**Проектирование и расчет структурной схемы радиоприемника**

Москва 2005 г.

# Введение

Техника радиовещания на УКВ с частотной модуляцией (ЧМ) начала развиваться с 30-х годов, когда были обнаружены высокая помехоустойчивость и высокое качество сигнала при этом виде модуляцию. Частотная модуляция относится к широкополосным видам модуляции, при которых излучаемая передатчиком полоса частот намного превышает полосу частот модулирующего звукового сигнала. Происходит как бы «обмен» полосы на отношение сигнал-шум, которое может достигать на выходе ЧМ детектора от –70 до –80 дБ. В связи с этим максимальную девиацию частоты радиовещательных передатчиков устанавливают равной 60 кГц (в РФ) или 75 кГц (в США). Полоса частот, занимаемая станцией в эфире, получается более 100 кГц, поэтому вещание с ЧМ ведется только на УКВ. Ширина радиовещательного УКВ диапазона в РФ (65, 8 – 73 МГц) втрое превосходит суммарную ширину участков, отведенных для радиовещания в диапазонах ДВ, СВ, и КВ.

Ультракороткие волны слабо огибают земную поверхность, а так же препятствия, встречающиеся на пути их распространения. Поэтому радиус действия УКВ ЧМ передатчиков обычно превосходит 70 – 100 км. Даже в зоне «радиовидимости» встречаются области глубокой «тени» со слабой напряженностью поля. Тем не менее, УКВ радиовещание полностью оправдано в городах и густонаселенных местностях, где построена густая сеть УКВ радиостанций и ретрансляторов. Эпизодически возможен и дальний прием УКВ станций, обусловленных сверхрефракцией радиоволн в тропосфере или другим причинам, например, отражением от спорадических ионосферных образований.

Одновременно с количественным развитием сети УКВ вещания происходил и качественный процесс – непрерывное совершенствование техники УКВ приема. Сверхрегенераторы применявшиеся ранее, виду их исключительной простоты, были полностью заменены супергетеродинными приемниками. Классическая структурная схема супергетеродинного приемника, включающая УВЧ, преобразователь частоты, УПЧ с большим коэффициентом усиления, ограничитель, частотный детектор (ЧД) и УПЧ существует без заметных изменений уже более полувека. Изменялась лишь элементная база – лампы уступили место транзисторам, затем интегральным микросхемам, с развитием стерео вещания добавился стерео декодер. Эта же структурная схема используется и во вех современных УКВ приемниках, выпускаемых промышленностью.

Попытки улучшить качество работы и помехоустойчивость приемника ЧМ привели к усовершенствованию всех перечисленных элементов структурной схемы приемника. Были созданы малошумящие высокочастотные каскады с большим динамическим диапазоном, тракты ПЧ с монолитными пьезокерамическими фильтрами УНЧ с большой выходной мощностью и пренебрежимо малыми частотными и нелинейными искажениями. В наименьшей степени этот процесс затронул «классический» частотный дискриминатор (ЧД) или детектор отношений.

Предпринимались поиски новых технических решений, улучшающих УКВ прием. Основные изобретения были сделаны в конце 30-х годов, однако, из-за слабого развития техники они долго не получали распространения. К этим изобретениям относятся отрицательная обратная связь по частоте (Чеффи, 1937), следящий фильтр (Виницкий, 1940), приемник с синхронно-фазовым ЧД (Кросби, 1938). Если первые два изобретения лишь улучшают параметры приемника ЧМ, причем, основные узлы структурной схемы, включая ЧД, остаются неизменными, то синхронно-фазовый детектор отличается принципиально – в нем используется техника синхронного детектирования ЧМ сигнала.

Синхронный прием был известен еще раньше – пионерами применения этой техники для детектирования АМ сигналов были Бельсиз, во Франции и Момот, в СССР, намного опередившие в своих работах уровень техники того времени. Однако, практическое развитие техника синхронного приема получила лишь с появлением систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), обеспечивающих синхронизацию гетеродина приемника.

Система ФАПЧ включает: фазовый детектор, фильтр нижних частот, усилитель и управляемый напряжением гетеродин. В процессе работы фазовый детектор вырабатывает сигнал ошибки слежения. Этот сигнал, пройдя через фильтр и усилитель, подстраивает частоту гетеродина под частоту сигнала до точного их совпадения. Если частота выходного сигнала модулирована, то управляющее напряжение изменяется в такт с модуляцией, т.е. является продетектированным сигналом.

В настоящее время системы ФАПЧ нашли применение в самых различных областях техники: в синтезаторах частоты для выделения нужной гармоники из сложного спектра, в различных следящих системах, в цепях синхронизации телевизионных приемников и даже в устройствах стабилизации частоты вращения диска электропроигрывателей.

Что касается систем связи, то выделение несущих, тактовых и синхронизирующих частот осуществляется чаще всего системами ФАПЧ. Так, например, в наземных станциях спутниковой системы связи «Орбита» для демодуляции ЧМ сигнала используется система ФАПЧ.

К идее использования обратной связи по частоте (ОСЧ) следящих фильтров (СФ) и синхронно-фазовых детекторов (СФД) для радиовещательного ЧМ приема вернулись в 60-х годах, когда возможности совершенствования «классического» тракта ПЧ и ЧД приемника были практически исчерпаны. Теоретическими работами было показано, что ОСЧ и СФ в случае широкополосных, а СФД, в случае сравнительно узкополосных (типа радиовещательных) ЧМ сигналов практически реализуют потенциальную, т.е. предельно возможную помехоустойчивость ЧМ приемника.

Промышленный образец приемника ЧМ и СФД был выпущен фирмой Кортинг (ФРГ) и показан на выставке 1953 г. Он не получил распространения из-за сложности и дороговизны ламповой схемы. С появлением транзисторов и интегральных микросхем изготовить ЧМ детектор с ФАПЧ стало гораздо проще. В новом приемнике той же фирмы «Синтектор 1500» СФД обеспечивает подавление АМ более 60 дБ и существенно улучшает селективность по соседнему каналу.

**1. Расчет Y – параметров транзистора**

В данном разделе необходимо найти Y-параметры для выбранного режима работы транзистора и его рабочей частоты на основании справочных данных в миллисимменсах в виде (форме) суммы активной (Gxx) и емкостной (Bxx=щCxx) составляющих.

Проектирование и расчет структурной схемы радиоприемника начнем с выбора транзистора.

Выбор транзистора производится на основе следующих соображений:

1. Граничная частота транзистора должна быть больше, чем 20\*fp
2. Тип транзистора – биполярный

В результате целенаправленного перебора различных марок транзистора, в качестве транзистора был выбран биполярный транзистор марки КТ-368

Расчет Y-параметров транзистора производился на основе программы RPUYP.

Исходные данные:

Рабочая частота сигнала: F = 40 МГц

Рабочая частота транзистора: 40 МГц

Тип транзистора: n-p-n

h21 = 100

fгр = 900 МГц

фк = 15 псек.

Ск = 1.7 пФ

Iк = 5 мА

W = 3 (коэф. технологичности)

Результаты расчета:

G11 = 3.5 мСм

G21 = S = 177 мА/В

G22 = 0.25 мСм

Таким образом, для дальнейших расчетов понадобятся следующие данные: G22 = 0.25 мСм

**2. Расчет допустимого коэффициента шума приемника**

Методика расчета ориентирована на достижение приемником максимальной чувствительности, ограниченной лишь собственными шумами и, соответственно не учитывает воздействия на антенну внешних помех, которые во многих случаях существенны (например, в сравнительно низкочастотных диапазонах). Поэтому найденный допустимый коэффициент шума должен превышать фактический (который будет найден в следующем разделе).

При заданной ЭДС Eа и параметрах сигнала (по Т.З.) в соответствии с программой RPUNS сначала рассчитывается допустимый коэффициент шума Шдоп по нижеследующим формулам. При несогласованно антенне (типа штыря) и отсутствия внешних помех:

Шдоп = Еа2/4kToПшDRa,

где Ea – ЭДС в антенне, Ra – сопротивление (излучения + потерь) антенны, Ом – выбирается с учетом конкретного вида антенны (например, у штыря длинной порядка 1 м, Ra = 20…30 Ом и ЭДС Еа в нем может составлять единицы мкВ, в данном случае берем Ra = 20 Ом.)kT0 = 4\*10-21 Вт / Гц, То = 293 град.

К – комнатная температура (20 град С), в данном случае 20 *град* С;

П – шумовая полоса линейного тракта РПУ (определяется преимущественно полосой пропускания ФСИ в тракте УПЧ), приближенно рассчитывается по эмпирической формуле Пш = 1.1 П0.7, где П0.7 – полоса пропускания многоконтурного ФСИ на уровне 0.7 (неравномерность АЧХ 3 дБ), выбранная с учетом ширины спектра сигнала, в данном случае Пш = 201.36 кГц.

D – отношение сигнал/шум на выходе линейного тракта РПрУ (или на входе детектора), в данном случае 10 *раз*.

На основе программы RPUKN был проведен расчет допустимого коэффициента шума радиоприемного устройства в предположении только внутренних шумов.

Исходные данные:

Тип антенны: несогласованная

Вид модуляции: ЧМ

ЭДС в антенне Ea = 1.5 мкВ/м

Шумовая полоса Пш = 201.36 кГц

Отношение сигнал/шум перед детектором D = 16 раз

Частота модуляции Fв = 3.4 кГц, девиация частоты 5 кГц.

Индекс модуляции Им = 5/3.4 = 1.5

Рабочая частота F = 40 МГц

Результаты расчета:

В результате расчета было получено следующее значения допустимого коэффициента шума: Шдоп = 16 раз.

**3. Расчет фактического коэффициента шума приемника**

Коэффициент шума на БТ. Настроенная антенна.

Расчет производится для выбранной марки биполярного транзистора КТ-368.

После выбора транзистора, производится расчет его Y – параметров на рабочей частоте, которые используются для расчета фактического (реального) коэффициента шума приемника Ш = Шфакт, а также эквивалентной добротности (эквивалентного затухания) контуров входной цепи и в коллекторной цепи транзистора УВЧ.

Расчет коэффициента шума первого каскада (УВЧ) производиться для настроенной антенны в соответствии с эквивалентной схемой, где m, n – коэффициенты включения со стороны антенны и входа транзистора, в данном случае m=0.06, n=0.1.

Проведем расчет с помощью программы RPUNS.

Исходные данные:

Активная проводимость источника Gи = 1/Rа = 0.05 сим

Собственная активная проводимость контура G0

d0 – собственное затухание контура, принимаем равным 0.007

с =1/щСКонт = 79.6

щ = 2рF получим щ = 25.12\*107,

Сконт = на частоте 40 МГц равняется 50 пФ

G0 = d0/с = 9\*10-5 сим

Рабочая частота 40 МГц

Рабочий ток коллектора Iк = 5 мА

Транзистор биполярный КТ-368, тип n-p-n

Результаты расчета:

Коэф. шума на рабочей частоте N0 = 4

На основе программы RPUNS был произведен расчет реального коэффициента шума для биполярного транзистора КТ-368. В результате расчета было получено, что реальный коэффициент шума составляет 4 раза. Сравнивая полученный результат с допустимым значением коэффициента шума, равным 16 разам, делаем вывод, что обеспечивается чувствительность по ТЗ, т. к. реальный коэффициент шума больше чем в 4 раза меньше допустимого.

Коэффициент шума БТ с учетом внутренней ОС

Произведем расчет коэффициента шума внутренней ОС в транзисторе, создаваемой емкостью коллектора Ск. Сделаем это с помощью программы RPUNS.

Исходные данные не изменяются за исключением наличия ОС.

Результаты расчета:

Коэф. шума на рабочей частоте с учетом внутренней ОС N0 = 4

Из данных расчета можно сделать вывод, что усилитель на транзисторе КТ-368 позволяет обеспечить одновременно и низкий коэффициент шума, и высокую избирательность.

**4. Расчет избирательности по побочным каналам**

Побочными каналами является зеркальный канал (с избирательностью Sезк), отстоящей от основного на частоту 2fпр, канал с частотой, равной промежуточной fпр (Sепр), а также соседний канал (с избирательностью Sеск)

Расчет фильтра входной цепи на избирательность

Расчет избирательности фильтра осуществляется в программе RPUNS.

Исходные данные:

Рабочая частота – 40000 кГц

Коэф. включения со стороны антенны m = 0.06

Коэф. включения со стороны транзистора n = 0.1

Активная проводимость источника Gи = 0.05 сим

Активная входная проводимость транзистора G11 = 3.5\*10-3 сим

Емкость контура Ск = 50 пФ

Собственное затухание контура d0 = 0.007

Результаты расчета:

Эквивалентное затухание контуров dе = 2.4\*10-2

Расчет избирательности фильтра по зеркальному каналу.

По техническому заданию селективность по зеркальному каналу равна 60 дБ. Обеспечения заданной селективности (повышения избирательности) мы добились, выбрав промежуточную частоту равной 5 МГц. Расстройка или частотное расстояние между помехой и сигналом в этом случае, как уже говорилось выше, равна Дfзк = 2fпр = 2 \* 5 = 10 МГц.

При таком выборе промежуточной частоты обеспечивается селективность по зеркальному каналу, равная 60 дБ при числе звеньев фильтра, равном двум, это означает, что заданная избирательность может быть обеспечена двумя ОК, включенными раздельно: один – в ВЦ, другой – в УРЧ.

Исходные данные вводимые в программу RPUNS и результаты расчета по данному пункту представлены ниже.

Частота сигнала 4000 кГц

Требуемая селективность по побочному каналу Sезк = 60 дБ

Ослабление на границе полосы пропускания П0.7 = 6 дБ

Эквивалентное затухание контуров dе = 2.4\*10-2

Максимальное число контуров Nmax = 2

Начальное значение частоты Fнач = 39000 кГц

Конечное значение частоты Fкон = 41000 кГц

Результаты расчета:

Ослабление сигнала на границе полосы пропускания П0.7 = 4.7 дБ

Селективность по зеркальному каналу Sезк = 63 дБ

Количество контуров во входной цепи N = 3

Полученные результаты дают нам право говорить об обеспечении заданной селективности по зеркальному каналу, т. к. полученное значение больше заданного на 3 дБ. Расчет избирательности фильтра по каналу с частотой, равной промежуточной fпр.

По техническому заданию селективность по каналу с частотой, равной промежуточной fпр равной 60 дБ. Расстройка или частотное расстояние между помехой и сигналом в этом случае равна:

Дfпр = fс – fпр = 40 – 5 = 35 МГц

Дfпр = 35000 Гц

Ослабление сигнала на границе полосы – это уровень на котором считывается полоса пропускания (обычно, больше 3 дБ), в данном случае – 6 дБ.

Исходные данные:

Частота сигнала 4000 кГц

Расстройка по побочному каналу 35000 Гц

Требуемая селективность по побочному каналу Sепр = 60 дБ

Ослабление на границе полосы пропускания П0.7 = 6 дБ

Эквивалентное затухание контуров dе = 2.4\*10-2

Максимальное число контуров Nmax = 2

Начальное значение частоты Fнач = 39000 кГц

Конечное значение частоты Fкон = 41000 кГц

Результаты расчета:

Ослабление сигнала на границе полосы пропускания П0.7 = 4.7 дБ

Селективность по каналу промежуточной частоты Sепр = 80 дБ

Количество контуров во входной цепи N = 3

Результаты расчета позволяют нам говорить об удовлетворении технического задания: ослабление сигнала F паразитного канала при заданной селективности 60 дБ составляет 80 дБ.

Расчет избирательности по соседнему каналу.

В данном разделе производится расчет на избирательность по соседнему каналу. Требуется по т.з. при расстройке 25 кГц обеспечить избирательность 60 дБ. Удобнее воспользоваться отдельной программой RPUNSS1).

Исходные данные:

Промежуточная частота ФСС fпр = 5000 кГц

При частотной модуляции требуемая полоса пропускания ФСС минимальная.

П0.7 = 2 (Дfд + Fв) = 2 Fв (1+M), где

Дfд – девиация ЧМ сигнала,

Fв – верхняя частота модуляции

Исходя из этого, делаем вывод:

П0.7 = 2\*(5 кГц + 3.4 кГц) = 17 кГц.

Расстройка по соседнему каналу 25 кГц

Требуемое ослабление на границе полосы пропускания S0.5 = 6 дБ

Собственное затухание контуров d0 = 0.003 (Q = 330 – при использовании ферритовых сердечников в катушках)

Максимально допустимое число контуров N = 12

Начальное значение частоты Fнач = 4970 кГц

Конечное значение частоты Fкон = 5030 кГц

Шаг изменения Fш = 2 кГц

Результаты расчета программы RPUNSS1 по данному пункту представлены ниже.

Результаты расчета:

Ослабление сигнала на частоте Дfск = 25 кГц равно Sеск = 61.32 дБ

Количество звеньев фильтра N = 11

Общее вносимое затухание на промежуточной частоте 45 дБ

Коэффициент передачи КФСС = 0.01

Волновое сопротивление W = 1 кОм.

**5. Выбор средств обеспечения требуемого усиления сигнала**

Для приемника с преобразованием частоты общий коэффициент усиления по напряжению получается как результат перемножения коэффициентов отдельных узлов:

К0пр = Квц \* Курч \* Кпч \* Кфсс \* Купч \* Кару

где перечислены соответственно коэффициенты передачи ВЦ, УРЧ, преобразователя частоты, ФСИ, линейки УПЧ, Кару – коэффициент, указывающий на уменьшение усиления линейного тракта после замыкания петли АРУ

Коэффициент усиления линейного тракта приемника К0пр равен:

К0пр = Uвых / Eа

где Uвых – требуемое эффективное напряжение на выходе линейного тракта приемника, Еа – указанная в техническом задании ЭДС в антенне (напряженность поля).

Uвых = Uном = 0.6 В, Еа = 1.5 мкВ

К0пр = 0.6/ 1.5\*10-6 = 4\*105

Коэффициент передачи Квц настроенной антенны рассчитываются по формуле:

Квц = mn / RaGэ

Gэ – эквивалентная проводимость контура, учитывающая вносимые потери со стороны источника сигнала (антенны, фидера) и от входа БТ.

Gэ = de/с = 2.4\*10-2 / 80 = 3\*10-4

Квц = (0.06 \* 0.1) / (20 \* 3\*10-4) = 1

Коэффициент передачи Курч рассчитывается по формуле:

Курч = mnS / Gэ

где вместо m подставляем новое значение mn учитывающее тот факт что выходная проводимость УРЧ значительно меньше проводимости антенны

mn = m / 

mn = 1; S = G21 = 0/18 А/в; Gэ = 3\*10-4

Курч = mn\*nS / Gэ = 1\*0.1\*0.18 / 3\*10-4= 60

Коэффициент усиления преобразователя Кпч

Кпч = mnSпр / Gэ

m = 1 т.к. G22W < 1,

= 0.5, Sпр = S/4 = 0.18/4 = 0.045,

Gэ = 1/ W = 10-3

Кпч = 1\*0.5\*0.045 / 10-3 = 22

Кфсс было рассчитано ранее с помощью программы РПУ ФСС1

Кфсс = 0.01

Кару Рассчитанное по программе и равно 1 / 2.1

Кару = 0.5

С учетом написанного выше можем найти Купч

Курч = К0пр / Квц \* Кпч \* Кфсс \* Купч \* Кару

Курч = 4\*105 / 1\*60\*22\*0.01\*0.5 = 6\*104

**6. Расчет ЧМ детектора на ФАПЧ**

Произведем расчет с помощью программы RPUFAP.

Исходные данные:

Индекс модуляции М=1.5

Верхняя частота модуляции Fв=3.4 кГц

Коэффициент запаса определяется по формуле Кз=

Коэффициент запаса Кз = 5

Сопротивление фильтра R1=1 кОм

Результаты расчета:

Пороговое отношение сигнал/шум с = 8

Полоса удержания ФАП =150 кГц

Сопротивление фильтра R1=1 кОм

Сопротивление фильтра R2=50 Ом

С = 0,03 мкФ

Отечественной промышленностью в настоящее время освоен выпуск микросхем, позволяющих на основе ФАПЧ обеспечить следящий прием ЧМ сигналов. С этой целью удобнее всего воспользоваться микросхемой ИМС174ХА15. В состав этой микросхемы входят усилитель высокой частоты и фильтр низкой частоты.

**7. Проектирование приемника на микросхеме**

Для обеспечения высокой чувствительности и избирательности включаем УРЧ на отдельном транзисторе КТ368 с расчетными параметрами. В качестве второго каскада УРЧ и преобразователя с отдельным гетеродином выбираем ИМС 174ХА15 к выходу этой микросхемы подключаем ФСИ с 11-ю контурами и УПЧ на микросхеме ИМС К157УВ2.

К выходу УПЧ подключаем микросхему 174ХА5 которая срабатывает при входном напряжении не более 100 мкВ. Таким образом, можно ограничиться в приемнике 1–2-мя каскадами УПЧ.

Проверочный расчет.

КУРЧ = 60 раз

КНИМС = 28 ДБ (≈ 26 раз)

Поскольку КФСИ=0.01 то напряжение на выходе ФСИ равно

UВЫХ ФСИ = 1.5\*10-6\*60\*26\*0.01 = 20 мкВ = 20\*10-6 В

Таким образом УПЧ должен обеспечить усиление не менее чем 

Таким образом можно ограничиться одним каскадом УПЧ этому удовлетворяет микросхема К174 ХА15

транзистор усиление сигнал приемник

**8. Подбор структурной схемы**

На основе проделанных выше расчетов, можно подобрать подходящую схему, удовлетворяющую техническому заданию и параметрам, обеспечивающим рассчитанный коэффициент усиления.

Таковой схемой является ИМСК174ХА15. Она представляет собой многофункциональную схему, предназначенную для УКВ блоков (аппаратов любой категории сложности до высшей).

Достижение высоких параметров УКВ приема связано с тем, что ИМС содержит:

* симметричный смеситель – перемножитель U1 с глубокой обратной связью, большим входным сопротивлением и значительным усилением.
* балансный гетеродин G1.
* буферный каскад А3, предохраняющему гетеродин от входных сигналов.
* усилитель АРУ А2, повышающий устойчивость блока УКВ к образованию паразитных каналов приема.
* высокочастотный стабилизатор напряжения А4, обеспечивающий, в частности, стабильность частоты гетеродина при колебаниях питающего напряжения.
* усилитель высокой частоты А1.
* фильтр низкой частоты Z1.

Ниже представлена структурная схема ИМСК174ХА15.

ИМС содержит все активные элементы, необходимые для построения УКВ – блока. На транзисторе VТ12 собирают усилитель ВЧ, на который сигнал поступает с входного контура через вывод 10, а усиленное напряжение с вывода 8 подают на смеситель – перемножитель (на транзисторах VT6, VT8, VT10). Активными элементами гетеродина служат транзисторы VT2 и VT3 (контур подключают к выводам 1 и 16). Колебания гетеродина через буферный усилитель на транзисторах VT4, VT5 попадают на перемножитель с помощью транзисторов VT7, VT11. сигнал ПЧ поступает с коллекторов перемножителя на фильтры нижних частот на RC структурах и снимается с выводов 13, 14.

В ИМС предусмотрен также каскад на транзисторе VT13 внутренней АРУ для предотвращения перегрузки при сильных сигналах и стабилизатор напряжения на транзисторе VT1 и диодах VD1…VD5.

Блок УКВ на базе ИМС имеет электронную настройку. Частотой настройки управляют переменным резистором R1. подстроечные резисторы R2…R5 служат для точного сопряжения контуров. Основные параметры блока УКВ: промежуточная частота 10.7 Мгц, ток потребления около 30 мА, коэффициент шума 6 дБ, полоса пропускания по ВЧ-1.7МГц, по ПЧ-0.5МГц, подавление зеркального канала 80дБ, ПЧ-100дБ.

**Список литературы**

1. Радиоприемные устройства. /Под редакцией проф. Н.Н. Фомина – М.: Радио и связь, 1996 г.
2. Проектирование радиоприемных устройств. /Под редакцией А.П. Сиверса – М.: Сов. Радио, 1976 г.
3. Аналоговые интегральные микросхемы для бытовой радиоаппаратуры: Справочник 2-издание. /А.И. Атаев, В.А. Болотников – М.: Издательство МЭИ, ПКФ «Печатное дело», 1992 г.
4. Чуркин Е.И. Расчет узлов и параметров радиоприемных устройств с применением ЭВМ: Учебное пособие. Часть 2 / МИС. – М., 1991 г.
5. Чуркин Е.И. Проектирование и расчет структурной схемы радиоприемника: Учебное пособие./ МТУСИ. – М., 2001 г.