

Лабораторная работа № 29-М
 ФОРМИРОВАНИЕ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ
 ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Составитель А.С.Сухоруков

Издание утверждено методическим советом ОУ.
 Протокол № 4 от 17.02.98 г.

Рецензент В.Н.Шакин

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Теоретическое и экспериментальное исследование частотного модулятора и детектора частотно-модулированных колебаний.

2. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучить принципы формирования частотно-модулированных (ЧМ) сигналов; основные характеристики и параметры частотного модулятора; методику их расчета. Изучить принципы детектирования частотно-модулированных сигналов; основные характеристики и параметры частотного детектора; методику их расчета.

2. Рассчитать статическую модуляционную характеристику (СМХ) частотного модулятора (см. Приложение). Исходные данные для расчета приведены в табл. 1 и на рис. 1. Составить программу для расчета СМХ на персональном компьютере (ПК).

3. Построить в соответствии с расчетами п. 2 статическую модуляционную характеристику частотного модулятора, выбрать рабочий участок характеристики, рабочую точку, определить допустимую амплитуду модулирующего сигнала, девиацию частоты, индекс M_f для неискаженной частотной модуляции (ЧМ).

4. Записать аналитическое выражение для сигнала ЧМ, нарисовать временную и спектральную диаграммы сигнала ЧМ с параметрами, определенными в п. 3, если модулирующий сигнал - гармонический:

$$u(t) = \cos 9\pi t = \cos 2\pi F t \quad (F = 1 \text{ кГц}).$$

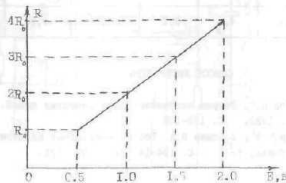


Рис. 1

5. Рассчитать статическую характеристику частотного детектора (СХД) на двух расстроенных контурах с резонансными частотами $f_1 = f_0 - f_g$; $f_2 = f_0 + f_g$ (f_g - девиация частоты ЧМ сигнала, определенная в п. 3). Составить программу для расчета СХД на ПК.

6. Построить СХД в соответствии с расчетами п. 5, выбрать рабочий участок характеристики, рабочую точку, определить допустимую девиацию частоты ЧМ сигнала, коэффициент нелинейных искажений полезного сигнала на выходе частотного детектора. Расчет выполняется методом пяти ординат для девиаций частоты, определенной в п. 3.

Таблица 1

Номер стенда	1	2	3	4	5	6
C, нФ	3,2	4,1	4,9	5,2	5,1	3,5
R ₀ , кОм	3,0	3,2	2,8	2,0	2,9	3,8
Q	4,0	2,5	3,0	3,5	2,0	2,2

Номер стенда	7	8	9	10	11	12
C, нФ	4,7	2,5	5,5	2,8	3,8	2,4
R ₀ , кОм	2,2	3,4	1,8	3,6	2,4	4,1
Q	4,0	4,6	3,2	3,8	4,2	3,6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1982. - С. 105-108.
2. Кузмир В.С., Ферман Б.А. Теория нелинейных электрических цепей. - М.: Связь, 1974. - С. 134-147, 161-167, 171.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Принципиальная схема лабораторного макета приведена на рис. 2 и на лицевой панели лабораторного стенда (блок 4). В блок 4 входит частотный модулятор, собранный на интегральной микросхеме (усилитель Y) и транзисторах T₁ и T₂, усилитель на транзисторе и частотный детектор, в состав которого входят два контура, настроенные на частоты f_1 и f_2 , соответственно, и два амплитудных детектора D₁R₁C₁ и D₂R₂C₂. Частотный модулятор представляет собой RC генератор, т.е. усилитель Y, охваченный обратной связью. Цепь обратной связи представляет собой фазообластную цепь из двух емкостей C и двух управляемых резисторов на полевых транзисторах T₁ и T₂. При изменении напряжения смещения на затворах T₁ и T₂ изменяется сопротивление сток-исток R этих транзисторов и, следовательно, изменяется частота генерации RC-генератора.

Вход частотного модулятора - клеммы 1 или 2. На вход модулятора можно подать либо гармонический модулирующий сигнал от внешнего источника (кнопка ГПН-ВКЛ), либо дзвончатый модулирующий сигнал от внутреннего источника (кнопка ГПН-ВКЛ). Напряжение смещения в цепи затвор-исток транзисторов T₁ и T₂ устанавливается регу-

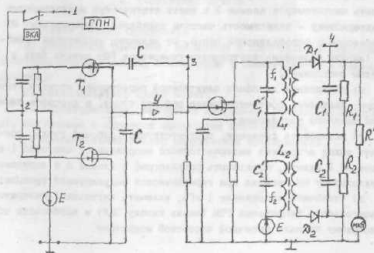


Рис. 2

лятором СМЕРЕНИЕ и отсчитывается по шкале вольтметра (справа, сверху). Изменение смещения изменяет частоту сигнала на выходе частотного модулятора. Частота сигнала на выходе модулятора (клеммы 3) измеряется с помощью частотомера.

Выход частотного модулятора подключен ко входу частотного детектора (клеммы 3). Напряжение на выходе частотного детектора (клеммы 4) измеряется с помощью вольтметра.

Форма сигнала на входе модулятора (клеммы 2), выходе модулятора (клеммы 3), выходе детектора (клеммы 4) наблюдается путем подключения осциллографа и соответствующим клеммам. Постоянный ток в нагрузке частотного детектора измеряется с помощью миллиамперметра МА, размещенного слева, сверху на лабораторном стенде.

4. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

4.1. Исследование частотного модулятора

а) Включить универсальный стенд, осциллограф С1-88, частотомер 43-82 и макет № 4 в универсальном стенде;

б) установить шкалу миллиамперметра в положение 0,1 мА, подключить частотомер к клемме 3 и снять статическую модуляционную характеристику - зависимость частоты колебаний, генерируемых КС генератором с фазобалансной цепью, от величины напряжения смещения (кнопка включения внутреннего генератора ГПН должна быть в отжатом состоянии);

в) определить диапазон электронной перестройки частоты генератора; смещение, соответствующее рабочей точке, и диапазон изменения входного напряжения;

г) установить смещение, соответствующее рабочей точке, соединить выход источника низкочастотного напряжения с частотой 1 кГц с клеммой 1 макета, подключить осциллограф к клемме 3 и зарисовать осциллограмму ЧМ сигнала при гармонической модулирующей функции;

д) отключить напряжение 1 кГц, включить внутренний генератор прямоугольного напряжения ГПН (нажав кнопку ВКЛ) и зарисовать осциллограмму сигнала двоичной частотной модуляции.

4.2. Исследование частотного детектора

а) Отключить ГПН, отжав кнопку ВКЛ, подключить частотомер к клемме 3 и снять статическую характеристику детектирования - зависимость тока в нагрузке детектора от частоты входного сигнала детектора, изменяя частоту путем изменения смещения;

б) выбрать частотный диапазон линейного детектирования и определить оптимальное значение частоты несущего колебания, установить смещение, соответствующее этой частоте генератора ЧМ;

в) включить генератор ГПН, нажав кнопку ВКЛ, и зарисовать осциллограммы напряжений на входе модулятора (клемма 2) и выходе детектора (клемма 4);

г) отключить генератор ГПН и подать гармонический сигнал с частотой 1 кГц на клемму 1. Зарисовать осциллограммы на клеммах 2 и 4;

д) исследовать характер искажений, возникающих в детекторе ЧМ при смещении несущей частоты на нелинейные участки характеристики детектирования (изменение частоты производить изменением смещения, пользуясь графиком, снятым в п. 1б).

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

а) результаты расчетов, временные и спектральные диаграммы, характеристики и графики, выполненные в соответствии с домашним заданием;

б) принципиальную схему макета;

в) характеристики, временные диаграммы, результаты измерений, полученные в процессе выполнения эксперимента;

г) сравнительный анализ результатов эксперимента.

1. Нарисуйте упрощенную схему частотного модулятора.
2. Нарисуйте временные диаграммы модулирующего и частотно-модулированного сигналов.
3. Чему равна частота ЧМ-сигнала при $\Omega t = 0; \pi/2; \pi; 3\pi/2$; если модулирующий сигнал $u(t) = \cos \Omega t$?
4. Нарисуйте спектр ЧМ-сигнала при $M_y = 0,1; 2,4; 10$.
Определите ширину спектра ЧМ-сигнала.

5. Что такое статическая модуляционная характеристика частотного модулятора?

6. Напишите аналитическое выражение для ЧМ-сигнала при гармонической модуляции.

7. Как определить по СМХ рабочий участок, рабочую точку, допустимую девиацию частоты, среднее значение несущей частоты, допустимую амплитуду модулирующего сигнала для неискаженной модуляции?

8. Нарисуйте принципиальную схему частотного детектора.

9. Что такое статическая характеристика детектирования (СХД) для частотного детектора?

10. Как рассчитать СМХ для частотного модулятора?

11. Как рассчитать СХД для частотного детектора?

12. Выбор рабочего участка и определение параметров входного и выходного сигналов частотного детектора для неискаженного детектирования.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И СООТНОШЕНИЯ

При ЧМ частота несущей $\omega_{\text{ЧМ}}(t)$ изменяется в соответствии с низкочастотным модулирующим сигналом $u(t)$:

$$\omega_{\text{ЧМ}}(t) = \omega_0 + \omega_g \cdot u(t); \quad \text{рад/с}, \quad (1)$$

где ω_0 - среднее значение несущей частоты;

ω_g - девиация частоты, максимальное отклонение частоты от среднего значения, $\omega_g = 2\pi f_g$.

Для гармонической модуляции $u(t) = \cos \Omega t = \cos 2\pi F t$.

В этом случае частота ЧМ сигнала изменится от максимального значения $\omega_{\text{max}} = \omega_0 + \omega_g$ до минимального значения $\omega_{\text{min}} = \omega_0 - \omega_g$.

Если нас интересует значение частоты ЧМ сигнала в герцах, то

$$\begin{aligned} f_{\text{ЧМ}}(t) &= f_0 + f_g \cdot \cos 2\pi F t; \\ f_{\text{max}} &= f_0 + f_g; \quad f_{\text{min}} = f_0 - f_g; \\ \omega_0 &= 2\pi f_0; \quad \omega_g = 2\pi f_g. \end{aligned} \quad (2)$$

ЧМ сигнал можно записать в виде:

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = u_m \cdot \cos \varphi_{\text{ЧМ}}(t),$$

где $\varphi_{\text{ЧМ}}(t)$ - фаза ЧМ сигнала. Для гармонической модуляции

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{ЧМ}}(t) &= \int_0^t \omega_{\text{ЧМ}}(t) dt = \int_0^t \omega_0 dt + \int_0^t \omega_g \cos \Omega t dt = \\ &= \omega_0 t + \frac{\omega_g}{\Omega} \sin \Omega t = \omega_0 t + M_y \sin \Omega t, \end{aligned} \quad (3)$$

где M_y - индекс ЧМ, $M_y = \frac{\omega_g}{\Omega} = \frac{f_g}{F}$.

Следовательно,

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = u_m \cdot \cos(\omega_0 t + M_y \sin \Omega t). \quad (4)$$

Временная диаграмма сигнала ЧМ с указанием характерных значений частоты ЧМ сигнала дана на рис. 3б (на рис. 3а нарисована временная диаграмма модулирующего сигнала).

Спектр сигнала ЧМ получим, разложив (4) в ряд Фурье:

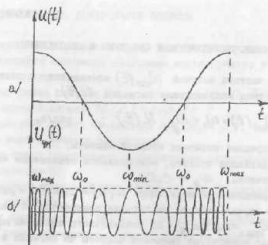


Рис. 3

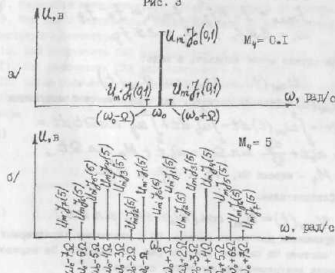


Рис. 4

10

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = U_m \cdot J_0(M_q) \cos \omega_0 t + U_m \cdot J_2(M_q) \cdot \cos(\omega_0 + 2\Omega)t - U_m \cdot J_4(M_q) \cdot \cos(\omega_0 - 2\Omega)t + \dots + U_m \cdot J_k(M_q) \cdot \cos(\omega_0 + k\Omega)t + (-1)^k \cdot U_m \cdot J_k(M_q) \cdot \cos(\omega_0 - k\Omega)t + \dots$$

где $J_k(M_q)$ - функции Бесселя.

Спектры сигнала ЧМ для двух значений: $M_q = 0,1$; $M_q = 5$ - показаны на рис. 4а,б. Ширина спектра сигнала ЧМ равна

$$\Pi_{\text{ЧМ}} = 2\Omega(M_q + 1), \text{ рад/с}; \quad \Pi_{\text{ЧМ}} = 2F(M_q + 1), \text{ Гц.} \quad (6)$$

Частотная модуляция может быть получена с помощью частотного модулятора. Он состоит из автогенератора и элемента, изменяющего частоту автогенератора. В качестве такого элемента цепи могут использоваться реактивный насад, варикап, управляемый резистор и т.п. Частотный модулятор с управляемым резистором показан на рис. 2. В соответствии с модулирующим напряжением, подаваемым на резистор, изменяется частота генерации $\omega = \frac{1}{RC}$. Основной характеристикой модулятора является статическая модуляционная характеристика (СМХ). СМХ для частотного модулятора - это зависимость частоты модулятора ω от напряжения смещения E или частоты f от напряжения E .

Порядок расчета СМХ:

1. Задается смещением E (пусть $E = 1,0 \text{ В}$).
2. Определяем сопротивление R управляемого резистора на рис. 1: при $E = 1,0 \text{ В}$ $R = 2R_0$.
3. Определяем частоту генерации: $\omega = 1/RC$; $f = 1/2\pi RC$.
4. Задается следующим значением смещения E и далее п. 2.

Пример СМХ показан на рис. 5. Рассмотрим выбор рабочего участка по СМХ:

1. Отметим линейный участок СМХ (отмечен "крестиками").
2. Находим рабочую точку Р.Т. в середине линейного участка: $E_0 = 0,6 \text{ В}$; $f_0 = 13,5 \text{ кГц}$.
3. Определим максимальную амплитуду модулирующего сигнала при неискаженной ЧМ:

$$U_m = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{2} = \frac{0,8 - 0,38}{2} = 0,21 \text{ В.}$$

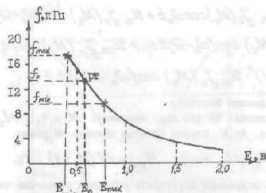


Рис. 5

4. Определяем максимальную девиацию ЧМ сигнала при неизменной ЧМ:

$$\frac{f}{f_{\max}} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2} = \frac{17,6 - 9,6}{2} = 4 \text{ кГц.}$$

5. Определяем максимальный индекс при неизменной ЧМ:

$$M_{\max} = \frac{f_{\max}}{F} = 4.$$

Детектирование ЧМ сигнала осуществляется с помощью частотного детектора. Наиболее широко используются частотные детекторы на расстроенных контурах. Принципиальная схема такого детектора приведена на рис. 2. В частотный детектор входят два резонансных контура - $L_1 C_1$, настроенный на частоту $(f_0 - f_g)$, и $L_2 C_2$, настроенный на частоту $(f_0 + f_g)$; два амплитудных детектора - $D_1 R_1 C_1$ и $D_2 R_2 C_2$. Выходной ток пропорционален разности токов диодов детектора. Если частота входного ЧМ сигнала ближе к резонансной частоте нижнего контура $f_0 = f_0 + f_g$, то напряжение на входе D_2 больше, чем на входе D_1 , и напряжение на R_2 больше, чем на R_1 , т.е. выходное напряжение на сопротивлении R' отрицательно, т.е. ток, протекающий через R' отрицателен. Если частота входного ЧМ сигнала ближе к резонансной частоте верхнего контура $f_1 = f_0 - f_g$, то напряжение на R_1 больше напряжения на R_2 и выходное напряжение

на сопротивлении R' - положительно. Ток положителен. Основная характеристика частотного детектора - статическая характеристика детектирования (СХД) - это зависимость постоянной составляющей тока на выходе детектора I_0 от частоты входного сигнала ω или f .

СХД для частотного детектора можно записать в виде:

$$I_0(f) = I_m \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2Q(f_1 - f)}{f_1} \right]^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2Q(f_2 - f)}{f_2} \right]^2}} \right], \quad (7)$$

где Q - добротность резонансных контуров;

f_2 - резонансная частота нижнего контура;

f_1 - резонансная частота верхнего контура.

На рис. 6 построены СХД для разных значений параметра

$$\beta = (f_2 - f_1) \cdot Q / f_0.$$

Выбор рабочего режима для неискаженного детектирования выполняется так (см. рис. 6):

1. Выбираем линейный участок СХД (отмечен "крестиками").
2. Выбираем рабочую точку в середине линейного участка и находим среднее значение несущей f_{cp} и ток в рабочей точке I_{00} .
3. Определяем допустимую девиацию частоты: $f_{g\max} = \frac{4f_{\max} - \Delta f_{\min}}{2}$.
4. Определяем амплитуду выходного тока I_g .

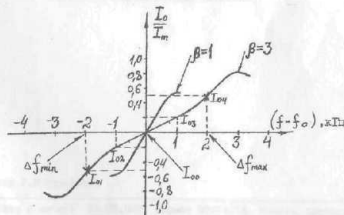


Рис. 6

5. Вычисляем коэффициент нелинейных искажений выходного сигнала методом пяти ординат:

$$I_1 = \frac{I_{04} - I_{01} + I_{03} - I_{02}}{3} ;$$

$$I_2 = \frac{I_{04} + I_{01} - 2I_{00}}{4} ;$$

$$I_3 = \frac{I_{04} - I_{01} - 2(I_{03} - I_{02})}{6} ; \quad (8)$$

$$I_4 = \frac{I_{04} + I_{01} - 4(I_{03} - I_{02}) + 6I_{00}}{12} ;$$

$$K_r = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2}}{I_1}$$

Лабораторная работа № 23-М
ФОРМИРОВАНИЕ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ
ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Редактор Г.В.Курынички

Подписано в печать 10.06.98г. Формат 60x84/16. Печать офсетная.
Объем 0,9 усл.п.л. Тираж 500 экз. Изд. № 54. Заказ 241.

ЗАО "Информсвязьиздат", Москва, ул. Авиамоторная, 8.