

Занятие № 1**Типовые радиосигналы и их спектры**

Основные операции, выполняемые радиоприёмным устройством:

- усиление сигнала;
- фильтрация;
- преобразование частоты сигнала;
- демодуляция (детектирование);
- последетекторная обработка.

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

Блок высокой частоты – линейное устройство. Для того чтобы не происходило искажение сигнала при прохождении через блок высокой частоты, полоса пропускания БВЧ должна быть не меньше ширины спектра сигнала. Чрезмерное расширение полосы пропускания приведёт к ухудшению фильтрации сигнала в том случае, когда он принимается на фоне шумов и мешающих колебаний.

Рассмотрим выражения, определяющие спектр типовых радиосигналов, и выясним, от чего зависит ширина спектра этих сигналов. Затем выполним моделирование сигналов при различных значениях параметров модуляции и сопоставим спектры, полученные на модели, с рассчитанными теоретически.

1) Сигнал с гармонической амплитудной модуляцией (АМ)

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

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

U_0 – амплитуда несущей,

f_0 – частота несущей,

F_m – частота модуляции,

m – коэффициент модуляции.

Найдём частотные составляющие этого сигнала:

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

Ширина спектра сигнала $\Delta f_{\text{АМС}} = 2F_m$.

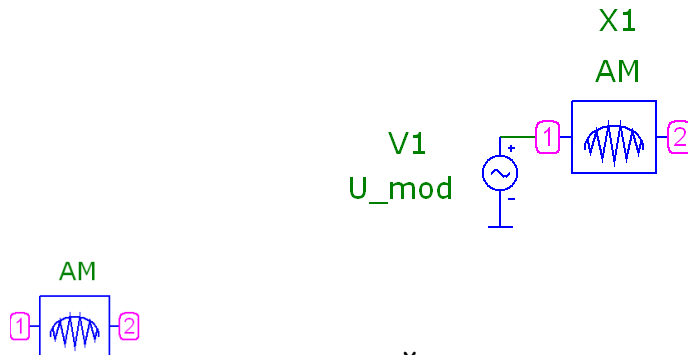
Выполним моделирование АМ сигнала при следующих значениях параметров:

- амплитуда несущей $U_0 = 1$ В;
- частота несущей $f_0 = 100$ кГц;

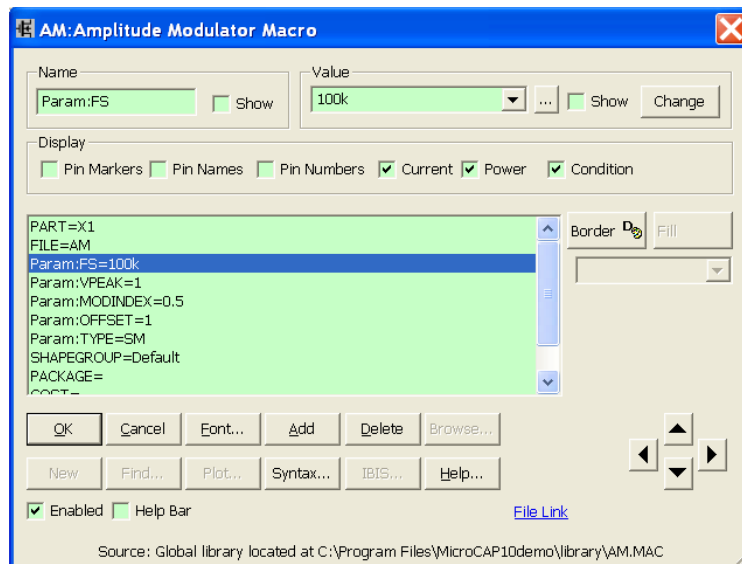
- коэффициент модуляции $m = 0,5$;
- частота модуляции $F_m = 10$ кГц.

1. Составление модели

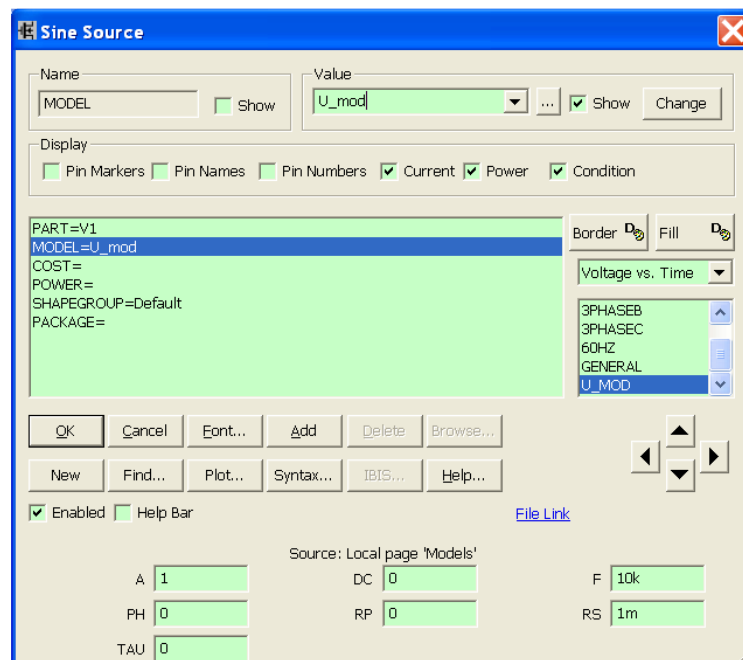
Схема модели:



Элемент , моделирующий генератор с управляемой амплитудой колебаний, выбирается в группе макросов (**Component** → **Analog Primitives** → **Macros**). Его параметры задаются следующим образом:

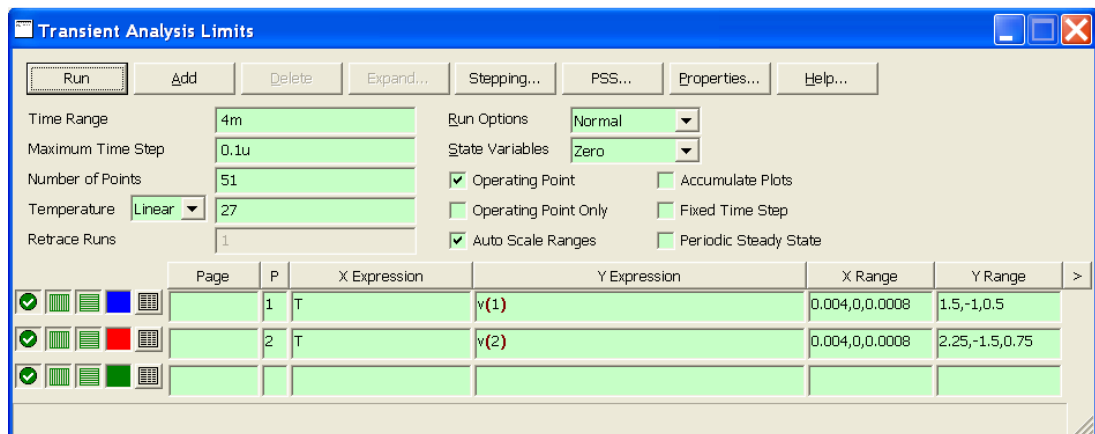


Параметры модели источника модулирующего колебания V1:

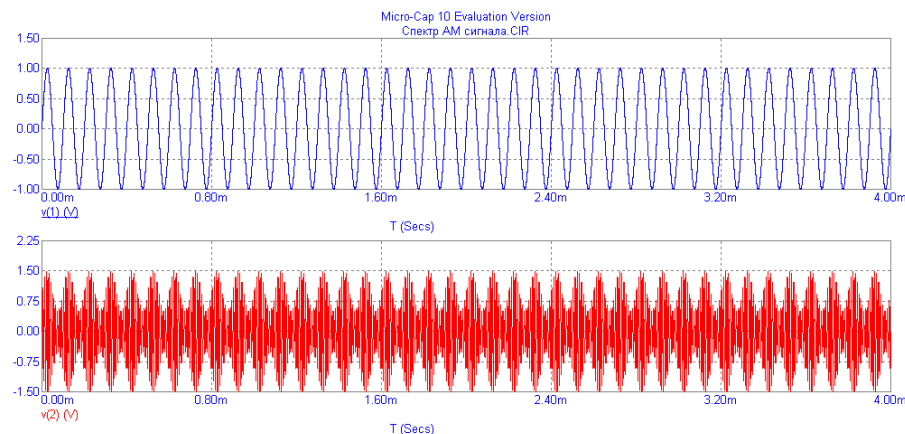


2. Моделирование колебаний

Параметры моделирования:



Эпюры колебаний:



3. Расчёт спектра

Для расчёта спектра выбираем в окне **Transient Analysis**:

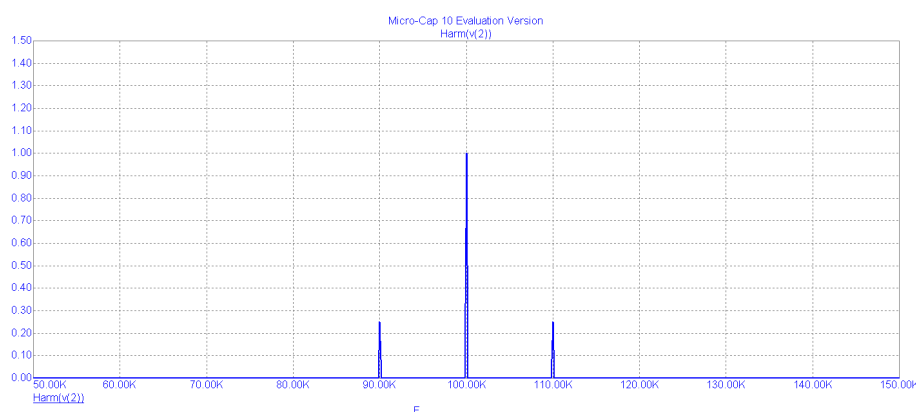
Transient → FFT Windows → Add FFT Window...

Затем в окне **Properties for FFT** (свойства БПФ) задаём:

- в закладке **Plot** (график):
 - в поле **What To Plot** (что построить): Harm;
 - в поле **Expression** (выражение): v(2);
- в закладке **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) выбираем 8192;
- в закладке **Scales and Formats** (масштабы и форматы):
 - в группе полей, объединённых под заголовком **X**, в поле **Range Low** (нижняя граница диапазона): 50k, в поле **Range High** (верхняя граница

- диапазона): 150k, в поле Grid Spacing (шаг сетки): 10k, снять «галочку» в полях Auto Scale и Log;
- 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, снять «галочку» в полях Auto Scale и Log;
 - в закладке Colors, Fonts, and Lines (цвета, шрифты и линии):
 - в поле Width (толщина линии): 2,
 - в поле Style (стиль): Normal (нормальный, т.е. соединение рассчитанных точек спектра прямыми линиями).

Получается график спектра следующего вида:



(Для того чтобы изменить параметры расчёта спектра, нужно дважды щёлкнуть левой кнопкой мыши в поле графика и затем, сделав исправления в соответствующих закладках, нажать клавишу ОК).

По графику определяем параметры спектра:

- уровень несущей 1 В,
- уровень боковых составляющих 0,25 В,
- частота несущей 100 кГц,
- частоты боковых составляющих 90 кГц и 110 кГц.

Параметры спектра совпадают с теоретическими значениями.

Далее повторяем моделирование при других значениях частоты модуляции: 5 кГц и 15 кГц и оцениваем изменение ширины спектра сигнала.

Схему модели, эюры сигналов и спектры следует сохранить в виде btr-файлов и затем распечатать и поместить в рабочую тетрадь.

2) Сигнал с гармонической частотной модуляцией (ЧМ)

$$u(t) = U_0 \cos\left(2\pi \int f(t) dt\right) = U_0 \cos \varphi(t), \text{ где } f(t) = f_0 + \Delta f_m \cos 2\pi F_m t,$$

где Δf_m – девиация частоты (максимальное отклонение частоты сигнала от частоты несущей f_0). При гармонической ЧМ полная фаза сигнала определяется выражением

$$\varphi(t) = 2\pi f_0 t + \frac{\Delta f_m}{F_m} \sin 2\pi F_m t = 2\pi f_0 t + \beta_{\text{ЧМ}} \sin 2\pi F_m t,$$

где $\beta_{\text{ЧМ}} = \frac{\Delta f_m}{F_m}$ – индекс частотной модуляции. Геометрический смысл индекса ЧМ – максимальное значение (в радианах) угла, на который поворачивается вектор комплексной огибающей сигнала в результате модуляции.

Спектр сигнала с гармонической ЧМ определяется на основе следующего выражения:

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

где $J_n(x)$ – функция Бесселя n -го порядка (при этом $J_{-n}(x) = (-1)^n J_n(x)$). Таким образом, спектр ЧМ сигнала имеет бесконечно много составляющих с частотами $f_0 \pm nF_m$, следовательно, его ширина теоретически бесконечна. Однако, начиная с некоторого номера n частотной составляющей, её уровень быстро убывает, поэтому при практических расчётах ширину спектра считают конечной. При $\beta_{\text{ЧМ}} \gg 1$ ширина спектра ЧМ сигнала приближённо равна $\Delta f_{\text{ЧМС}} \approx 2F_m(1 + \beta_{\text{ЧМ}})$. При малых значениях индекса модуляции ($\beta_{\text{ЧМ}} < 1$) амплитудный спектр ЧМ сигнала имеет практически такой же вид, как и спектр АМ сигнала, поэтому его ширина считается равной $\Delta f_{\text{ЧМС}} = 2F_m$.

Выполним моделирование ЧМ сигнала при следующих значениях параметров:

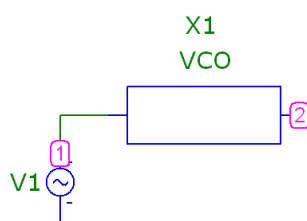
- амплитуда несущей $U_0 = 1$ В;
- частота несущей $f_0 = 1$ МГц;
- девиация частоты $\Delta f_m = 100$ кГц;
- частота модуляции $F_m = 10$ кГц.

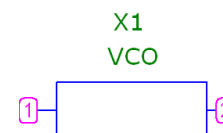
Для такого сигнала индекс модуляции равен $\beta_{\text{ЧМ}} = \frac{\Delta f_m}{F_m} = 10$. Поскольку $\beta_{\text{ЧМ}} \gg 1$, то ширина спектра приближённо равна

$$\Delta f_{\text{ЧМС}} \approx 2F_m(1 + \beta_{\text{ЧМ}}) = 2 \cdot 10 \text{ кГц} \cdot (1 + 10) = 220 \text{ кГц}.$$

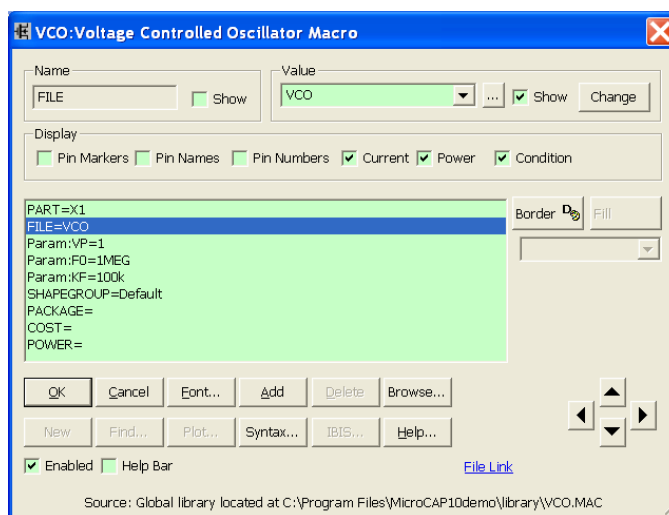
1. Составление модели

Схема модели:



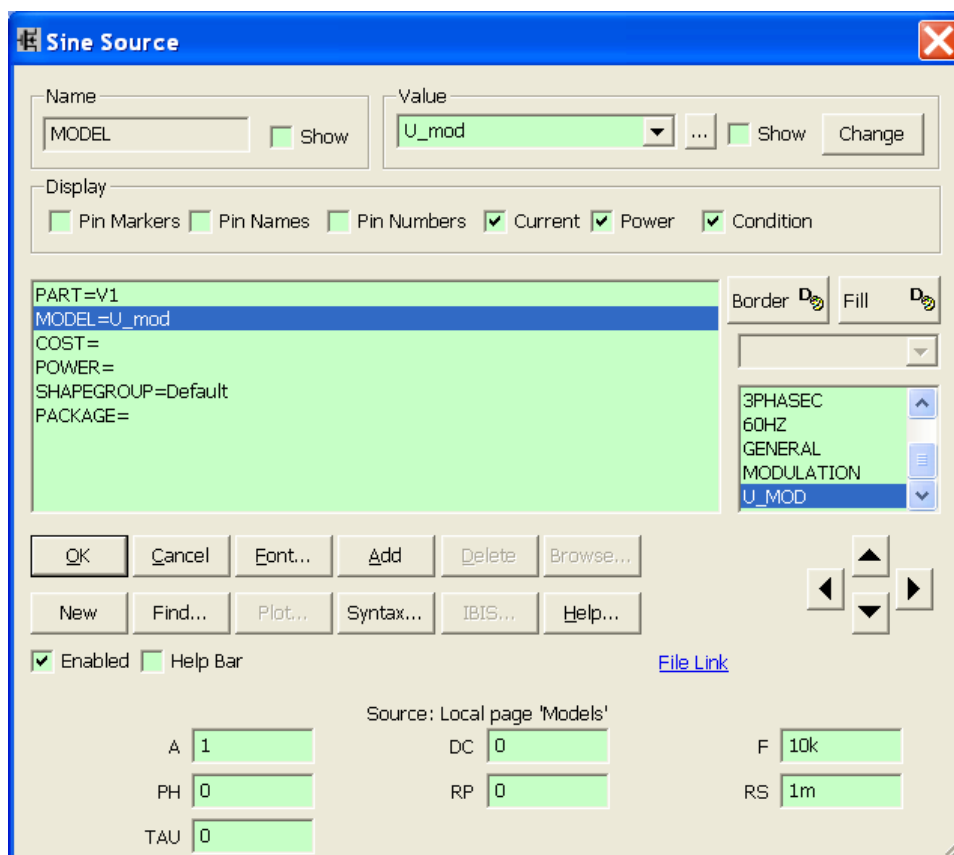


Генератор с управляемой частотой моделируется элементом (VCO – *Voltage Controlled Oscillator* – генератор, управляемый напряжением). Он выбирается в группе макросов (**Component** → **Analog Primitives** → **Macros**). Его параметры задаются следующим образом:



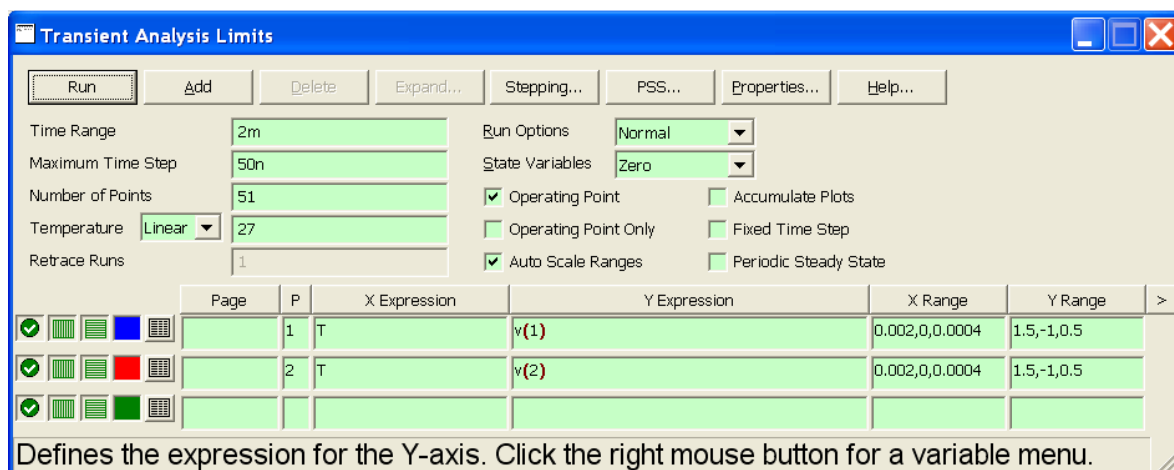
Параметр **KF** определяет коэффициент пропорциональности (в Гц/В) между частотой и модулирующим напряжением (крутизну характеристики модулятора).

Параметры модели источника модулирующего колебания **V1**:



2. Моделирование колебаний

Параметры моделирования:



3. Расчёт спектра

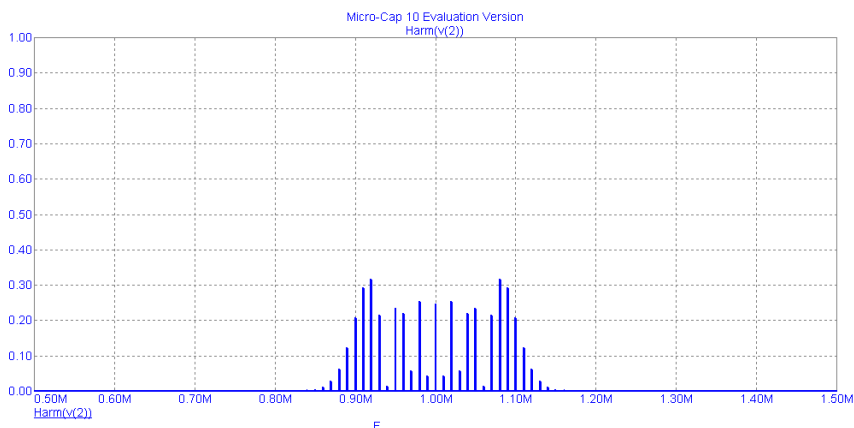
После моделирования в режиме **Transient Analysis** переходим к расчёту спектра:

Transient → FFT Windows → Add FFT Window...

Затем в окне **Properties for FFT** (свойства БПФ) задаём:

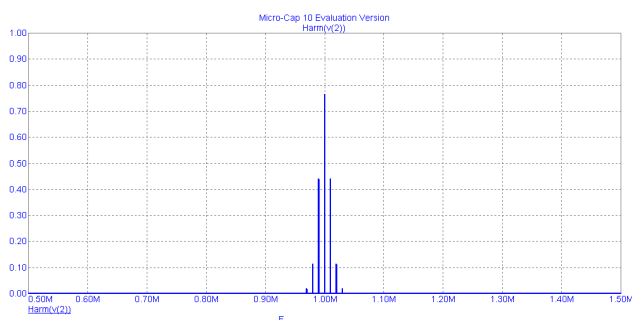
- в закладке **Plot** (график):
 - в поле **What To Plot** (что построить): Harm;
 - в поле **Expression** (выражение): v(2);
- в закладке **FFT** (БПФ):
 - в поле **Upper Time Limit** (верхний предел времени): TMAX,
 - **Lower Time Limit** (нижний предел времени): TSTART (или 0),
 - **Frequency Step** (шаг по частоте): 1000,
 - в поле **Number of Points** (количество точек, т.е. объём БПФ) выбрать 8192;
- в закладке **Scales and Formats** (масштабы и форматы):
 - в группе полей, объединённых под заголовком **X**, в поле **Range Low** (нижняя граница диапазона): 500k, в поле **Range High** (верхняя граница диапазона): 1.5meg, в поле **Grid Spacing** (шаг сетки): 100k, снять «галочку» в полях **Auto Scale** и **Log**;
 - 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, снять «галочку» в полях **Auto Scale** и **Log**;
- в закладке **Colors, Fonts, and Lines** (цвета, шрифты и линии):
 - в поле **Width** (толщина линии): 2,
 - в поле **Style** (стиль): Normal (нормальный).

Получается график спектра следующего вида:

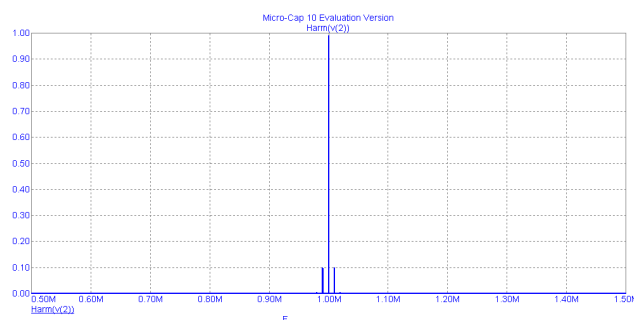


По графику определяем ширину спектра (по значениям частоты, соответствующим граничным составляющим наименьшего уровня) и сравниваем с рассчитанным значением 220 кГц.

Повторяем моделирование при значениях девиации частоты 10 кГц ($\beta_{\text{чМ}} = 1$) и 2 кГц ($\beta_{\text{чМ}} = 0,2$):



$\beta_{\text{чМ}} = 1$



$\beta_{\text{чМ}} = 0,2$

Сравниваем ширину спектра с теоретическим значением 20 кГц, рассчитанным по формуле $\Delta f_{\text{чМС}} = 2F_m$.

3) Радиопульс с прямоугольной огибающей

$$u(t) = \begin{cases} U_0 \cos 2\pi f_0 t & \text{при } t \in [0, \tau_{\text{и}}] \\ 0 & \text{при } t \notin [0, \tau_{\text{и}}] \end{cases},$$

где U_0 – амплитуда несущей,

f_0 – частота несущей,

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

Выполним моделирование сигнала при следующих значениях параметров:

- амплитуда несущей $U_0 = 1$ В;
- частота несущей $f_0 = 10$ МГц;
- длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 1$ мкс.

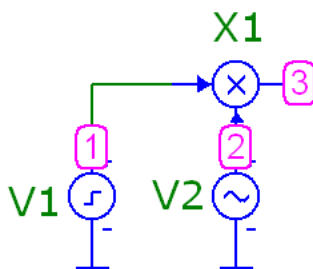
Поскольку возможно моделирование только периодической последовательности импульсов, то дополнительно зададим период повторения $T_n = 10$ мкс. Время моделирования T (параметр Time Range) также зададим равным 10 мкс. В этом случае амплитудный спектр сигнала определяется выражением

$$S(f) = \frac{\tau_n}{T} \left| \frac{\sin \pi \tau_n (f - f_0)}{\pi \tau_n (f - f_0)} \right|.$$

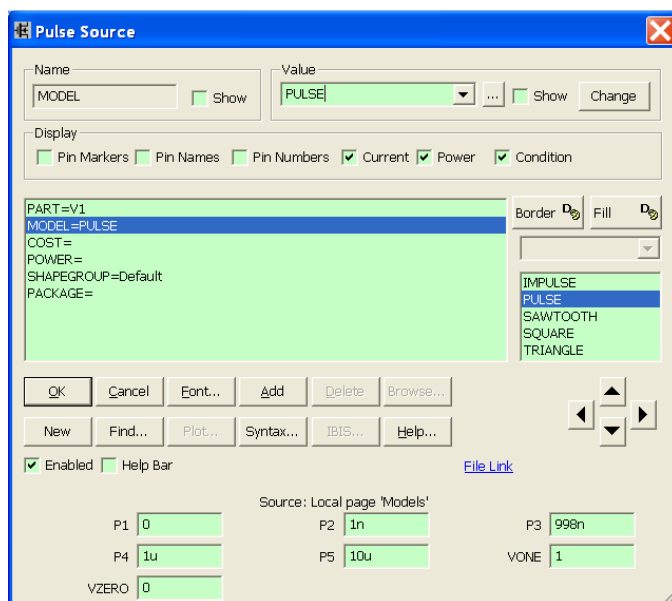
Нулям спектра соответствуют частоты $f_0 \pm n \frac{1}{\tau_n}$, $n = 1, 2, \dots$. Следовательно, ширина спектра по первым нулям (ширина главного лепестка спектра) равна $2/\tau_n$. Максимум спектра равен τ_n/T .

1. Составление модели

Схема модели:



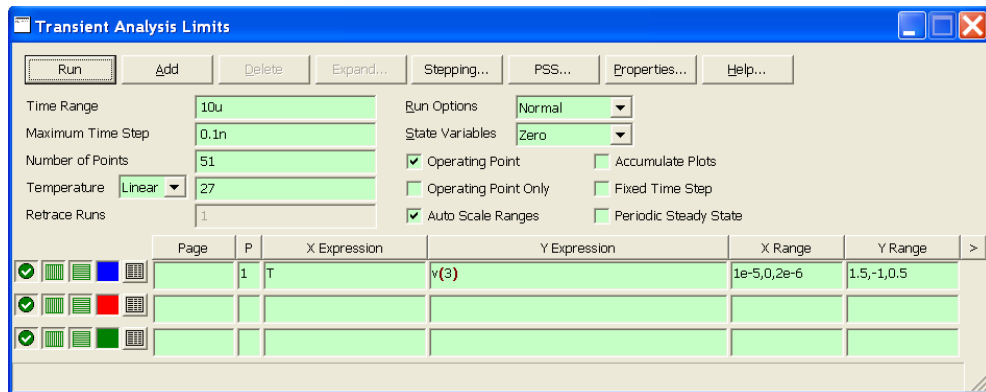
Модель источника импульсов имеет следующие параметры:



Длительность фронта и спада импульса задана равной 1 нс, поскольку при нулевой длительности (что соответствует идеально прямоугольному импульсу) программа может работать некорректно.

2. Моделирование колебаний

Параметры моделирования:

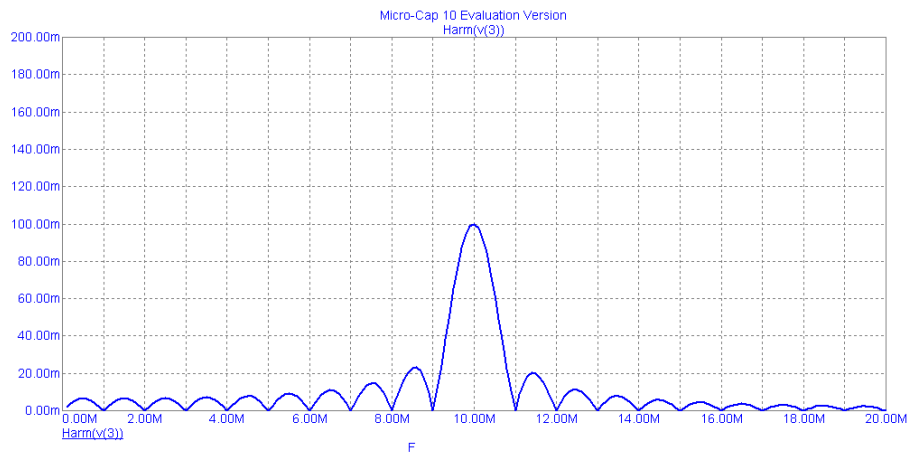


3. Расчёт спектра

Параметры расчёта спектра:

- в закладке **Plot (график)**:
 - в поле **What To Plot (что построить)**: Harm;
 - в поле **Expression (выражение)**: $v(3)$;
- в закладке **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;
- в закладке **Scales and Formats (масштабы и форматы)**:
 - в группе полей, объединённых под заголовком **X**, в поле **Range Low (нижняя граница диапазона)**: 0, в поле **Range High (верхняя граница диапазона)**: 20meg, в поле **Grid Spacing (шаг сетки)**: 1meg, снять «галочку» в полях **Auto Scale** и **Log**;
 - в группе полей, объединённых под заголовком **Y**, в поле **Range Low (нижняя граница диапазона)**: 0, в поле **Range High (верхняя граница диапазона)**: 0.2, в поле **Grid Spacing (шаг сетки)**: 0.02, снять «галочку» в полях **Auto Scale** и **Log**;
- в закладке **Colors, Fonts, and Lines (цвета, шрифты и линии)**:
 - в поле **Width (толщина линии)**: 2,
 - в поле **Style (стиль)**: Normal (нормальный).

Получается график спектра следующего вида:



(Асимметрия спектра – несколько различных уровень боковых лепестков слева и справа от главного – связана с эффектом наложения при вычислении дискретного преобразования Фурье). Уровень боковых лепестков убывает медленно, поэтому такой сигнал имеет большую ширину спектра.

Определяем параметры спектра:

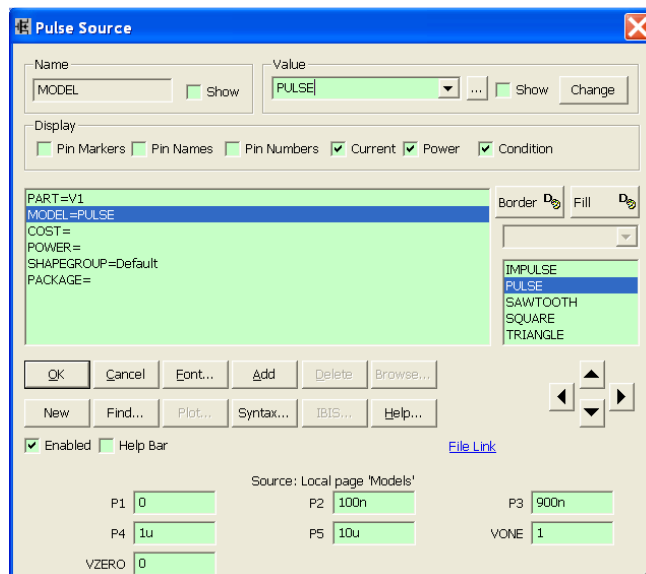
- максимальное значение: 0,1;
- ширина главного лепестка: 0,2 МГц.

Они совпадают с теоретическими значениями.

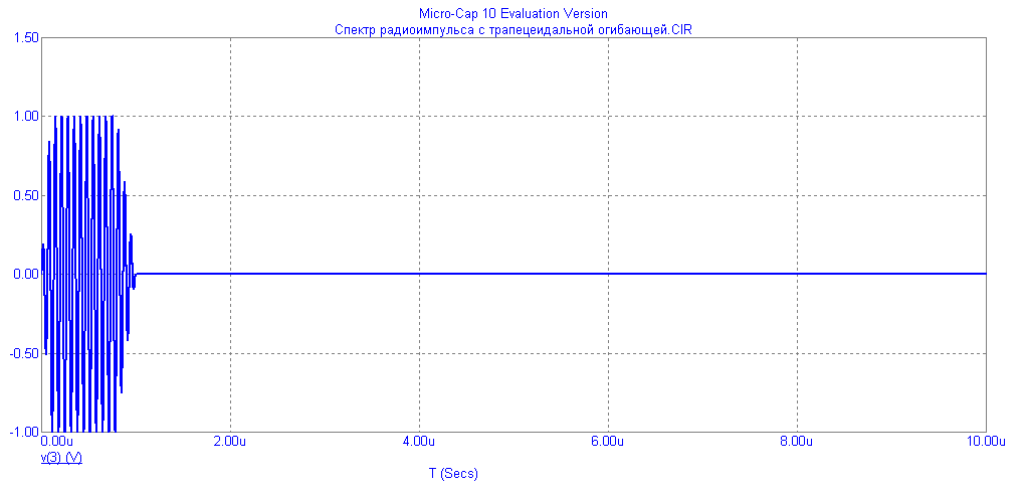
Повторяем моделирование при $f_0 = 12$ МГц.

4) Радиоимпульс с трапецеидальной огибающей

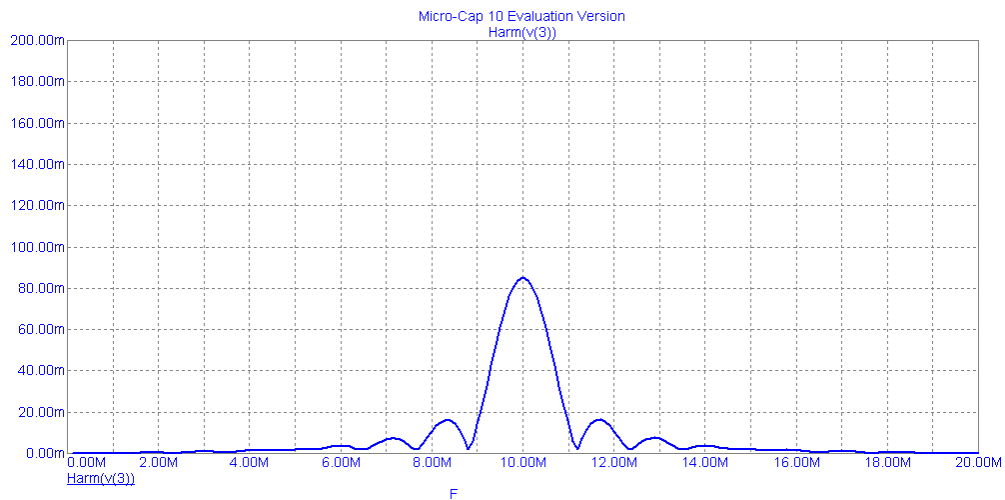
Для моделирования такого сигнала используется та же модель, что и в случае прямоугольной огибающей, но длительность фронта и спада импульса задаётся равной $0,1\tau_{\text{и}} = 0,1$ мкс :



Эпюра сигнала:



Спектр сигнала имеет следующий вид:



Боковые лепестки спектра убывают быстрее, главный лепесток расширяется. В целом, в результате увеличения времени нарастания и спада импульса ширина спектра уменьшается.