

Моделирование источников аналоговых сигналов

Роман Антипенский (г. Воронеж)

В статье рассматривается методика моделирования источников сигналов с амплитудной, частотной и фазовой модуляцией, предназначенных для использования в САПР. Материал может быть полезен для разработчиков аналоговой аппаратуры.

При моделировании аналоговых радиоэлектронных устройств с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР), таких как OrCAD, Microcap, DesignLab [1] и других, часто приходится использовать различные источники сигналов для проверки работоспособности проектируемой схемы на предмет передачи (преобразования) первичного сигнала с минимальными искажениями. Однако имеющиеся в этих программах источники сигналов представлены весьма скудной библиотекой. Для исследования характеристик проектируемой схемы в условиях «реальных» сигналов и помех часто приходится разрабатывать собственную модель сигнала, а затем использовать её при моделировании схемы в САПР. В связи с этим весьма полезным представляется освоение принципов построения моделей сигналов, используемых в радиоэлектронных устройствах. Настоящая публикация знакомит читателя с основами моделирования сигналов с аналоговой модуляцией в программной среде MathCAD [2] и последующего их использования в качестве источников сигналов из внешнего файла в различных САПР радиоэлектронных устройств.

Основными представлениями при моделировании сигналов являются временное (зависимость амплитуды сигнала от времени) и спектральное (зависимость амплитуды или фазы гармонических составляющих сигнала от частоты). Наша задача заключается в разработке моделей сигналов, которые позволили бы получить их временное представление в виде массивов значений (отсчётов), а спектральные характеристики (комплексный спектр сигнала) можно получить с использо-

ванием быстрого преобразования Фурье [3]:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

где $S(t)$ – массив временных отсчётов сигналов. Для реализации этого преобразования в системе MathCAD воспользуемся встроенным БПФ в виде функции $Cfft(S(t))$ [2]. Этот метод получения спектральных характеристик сигналов будем применять к большинству временных представлений.

Разработаем модель для амплитудно-модулированного сигнала, аналитическую запись которого можно записать в следующем виде [3]:

$$S_{AM}(t_j) = Sm \left[1 + m_a S_{перв}(t_j) \right] \cos(2\pi f_0 t_j + \psi), \quad (2)$$

где Sm – амплитуда сигнала, f_0 – частота несущего колебания, ψ – начальная фаза несущего колебания, $S_{перв}$ – некоторый первичный (модулирующий сигнал), m_a – индекс модуляции, зависящий от нелинейного элемента модулятора. Для начала в качестве первичного сигнала будем использовать гармоническое колебание, поэтому результирующий сигнал по сути будет являться амплитудно-модулированным колебанием (АМК). На первом этапе сформируем массив

отсчетов времени t_j и частоты f_j . Для этого в окне программы MathCAD запишем следующие выражения:

$$j:=0..10000 \quad t_j:=j \times 10^{-6} \quad f_j:=j \times 10^3.$$

Поясним введённые идентификаторы программы. Сначала мы сформируем массив значений переменной j – управляющей переменной, которую будем использовать для индексации массивов, необходимых в модели; затем формируем массив значений времени t_j и частоты f_j . Следует обратить внимание на взаимосвязь числа отсчётов и показателя степени в выражениях для массивов времени и частоты. Если график временного представления сигнала будет ломаным (отсчётов сигнала недостаточно), то число отсчётов необходимо увеличить, одновременно изменив показатели степени при задании массивов времени и частоты. При этом время моделирования значительно увеличивается, что следует учитывать при разработке моделей.

Введём новые переменные и зададим их значения для управления: 1) частотой F и начальной фазой ϕ модулирующего (первичного) колебания; 2) амплитудой Sm , частотой f_0 и начальной фазой несущего колебания ψ ; 3) глубиной модуляции m . Для этого в окне программы MathCAD запишем следующие выражения:

$$F:=2 \times 10^3 \quad \phi:=0 \quad Sm:=1 \\ f_0:=3 \times 10^4 \quad \psi:=0 \quad m:=0.5$$

Запишем выражение (2) на языке программы MathCAD, обозначив

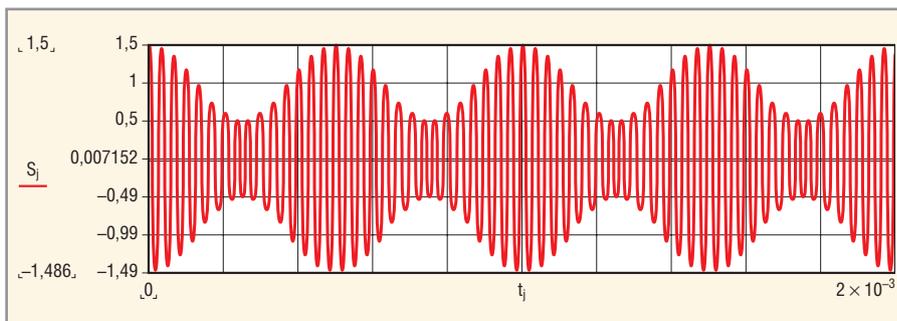


Рис. 1. Временное представление амплитудно-модулированного колебания

идентификатором s временное представление сигнала:

$$s_j := Sm(1 + m\cos(2\pi Ft_j + \phi))\cos(2\pi f_0 t_j + \phi).$$

После этого в окно программы поместим график, на горизонтальной оси которого зададим отображение переменной t_j , а на вертикальной оси – переменной s_j . После выполнения указанных действий должен получиться график, представленный на рисунке 1.

Итак, мы получили временной массив АМК, который необходимо записать в файл для его использования в качестве источника аналогового сигнала в САПР. Мы можем также рассчитать спектральные характеристики модулированного сигнала для предварительной оценки. Для этого введём идентификатор Sw , присвоим ему результат, возвращаемый функцией альтернативного БПФ cff [2], затем рассчитаем модуль полученного комплексного спектра АМК и выполним нормировку амплитудно-частотного спектра (АЧС) результирующего колебания, используя переменную r . Результат присвоим идентификатору b и построим график полученного массива от отсчётов частоты f_j . Программный код этих операций в окне MathCAD будет выглядеть так:

$$Sw := cfft(W) \quad v_j := |Sw_j|$$

$$r := \max(v) \quad b_j := \frac{v_j}{r}$$

На рисунке 2 представлен график АЧС результирующего колебания, в котором различимы три гармонические составляющие: одна с несущей частотой f_0 и две боковые частоты, отстоящие от несущей на значение F .

Итак, мы построили простую и удобную модель амплитудно-модулированного колебания. Мы можем управлять амплитудой, частотой и начальной фазой несущего колебания, частотой и начальной фазой модулирующего колебания, а также глубиной модуляции и наблюдать результаты изменений этих параметров на временном и спектральном представлении сигнала. Единственное, что осталось сделать, – записать в файл результат формирования временного представления сигнала для его использования в качестве входного сигнала в САПР.

Рассмотрим в качестве примера САПР DesignLAB (или последнюю

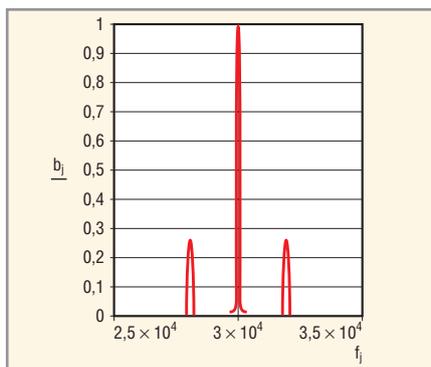


Рис. 2. Амплитудно-частотный спектр АМК

версию этого пакета OrCAD). В этих системах предусмотрен источник сигнала из файла, при этом данные в файле необходимо представить в следующем формате:

(<отсчёт времени 1> , <отсчёт амплитуды 1>
 (<отсчёт времени 2> , <отсчёт амплитуды 2>
 ...
 (<отсчёт времени N> , <отсчёт амплитуды N>).

Чтобы наш сигнал выглядел в файле подобным образом, запишем следующий программный код:

```
i:=0...1 sigi: i:= if(i=0, tj, sj)
WRITERN(«sig.dat»):= sig.
```

Поясним введённые обозначения. Мы сформировали массив всего из двух значений (0 и 1) для индексной переменной i , которая будет участвовать в формировании двумерного массива sig по правилу: если $i=0$, то в j -элемент массива записываем отсчёт времени t_j , если не равен нулю (равен 1), то записываем отсчет сигнала s_j . Затем формируем файл с именем $sig.dat$; он будет размещаться в том же каталоге, что и наш файл с моделью. Теперь, если вывести в окно програм-

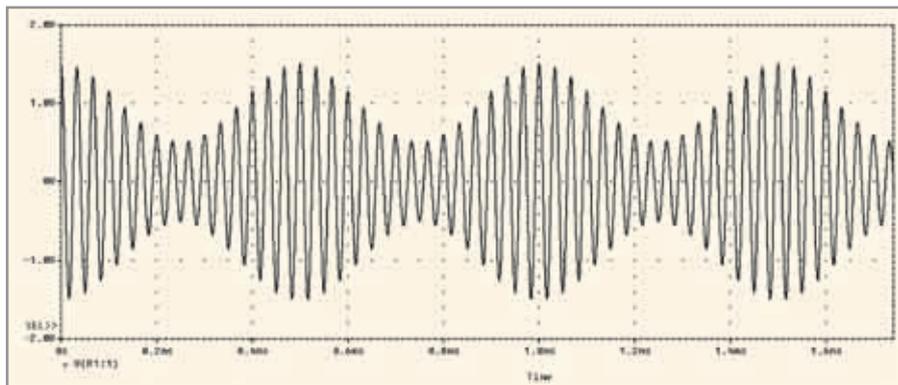


Рис. 4. АМК на выходе источника сигнала в САПР DesignLAB

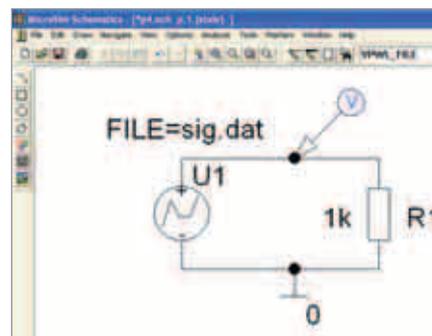


Рис. 3. Испытательная схема с источником сигнала из файла

мы MathCAD рассчитанный массив sig , получим то, что нам необходимо для использования в качестве входного аналогового сигнала для моделирования в САПР:

	0	1
0	0	0,74
1	1×10^{-6}	0,729
2	2×10^{-6}	0,692
3	3×10^{-6}	0,631
4	4×10^{-6}	0,546
5	5×10^{-6}	0,442
6	6×10^{-6}	0,321
7	7×10^{-6}	0,188
8	8×10^{-6}	0,048
9	9×10^{-6}	-0,095
10	1×10^{-5}	-0,236
11	$1,1 \times 10^{-5}$	-0,369
12	$1,2 \times 10^{-5}$	-0,49
13	$1,3 \times 10^{-5}$	-0,593
14	$1,4 \times 10^{-5}$	-0,677
15	$1,5 \times 10^{-5}$	-0,737

Необходимо пояснить, что для правильной записи результатов моделирования в файл, необходимо в программе MathCAD установить следующие значения системных параметров PRN File Settings: Precision (точность отображения) = 10, Column Width (ширина столбца) = 20.

```

j:=0..10000    t_j:=j*10^-6    f_j:=j*10^2
Um_1:=3    Um_2:=4    Um_3:=6    Um_4:=5    Um_5:=4.5    Um_6:=4    Um_7:=3.5    Um_8:=3    Um_9:=2.4    Um_10:=2
F_1:=300    F_2:=600    F_3:=900    F_4:=1200    F_5:=1500    F_6:=1800    F_7:=2100    F_8:=2400    F_9:=2800    F_10:=3200
N:=5    k:=1..N    um:=max(Um)    ma_k:=Um_k/um    phi_k:=rnd(Um_k)*pi
T_j:=sum_{k=1}^N (Um_k/um*cos(2*pi*F_k*t_j+phi_k))    R:=max(T)    TLF_j:=T_j/R    SwT:=cff(T)    vT_j:=|SwT_j|    r:=max(vT)    bT_j:=vT_j/r
a:=0.8    f0:=30000    st_j:=1-1+(a)*TLF_j*cos(2*pi*f0*t_j)    mst:=max(st)    st_j:=st_j/mst
Sws:=cff(st)    vs_j:=|Sws_j|    r:=max(vs)    bs_j:=vs_j/r
i:=0..1    sig_{i,j}:=if(i=0,t_j,st_j)    WRITEPRN("sig.dat"):=sig
    
```

Рис. 5. Программный код модели амплитудно-модулированного сигнала с модуляцией телефонным сообщением

Продemonстрируем, как выполнить ввод и моделирование испытательной схемы для проверки источника сигнала в DesignLAB 8.0. Введём схему, показанную на рисунке 3. В качестве источника сигнала воспользуемся компонентом VPWL_FILE (источник напряжения, заданный в файле) и установим значение его атрибута File = sig.dat. Сохраним собранную схему, поместив в папку со схемой файл sig.dat, зададим параметры директивы временного анализа и выполним моделирование. В окне программы Probe системы DesignLAB мы увидим точно такой сигнал, какой был создан с помощью программы MathCAD (см. рис. 4). Спектр сигнала можно увидеть, выполнив БПФ нажатием на кнопку с надписью FFT.

Итак, мы разработали модель амплитудно-модулированного колебания, позволяющую в доступной и удобной для восприятия форме исследовать временные и спектральные характе-

ристики сигнала, а также использовать результаты моделирования в качестве данных для источника аналогового сигнала в САПР DesignLAB.

Рассмотрим возможность использования в качестве первичного (модулирующего) сигнала телефонного сообщения, состоящего из нескольких гармонических составляющих. Автором предлагается модель телефонного сигнала в виде суммы ограниченного числа гармонических составляющих, аппроксимирующих спектр реального телефонного сообщения (ТЛФС) в регулируемых пределах отклонения их амплитуд и фаз, генерируемых по случайному закону с равномерным распределением в диапазоне 0...2π:

$$S_{ТЛФС} = \sum_{k=0}^{N_2-1} (Sm_k + \Delta Sm_k) \cos(2\pi F_k t_j + \phi_k), \quad (3)$$

где F_k, Sm_k – частоты и их амплитуды, аппроксимирующие спектр реально-

го ТЛФС; d – уровень отклонения амплитуд гармонических составляющих от аппроксимированных значений амплитуд реального ТЛФС; ΔSm_k – нормированные случайные значения отклонений амплитуд гармонических составляющих; ϕ_k – начальные фазовые сдвиги частот; N_2 – количество гармонических составляющих в спектре.

Фазовые сдвиги гармоник ϕ_k генерируются случайным образом с использованием соответствующей функции в среде моделирования. В системе MathCAD [2] такая функция может быть представлена формулой:

$$\phi_k = Vunif\{N_2, 0, 2\pi\}, \quad k \in 0..N_2 - 1, \quad (4)$$

которая рассчитывает вектор случайных чисел размера N_2 , равномерно распределённых в интервале 0...2π.

С использованием модели телефонного сообщения (3) сигнал с амплитудной модуляцией можно представить в следующем виде:

$$S_{AM}(t_j) = Sm \left[1 + \sum_{k=0}^{N_1-1} m_k \cos(2\pi F_k t_j + \phi_k) \right] \cos(2\pi f_0 t_j + \psi), \quad (5)$$

где Sm – амплитуда несущего колебания; f_0 – частота несущего колебания; F_k, ϕ_k – частота и фазовый сдвиг k -й гармоники первичного сигнала; N_1 – количество моделируемых гармонических составляющих в первичном сообщении; m_k – парциальные коэф-

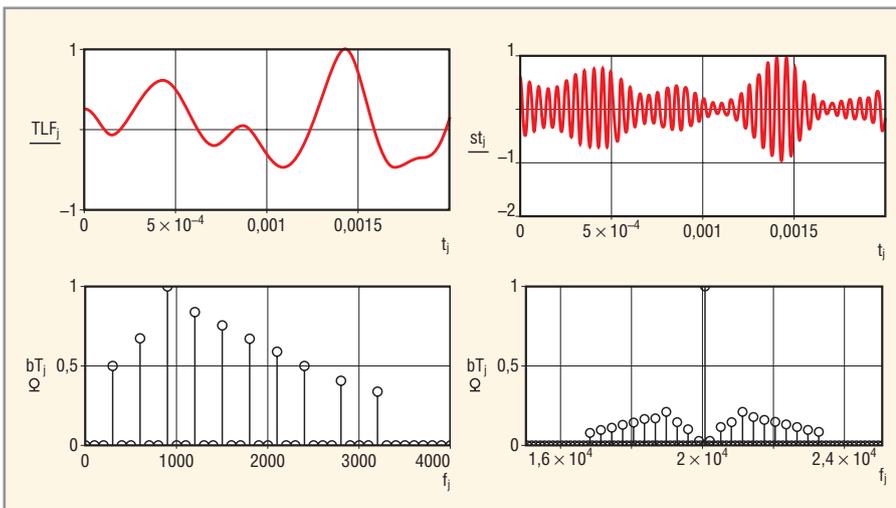


Рис. 6. Форма и спектр телефонного сообщения и сигнала с амплитудной модуляцией

коэффициенты амплитудной модуляции, вычисляемые по формуле:

$$m_k = a \frac{(S_{\Omega k} + \Delta S_{\Omega k})}{Sm}, \quad (6)$$

где a – параметр, характеризующий нелинейный элемент модулятора; $S_{\Omega k}$, $\Delta S_{\Omega k}$ – амплитуды гармонических составляющих телефонного сообщения и их флуктуации.

Покажем, каким образом наша аналитическая модель преобразуется в программный код MathCAD (см. рис. 5).

В строке 1 формируем отсчёты индексной переменной j и отсчёты времени и частоты; в строках 2, 3 задаём амплитуды и частоты десяти гармонических составляющих телефонного сообщения. В строке 4 рассчитываем парциальные индексы модуляции для каждой гармонической составляющей и формируем начальные фазовые сдвиги. Если установить маркер в поле с красным фоном (где и осуществляется генерация фазовых сдвигов), то каждый раз при моделировании будут генерироваться новые значения фаз, и это отразится на выходном сигнале. В строке 5 формируем временное и спектральное представление телефонного сообщения, в строках 6, 7 рассчитываем временное и спектральное представление амплитудно-модулированного сигнала, и в последней строке записываем результат моделирования в файл. На рисунке 6 показаны форма и спектр телефонного сигнала, полученные с помощью модели (3), а также форма и спектр сигнала с амплитудной модуляцией, где в качестве первичного сигнала использован массив значений телефонного сообщения.

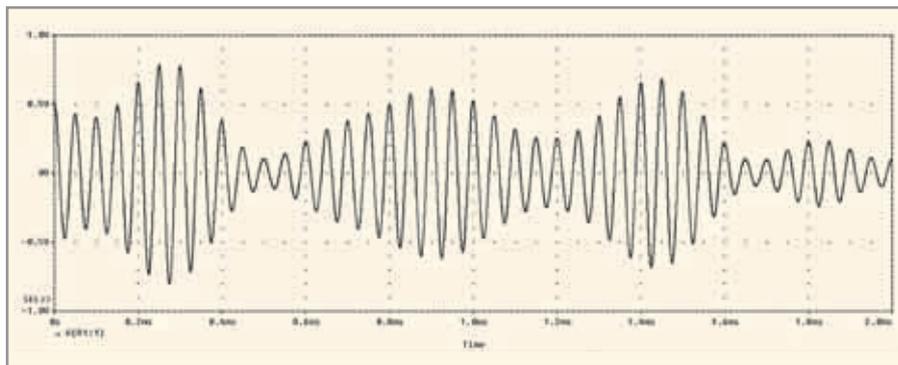


Рис. 7. Сигнал на выходе источника в САПР DesignLAB

После загрузки файла с источником данных в САПР DesignLAB получим аналогичную форму амплитудно-модулированного сигнала (см. рис. 7). Тем же способом, с использованием модели телефонного сообщения, можно получить выражения для моделирования источников сигналов с балансной модуляцией (БМ), однопольной модуляцией (ОМ), частотной (ЧМ) и фазовой модуляцией (ФМ):

$$S_{БМ}(t_j) = Sm \left[\sum_{k=0}^{N_s-1} m_k \cos(2\pi F_k t_j + \varphi_k) \right] \cos(2\pi f_0 t_j + \psi), \quad (7)$$

$$S_{ОМ}(t_j) = \frac{Sm}{2} \sum_{k=0}^{N_s-1} m_k \cos(2\pi(f_0 - F_k)t_j + \psi + \varphi_k), \quad (8)$$

$$S_{ЧМ}(t_j) = Sm \cos \left(2\pi f_0 t_j + \psi + \sum_{k=0}^{N_s-1} m_{f_k} \sin(2\pi F_k t_j + \varphi_k) \right), \quad (9)$$

где m_{f_k} – парциальные индексы частотной модуляции. Эти индексы

частотной модуляции вычисляются по формуле:

$$m_{f_k} = a \frac{S_{\Omega k} + \Delta S_{\Omega k}}{F_k}; \quad (10)$$

$$S_{ФМ}(t_j) = Sm \cos \left[2\pi f_0 t_j + \theta_0 + a \sum_{k=0}^{N_s-1} (S_{\Omega k} + \Delta S_{\Omega k}) \cos(2\pi F_k t_j + \varphi_k) \right]. \quad (11)$$

Используя рассмотренную методику построения временных отсчётов сигналов в среде MathCAD, можно самостоятельно моделировать источники аналоговых сигналов для исследования работы различных аналоговых устройств в САПР.

ЛИТЕРАТУРА

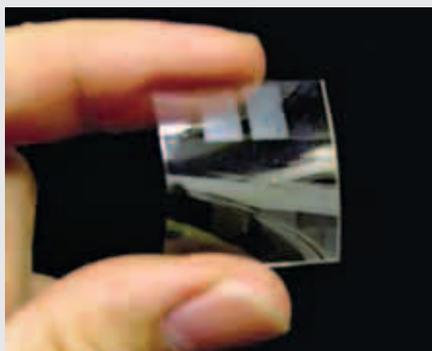
1. *Разевиг В.Д.* Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. Солон, 1999.
2. *Saffe R.C.* Random Signals for Engineers using MATLAB and Mathcad. Springer-Verlag, 2000.
3. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. Радио и связь, 1986. ©

Новости мира News of the World Новости мира

Японские учёные создали прозрачную полимерную батарейку

Кажущаяся на первый взгляд практически бесполезной прозрачная пластинка, изображённая на фото, представляет собой рабочий прототип перезаряжаемой полимерной батарейки, созданный японскими учёными Хироуки Нишиде (Hiroyuki Nishide), Хироаки Кониши (Hiroyuki Konishi) и Такео Суга (Takeo Suga) в университете Васеда (Waseda University). Инженерам удалось создать топливный элемент, состоящий из полимерной плёнки, активной к окислительно-восстановительным реак-

циям, толщиной 200 нм. Немаловажную роль здесь играют нитроксидные радикальные группы – «хранители» заряда.



Ввиду очень высокой плотности этих групп, новый элемент отличается от бывших разработок отличными рабочими показателями. Более того, полная зарядка «прозрачной» батарейки длится не более минуты, а количество жизненных циклов превышает 1000.

Профессор Питер Скабара (Peter Skabar), эксперт в этой области, по достоинству оценил инновационную разработку японских учёных в аспекте как технических характеристик продукта, так и предполагаемого маркетингового будущего «прозрачных» полимерных батареек.

gizmag.co.uk