

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ

Цель лабораторной работы. Освоение методики моделирования радиосигналов с амплитудной (АМ), фазовой (ФМ) и частотной (ЧМ) модуляцией. Изучение на модели амплитудных спектров этих сигналов.

6.1. Методические указания

6.1.1. Моделирование радиосигналов с помощью функциональных элементов

Для моделирования радиосигналов используются следующие функциональные элементы:

- стандартные источники напряжения (источник синусоидального напряжения **Sine Source** и источник импульсного напряжения **Pulse Source**);
- управляемые источники напряжения (**NFV**);
- источник напряжения с управляемой частотой (**VCO**);
- умножители (**Mul**);
- сумматоры (**Sum**);
- интеграторы (**Int**).

Эти функциональные элементы включены в библиотеку моделей аналоговых компонентов (**Analog Primitives**) системы Micro-Cap. При этом стандартные источники напряжения находятся в группе источников колебаний (**Waveform Sources**), управляемые источники – в группе функциональных источников напряжения (**Function Sources**), а элементы **VCO**, **Mul**, **Sum** и **Int** – в группе стандартных макросов (**Macros**).

Моделирование АМ сигналов. Сигнал с амплитудной модуляцией (АМ) описывается функцией

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

где f_0 – частота несущей; $U_m(t)$ – изменяющаяся во времени амплитуда (закон модуляции). Такой сигнал может быть смоделирован двумя способами.

Первый способ основан на использовании источника напряжения, задаваемого нелинейной функцией. Этот тип источника называется **NFV (Nonlinear Function V – напряжение, заданное нелинейной функцией)**. Для его размещения на схеме нужно последовательно выбрать следующие пункты меню: **Component>Analog Primitives>Function Sources>NFV**. Функция времени, определяющая вид сигнала, записывается в окне параметров модели источника как значение атрибута **Value**. Например, для моделирования синусоидального колебания с частотой f_0 и амплитудой U_m (постоянной либо изменяющейся во времени) в строке **Value** следует записать

$$U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$$

При этом параметры f_0 и U_m должны быть заданы с помощью оператора `.define` (*определить*). Этот оператор записывается либо в текстовом окне, либо в окне схемы (в последнем случае с помощью кнопки **T** **Text Mode** следует сначала перейти в режим ввода текста; при этом каждый оператор должен быть введён **как отдельный текстовый объект**)¹⁾. Например, значения частоты 10 кГц и амплитуды 0,7 В задаются следующим образом:

```
.define f0 10k
.define Um 0.7
```

При использовании для записи операторов текстового окна его удобно разместить на экране под окном схемы с помощью команды **Windows>Split Horizontal**. Если параметры колебания не предполагается менять, то при задании параметров источника в строке **Value** их можно указать сразу в численном виде, например:

$$0.7 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10k \cdot t)$$

Для моделирования АМ сигналов необходимо в операторе `.define`, которым определяется амплитуда сигнала, задать закон её изменения во времени. При этом закон модуляции сигнала может быть указан явно в виде некоторой функции времени (рис. 6.1), а может определяться законом изменения напряжения в одном из узлов схемы (рис. 6.2).

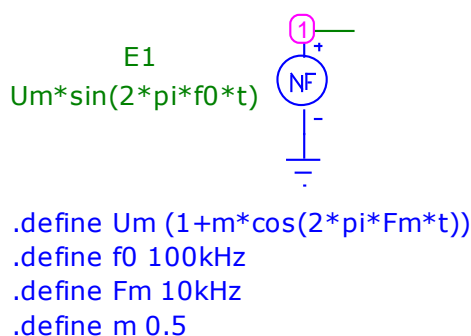


Рис. 6.1. Моделирование АМ сигнала с помощью функционального источника напряжения. Явное задание закона модуляции

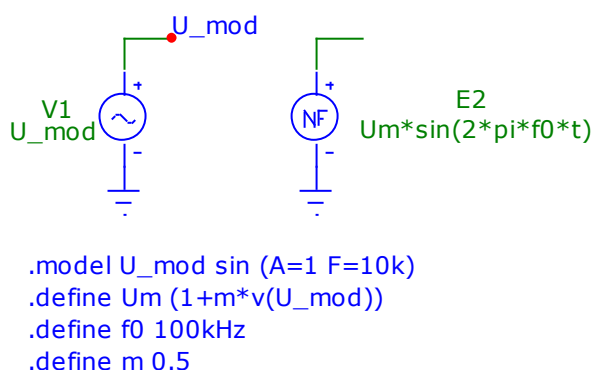



Рис. 6.2. Моделирование АМ сигнала с помощью функционального источника напряжения. Задание закона модуляции через напряжение в узле U_mod

На схеме, приведённой на рис. 6.2, это напряжение создаётся отдельным источником $V1$ модулирующего гармонического колебания. Для того чтобы при указании в операторе `.define` узла схемы не зависеть от его номера, проставляемого программой, удобно использовать текстовое имя узла (в данном случае это имя U_mod). Для его задания следует перейти в режим ввода текста (кнопка **T**), поместить указатель мыши, рядом с которым появляется буква **T**, вблизи нужного узла и нажать левую кнопку мыши. При этом открывается окно, в котором нужно

¹⁾ Оператор `.define`, так же как и любой другой текстовый объект, можно переносить из окна текста в окно схемы и обратно, нажимая комбинацию клавиш **Ctrl+B**.

напечатать имя узла. Введённое имя «привязывается» к требуемому узлу схемы, если после закрытия окна оно оказывается в непосредственной близости от узла, который при этом выделяется большой красной точкой. Если имя оказалось напечатанным слишком далеко от узла, его следует передвинуть к узлу, перейдя предварительно в режим выбора элементов схемы (кнопка  **Select Mode**)²⁾.

На схемах, изображённых на рис. 6.1 и 6.2, U_0 – амплитуда несущей. Её значение также задаётся оператором `.define`.

Второй способ моделирования АМ сигналов основан на использовании функционального элемента – умножителя **Mul** (**M**ultiplier – *умножитель*). Этот элемент выбирается из меню компонентов в разделе аналоговых компонентов в подразделе макросов: **Component>Analog Primitives>Macros>Mul**. При задании параметров умножителя в строке **Param:SCALE** (*параметр: масштаб*) указывается значение масштабного коэффициента, на который дополнительно умножаются перемножаемые напряжения. По умолчанию он равен 1.

Поскольку для моделирования сигнала с гармонической АМ необходимо умножить несущее колебание $U_0 \cos(2\pi f_0 t)$ на модулирующую функцию $1 + m \cos(2\pi F_m t)$, то в источник модулирующего напряжения следует ввести постоянное смещение, равное 1, и задать амплитуду колебания равной m . Например, при $m = 0,5$ и $F_m = 5$ кГц параметры источника задаются следующим образом:

```
.model U_mod3 sin(DC=1 A=0.5 F=5k)
```

Схема, реализующая данную модель АМ сигнала, показана на рис. 6.3.

Моделирование с использованием умножителя позволяет формировать не только сигналы с гармонической амплитудной модуляцией, но и радиоимпульсные сигналы. Для этого в качестве модулирующего напряжения следует использовать последовательность прямоугольных импульсов, создаваемую источником импульсного сигнала **Pulse Source** (*источник импульсов*) (рис. 6.4).

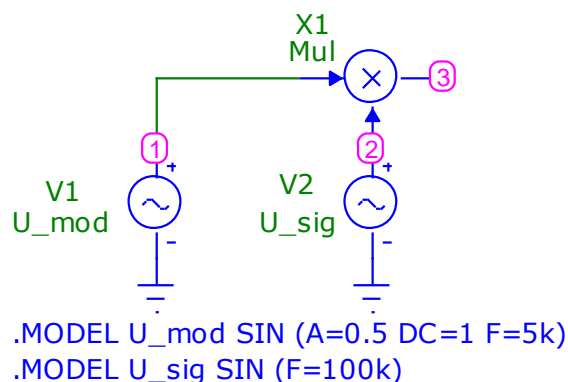


Рис. 6.3. Моделирование АМ сигнала с помощью умножителя

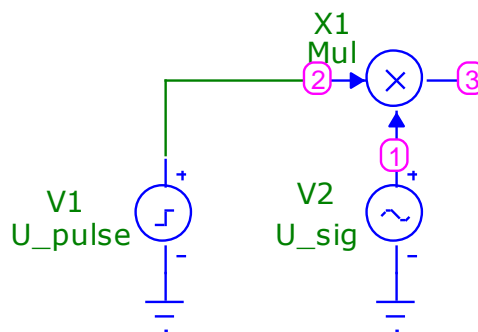


Рис. 6.4. Моделирование радиоимпульсного сигнала

²⁾ Для облегчения «привязки» имён к узлам нужно в пункте меню **Options** в подпункте **Preferences...** на вкладке **Common Options** (*Общие настройки*) в группе опций, объединённых заголовком **Circuit** (*схема*), отметить галочкой пункт **Node Snap**. При этом текст будет автоматически «привязываться» к ближайшему узлу координатной сетки.

Моделирование ФМ сигналов. Сигнал с фазовой модуляцией описывается функцией

$$u(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)),$$

где f_0 – частота несущей; U_0 – амплитуда сигнала; $\varphi(t)$ – изменяющаяся во времени фаза сигнала (закон ФМ).

Моделирование ФМ сигнала производится с помощью функционального источника напряжения, – элемента NFV (рис. 6.5). При задании параметров этого источника в строке **Value** следует записать

$$U0*\cos(2*pi*f0*t+phi),$$

где $U0$ – амплитуда сигнала; $f0$ – частота сигнала; phi – фаза, изменяющаяся в соответствии с законом ФМ. Закон модуляции, как и в случае моделирования АМ сигнала, может либо задаваться в виде функции времени, либо определяться законом изменения напряжения в каком-либо узле схемы. На рис. 6.5 приведён пример моделирования сигнала с гармонической ФМ. При этом модуляция производится напряжением в узле с именем U_mod_PhM , создаваемым источником синусоидального колебания U_mod . Связь между модулирующим напряжением и фазой задаётся операторами `.define`:

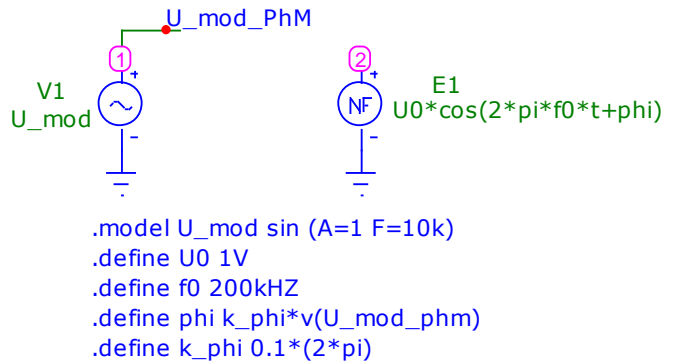


Рис. 6.5. Моделирование ФМ сигнала

```
.define phi k_phi*v(U_mod_PhM)
.define k_phi 0.1*(2*pi)
```

Первый оператор показывает, что фаза прямо пропорциональна модулирующему напряжению, а второй определяет значение коэффициента пропорциональности k_phi . В данном примере он равен $0,1 \cdot 2\pi = 0,2\pi$.

Моделирование ЧМ сигналов. Сигнал с частотной модуляцией в общем случае описывается функцией [4]

$$u(t) = U_0 \cos\left(2\pi f_0 t + 2\pi \int \Delta f(t) dt\right),$$

где U_0 – амплитуда сигнала; f_0 – частота несущей; $\Delta f(t)$ – изменяющееся во времени отклонение мгновенной частоты сигнала от частоты несущей (закон ЧМ). Из этого выражения следует, что моделирование ЧМ сигнала сводится к моделированию ФМ сигнала с законом фазовой модуляции

$$\varphi(t) = 2\pi \int \Delta f(t) dt.$$

В связи с этим моделирование ЧМ сигнала, так же как и моделирование ФМ сигнала, может быть выполнено с помощью функционального источника напряжения NFV. При задании параметров этого источника в строке **Value** следует записать

$$U0*\cos(2*pi*f0*t+phi),$$

где U_0 – амплитуда сигнала; f_0 – частота несущей; ϕ – изменяющаяся во времени фаза $\phi(t)$.

Поскольку фаза сигнала пропорциональна интегралу от отклонения мгновенной частоты, то в состав модели источника ЧМ сигнала входит функциональный элемент *интегратор* **Int**. Этот элемент выбирается из меню компонентов в разделе аналоговых компонентов в подразделе макросов: **Component>Analog Primitives>Macros>Int**. При описании параметров интегратора в строке **Param:SCALE** (*параметр: масштаб*) следует указать значение (**Value**) масштабного коэффициента, на который дополнительно умножается проинтегрированное напряжение, а в строке **Param:VINIT** (*параметр: Vначальное*) – начальное значение напряжения на выходе интегратора. При моделировании ЧМ сигнала масштабный коэффициент равен 2π , а начальное значение равно 0.

При гармонической ЧМ отклонение мгновенной частоты равно

$$\Delta f(t) = \Delta f_m \sin(2\pi F_m t),$$

где Δf_m – девиация (т.е. максимальное отклонение) частоты сигнала; F_m – частота модуляции. На рис. 6.6 приведена схема модели источника сигнала с гармонической ЧМ, имеющего следующие параметры³⁾:

- амплитуда – 1 В;
- частота несущей – 100 кГц;
- девиация частоты – 40 кГц;
- частота модуляции – 1000 Гц.

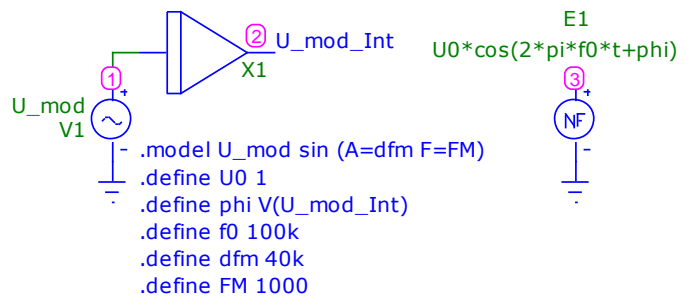


Рис. 6.6. Моделирование ЧМ сигнала

Описанный алгоритм моделирования ЧМ сигнала реализован в стандартном макросе **VCO (Voltage-Controlled Oscillator – генератор, управляемый напряжением)**. Для этого макроса задаются следующие параметры: **Param:VP** (*параметр: Vпиковое*) – амплитуда сигнала, **Param:F0** (*параметр: F0*) – частота несущей, **Param:KF** (*параметр: KF*) – коэффициент пропорциональности между отклонением частоты и напряжением, имеющий размерность В/Гц.

На рис. 6.7 приведена схема такой модели источника ЧМ сигнала с теми же параметрами, что и на рис. 6.6.

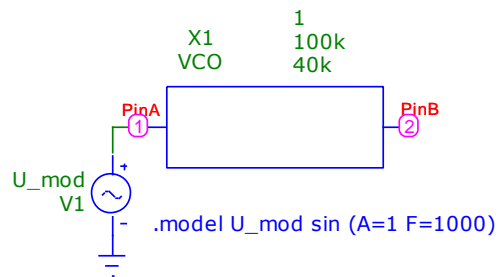


Рис. 6.7. Моделирование ЧМ сигнала с помощью макроса VCO

6.1.2. Расчёт спектра сигнала с помощью дискретного преобразования Фурье

³⁾ Обратите внимание на то, что при описании источника модулирующего колебания **U_mod** в операторе **.model** для большей наглядности используются буквенные обозначения для амплитуды и частоты сигнала – **dfm** и **FM** соответственно. Значения этих переменных задаются операторами **.define**.

Частотный состав модулированного сигнала характеризуется его амплитудным спектром. Расчёт спектра производится в режиме анализа переходных процессов (**Analysis>Transient...**) в соответствии с методикой, изложенной в п. 5.1.2 описания лабораторной работы № 5 «Исследование модели резонансного усилителя». Для правильного вычисления спектра сигнала необходимо, чтобы длительность интервала спектрального анализа была кратна периоду повторения сигнала, который зависит как от частоты несущей, так и от частоты модуляции. Поскольку во всех вариантах лабораторного задания частота несущей кратна частоте модуляции, то длительность интервала анализа должна быть равна целому числу периодов модуляции.

6.2. Домашняя подготовка

1. Используя методические указания к лабораторной работе, изучите методику моделирования сигналов с амплитудной, фазовой и частотной модуляцией.
2. Изобразите ожидаемый вид сигналов и их амплитудных спектров.
3. Запишите выражения, определяющие моделируемые сигналы.
4. Подготовьтесь к ответу на контрольные вопросы.

6.3. Лабораторное задание

1. Составьте функциональные схемы для генерации сигналов с амплитудной, фазовой и частотной модуляцией. Параметры сигналов возьмите из табл. 6.1 в соответствии с номером бригады.

Таблица 6.1

№ бри- гады	f_0 , кГц	Параметры модуляции								
		АМ					ФМ		ЧМ	
		гармоническая		импульсная						
		F_m , кГц	m	T , мс	τ , мкс	U , В	F_m , кГц	$\Delta\varphi_m / 2\pi$	F_m , кГц	Δf_m , кГц
1	100	5	0,5	1,1	110	1	20	0,10	1,0	40
2	120	6	0,4	1,0	100	0,9	30	0,12	1,2	48
3	160	8	0,5	1,5	150	1,1	40	0,08	1,6	64
4	200	10	0,4	2,5	250	1,5	50	0,11	2,0	80
5	240	12	0,6	0,5	50	0,8	25	0,09	2,4	96
6	260	13	0,3	1,5	150	1,2	35	0,12	2,6	104
7	300	15	0,6	2,7	270	2,0	40	0,07	3,0	120
8	320	16	0,5	2,5	250	0,5	30	0,10	3,2	128
9	360	18	0,3	1,0	100	0,8	25	0,08	3,6	144
10	400	20	0,4	2,3	230	1,3	45	0,11	4,0	160

В таблице приняты следующие обозначения: f_0 – частота несущей; F_m – частота модуляции; m – коэффициент АМ; T – период повторения импульсов; τ – длительность импульса; U – амплитуда импульса; $\Delta\varphi_m$ – максимальное отклонение фазы; Δf_m – девиация частоты.

2. Выбрав один из способов моделирования АМ сигнала, проведите моделирование сигнала и расчёт его спектра для заданного значения коэффициента модуляции. Учтите, что для правильного расчёта спектра необходимо, чтобы интервал анализа содержал целое число периодов сигнала. По спектру сигнала измерьте уровень несущей и боковых составляющих и сравните измеренные значения с теоретическими.
3. Проведите моделирование последовательности радиоимпульсов с заданными параметрами. Рассчитайте спектр модулирующей последовательности видеоимпульсов и радиоимпульсного сигнала. Постройте графики спектров в интервале частот $[0, 2f_0]$, сравните их и сделайте выводы.
4. Проведите моделирование ФМ сигнала с заданными параметрами. Рассчитайте спектр сигнала в интервале частот $[0, 2f_0]$ для заданного значения коэффициента k_{ϕ} , определяющего индекс модуляции, а также для значения, вдвое большего. Учтите, что для правильного расчёта спектра необходимо, чтобы интервал анализа содержал целое число периодов сигнала. Сделайте выводы о влиянии индекса ФМ на вид спектра.
5. Выполните моделирование ЧМ сигнала
 - а) с заданными параметрами;
 - б) при вдвое меньшем значении девиации частоты.
 Рассчитайте спектр сигнала в интервале частот $[0, 2f_0]$. Оцените влияние девиации частоты на форму и ширину спектра сигнала.
6. Повторите моделирование ЧМ сигнала с использованием макроса VCO. Сопоставьте результаты с полученными в п. 5.

6.4. Контрольные вопросы

1. Какие функциональные элементы используются для моделирования АМ сигнала с гармонической модуляцией?
2. Как связаны параметры амплитудного спектра АМ сигнала с параметрами модуляции?
3. Как смоделировать радиоимпульсный сигнал?
4. Какой вид имеет амплитудный спектр радиоимпульсного сигнала?
5. Как моделируется сигнал с гармонической ФМ?
6. На каком принципе основано моделирование ЧМ сигнала?
7. Что такое девиация частоты ЧМ сигнала?
8. Какие условия необходимо обеспечить для правильного вычисления спектра сигнала с помощью дискретного преобразования Фурье?