	21	1,1
3	1,3	21	1,1	16	0,9	24	0,8
4	1,2	18	1,3	17	1,3	17	1,2
5	0,9	19	0,9	18	1,1	22	0,9
6	1,1	23	0,8	19	0,8	19	1,1
7	0,8	21	1,1	20	1,2	22	0,7
8	1,4	24	0,7	21	1,3	18	1,2
9	1,3	19	1,2	22	1,1	23	0,8
10	0,9	22	0,8	23	0,9	19	1,1
11	1,1	25	0,7	24	1,1	21	1,3
12	0,9	17	1,4	25	0,9	22	1,2
13	0,8	18	1,3	26	1,2	23	0,9

1.3. Лабораторное задание

1.3.1. Моделирование АМ сигнала

1) Составьте модель АМ сигнала. При заданных в табл. 1.1 значениях параметров в режиме анализа переходных процессов **Transient Analysis** получите эпюры модулирующего колебания и АМ сигнала. Задайте следующие параметры моделирования: время моделирования (Time Range) 2 мс, максимальный шаг по времени (Maximum Time Step) 0,1 мкс. Установите режим автоматического масштабирования Auto Scale Ranges.

2) После моделирования в режиме **Transient Analysis** выполните расчёт спектра АМ сигнала^{*)}:

Transient → FFT Windows → Add FFT Window...

В окне **Properties for FFT (свойства БПФ)** задайте^{**)} :

- на вкладке Plot (*график*):
 - в поле What To Plot (*что построить*): Harm;
 - в поле Expression (*выражение*): V(2);
- на вкладке FFT (*БПФ*):
 - в поле Upper Time Limit (*верхний предел времени*): TMAX,
 - Lower Time Limit (*нижний предел времени*): TSTART (или 0),
 - Frequency Step (*шаг по частоте*): 500,
 - в поле Number of Points (*количество точек*, т.е. объём БПФ) выберите 8192;
- на вкладке Scales and Formats (*масштабы и форматы*), предварительно сняв «галочку» в полях Auto Scale и Log:
 - в группе полей, объединённых под заголовком X, в поле Range Low (*нижняя граница диапазона*): 200k, в поле Range High (*верхняя граница диапазона*): 800k, в поле Grid Spacing (*шаг сетки*): 20k;
 - в группе полей, объединённых под заголовком Y, в поле Range Low (*нижняя граница диапазона*): 0, в поле Range High (*верхняя граница диапазона*): 1.5, в поле Grid Spacing (*шаг сетки*): 0.1;
- на вкладке Colors, Fonts, and Lines (*цвета, шрифты и линии*):
 - в поле Width (*толщина линии*): 2,

^{*)} Отличия для версии Micro-Cap 12 указаны в п. 1.1.2.

^{**)} См. примечания к расчёту спектра в п. 1.1.2.

- в поле **Style (стиль)**: Normal (**нормальный**, т.е. соединение рассчитанных точек спектра прямыми линиями).

По графику определите следующие параметры спектра:

- частоту несущей;
- уровень (амплитуду) несущей;
- частоты боковых составляющих;
- уровень (амплитуду) боковых составляющих.

Сравните измеренные параметры спектра с рассчитанными теоретическими значениями.

3) Увеличьте частоту модуляции в 2 раза и повторите моделирование. Сравните с результатами, полученными в п. 2. Сделайте выводы.

1.3.2. Моделирование ЧМ сигнала

1) Составьте модель ЧМ сигнала. При заданных в табл. 1.2 значениях параметров в режиме анализа переходных процессов **Transient Analysis** получите эпюры модулирующего колебания и ЧМ сигнала. Крутизну модуляционной характеристики модели генератора задайте численно равной девиации частоты сигнала. В модели источника модулирующего колебания V1 постоянная составляющая должна быть равна 0, начальная фаза $\pi/2$.

Задайте следующие параметры моделирования: время моделирования (Time Range) 2 мс, максимальный шаг по времени (Maximum Time Step) 0,1 мкс. Установите режим автоматического масштабирования Auto Scale Ranges.

2) После моделирования в режиме **Transient Analysis** выполните расчёт спектра ЧМ сигнала^{*)}:

Transient → FFT Windows → Add FFT Window...

В окне **Properties for FFT (свойства БПФ)** задайте^{**) :}

- на вкладке Plot (**график**):
 - в поле What To Plot (**что построить**): Harm;
 - в поле Expression (**выражение**): V(2);
- на вкладке FFT (**БПФ**):
 - в поле Upper Time Limit (**верхний предел времени**): TMAX,
 - Lower Time Limit (**нижний предел времени**): TSTART (или 0),
 - Frequency Step (**шаг по частоте**): 500,

^{*)} Отличия для версии Micro-Cap 12 указаны в п. 1.1.2.

^{**) :} См. примечания к расчёту спектра в п. 1.1.2.

- в поле Number of Points (*количество точек*, т.е. объём БПФ) выбрать 8192;
- на вкладке Scales and Formats (*масштабы и форматы*), предварительно сняв «галочку» в полях Auto Scale и Log:
 - в группе полей, объединённых под заголовком X, в поле Range Low (*нижняя граница диапазона*): 100k, в поле Range High (*верхняя граница диапазона*): 1.5meg, в поле Grid Spacing (*шаг сетки*): 100k;
 - в группе полей, объединённых под заголовком Y, в поле Range Low (*нижняя граница диапазона*): 0, в поле Range High (*верхняя граница диапазона*): 1, в поле Grid Spacing (*шаг сетки*): 0.1;
- на вкладке Colors, Fonts, and Lines (*цвета, шрифты и линии*):
 - в поле Width (*толщина линии*): 2,
 - в поле Style (*стиль*): Normal (*нормальный*).

По полученному графику определите центральную частоту и ширину спектра сигнала. Ширина спектра измеряется по значениям частоты, соответствующим крайним составляющим, которые имеют заметный уровень (приблизительно 0,1 от максимального значения). Сравните измеренную центральную частоту с заданной несущей частотой, а ширину спектра сигнала – с рассчитанной при домашней подготовке.

3) Повторите моделирование при других значениях девиации частоты сигнала:

- а) в 10 раз меньше, чем задано в исходных данных;
- б) в 50 раз меньше, чем задано в исходных данных.

Для уменьшения девиации частоты сигнала нужно во столько же раз уменьшить амплитуду модулирующего напряжения.

Определите ширину спектра сигнала. Сравните результаты расчёта и измерения. Сделайте выводы.

1.3.3. Моделирование импульсного сигнала

1) Составьте модель импульсного сигнала. В режиме анализа переходных процессов **Transient Analysis** при заданных в табл. 1.3 значениях параметров сигнала получите эпюры модулирующего видеоимпульса и радиоимпульса. Для моделирования одиночного импульса период повторения задайте равным времени моделирования: $T_{\text{п}} = 20$ мкс (см. п. 1.1.5).

Задайте следующие параметры моделирования: время моделирования (Time Range) 20 мкс, максимальный шаг по времени (Maximum Time Step) 1 нс. Установите режим автоматического масштабирования Auto Scale Ranges.

2) После моделирования в режиме **Transient Analysis** выполните расчёт спектра импульсного сигнала^{*)}:

Transient → FFT Windows → Add FFT Window...

В окне **Properties for FFT (свойства БПФ)** задайте^{**)} :

- на вкладке **Plot (график)**:
 - в поле **What To Plot (что построить)**: Harm;
 - в поле **Expression (выражение)**: V(3);
- на вкладке **FFT (БПФ)**:
 - в поле **Upper Time Limit (верхний предел времени)**: TMAX,
 - **Lower Time Limit (нижний предел времени)**: TSTART (или 0),
 - **Frequency Step (шаг по частоте)**: 100k,
 - в поле **Number of Points (количество точек, т.е. объём БПФ)**: выбрать 8192;
- на вкладке **Scales and Formats (масштабы и форматы)**, предварительно сняв «галочку» в полях **Auto Scale** и **Log**:
 - в группе полей, объединённых под заголовком **X**, в поле **Range Low (нижняя граница диапазона)**: 5meg, в поле **Range High (верхняя граница диапазона)**: 35meg, в поле **Grid Spacing (шаг сетки)**: 1meg;
 - в группе полей, объединённых под заголовком **Y**, в поле **Range Low (нижняя граница диапазона)**: 0, в поле **Range High (верхняя граница диапазона)**: 0.1, в поле **Grid Spacing (шаг сетки)**: 0.01;
- на вкладке **Colors, Fonts, and Lines (цвета, шрифты и линии)**:
 - в поле **Width (толщина линии)**: 2,
 - в поле **Style (стиль)**: Normal (нормальный).

По полученному графику определите параметры спектра:

- центральную частоту;
- максимальное значение;
- ширину главного лепестка.

Сравните измеренные значения параметров с рассчитанными при домашней подготовке.

3) Измените параметры сигнала: уменьшите длительность импульса в 2 раза и увеличьте несущую частоту на 2 МГц. Повторите моделирование. Сравните с результатами, полученными в п. 2. Сделайте выводы.

^{*)} Отличия для версии Micro-Cap 12 указаны в п. 1.1.2.

^{**)} См. примечания к расчёту спектра в п. 1.1.2.

1.4. Контрольные вопросы и задания

1. Сколько частотных составляющих имеет спектр сигнала с гармонической АМ?
2. Как коэффициент модуляции АМ сигнала влияет на уровень боковых составляющих спектра?
3. Качественно изобразите спектр АМ сигнала с коэффициентом модуляции 0,5 и частотой модуляции 10 кГц. Частота несущего колебания 100 кГц.
4. Запишите выражение, определяющее ширину спектра АМ сигнала.
5. Запишите выражение, определяющее индекс модуляции ЧМ сигнала.
6. Как индекс модуляции влияет на форму спектра ЧМ сигнала? Качественно изобразите спектр сигнала с гармонической ЧМ: а) при большом (больше 10) индексе модуляции; б) при малом (меньше 1) индексе модуляции.
7. Запишите выражение, определяющее ширину спектра ЧМ сигнала: а) при большом (больше 10) индексе модуляции; б) при малом (меньше 1) индексе модуляции.
8. Как уменьшение длительности радиоимпульса влияет на ширину его спектра?
9. Как увеличение несущей частоты влияет на спектр радиоимпульса?
10. Качественно изобразите спектр радиоимпульса длительностью 1 мкс с несущей частотой 10 МГц.

РАБОТА № 2. ПРОХОЖДЕНИЕ АМ СИГНАЛА ЧЕРЕЗ ТРАКТ РАДИОПРИЁМНИКА С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ

Цель лабораторной работы: моделирование преобразователя частоты супергетеродинного, инфрадинного и гомодинного радиоприёмников; получение на модели эпюр колебаний и амплитудных спектров исходного и преобразованного сигналов.

2.1. Методические указания

2.1.1. Типы радиоприёмников с преобразованием частоты

В составе радиоприёмного устройства преобразователь частоты (ПЧ) выполняет перенос спектра сигнала с одной частоты (несущей f_c) на другую (промежуточную f_n). Преобразование частоты осуществляется в результате выполнения следующих двух операций:

- умножения сигнала на колебание вспомогательного генератора (гетеродина) с частотой f_r ;
- фильтрации одной из частотных составляющих колебания, образующегося на выходе перемножителя.

Если с помощью фильтра выделяется колебание разностной частоты, т.е. $f_n = |f_c - f_r|$, то радиоприёмник называется **супергетеродинным**. При этом частоту гетеродина следует выбирать исходя из частоты сигнала и заданной промежуточной частоты:

- в случае верхней настройки гетеродина $f_r = f_c + f_n$,
- в случае нижней настройки гетеродина $f_r = f_c - f_n$.

Если с помощью фильтра выделяется колебание суммарной частоты, т.е. $f_n = f_c + f_r$, то радиоприёмник называется **инфрадинным**.

Если $f_r = f_c$ и выделяется колебание «нулевой» частоты, то радиоприёмник называют **приёмником с прямым преобразованием частоты** или **гомодинным**.

2.1.2. Модель преобразователя частоты супергетеродинного (инфрадинного) радиоприёмника

В результате перемножения сигнала и напряжения гетеродина образуется преобразованное колебание, которое имеет две составляющие: с суммарной частотой $f_c + f_r$ и с разностной частотой $|f_c - f_r|$. В суперге-

теродадном радиоприёмнике промежуточная частота равна разностной, а в инфрадинном – суммарной.

Схема модели сигнала и преобразователя частоты показана на рис. 2.1. В состав модели входят:

- источник модулирующего напряжения V1;
- генератор с управляемой амплитудой колебаний AM;
- источник колебания гетеродина V2;
- перемножитель X2;
- источник тока, управляемый напряжением, G1;
- параллельный колебательный контур, образованный катушкой индуктивности L1, конденсатором C1 и резистором R1.

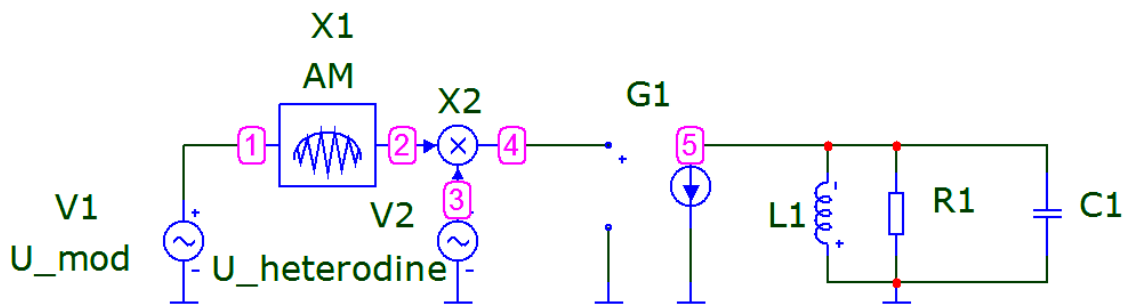


Рис. 2.1. Модель сигнала и преобразователя частоты супергетеродадного (инфрадинного) радиоприёмника

Колебательный контур является фильтром, который выделяет из колебания на выходе перемножителя составляющую промежуточной частоты. Для расчёта номиналов компонентов модели колебательного контура необходимо задать его параметры. Резонансная частота f_0 должна быть равна промежуточной частоте. Полоса пропускания контура $\Pi_{к. ПЧ}$ задаётся так, чтобы не было существенных искажений преобразованного АМ сигнала. Для этого она должна быть больше ширины спектра сигнала, которая при гармонической амплитудной модуляции равна $\Delta f_{АМС} = 2F_m$. Делать её значительно больше, чем $\Delta f_{АМС}$, нецелесообразно, так как это ухудшает подавление второй составляющей преобразованного колебания. Поэтому полосу пропускания следует задавать исходя из условия

$$\Delta f_{АМС} \leq \Pi_{к. ПЧ} \leq 2\Delta f_{АМС} \quad (2.1)$$

Для расчёта ёмкости конденсатора колебательного контура нужно задать индуктивность контурной катушки $L_{к. ПЧ}$. При заданных значениях индуктивности $L_{к. ПЧ}$ и резонансной частоты f_0 ёмкость конденсатора определяется как

$$C_{\text{к. ПЧ}} = \frac{1}{L_{\text{к. ПЧ}} (2\pi f_0)^2}. \quad (2.2)$$

Катушки индуктивности и конденсаторы в системе Micro-Cap моделируются как идеальные элементы, не имеющие потерь. Колебательный контур с такими элементами имеет бесконечно большое резонансное сопротивление. Для того чтобы оно было конечным, в модель колебательного контура необходимо включить резистор, имитирующий его резонансное сопротивление $R_{\text{к. ПЧ}}$. Величина резонансного сопротивления связана с полосой пропускания и ёмкостью конденсатора колебательного контура соотношением

$$R_{\text{к. ПЧ}} = \frac{1}{2\pi \Pi_{\text{к. ПЧ}} C_{\text{к. ПЧ}}}. \quad (2.3)$$

Модель катушки индуктивности имеет нулевое внутреннее сопротивление. Поэтому непосредственное подключение такого элемента к выходу перемножителя недопустимо, т.к. это приведёт к короткому замыканию. Кроме того, при этом нулевое выходное сопротивление перемножителя зашунтирует колебательный контур. Следовательно, для правильного моделирования необходимо обеспечить развязку перемножителя и колебательного контура. Для этого нужно дополнительно включить в модель элемент, преобразующий напряжение в ток и имеющий бесконечно большое выходное сопротивление, – идеальный источник тока, управляемый напряжением (ИТУН). Его модель выбирается следующим образом:

Component → Analog Primitives → Dependent Sources → IofV.

Параметр Value этого источника определяет коэффициент пропорциональности между током и напряжением, т.е. коэффициент передачи элемента. Его значение следует задать как величину, обратную резонансному сопротивлению контура. Тогда результирующий коэффициент передачи элемента ИТУН и колебательного контура на резонансной частоте будет равен 1.

2.1.3. Модель преобразователя частоты гомодинного радиоприёмника

В гомодинном радиоприёмнике частота гетеродина равна частоте сигнала. Поэтому в результате перемножения сигнала и напряжения гетеродина образуется преобразованное колебание, которое содержит высокочастотную составляющую с удвоенной частотой $2f_c$ и низкочастотную составляющую, которую условно можно назвать «составляющей с

нулевой частотой», поскольку в случае равенства частоты гетеродина и несущей частоты сигнала их разность равна нулю. Для выделения полезной низкочастотной составляющей и подавления высокочастотной к выходу перемножителя подключается фильтр низких частот (ФНЧ). В модели преобразователя частоты в качестве ФНЧ используется интегрирующая RC -цепь.

Поскольку суммарная частота $f_{\Gamma} + f_c = 2f_c$ много больше частоты полезной низкочастотной составляющей, которая равна частоте амплитудной модуляции F_m , то полосу пропускания ФНЧ (верхнюю граничную частоту $f_{в. \text{ФНЧ}}$) можно сделать достаточно большой. Для уменьшения искажений полезной составляющей преобразованного колебания её значение следует задать не менее чем $4F_m$. Верхняя граничная частота интегрирующей RC -цепи определяется постоянной времени $\tau = RC$ и равна $f_{в. \text{ФНЧ}} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC}$. Поэтому при заданных значениях верхней граничной частоты $f_{в. \text{ФНЧ}}$ и сопротивления R ёмкость конденсатора определяется как

$$C = \frac{1}{2\pi f_{в. \text{ФНЧ}} R}. \quad (2.4)$$

Схема модели показана на рис. 2.2. В состав модели входят:

- источник модулирующего напряжения V1;
- генератор с управляемой амплитудой колебаний AM;
- источник колебания гетеродина V2;
- перемножитель X2;
- фильтр низких частот, образованный резистором R1 и конденсатором C1.

Здесь, в отличие от модели преобразователя частоты супергетеродинного и инфрадинного радиоприёмников, фильтр подключается непосредственно к выходу перемножителя, поскольку он не создаёт короткого замыкания.

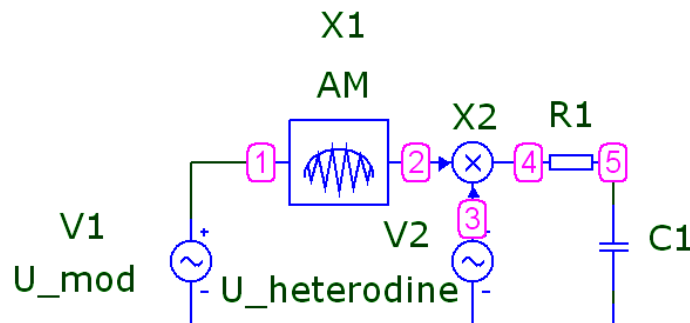


Рис. 2.2. Модель сигнала и преобразователя частоты гомодинного радиоприёмника

2.2. Домашняя подготовка

2.2.1. Расчёт преобразователя частоты супергетеродинного радиоприёмника

1) В соответствии с номером варианта по табл. 2.1 определите параметры АМ сигнала. Для промежуточной частоты супергетеродинного радиоприёмника $f_{\text{п}} = 100$ кГц рассчитайте частоту гетеродина при верхней настройке $f_{\text{г.в}}$ и при нижней настройке $f_{\text{г.н}}$.

2) Рассчитайте ширину спектра сигнала и в соответствии с условием (2.1) задайте полосу пропускания колебательного контура преобразователя частоты. Резонансную частоту задайте равной промежуточной частоте $f_{\text{п}} = 100$ кГц. Индуктивность контурной катушки задайте в интервале 1...2 мГн. По формулам (2.2) и (2.3) рассчитайте ёмкость конденсатора и резонансное сопротивление колебательного контура.

3) Рассчитайте коэффициент передачи ИТУН как $1/R_{\text{к.ПЧ}}$.

4) Качественно изобразите ожидаемый вид спектра в следующих точках:

- на входах перемножителя;
- на выходе перемножителя;
- на выходе фильтра.

2.2.2. Расчёт преобразователя частоты инфрадинного радиоприёмника

1) Для ранее найденной частоты гетеродина $f_{\text{г.в}}$ рассчитайте промежуточную частоту инфрадинного радиоприёмника $f_{\text{п.инфра}} = f_{\text{с}} + f_{\text{г.в}}$.

2) Задайте индуктивность контурной катушки преобразователя частоты в интервале 100...200 мкГн. Для найденного значения промежуточной частоты $f_{\text{п.инфра}}$ по формулам (2.2) и (2.3) рассчитайте ёмкость конденсатора и резонансное сопротивление колебательного контура.

3) Рассчитайте коэффициент передачи ИТУН как $1/R_{\text{к.ПЧ}}$.

4) Качественно изобразите ожидаемый вид спектра в следующих точках:

- на входах перемножителя;
- на выходе перемножителя;
- на выходе фильтра.

2.2.3. Расчёт преобразователя частоты гомодинного радиоприёмника

1) В соответствие с указаниями в п. 2.1.3 задайте значение верхней граничной частоты интегрирующей RC-цепи в модели преобразователя

частоты гомодинного радиоприёмника. Задайте величину сопротивления R в интервале 1...5 кОм и по формуле (2.4) рассчитайте ёмкость конденсатора RC -цепи.

2) Качественно изобразите ожидаемый вид спектра в следующих точках:

- на входах перемножителя;
- на выходе перемножителя;
- на выходе фильтра.

3) Подготовьтесь к ответу на контрольные вопросы.

Таблица 2.1

Параметры АМ сигнала

Вариант	Параметры				Вариант	Параметры			
	Амплитуда несущей, В	Частота несущей, кГц	Коэффициент модуляции	Частота модуляции, кГц		Амплитуда несущей, В	Частота несущей, кГц	Коэффициент модуляции	Частота модуляции, кГц
1	0,9	505	0,6	8	14	1,3	535	0,5	14
2	1,3	450	0,5	6	15	1,2	485	0,5	12
3	0,8	520	0,6	8	16	1,1	490	0,4	14
4	1,2	485	0,6	6	17	0,9	490	0,5	7
5	1,3	540	0,5	9	18	1,1	530	0,4	12
6	1,0	525	0,5	12	19	0,9	490	0,5	7
7	0,8	510	0,5	13	20	1,2	480	0,4	11
8	0,9	525	0,6	12	21	1,3	525	0,4	10
9	1,2	550	0,4	14	22	1,1	530	0,4	12
10	0,9	550	0,4	7	23	0,9	535	0,6	12
11	1,0	475	0,4	13	24	0,9	450	0,6	7
12	1,1	475	0,4	11	25	0,8	510	0,6	9
13	1,1	515	0,5	11	26	1,2	520	0,5	15

2.3. Лабораторное задание

2.3.1. Моделирование преобразователя частоты супергетеродинного радиоприёмника

1) Составьте модель сигнала и преобразователя частоты в соответствии с рис. 2.1. Параметры сигнала задайте по табл. 2.1 в соответствии с номером варианта. Установите амплитуду колебания гетеродина 1 В и рассчитанное значение частоты при верхней настройке $f_{г.в}$. Параметр Value источника G1 задайте равным $1/R_{к.пч}$.

2) Получите эюры следующих колебаний:

- сигнала;
- напряжения гетеродина;
- напряжения на выходе перемножителя.

Параметры моделирования задаются так же, как при моделировании АМ сигнала в работе № 1: время моделирования (Time Range) 2 мс, максимальный шаг по времени (Maximum Time Step) 0,1 мкс.

3) Рассчитайте амплитудные спектры смоделированных колебаний и постройте их на одном графике.

Для расчёта спектров выполните в окне **Transient Analysis**^{*)} команды

Transient → FFT Windows → Add FFT Window...

Затем в окне **Properties for FFT** (*свойства БПФ*) задайте^{**) :}

- на вкладке **Plot** (*график*):
 - в поле What To Plot (*что построить*): Harm;
 - в поле Expression (*выражение*): сначала выбрать V(2), затем нажать кнопку Add (*добавить*) и выбрать V(3), затем опять нажать кнопку Add и выбрать V(4)^{***)};
- на вкладке **FFT** (*БПФ*):
 - в поле Upper Time Limit (*верхний предел времени*): TMAX,
 - Lower Time Limit (*нижний предел времени*): TSTART (или 0),
 - Frequency Step (*шаг по частоте*): 500,
 - в поле Number of Points (*количество точек*, т.е. объём БПФ) выбрать 8192;
- на вкладке **Scales and Formats** (*масштабы и форматы*), предварительно сняв «галочку» в полях Auto Scale и Log:
 - в группе полей, объединённых под заголовком X, в поле Range Low (*нижняя граница диапазона*): 0, в поле Range High (*верхняя граница диапазона*): 1.2meg, в поле Grid Spacing (*шаг сетки*): 100k;
 - в группе полей, объединённых под заголовком Y, в поле Range Low (*нижняя граница диапазона*): 0, в поле Range High (*верхняя граница диапазона*): 1.4, в поле Grid Spacing (*шаг сетки*): 0.1;

^{*)} Отличия для версии Micro-Cap 12 указаны в п. 1.1.2.

^{**) :} См. примечания к расчёту спектра в п. 1.1.2.

^{***)} Номера узлов указаны для приведённой выше схемы модели. При выполнении лабораторной работы они могут отличаться.

- на вкладке Colors, Fonts, and Lines (*цвета, шрифты и линии*) параметры задать в соответствии с указаниями во Введении.

По графикам спектра определите частоту и уровень составляющих спектра смоделированных колебаний. Сравните спектр преобразованного колебания на разностной частоте со спектром сигнала. Сделайте выводы.

4) Выполните моделирование колебания на выходе фильтра и получите его спектр. Постройте спектр на отдельном графике, задавая параметры спектра так же, как в п. 3. Сравните спектр этого колебания с полученным ранее спектром колебания на выходе перемножителя. Сделайте выводы о влиянии фильтра на спектр преобразованного колебания.

5) Повторите моделирование при нижней настройке гетеродина. Сравните с результатами п. 3. Сделайте выводы.

2.3.2. Моделирование преобразователя частоты инфранийного радиоприёмника

1) Измените номиналы элементов модели колебательного контура преобразователя частоты в соответствии с расчётами, выполненными при подготовке к лабораторной работе, так, чтобы модель соответствовала преобразователю частоты инфранийного радиоприёмника.

2) Получите эпюры следующих колебаний:

- сигнала;
- напряжения гетеродина;
- напряжения на выходе перемножителя;
- напряжения на выходе фильтра.

3) Рассчитайте амплитудные спектры смоделированных колебаний и постройте их на одном графике. Сравните их со спектрами, полученными при выполнении п. 2.3.1. Сделайте выводы.

2.3.3. Моделирование преобразователя частоты гомодийного радиоприёмника

1) Составьте модель сигнала и преобразователя частоты в соответствии с рис. 2.2. Параметры сигнала задайте по табл. 2.1 в соответствии с номером варианта. Установите частоту колебания гетеродина равной частоте сигнала и задайте амплитуду 1 В.

2) Выполните моделирование и получите эпюры следующих колебаний:

- АМ сигнала;
- напряжения на выходе перемножителя;
- напряжения на выходе ФНЧ.

Параметры моделирования задаются так же, как в п. 2.3.1: время моделирования (Time Range) 2 мс, максимальный шаг по времени (Maximum Time Step) 0,1 мкс.

Сравните колебание на выходе ФНЧ и огибающую АМ сигнала. Сделайте выводы из полученных результатов.

3) Используя методику, описанную в п. 2.3.1, получите спектры АМ сигнала и напряжения на выходе перемножителя; постройте их на одном графике. Поскольку напряжение на выходе перемножителя имеет постоянную составляющую, то для её отображения на графике нужно на вкладке FFT (**БПФ**)^{*)} поставить «галочку» в поле Include DC Harmonic (**Включить постоянную составляющую**). Сравните спектр АМ сигнала и колебания на выходе перемножителя.

Получите спектры колебания на выходе перемножителя и на выходе ФНЧ и постройте их на отдельном графике. Сравните спектры и сделайте выводы о влиянии ФНЧ.

2.4. Контрольные вопросы и задания

1. На каких частотах в радиоприёмнике с преобразованием частоты образуются составляющие спектра колебания на выходе перемножителя?
2. Каким выражением определяется частота гетеродина в случае верхней настройки?
3. Каким выражением определяется частота гетеродина в случае нижней настройки?
4. На какую частоту должен быть настроен колебательный контур преобразователя частоты супергетеродинного радиоприёмника?
5. На какую частоту должен быть настроен колебательный контур преобразователя частоты инфрадинного радиоприёмника?
6. Используя формулу Томсона для резонансной частоты, получите выражение (2.2) для ёмкости конденсатора колебательного контура.
7. Для чего в модели преобразователя частоты супергетеродинного радиоприёмника используется элемент ИТУН?
8. Чему должна быть равна частота колебания гетеродина гомодинного радиоприёмника?
9. На каких частотах в гомодинном радиоприёмнике образуются составляющие спектра колебания на выходе перемножителя?

^{*)} В версии Micro-Cap 12 эта вкладка называется Fourier.

10. Для чего в модели преобразователя частоты гомодинного радиоприёмника используется интегрирующая RC -цепь?
11. Исходя из каких соображений следует выбирать верхнюю граничную частоту ФНЧ, входящего в состав гомодинного радиоприёмника?
12. Используя выражение для верхней граничной частоты интегрирующей RC -цепи, получите формулу (2.4) для ёмкости конденсатора.

РАБОТА № 3. ВЛИЯНИЕ ПОМЕХИ ПО ЗЕРКАЛЬНОМУ КАНАЛУ НА ПРИЁМ СИГНАЛА В СУПЕРГЕТЕРОДИННОМ РАДИОПРИЁМНИКЕ

Цель лабораторной работы: 1) моделирование преселектора и преобразователя частоты супергетеродинного радиоприёмника при приёме смеси полезного АМ сигнала и мешающего ЧМ сигнала, действующего на частоте зеркального канала; расчёт спектра преобразованного колебания; 2) оценка влияния преселектора на степень искажения преобразованного полезного сигнала.

3.1. Методические указания

3.1.1. Зеркальный канал приёма в супергетеродинном радиоприёмнике

В супергетеродинном радиоприёмнике, промежуточная частота которого равна $f_{\text{п}} = |f_{\text{с}} - f_{\text{г}}|$, помехи, воздействующие по паразитным каналам приёма, переносятся в преобразователе частоты на промежуточную частоту (либо, в случае канала прямого прохождения, воздействуют на промежуточной частоте) и, накладываясь на преобразованный полезный сигнал, искажают его. Один из основных паразитных каналов приёма – **зеркальный канал**. Он всегда образуется в результате преобразования частоты. В случае верхней настройки гетеродина, когда $f_{\text{г}} > f_{\text{с}}$, его частота равна $f_{\text{зк}} = f_{\text{г}} + f_{\text{п}} = f_{\text{с}} + 2f_{\text{п}}$.

Для ослабления помехи, действующей на частоте зеркального канала, в супергетеродинном радиоприёмнике используется преселектор, настроенный на частоту сигнала. Степень ослабления помехи (селективность) определяется уровнем нормированной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) преселектора на частоте зеркального канала. Для простейшего преселектора в виде параллельного колебательного контура селективность равна

$$\sigma_{\text{зк}} = \sqrt{\xi_{\text{зк}}^2 + 1}, \quad (3.1)$$

где $\xi_{\text{зк}} = Q_{\text{к. прес}} \left(\frac{f_{\text{зк}}}{f_0} - \frac{f_0}{f_{\text{зк}}} \right)$ – обобщённая расстройка для частоты зеркального канала; f_0 – резонансная частота колебательного контура, равная частоте сигнала; $Q_{\text{к. прес}} = \frac{f_0}{\Pi_{\text{к. прес}}}$ – добротность контура; $\Pi_{\text{к. прес}}$ – полоса пропускания контура. В децибелах селективность выражается как

$$\sigma_{\text{зк. дБ}} = 20 \lg \sigma_{\text{зк}}. \quad (3.2)$$

3.1.2. Модель сигналов и преобразователя частоты супергетеродинного радиоприёмника без преселектора

При моделировании полезным сигналом является колебание с гармонической амплитудной модуляцией (АМ), помехой – колебание с гармонической частотной модуляцией (ЧМ). Параметры этих колебаний определяются из табл. 3.1 в соответствии с номером варианта. Промежуточная частота $f_{\text{п}} = 100$ кГц. Частота гетеродина задаётся для случая верхней настройки как $f_{\text{г}} = f_{\text{с}} + f_{\text{п}}$. Помеха действует на частоте зеркального канала $f_{\text{зк}} = f_{\text{с}} + 2f_{\text{п}}$.

Схема модели сигналов и преобразователя частоты показана на рис. 3.1. В состав модели входят:

- источник модулирующего напряжения для сигнала V1;
- генератор с управляемой амплитудой колебаний АМ;
- источник модулирующего напряжения для помехи V2;
- генератор колебания с управляемой частотой VCO;
- сумматор X3;
- источник колебания гетеродина V3;
- перемножитель X4;
- источник тока, управляемый напряжением, G1;
- параллельный колебательный контур, образованный катушкой индуктивности L1, конденсатором C1 и резистором R1.

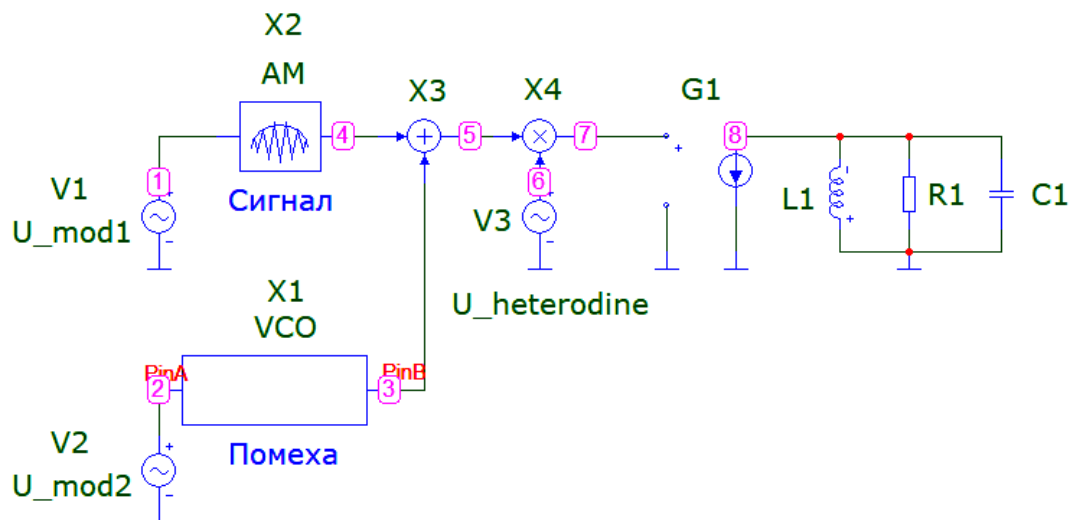


Рис. 3.1. Модель сигналов и преобразователя частоты супергетеродинного радиоприёмника без преселектора

Параметры колебательного контура преобразователя частоты (ПЧ) (индуктивность контурной катушки, ёмкость конденсатора, резонансное сопротивление контура) рассчитываются в соответствии с шириной спектра АМ сигнала по методике, изложенной в пп. 2.1.2, 2.2.1 лабора-

торной работы № 2. Коэффициент передачи источника тока, управляемого напряжением, (ИТУН) задаётся так, чтобы на резонансной частоте результирующий коэффициент передачи ИТУН и колебательного контура был равен 1.

3.1.3. Модель сигналов и преобразователя частоты супергетеродинного радиоприёмника с преселектором

Схема модели сигнала и помехи, преселектора и преобразователя частоты показана на рис. 3.2. Она отличается от схемы на рис. 3.1 тем, что между сумматором, с помощью которого моделируется наложение помехи на полезный сигнал, и перемножителем преобразователя частоты включён параллельный колебательный контур преселектора, образованный элементами L2, C2 и R2. Для развязки сумматора и колебательного контура между ними дополнительно включён ИТУН G2. Его коэффициент передачи задаётся как величина, обратная резонансному сопротивлению контура $R_{к. прес}$.

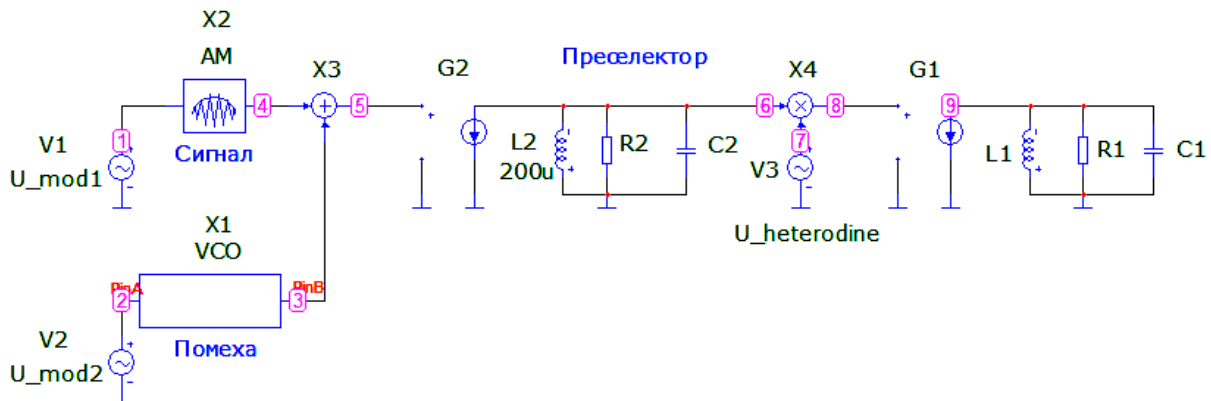


Рис. 3.2. Модель сигналов и преобразователя частоты супергетеродинного радиоприёмника с преселектором

Параметры элементов модели преселектора имеют следующие значения: индуктивность контурной катушки $L_{к. прес} = 200 \text{ мкГн}$, ёмкость конденсатора рассчитывается таким образом, чтобы резонансная частота контура совпадала с заданной частотой сигнала:

$$C_{к. прес} = \frac{1}{L_{к. прес} (2\pi f_c)^2}. \quad (3.3)$$

Резонансное сопротивление контура рассчитывается так, чтобы обеспечить полосу пропускания, необходимую для получения заданной селективности по зеркальному каналу.

3.2. Домашняя подготовка

1) В соответствии с номером варианта по табл. 3.1 определите параметры полезного АМ сигнала и мешающего ЧМ сигнала, а также требуемую селективность по зеркальному каналу. Для промежуточной частоты супергетеродинного радиоприёмника $f_{\text{п}} = 100$ кГц рассчитайте частоту гетеродина при верхней настройке и частоту зеркального канала. Частоту зеркального канала сравните с заданной частотой помехи.

2) Рассчитайте ширину спектра полезного сигнала и в соответствии с указаниями в п. 2.2.1 лабораторной работы № 2 рассчитайте ёмкость конденсатора $C_{\text{к. ПЧ}}$ и резонансное сопротивление $R_{\text{к. ПЧ}}$ колебательного контура преобразователя частоты.

3) Рассчитайте коэффициент передачи ИТУН G1 как $1/R_{\text{к. ПЧ}}$.

4) Качественно изобразите спектры следующих колебаний:

- полезного сигнала, помехи и напряжения гетеродина на одной частотной оси;
- результата умножения суммы сигнала и помехи на колебание гетеродина;
- колебания на выходе фильтра, входящего в состав преобразователя частоты.

5) По формуле (3.3) рассчитайте ёмкость $C_{\text{к. прес}}$ конденсатора колебательного контура преселектора.

6) Используя формулы (3.1), (3.2), получите выражение для полосы пропускания колебательного контура преселектора в зависимости от селективности по зеркальному каналу. Для заданного значения селективности рассчитайте полосу пропускания. По формуле

$$R_{\text{к. прес}} = \frac{1}{2\pi\Pi_{\text{к. прес}}C_{\text{к. прес}}} \quad (3.4)$$

рассчитайте резонансное сопротивление колебательного контура.

7) Рассчитайте коэффициент передачи ИТУН G2 как $1/R_{\text{к. прес}}$.

8) Качественно изобразите спектры следующих колебаний:

- полезного сигнала и помехи на входе преселектора на одной частотной оси;
- полезного сигнала и помехи на выходе преселектора, а также колебания гетеродина на одной частотной оси;
- результата умножения суммы сигнала и помехи на колебание гетеродина;

- колебания на выходе фильтра, входящего в состав преобразователя частоты.

9) Подготовьтесь к ответу на контрольные вопросы.

Таблица 3.1

Параметры полезного АМ сигнала и мешающего ЧМ сигнала

Вариант	Параметры АМ сигнала				Параметры ЧМ сигнала				Селективность, дБ
	Амплитуда несущей, В	Частота несущей, кГц	Коэффициент модуляции	Частота модуляции, кГц	Амплитуда несущей, В	Частота несущей, кГц	Девияция частоты, кГц	Частота модуляции, кГц	
1	1,0	525	0,5	12	1,0	725	57	7	25
2	1,2	550	0,4	14	1,2	750	81	8	31
3	0,8	510	0,5	13	0,8	710	55	9	27
4	0,9	505	0,6	8	0,9	705	60	11	23
5	1,1	475	0,4	11	1,1	675	77	7	29
6	0,9	525	0,6	12	0,9	725	66	6	22
7	1,3	450	0,5	6	1,3	650	82	9	30
8	1,0	475	0,4	13	1,0	675	56	8	26
9	0,8	520	0,6	8	0,8	720	66	11	21
10	1,1	515	0,5	11	1,1	715	72	7	28
11	0,9	550	0,4	7	0,9	750	54	11	31
12	1,2	485	0,6	6	1,2	685	49	7	22
13	1,3	540	0,5	9	1,3	740	51	13	29
14	1,0	515	0,4	8	1,0	715	81	14	25
15	0,8	475	0,6	13	0,8	675	60	9	30
16	0,9	490	0,5	7	0,9	690	72	12	23
17	1,1	530	0,4	12	1,1	730	66	8	20
18	1,2	480	0,4	11	1,2	680	48	6	27
19	1,3	535	0,5	14	1,3	735	73	10	21
20	0,8	510	0,6	9	0,8	710	72	7	28
21	1,3	525	0,4	10	1,3	725	57	13	24
22	1,2	485	0,5	12	1,2	685	74	9	26
23	0,9	450	0,6	7	0,9	650	88	9	22
24	1,1	490	0,4	14	1,1	690	52	11	29
25	1,2	520	0,5	15	1,2	720	56	13	20
26	0,9	535	0,6	12	1,3	735	48	7	30

3.3. Лабораторное задание

3.3.1. Моделирование сигнала на выходе преобразователя частоты радиоприёмника без преселектора

1) Составьте модель преобразователя частоты радиоприёмника без преселектора (рис. 3.1). Параметры модели задайте в соответствии с

домашней подготовкой. Амплитуду колебания гетеродина установите равной 1 В.

2) Выполните моделирование и получите эпюры следующих колебаний:

- полезного сигнала;
- мешающего сигнала;
- напряжения гетеродина;
- напряжения на выходе перемножителя преобразователя частоты.

Параметры моделирования: время моделирования (Time Range) 5 мс, максимальный шаг по времени (Maximum Time Step) 0,1 мкс. Эпюры полезного сигнала, помехи, колебания гетеродина и колебания на выходе перемножителя нужно построить на одной странице (на разных графиках), эпюру колебания на выходе фильтра ПЧ построить на отдельной странице.

После построения эпюры колебания на выходе фильтра ПЧ график нужно получить в укрупнённом масштабе по оси времени, выделив и увеличив какой-либо его участок длительностью 1 мс. По графику оцените характер искажения закона амплитудной модуляции преобразованного полезного сигнала в результате действия помехи.

3) Рассчитайте амплитудные спектры полезного сигнала, помехи, колебания гетеродина и колебания на выходе перемножителя и постройте их на одном графике.

Для расчёта спектров выполните следующие команды в окне **Transient Analysis**^{*)}:

Transient → FFT Windows → Add FFT Window...

Затем в окне **Properties for FFT** (свойства БПФ) задайте^{**)} :

- на вкладке **Plot** (график):
 - в поле **What To Plot** (что построить): Harm;
 - в поле **Expression** (выражение): сначала выбрать V(4), затем нажать кнопку **Add** (добавить) и выбрать V(3), затем опять нажать кнопку **Add** и выбрать последовательно V(6) и V(7)^{***)};
- на вкладке **FFT** (БПФ):
 - в поле **Upper Time Limit** (верхний предел времени): TMAX,
 - **Lower Time Limit** (нижний предел времени): TSTART (или 0),

^{*)} Отличия для версии Micro-Cap 12 указаны в п. 1.1.2.

^{**)} См. примечания к расчёту спектра в п. 1.1.2.

^{***)} Номера узлов указаны для приведённой выше схемы модели. При другой нумерации узлов на схеме номера на вкладке **Plot** должны быть изменены.

- Frequency Step (*шаг по частоте*): при заданных пределах по времени автоматически устанавливается 200,
- в поле Number of Points (*количество точек*, т.е. объём БПФ) выбрать 32768;
- на вкладке Scales and Formats (*масштабы и форматы*) задайте параметры в соответствии с указаниями во Введении.
- на вкладке Colors, Fonts, and Lines (*цвета, шрифты и линии*) задайте параметры в соответствии с указаниями во Введении.

По графикам спектра определите вид его составляющих на разностной частоте ($f_r - f_c = 100$ кГц для полезного сигнала, $f_m - f_r = 100$ кГц для помехи) и на суммарной частоте ($f_c + f_r$ для полезного сигнала, $f_m + f_r$ для помехи). Сделайте выводы.

4) Для того чтобы оценить вид спектра колебания на выходе фильтра ПЧ, дополнительно постройте его график в отдельном окне. Для этого в окне графиков спектра (или в окне графиков колебаний) выполните команды^{*)}

Transient → FFT Windows → Add FFT Window...

и в окне **Properties for FFT** (*свойства БПФ*)^{**)} на вкладке Plot в поле Expression выберите V(8)^{***)}; на остальных вкладках задайте такие же значения параметров, как и для ранее построенных графиков спектров.

Сопоставьте спектр преобразованного сигнала со спектром исходного полезного сигнала, сделайте выводы.

3.3.2. Моделирование сигнала на выходе преобразователя частоты радиоприёмника с преселектором

1) В схему модели добавьте колебательный контур преселектора и ИТУН G2 (рис.3.2). Выполните моделирование суммарного колебания полезного сигнала и помехи V(5), колебания на выходе преселектора V(6) и колебания на выходе фильтра ПЧ V(9)^{****)}. Параметры моделирования задайте такие же, как в предыдущем случае: время моделирования (Time Range) 5 мс, максимальный шаг по времени (Maximum Time Step) 0,1 мкс.

^{*)} Отличия для версии Micro-Cap 12 указаны в п. 1.1.2.

^{**)} См. примечания к расчёту спектра в п. 1.1.2.

^{***)} Номера узлов указаны для схемы модели на рис. 3.1. При другой нумерации узлов на схеме номер на вкладке Plot должен быть изменён.

^{****)} Номера узлов указаны для схемы модели на рис. 3.2. При выполнении лабораторной работы они могут отличаться.

Получите эюру колебания на выходе фильтра ПЧ в таком же масштабе, как в п. 3.3.1. Сравните с аналогичным графиком, полученным в п. 3.3.1, и оцените степень искажения огибающей преобразованного полезного сигнала.

2) Рассчитайте амплитудные спектры смоделированных колебаний и постройте их на отдельных графиках. На частоте зеркального канала определите уровень центральной составляющей спектра помехи на входе преселектора $S_{\text{вх}}(f_{\text{зк}})$ и на выходе $S_{\text{вых}}(f_{\text{зк}})$. По измеренным значениям спектра рассчитайте ослабление помехи в децибелах как $20\lg\left(\frac{S_{\text{вх}}(f_{\text{зк}})}{S_{\text{вых}}(f_{\text{зк}})}\right)$ и сравните с заданным значением селективности. Сделайте выводы о влиянии преселектора на спектр преобразованного колебания.

3.4. Контрольные вопросы и задания

1. На каких частотах в супергетеродинном радиоприёмнике образуются составляющие спектра колебания на выходе перемножителя, если частота сигнала равна 65 МГц, частота гетеродина 75 МГц?
2. В супергетеродинном радиоприёмнике, предназначенном для приёма сигнала на частоте 500 кГц, частота гетеродина равна 600 кГц, промежуточная частота 100 кГц. На какую частоту должен быть настроен преселектор радиоприёмника?
3. На какой частоте образуется зеркальный канал в радиоприёмнике, предназначенном для приёма сигнала на частоте 70 МГц, если частота гетеродина равна 80 МГц?
4. В радиоприёмнике с верхней настройкой гетеродина, предназначенном для приёма сигнала с частотой 65 МГц, промежуточная частота равна 10 МГц, добротность контура преселектора 30. Рассчитайте селективность (в децибелах) одноконтурного преселектора на частоте зеркального канала.
5. Используя формулы (3.1), (3.2), получите выражение для полосы пропускания колебательного контура преселектора в зависимости от селективности по зеркальному каналу (в децибелах).
6. Почему в супергетеродинном радиоприёмнике ослабление помехи, действующей на частоте зеркального канала, необходимо выполнять до преобразования частоты, а не после?
7. Как изменится селективность радиоприёмника по зеркальному каналу, если увеличить промежуточную частоту?

8. Можно ли повысить селективность радиоприёмника по зеркальному каналу сужением полосы пропускания колебательного контура преобразователя частоты?
9. Можно ли повысить селективность радиоприёмника по зеркальному каналу сужением полосы пропускания преселектора?
10. Используя формулу Томсона для резонансной частоты колебательного контура, получите выражение (3.3), определяющее ёмкость конденсатора.
11. Какими способами можно повысить избирательность радиоприёмника по зеркальному каналу?

Основные требования к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы приёма и обработки сигналов»

Основанием для выставления оценки за каждую выполненную работу является наличие полностью оформленного в соответствии с требованиями индивидуального отчёта и его защита с оценкой не ниже чем 3 («удовлетворительно»).

Отчёт по работе должен содержать:

1. полностью выполненную домашнюю подготовку для заданного варианта исходных данных;
2. схемы моделей по каждому пункту задания;
3. графические результаты моделирования в соответствии с заданием (эпюры колебаний, амплитудные спектры, амплитудно-частотные характеристики цепей);
4. измеренные по графикам значения величин, которые необходимы для сравнения с заданными или рассчитанными теоретически значениями параметров;
5. сравнение измеренных значений параметров с ожидаемыми, полученными при расчёте;
6. конкретные выводы по каждому пункту задания.

Домашняя подготовка оформляется студентами на листах формата А4 в любой форме (от руки или на компьютере). В случае невыполнения домашней подготовки студент до работы не допускается.

В ходе выполнения работы студенты дополняют домашнюю подготовку выводами и сравнительными результатами; на компьютере демонстрируют преподавателю полученные графические и численные результаты моделирования, на основании которых делаются выводы.

Защита работы проводится в день её выполнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатырёв, Е.А. Схемотехническое и функциональное моделирование радиоэлектронных устройств в программе Micro-Cap: учеб. пособие / Е.А. Богатырёв, В.А. Филатов. – М.: Издательство МЭИ, 2021.
2. Амелина, М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10: учеб. пособие / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013.