

Математическая модель супергетеродинного приёмника для виртуального лабораторного макета

Качество виртуального лабораторного макета в первую очередь зависит от точности используемых математических моделей. При разработке виртуального супергетеродина с однократным преобразованием частоты важнейшим критерием является соблюдение принципа максимального правдоподобия и схожести характеристик реального приёмника и его программного аналога.

На рис. 1 представлена эквивалентная функциональная схема виртуального супергетеродина, разработанная на кафедре радиотехнических устройств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники для виртуальной лабораторной работы. В качестве исходного материала применялись простейшие математические модели всех узлов приёмника в виде линейных передаточных функций стандартных блоков, а именно: усилителей, сумматоров, перемножителей, фильтров нижних частот n -го порядка, полосовых фильтров n -го порядка.

Модель радиоприёмника содержит следующие основные функциональные узлы: входную цепь (ВЦ), генератор внутренних шумов, входной регулируемый аттенюатор-сумматор 1, смеситель (СМ), гетеродин (G), сумматор 2, полосовой фильтр сосредоточенной селекции (ФСС), усилитель сигналов промежуточной частоты (УПЧ), детектор, усилитель сигналов низкой частоты (УНЧ), фильтр нижних частот (ФНЧ), усилитель сигналов постоянного тока (УПТ).

Перечисленных узлов вполне достаточно для моделирования общего принципа функционирования супергетеродинного радиоприёмника, включая ограничение чувствительности усилением и внутренними шумами, а также частотной избирательности по соседнему и зеркальному каналам. Дальнейшее уточнение модели радиоприёмника требует учёта более тонких эффектов. В реальном супергетеродине всегда присутствует прямое прохождение сигналов через смеситель без преобразования частоты. Этот эффект достаточно просто моделируется введением дополнительного параллельного канала, состоящего в предлагаемой модели из блока прямого прохождения сигнала и сумматора 2 на входе полосового фильтра основной селекции.

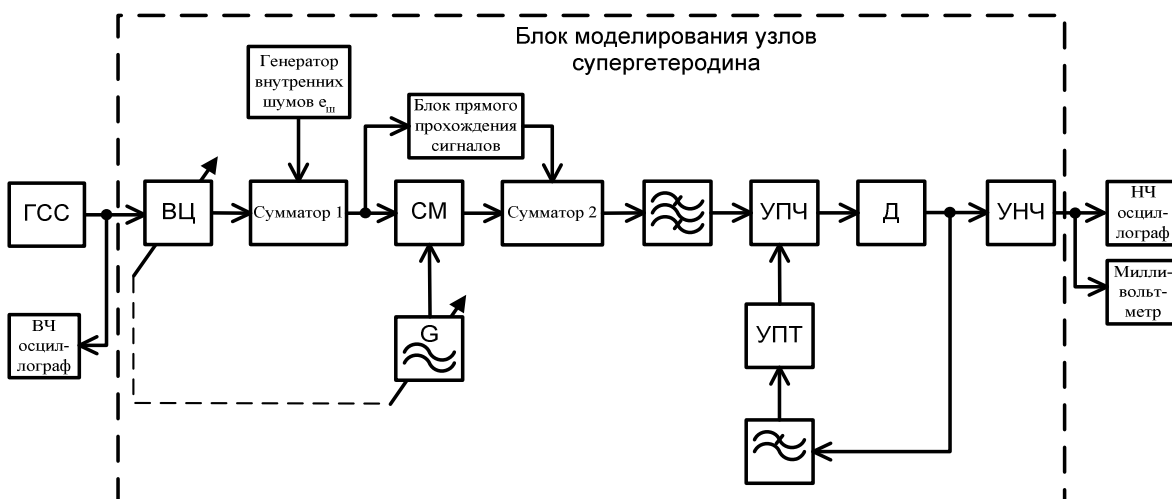


Рис. 1. Структурная схема виртуального лабораторного макета для исследования характеристик супергетеродинного радиоприёмника

Модели многоконтурных структур преселектора и полосового ФСС (их передаточные характеристики) основаны на аппроксимации полиномами Баттерворта.

Модель преобразователя частоты основана на верхнем преобразовании частоты вниз. Частота сигнала $f_{спч}$ на выходе СМ определяется соотношением $f_{спч} = f_o + f_{пч} - f_c$, где f_o - частота настройки преселектора приёмника, $f_{пч}$ - промежуточная частота, f_c - частота принимаемого сигнала. В соотношении учитывается, что $f_o + f_{пч} = f_r$, где f_r - частота гетеродина. Это важно для синхронной перестройки преселектора и гетеродина. В результате в преселекторе анализируется обобщённая расстройка $\xi_{сп}$ частоты сигнала f_c относительно частоты настройки преселектора f_o :

$$\xi_{\text{пр}} = Q_{\text{пр}} \left(\frac{f_c}{f_o} - \frac{f_o}{f_c} \right),$$

где $Q_{\text{пр}}$ – добротность колебательных систем преселектора.

Коэффициент передачи преселектора равен

$$K_{\text{пр}} = \frac{1}{\left(\sqrt{1 + \xi_{\text{пр}}^{2n}} \right)},$$

где n - число контуров в преселекторе.

В тракте промежуточной частоты анализируется обобщённая расстройка $\xi_{\text{пч}}$ частоты сигнала $f_{\text{спч}}$, относительно промежуточной частоты $f_{\text{пч}}$ (или частоты настройки ФСС):

$$\xi_{\text{пч}} = Q_{\text{пч}} \left(\frac{f_{\text{спч}}}{f_{\text{пч}}} - \frac{f_{\text{пч}}}{f_{\text{спч}}} \right),$$

где $Q_{\text{пч}}$ – добротность колебательных систем ФСС.

Коэффициент передачи смесителя и ФСС с учетом прямого прохождения сигнала равен

$$K_{\text{см}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{пчо}}^{2k}} + \frac{1}{1 + \xi_{\text{пч}}^{2k}}},$$

где k - число контуров в ФСС, $\xi_{\text{пчо}}$ – обобщённая расстройка частоты сигнала f_c относительно промежуточной частоты $f_{\text{пч}}$ (для колебания, проходящего через СМ напрямую):

$$\xi_{\text{пчо}} = Q_{\text{пч}} \left(\frac{f_c}{f_{\text{пч}}} - \frac{f_{\text{пч}}}{f_c} \right).$$

Для упрощения в модели радиоприёмника принято, что затухание всех селективных цепей на резонансной частоте и в полосе прозрачности отсутствует, т.е. коэффициенты передачи ВЦ, ФСС и ФНЧ равны единице. Коэффициенты преобразования СМ и передачи блока прямого прохождения сигнала приняты равными единице, а все сумматоры считаются идеальными с весовыми коэффициентами по всем входам равными единице.

Модель блока детектора представляет собой линейный преобразователь модулированной несущей в низкочастотный сигнал с коэффициентом передачи, равным глубине модуляции m . Модель УНЧ представляет собой масштабирующее звено с изменяемым коэффициентом $K_{\text{унч}}$, достаточным для получения на его выходе стандартной мощности сигнала.

Выражение для общего коэффициента передачи РПрУ принимает следующий вид:

$$K_{\text{РПрУ}} = \frac{(K_{\text{унч}} + E_3 S_p K_{\text{упт}}) K_{\text{унч}}}{1 + S_p U_{\text{мс}} K_{\text{пр}} K_{\text{см}} K_{\text{упт}}},$$

где $U_{\text{мс}}$ - амплитуда несущего колебания на входе приёмника, E_3 – напряжение задержки системы автоматической регулировки усиления, S_p – крутизна характеристики управления гетеродином, $K_{\text{упт}}$ – коэффициент передачи УПТ, $K_{\text{унч}}$ – коэффициент передачи УПЧ.

Все количественные значения таких параметров модели как коэффициенты передачи УПЧ, УПТ, крутизна S_p , добротности контуров $Q_{\text{пр}}$ и $Q_{\text{пч}}$, количество контуров преселектора n и ФСС k , уровень шума $e_{\text{ш}}$ вырабатываются с помощью генераторов случайных чисел. Это позволяет проводить виртуальные исследования очень большого числа возможных вариантов реализации супергетеродина с однократным преобразованием частоты.

Используемая на практике программная реализация рассмотренной модели радиоприёмника обеспечивает работу виртуального макета в диапазонах волн, характерных для бытовой радиоаппаратуры. Это диапазоны длинных, средних и коротких волн с соответствующей разбивкой на поддиапазоны. При этом начальные и конечные значения частот диапазонов и поддиапазонов также определяются с помощью генераторов случайных чисел.

Уровень выходного сигнала звуковой частоты с учетом собственного шума приёмника $e_{\text{ш}}$ равен:

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{РПрУ}} \sqrt{(U_{\text{мс}} m)^2 / 2 + e_{\text{ш}}^2}.$$

В результате, несмотря на кажущуюся простоту, в целом получилась модель супергетеродина, весьма точно описывающая радиотехнические процессы, происходящие в реальном устройстве. Это касается не только воспроизведения функций усиления, преобразования частоты и адаптации. Достоинством разработанной модели является воспроизведение функции селективности по таким мешающим каналам приёма, как соседний канал, зеркальный канал и прямой или канал промежуточной частоты.