



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ при  
КЫРГЫЗСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ им. И. РАЗЗАКОВА.**

**Кафедра “Радиоэлектроника”**

**ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СВОЙСТВ  
ЧАСТОТНЫХ  
МОДУЛЯТОРОВ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ.**

Методические указания к выполнению лабораторных работ для  
студентов по специальностям  
“Радиосвязь, радиовещание и телевидение”, “Радиотехника”

**Бишкек 2011**



**Рассмотрено**  
на заседании кафедры  
«Радиоэлектроники»  
Протокол: №2 от 25.10.2011



**Одобрено**  
Учебно-методической  
комиссией ИЭТ  
Протокол: № 3 от 24.11.2011

**УДК.:**

**Составители: ЖУМАБАЕВ М.Ж., ТУУГАНБАЕВ Т.Т.**

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СВОЙСТВ ЧАСТОТНЫХ МОДУЛЯТОРОВ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ: методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплинам «Космические и наземные системы радиосвязи, телевидения», «Радиосвязь, радиовещание и телевидение» для студентов по направлениям “Радиосвязь, радиовещание и телевидение”, “Радиотехника” / КГТУ; Сост.: Жумабаев М.Ж, Тууганбаев Т.Т Бишкек 2011-11с.

Излагаются теоретические сведения и методические указания к выполнению лабораторной работы по изучению параметров и свойств частотных модуляторов радиорелейных линий.

Предназначены для студентов направления 550400, 552500; всех форм обучения.

Ил. 4; Табл. 3; Библиогр.: 6 наименов.

**Рецензент: Каримов Б.Т.**



## Цель работы

Целью работы является изучение параметров и свойств частотных модуляторов радиорелейных линий.

## Теоретические сведения

Применение частотной модуляции в аналоговых РРЛ. По сравнению с амплитудной модуляцией частотная модуляция является более помехоустойчивой и поэтому стали ее применять уже в первых радиорелейных станциях (РРС). Сообщение в этом случае передается за счет изменения частоты  $\omega(t)$  передатчика.

В аналоговых РРЛ при частотной модуляции групповым случайным телефонным сигналом  $u(t)$  пользуются понятиями эффективного (среднеквадратичного) значения девиации круговой частоты  $\Delta\omega_{\text{э}}$  и квазипиковой девиацией частоты  $\Delta\omega_{\text{пик}}(\varepsilon\%)$  (или соответствующими значениями  $\Delta f_{\text{э}}$  и  $\Delta f_{\text{пик}}(\varepsilon\%)$ , выражаемыми в Гц)[1]. В этом случае  $\Delta\omega_{\text{э}}$  соответствует среднеквадратичному значению  $u_{\text{э}}$  процесса  $u(t)$  со средней мощностью  $P_{\text{ср}}$  т.е.

$$\Delta\omega_{\text{э}} = \kappa_{\text{чм}} U_{\text{э}} \text{ (или } \Delta f_{\text{э}} = K_{\text{чм}} U_{\text{э}} \text{)}, \quad (1)$$

где  $\kappa_{\text{чм}}$  или  $K_{\text{чм}}$  - крутизна характеристики частотного модулятора [рад/сВ] или [Гц/В].

А квазипиковое значение девиации  $\Delta\omega_{\text{пик}}(\varepsilon\%)$  связано с квазипиковым значением  $u_{\text{пик}}(\varepsilon\%)$  случайного процесса  $u(t)$  и с пиковой мощностью  $P_{\text{пик}}(\varepsilon\%)$ , т.е.

$$\Delta\omega_{\text{пик}}(\varepsilon\%) = \kappa_{\text{чм}} u_{\text{пик}}(\varepsilon\%), \quad (2)$$

где,  $x(\varepsilon\%)$  означает величину  $x$ , превышаемую в течении не более  $\varepsilon\%$  времени. При частотной модуляции случайным процессом  $u(t)$  эффективное значение индекса модуляции определяется по выражению:

$$m_{\text{э}} = \Delta\omega_{\text{э}} / \Omega_B = \Delta f_{\text{э}} / F_B, \quad (3)$$

где,  $F_B$  - верхняя частота модулирующего сигнала  $u(t)$ .

В аналоговых РРЛ  $u(t)$  - групповой телефонный сигнал, видеосигнал с звуковым сопровождением. Введем нормированный случайный сигнал:

$$\xi(t) = u(t) / U_{\text{э}} \quad (4)$$

Принято считать, что  $u(t)$  - центрированный случайный процесс со средней мощностью (на сопротивлении  $R = 1 \text{ Ом}$ )  $P_{\text{ср}} = U_{\text{э}}^2$  с дисперсией равной единице, а его среднее значение равно нулю. С учетом вышесказанного математическое выражение ЧМ сигнала описывается в следующем виде:

$$u_{\text{чм}}(t) = U_0 \cos \left[ \omega_0 t + \Delta\omega_{\text{э}} \int_0^t \xi(t) dt + \varphi_0 \right], \quad (5)$$

где,  $U_0, \omega_0$  и  $\varphi_0$  - амплитуда, частота и начальная фаза несущего колебания,  $\Delta\omega_{\text{э}}$  - эффективная девиация частоты.

Ширина спектра ЧМ сигнала определяется по формуле Карсона:

$$\Delta f_{\text{чм}} = 2F_B (1 + m_{\text{э}}) \quad (6)$$

При передаче групповых аналоговых сигналов методом ЧМ  $\Delta f_{\text{э}}$  зависит от число телефонных (ТФ) каналов. Если задано число ТФ каналов, соответственно и  $F_B$ , то можно определить  $m_{\text{э}}, \Delta f_{\text{чм}}$ . Значение  $m_{\text{э}}$  влияет на уровень тепловых шумов и переходных помех на выходе канала. Для РРС с различным числом ТФ каналов  $N$  Международный



союз электросвязи (МСЭ) рекомендует различные величины так называемой эффективной девиации на канал  $\Delta f_K$ . Данный параметр является эффективной девиацией частоты на выходе модулятора при подаче на вход любого ТФ канала измерительного сигнала (с частотой  $800 \text{ Гц}$ ) мощностью  $1 \text{ мВт}$  (нулевой уровень). Согласно рекомендации МСЭ в аналоговых РРЛ в зависимости от числа каналов  $N$  используют  $\Delta f_K$  равные  $200 \text{ кГц}$  и  $140 \text{ кГц}$  [1]. Значение  $\Delta f_K$  определяется на основе средней мощности группового телефонного сигнала ( $P_{cp}$ ). При большом количестве ТФ каналов ( $N > 60$ ) сигналы в каждом канале не зависят от остальных и средняя мощность группового сигнала ( $P_{cp}$ ) равна сумме средних мощностей сигналов активных каналов и следовательно уровень средней мощности равна сумме средних мощностей сигналов активных каналов, можно определить по выражению:

$$P_{cp} = P_{1cp} N$$

или

$$p_{cp} = 10 \lg [N P_{1cp}] = p_{1cp} + 10 \lg N \quad (7)$$

где,  $p_{1cp} = 10 \lg \left( \frac{P_1}{1 \text{ мВт}} \right)$ ,  $P_{1cp} = 32 \text{ мкВт}$  средняя мощность одного ТФ канала на входе канала. Соответствующий ей уровень  $p_{1cp} = 10 \lg \left[ \frac{32 \text{ мкВт}}{1 \text{ мВт}} \right] = -15 \text{ дБ}$  (дБ по отношению к  $1 \text{ мВт}$ ).

Эффективная девиация  $\Delta f_{\text{Э}}$  определяется выражением:

$$\Delta f_{\text{Э}} = \Delta f_K 10^{0,05 p_{cp}} \quad (8)$$

где,

$$p_{cp} = -15 + 10 \lg N, \text{ дБ} \quad (9)$$

выражение (10) является справедливым для случая  $N > 240$ .

В аналоговых РРЛ при частотной модуляции полным цветным телевизионным сигналом  $U_{п.ц.}(t)$  совместно с ним передаются несколько поднесущих с ЧМ сигналов (Сигналы звукового сопровождения и вещания. Количество поднесущих частот в зависимости от исполнения модема могут быть 2 или 4). Линейный спектр группового сигнала для этого случая показан на рис. \_\_\_\_ МСЭ для передачи видеосигнала  $U_{п.ц.}(t)$  с размахом  $1 \text{ В}$  рекомендует применять размах изменения частоты  $\Delta f_{\text{раз}} = 8 \text{ МГц}$ . Тогда максимальная девиация частоты будет составлять  $\Delta f_{\text{д max}} = \pm 4 \text{ МГц}$ . Для определения ширины спектра ЧМ ТВ сигнала в выражении (6) вместо  $m_{\text{Э}}$  следует использовать  $m_{\text{max}}$ , (где  $m_{\text{max}} = F_B / f_{\text{д max}}$ ;  $F_B = 6 \text{ МГц}$ ).

Частотная модуляция (ЧМ) обеспечивает относительно высокую помехоустойчивость сигналов по сравнению с амплитудной модуляцией (АМ). Мощность ЧМ сигнала используется очень эффективно, поскольку не зависит от параметров сообщений на входе модулятора и пик фактор всегда равен единице. Уровень ЧМ сигнала при замираниях на входе приемника может меняться в достаточно больших пределах ( $20 \div 30 \text{ дБ}$ ) но качество принимаемого сигнала в этом случае практически остается неизменной.

По этой причине ЧМ применяется на РРЛ, в спутниковых и других системах передачи информации по радиоканалам.

Применение ЧМ в цифровых РРЛ. При модуляции ВЧ колебания цифровым сигналом математическое выражение ЧМ сигнала можно записывать в виде:

$$u_{\text{чм}}(t) = U_0 \cos \left[ \omega_0 + \Delta \omega_{\text{д}} \int_0^t c(t) dt + \varphi_0 \right], \quad (10)$$

где,  $c(t)$  - модулирующий цифровой сигнал,  $U_0$  - амплитуда сигнала,  $\omega_0$  - частота несущей,  $\Delta \omega_{\text{д}}$  - девиация частоты. В случае, когда  $c(t) \in \{+1; -1\}$ , модуляция осуществляется с использованием двух частот  $\omega_2 = \omega_0 + \Delta \omega_{\text{д}}$  соответствующей  $c(t) = +1$  и

$\omega_1 = \omega_0 - \Delta\omega_g$  соответствующей  $c(t) = -1$ . В этом случае девиация частоты определяется, и индекс модуляции определяется выражениями:

$$\Delta f_\delta = \frac{f_2 - f_1}{2} = \frac{\Delta f_p}{2} \quad \text{и} \quad m = \Delta f_p T$$

где,  $T = 1/B$  - длительность символа,  $B$  - скорость передачи.

Минимальная полоса цифрового радиосигнала, которая является необходимой для приема радиоимпульса, длительностью  $T$  при частотной модуляции определяется выражением:

$$П_{ЦЧМ} = 1,1B + \Delta f_\delta, \quad (11)$$

где,  $\Delta f$  - разнос между несущими частотами  $f_1$  и  $f_2$ . Из (11) следует, что двухуровневая (двухпозиционная) классическая ЧМ занимает большую полосу, чем АМ и ОФМ (относительная фазовая модуляция). Поскольку для случая АМ и ОФМ этот параметр определяется по выражению

$$П_{ЦОФМ} = П_{ЦАМ} \approx 1,1B \quad (12)$$

Огибающая энергетических спектров модулированных сигналов АМ, ЧМ и ОФМ приведена на рис. 1.

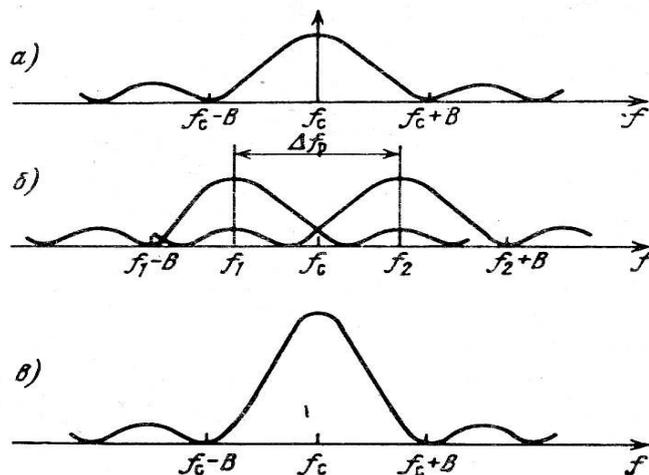


Рис.1

Частотная модуляция более проста в реализации, чем ФМ, но неэкономична по полосе частот и находит применение на РРЛ из нескольких пролетов, работающих в диапазоне выше 15ГГц, где спектр радиочастот менее загружен. В этом случае даже применяют четырехуровневую частотную модуляцию (4 ЧМ), поскольку формирование и прием сигнала 4ЧМ оказываются более простыми в реализации, чем при 4 ОФМ и 4 КАФМ. Но сигнал 4 ЧМ имеет более широкий спектр, чем сигнал 4 ОФМ. Требуемая минимальная полоса частот цифрового ствола при 4 ЧМ:

$$П_{4ЧМ} = \left( \frac{B_S}{2} + 3\Delta f_\delta \right) \quad (13)$$

Для сигнала 4 ОФМ минимальная требуемая полоса частот цифрового ствола намного ниже:

$$П_{4ОФМ} = 1,1 \frac{B_S}{2} \quad (14)$$

Структурная схема модулятора 4 ЧМ представлена на рис. 2

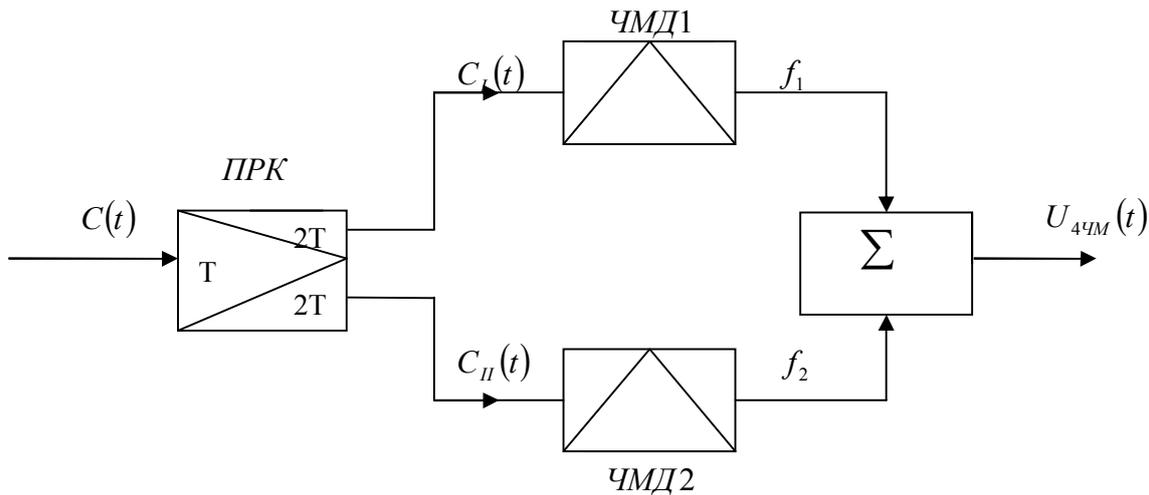


Рис.2

Цифровой сигнал  $U_{ц}(t)$  с длительностью символов  $T$  кода (ПРК) разделяется на четные и нечетные потоки  $C_I(t)$  и  $C_{II}(t)$  с длительностью символов в  $2T$ . Это приводит к снижению скорости передачи сигналов  $C_I(t)$  и  $C_{II}(t)$  в 2 раза (т.е.  $B_{C_I} = B_{C_{II}} = \frac{B_C}{2}$ ) и уменьшению полосы частот радиосигнала.

Усовершенствованным видом частотной модуляции является ЧМ с непрерывной фазой (ЧМНФ). В данном виде модуляции в моменты двоичных символов из одного состояния в другое не происходит скачкообразное изменение фазы и соответственно происходит сокращение полосы частот, занимаемая ЧМ сигналом. Плавное изменение фазы можно реализовать на частотных модуляторах аналоговых РРЛ с линейной модуляционной характеристикой. Для этого подаваемый цифровой сигнал на вход модулятора пропускается через фильтр низкой частоты (ФНЧ) и его форма на выходе ФНЧ имеет форму приподнятого косинусообразного импульса. В результате модуляции частота изменяется по закону приподнятого косинуса, а фаза ЧМ сигнала будет непрерывной.

Частотные модуляторы (ЧМД) радиорелейных станций (РРС). Модуляционная характеристика ЧМД должна иметь высокую линейность. Это необходимо для минимизации нелинейных искажений сигнала вносимые в процессе модуляции.

Частотный модулятор должен иметь более высокую крутизну модуляционную характеристики и высокую линейность (это определяет малые шумы вносимые модулятором). Непосредственно на ПЧ получить высокую линейность и широкую полосу частот усложняет схему модулятора. Поэтому на практике это реализуется применением двух параллельно работающих частотных модуляторов (автогенераторов), работающих на более высоких частотах ( $f_1$  и  $f_2$ ). Разность частот этих генераторов составляет частоту ПЧ ( $f_1 - f_2 = f_{ПЧ}$ ) и соответственно на выходе смесителя можно получить сигнал с промежуточной частотой  $f_{ПЧ} = 70 \text{ МГц}$  (рис.3).

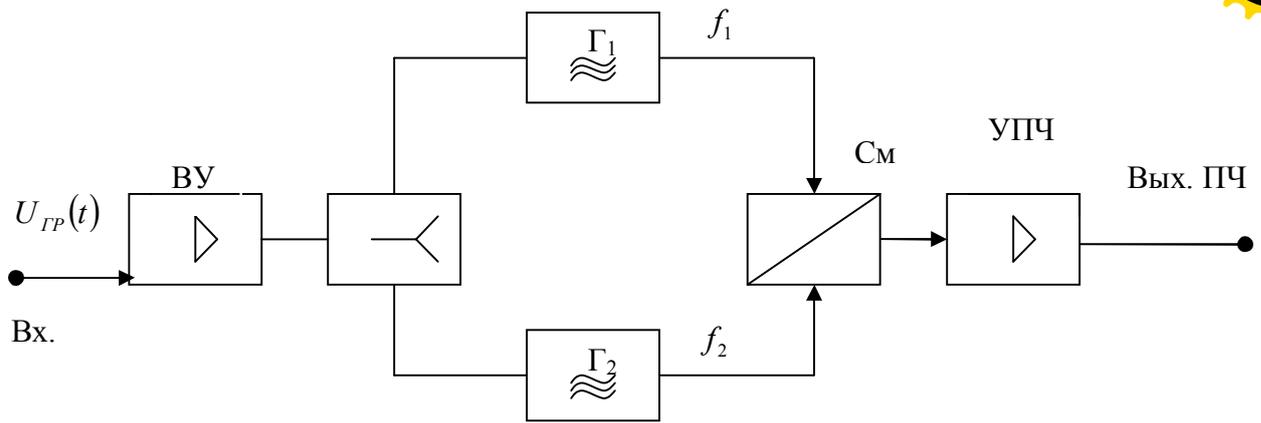


Рис.3

Модулирующий сигнал поступает через видеоусилитель и разветвители на входы контуров автогенераторов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  для управления их частотой. Частотная модуляция осуществляется противофазе. Для этого варикапы в колебательных контурах включены в противофазно по отношению к модулирующему сигналу и поэтому сигнал, на выходе смесителя будет иметь удвоенную девиацию частоты. Сигнал ПЧ усиливается в УПЧ, и часть сигнала ответвляется в систему автоматической подстройки частоты (АПЧ). Благодаря противофазному включению варикапов частично компенсируются нелинейные искажения модуляции.

Частоты автогенераторов  $f_1$  и  $f_2$  выбираются таким образом, чтобы продукты преобразования на частотах:

$$f_{\Pi} = \pm(m+n)f_1 - nf_2; (m=1,2,\dots; n=0,1,2)$$

не попадали в полосу УПЧ, поскольку эти составляющие комбинационных частот приводят к появлению дополнительных перекрестных искажений и соответственно шумов.

Измерение девиации частоты частотного модулятора косвенным методом. При частотной модуляции мгновенная частота должна изменяться относительно своего среднего значения  $\omega_0 = 2\pi f_0$  прямо пропорционально напряжению синусоидального модулирующего сообщения:  $U(t) = U_M \cos \Omega t$ .

$$f(t) = \omega(t) / 2\pi = f_0 + K_M U_0(t) = f_0 + K_M U_m \cos \Omega t, \quad (15)$$

где  $\Omega$  - частота модулирующего синусоидального колебания;  $U_m$  - амплитуда модулирующего синусоидального колебания.

Для мгновенной частоты (13) определим мгновенную фазу ЧМ сигнала:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_0 t + 2\pi K_M \int_0^t U_c(t) dt = \omega_0 t + (K_M U_m / F) \sin \Omega t + \theta_0 \quad (16)$$

$\theta$  - начальная фаза ЧМ генератора.

$K_M U_m = \Delta f_m$  является максимальным отклонением частоты ЧМ от своего среднего значения, возникающим в результате воздействия модулирующего колебания с частотой  $F$  и амплитудой  $U_m$ . Эта величина называется максимальной девиацией частоты. С учетом вышесказанного и на основании выражения (14) ЧМ сигнал можно записать в виде:

$$U_{чМ}(t) = U_0 \cos[\theta(t)] = U_0 \cos[\omega_0 t + m \sin \Omega t + \theta_0] \quad (17)$$

$$m = \Delta f_m / F = K_M U_m / F = \Delta \omega_m / \Omega$$

параметр  $m$  называют обычно индексом модуляции.

Для определения спектра ЧМ сигнала, разложив в ряд выражение (15), получим:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ЧМ}}(t) = & U_0 J_0(m) \cos[\omega_0 t + \theta_0] + \\
 & + U_0 \sum_{K=1}^{\infty} J_K(m) \cos[(\omega_0 + K\Omega)t + K\theta_0] + \\
 & + U_0 \sum_{K=1}^{\infty} (-1)^K J_K(m) \cos[(\omega_0 - K\Omega)t + K\theta_0]
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

где  $J_K(m)$  - функция Бесселя I-го рода K-того порядка от аргумента.

Из выражения (16) следует, что при модуляции синусоидальным колебанием спектр является дискретным и теоретически бесконечным. Амплитуды спектральных составляющих определяют значением и соответствующих функций Бесселя, аргументом которых является индекс модуляции. Из (16) видно, что при  $m \ll 1$  функция Бесселя высших порядков (кроме первого) имеют пренебрежимо малое значение. В этом случае спектр амплитуд ЧМ сигнала практически будет состоять лишь из трех составляющих (рис.4). Следует отметить, что фазы нижней боковой будет отличаться на  $180^\circ$  от фазы верхней боковой составляющей.

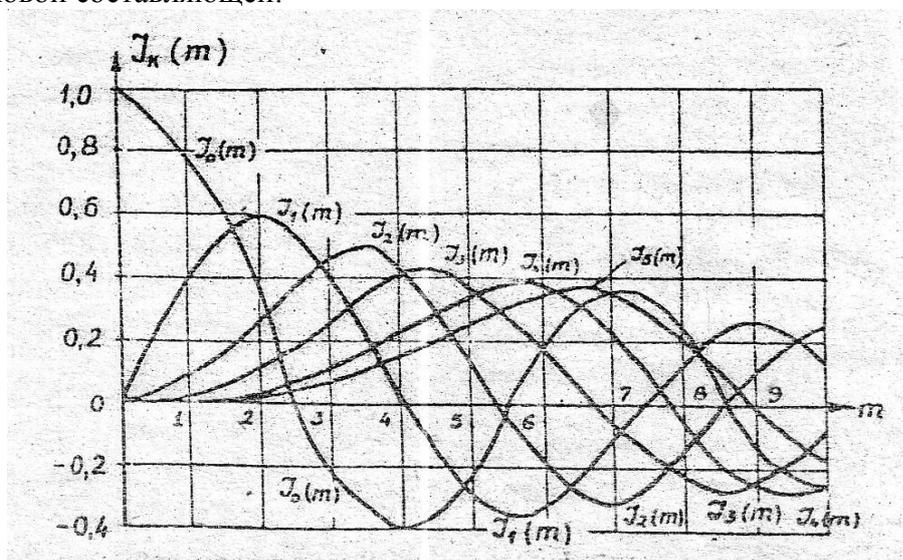


Рис.4

При увеличении индекса модуляции  $m$  амплитуды составляющих высокого порядка увеличиваются. Амплитуда же ЧМ сигнала  $U_0$  в процессе модуляции остается постоянной и следовательно должна оставаться неизменной и средняя мощность ЧМ сигнала. Поэтому появление новых составляющих боковых частот приводит к уменьшению амплитуд отдельных составляющих боковых частот. Таким образом происходит перераспределение мощности по спектру. Следует отметить, что при отдельных значениях  $m$  некоторые составляющие могут обратиться в нуль. Это свойство спектра ЧМ сигнала при модуляции синусоидальным колебанием используется для измерения девиации частоты.

При больших значениях индекса модуляции ( $m \gg 1$ ) функция Бесселя всех порядков имеет примерно одинаковую величину за исключением близких  $K_m$ . В этом случае огибающая спектра ЧМ сигнала будет равномерно вблизи несущей, а на составляющих, порядок которых близок к  $F_m$  образуется всплеск. При дальнейшем увеличении огибающая быстро уменьшается до нуля.

В практических случаях спектр ЧМ сигнала определяется с учетом только тех составляющих, на которых сосредоточена основная часть всей мощности. Ширина спектра  $P_{\text{ЧМ}}$  ЧМ сигнала определяется по приближенной формуле Карсона:

$$P_{\text{ЧМ}} \cong 2(\Delta f_M + F_M) = 2F_M(1 + m)
 \tag{19}$$



Одной из основных характеристик частотного модулятора является динамическая модуляционная характеристика, которая представляет собой зависимость девиации частоты на выходе модулятора от значения модулирующего напряжения, подаваемого на его вход.

Для получения данной характеристики девиацию частоты можно произвести косвенным методом.

Известно, что при модуляции синусоидальным колебанием амплитуда  $k$ -той дискретной составляющей спектра ЧМ сигнала определяется значением функции Бесселя первого рода  $k$ -го порядка  $J_k(m)$ , аргументом которой является индекс модуляции:

$$m = \Delta f_M / F_M, \quad (20)$$

где  $\Delta f_M$  амплитудное значение девиации частоты;  $F_M$  - частота модулирующего колебания.

В свою очередь  $\Delta f_M$  можно определить по следующей формуле:

$$\Delta f_M = K_M U_m, \quad (21)$$

где  $K_M$  - крутизна модуляционной характеристики модулятора ( $\Gamma_{\text{ц}}/B$ );  $U_m$  - амплитуда модулирующего колебания.

Известно, что при определенных значениях аргумента функция Бесселя обращается в нуль. Следовательно, при определенных значениях индекса модуляции  $m$  соответствующие дискретные составляющие спектра ЧМ сигнала тоже будут обращаться в нуль. Например, составляющая, расположенная на несущей частоте и определяемая функцией Бесселя нулевого порядка  $J_0(m)$ , обращается в нуль при значениях  $m = 2.4; 5.5$ .

Таким образом, подав на вход модулятора синусоидальное колебание с известной частотой  $F_M$  и изменяя его амплитуду  $U_m$ , соответственно можно изменить индекс модуляции. При определенных значениях  $m$  можно добиться пропадания составляющей спектра, которая расположена на несущей частоте и определить амплитудную девиацию частоты:

$$\Delta f_M = m F_M \quad (22)$$

эффективная девиация частоты будет равна

$$\Delta f_{\text{э}} = K_M U_m / \sqrt{2} = \Delta f_M / \sqrt{2} \quad (23)$$

или с учетом (18)

$$\Delta f_{\text{э}} = F_M m / \sqrt{2}$$

Домашнее задание

1. Ознакомиться со структурной схемой частотного модулятора и зарисовать ее в отчет.
2. Определить спектр ЧМ сигнала для индексов модуляции:  $m = 0.1; m = 0.5; m = 2.4; m = 5.5; m = 8.65; m = 11.8; m = 14.9$ . Амплитудное значение напряжения ЧМ сигнала считать равным  $U_0 = 1B$  для  $F_{\text{в}} = F = 1 \text{ МГц}$ .
3. Рассчитать зависимость эффективной девиации частоты на выходе модулятора от частоты модулирующего сигнала ( $F_{\text{в}} = 0.1 \dots 6 \text{ МГц}$ ) для  $m = 0.5$  и  $m = 1$ .



4. Определить ширину спектра ЧМ сигнала по выражению (6) для различных  $N$  каналов, а также ТВ сигнала и заполнить таблицу

Таблица 1

№ ПП	Количество каналов ( $N$ )	$f_K$ (кГц)	$F_B$ (кГц)	$P_1$ (дБ)	$P_{cp}$ (дБ)	$\Delta f_{\Sigma}$ или $f_{max}$ (кГц)	$m_{\Sigma}$ или $m_{max}$	$\Delta f_{чм}$
1.	300	200	1300	-13				
2.	600	200	2596	-13				
3.	720	200	3340	-13				
4.	960	200	4188	-13				
5.	1020	200	4636	-13				
6.	1320	140	5932	-13				
7.	1920	140	8000	-13				
8.	1 ТВ сигнал	-	6 МГц	-	-	$\pm 4$ МГц		

### Лабораторное задание

1. Снять график спектра сигнала для каждого случая пропадания несущей.
2. Снять динамическую модуляционную характеристику модулятора для  $F_m=40$ кГц и определить ее крутизну, приведенную ко входу частотного модулятора.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить к работе анализатор спектра (см. инструкцию по эксплуатации анализатора). Включить модулятор и анализатор спектра. (Ручка развертка-2мс/дел, ручка номинальный уровень-крайнее левое положение, ручка вид-автоматический, ручка видеофильтр 10кГц, частота 70МГц. Ручка уровень 0dBmW, ручка полоса 30кГц, ручка ослабление 40dB.)
2. Подключить вольтметр к гнездам вх.видео.
3. Подать на вход модулятора модулирующее синусоидальное напряжение с частотой  $F_m=3000$ кГц. Сигнал с выхода ЧМД подать на вход анализатора спектра плавно увеличивая от нуля модулирующее напряжение, записать в табл.1 показания вольтметра для каждого случая полного пропадания составляющей спектра, расположенной на несущей частоте. Для каждого случая пропадания несущей зарисовать спектр на экране анализатора спектра.
4. Рассчитать по формуле 23 и занести в табл.1 эффективное значение девиации частоты для каждого значения индекса модуляции, соответствующего пропаданию несущей.

Таблица 1

$N$ пропадания несущей	1	2	3	4	5
$m$ , радиан	2,4	5,5	8,65	11,8	14,9
$\Delta f_{\Sigma}$ , кГц					
$U_{\Sigma ЧМД}$ , мВ					

5. Построить динамическую модуляционную характеристику модулятора, приведенной ко входу ЧМД при  $U_{\Sigma ЧМД}$  10, 20, ... 100мВ . Для этого необходимо включить генератор сигналов ГЗ-112 установить 40кГц. С выхода генератора подать сигнал на вход ТВПд (вх. видео)



Подключить вольтметр ВЗ-39 к гнездам вх. видео, поставить переключатель вольтметра на шкалу 100mV.

С выхода ЧМД (выход ПЧ) подать на вход измерителя модуляции СКЗ-43. Подать с генератора ГЗ-112 сигнал с уровнем  $U_{\text{эчмд}}$  10, 20, ... 100mV. Для каждого значения  $U_{\text{эчмд}}$  снять показания  $\Delta f_{\text{э}}, \text{кГц}$  с измерителя модуляции СКЗ-43.

Результаты внести в таблицу.

$U_{\text{эчмд}}, \text{мВ}$										
$\Delta f_{\text{э}}, \text{кГц}$										

6. Построить график по таблице.

Вычислить крутизну модуляционной характеристики для  $U_{\text{эчмд}}$  10, 20, ... 100mV.

Оценить линейность характеристики.

#### Содержание отчета

Результаты домашнего расчета (п.1...п.3) в виде графиков.

Результаты измерений в виде графиков.

Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип получения частотной модуляции и нарисуйте структурную схему частотного модулятора.
2. Отличается ли спектр ЧМ сигнала от спектра АМ сигнала при малых индексах модуляции ( $m \ll 1$ ).
3. Как определяется полоса пропускания ЧМ сигнала?
4. Что понимается под индексом модуляции при синусоидальном модулирующем напряжении?
5. Как выглядит спектр ЧМ сигнала при синусоидальном модулирующем напряжении? От каких параметров зависит его вид?
6. Объясните принцип снятия динамической модуляционной характеристики ЧМД.
7. Как определяется эффективная девиация частоты, если известно  $F_M$  и  $m$ ?

#### Библиографический список

1. Системы радиосвязи: Учебник для ВУЗов/Н.И. Калашников, Э.И. Крупицкий, И.Л. Дороднов, В.И. Носов; Под ред. Н.И. Калашникова. –М.: Радио и связь, 1988, 352 с.: ил.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для ВУЗов. Изд. 4-е перераб. и доп. М., Сов. Радио, 1986, 620с.
3. Степанов А.П. Изучение свойств ЧМ колебаний в РРЛ: Методическое указание к выполнению работ. М., ВЗЭИС, 1980, 28с.
4. Изучение параметров и свойств ЧМ сигналов при синусоидальном модулирующем напряжении. Бишкек, 1996, 8с.
5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для ВУЗов. Издание 4-ое перераб. и доп. М., Сов. Радио, 1986, 620 с.
6. Принципы построения и расчета цифровых радиорелейных систем; Учебное пособие/МТУСИ М.М.Маковеева – М., 2003, 63 с.