

А.В.Хохлов

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

*Учебное пособие для специализированных курсов  
"Теоретические основы радиоэлектроники"*

Ц е л ь р а б о т ы: изучить методы параметрического усиления сигналов в одноконтурных и двухконтурных усилителях с электронными (гираторными) индуктивностями.

## Литература

1. Харкевич А.А. Нелинейные и параметрические явления в радиотехнике. М.: Гостехиздат, 1956.
2. Блекуэлл А.А., Коцебу К.Л. Параметрические усилители на полупроводниковых диодах. М.: Мир, 1964.
3. Хохлов А.В. Полупроводниковые усилители и автогенераторы.- Саратов: Изд-во Сарат.ун-та, 1997.
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник. М.: Высш. шк., 1983.
5. Калинин В.И., Герштейн Г.М. Введение в радиофизику. М.: Гостехиздат, 1957.
6. Хохлов А.В. Теоретические основы радиоэлектроники. Саратов. Изд-во Сарат. ун-та, 2005.

## Контрольные вопросы:

1. Какой колебательный контур называется параметрическим?
2. Дайте определение параметрического резонанса. Что понимается под термином "накачка энергии"?
3. При каких условиях дифференциальное уравнение консервативного колебательного контура трансформируется в уравнение Хилла, в уравнение Матгье?
4. Как происходит усиление амплитуды колебаний в параметрическом контуре без потерь и каковы особенности усиления колебаний в диссипативном параметрическом контуре?
5. Как связаны критическая глубина модуляции параметра и добротность параметрического контура? Какова величина вносимого при параметрическом резонансе отрицательного сопротивления?

6. В чем особенности синхронного и асинхронного режимов параметрического усилителя? Каковы преимущества двухконтурного ПУ перед одноконтурным?
7. Каковы схема и принцип действия гиратора? Выведите формулу для расчета величины гираторной индуктивности.
8. Как, используя перемножитель сигналов, построить электрически управляемую емкость? Как зависит величина емкости от амплитуды управляющего сигнала?

### Задания для самостоятельной работы

1. Вывести формулы (7), (10), (11), (16), (17).
2. Рассчитать индуктивности 1-го и 2-го гираторов по заданным значениям их параметров ( $C_1 = 1.13$  нФ,  $R_2^1 = R_1 + 8$  кОм,  $C_2 = 3.53$  нФ,  $R_2^2 = R_2 + 8$  кОм) остальные  $R_i = 8$  кОм.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

*Усилением электрических сигналов* называется физический процесс увеличения мощности выходного сигнала по сравнению с мощностью входного воздействия при сохранении формы колебаний. Эффект усиления сигналов по мощности достигается в *нелинейных активных* или *параметрических* устройствах за счет воздействия стороннего источника энергии. Нелинейный активный элемент (электронная лампа или транзистор) преобразует энергию стороннего источника постоянного напряжения в выходной сигнал, пропорциональный входному. При этом усилитель может быть алгебраическим (широкополосным) или резонансным.

При параметрическом усилении сторонний источник создает переменный сигнал, который управляет изменением параметра одного из энергоемких (реактивных) элементов колебательного контура, а следовательно, накоплением и расходом энергии в контуре. Колебательный контур, один из элементов которого изменяется со временем, называется *параметрической контуром*. Эффект параметрического усиления сигналов используется для создания принципиально новых радиоэлектронных систем - мажущих параметрических усилителей (ПУ). Основу процессов параметрического усиления электромагнитных колебаний составляет явление параметрического резонанса.

### 1. Параметрический резонанс

Параметрические явления в линейном колебательном контуре в общем случае описываются дифференциальным уравнением второго порядка, коэффициенты которого зависят от независимой переменной (времени)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + f_1(t) \frac{dx}{dt} + f_2(t)x = 0, \quad (1)$$

где  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  - ограниченные периодические функции времени. Когда потери в контуре отсутствуют, уравнение (1) превращается в уравнение Хилла

$$\frac{d^2x}{dt^2} + F(t)x = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2(t)x = 0. \quad (2)$$

4. Изменяя  $U_{\pm}$  от  $-1В$  до  $1В$ , измерять резонансную частоту контура для различных  $U_{\pm}$ . Рассчитать и построить зависимость  $C(U_{\pm})$ . Определить по полученной кривой  $C' = dC/dU_{\pm}$ .

### 3. Исследование одноконтурного ПУ

1. Установить переключатель режимов работы в положение 4, переключить генератор сигналов GFG-3015 к разъему "Накачка  $U_{\sim}$ ", а к разъему "ВХОД ГЕН." подключить генератор GFG-8210. При этом параллельно емкости 1-го контура включается дополнительная емкость, величина которой изменяется с помощью переменного напряжения от генератора накачки, и в контур вносятся отрицательное сопротивление, т.е. возникают условия для параметрического усиления колебаний.

2. Временно отключить кабель от генератора накачки. Убедиться, что контур с дополнительной емкостью настроен на частоту  $f_0$ , и подключить кабель к генератору накачки.

3. Исследовать параметрический усилитель в синхронном режиме. Установить на генераторе сигналов GFG-3015 синусоидальную форму колебаний и тщательно настроить генератор на частоту  $2f_0$ . Настройку генератора контролировать по отсутствию биений на осциллограмме сигнала.

Плавное увеличение амплитуды сигналов генератора GFG-3015, отметить величину сигналов, при которой напряжение на выходе параметрического контура начинает нарастать.

Снять и построить зависимость величины выходного напряжения от напряжения накачки. Для 2-3-х значений напряжения накачки рассчитать вносимые сопротивления и эквивалентные добротности контура и объяснить полученные результаты.

4. Исследовать параметрический усилитель в асинхронном режиме. Для этого расстроить генератор сигналов GFG-8210 на  $0,8 - 1$  кГц и зафиксировать возникновение биений в параметрическом контуре.

По осциллограмме измерить число периодов входного сигнала в периоде биений, рассчитать отношение частот колебаний и расстройкой и сопоставить экспериментально измеренную частоту расстройки контура с заданной на генераторе.

### \*4. Исследование двухконтурного ПУ

1. Установить переключатель режимов работы в положение 5 и соединить введенные ранее соединения генераторов сигналов GFG-3015 и GFG-8210, а также 1-го канала осциллографа GOS-6031. Подключить 2-й милливольтметр В3-38 к разъему "ВЫХОД МВ", а 2-й канал осциллографа GOS-6031 к разъему "ВЫХОД ОСЦ.", т.е. соединить оба прибора с выходом двухконтурного ПУ.

2. Временно отключить кабель от генератора накачки. Изменяя частоту генератора входных сигналов, добиться максимальной амплитуды колебаний в первичном контуре, т.е. настроить первичный контур в резонанс. Зафиксировать частоту  $f_1$ . Установить частоту колебаний генератора накачки GFG-3015  $f_{нак} = (2,1 \div 2,5) f_1$ .

3. Перебравая вторичный контур, по показаниям милливольтметра, подключенного к разъему "ВЫХОД МВ", добиться максимальной амплитуды напряжения на вторичном контуре системы. Используя градуировку частоты вторичного контура, определить его резонансную частоту и сравнить с частотой  $f_{нак} - f_1$ . Объяснить полученные результаты.

**Собственные колебания в параметрическом контуре без потерь.**  
Пусть колебательный контур с постоянными параметрами  $L$  и  $C_0$  настроен на частоту  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_0} = 2\pi/T$  и находится в режиме собственных колебаний. При этом амплитуда колебаний постоянна, а полная энергия, запасенная в контуре, периодически трансформируется из электрической в магнитную и обратно с частотой  $2\omega_0$ . Если же емкость конденсатора периодически изменится во времени, то меняется и характер колебаний.

Пусть, например, в плоском конденсаторе с емкостью  $C = \epsilon_a S/\ell$ , где  $S$  – площадь пластин конденсатора,  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами, расстояние  $\ell$  между пластинами может скачкообразно изменяться по закону  $\ell = \ell_0 + \Delta\ell \text{sgn}(\sin 2\omega_0 t)$  и пусть  $C_0 = \epsilon_a S/\ell_0$ . Тогда

$$C(t) = \frac{\epsilon_a S}{\ell_0 + \Delta\ell \text{sgn}(\sin 2\omega_0 t)}, \quad (3)$$

$$\Delta C = \frac{dC}{d\ell} \Delta\ell = -\frac{\epsilon_a S}{\ell_0^2} \Delta\ell = -C_0 \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad (4)$$

Будем называть  $m = |\Delta\ell/\ell_0| = |\Delta C/C_0|$  *глубиной модуляции* емкости параметрического конденсатора. Подставляя (3) в (2), получим для уравнения Хилла выражение:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\ell_0 + \Delta\ell \text{sgn}(\sin 2\omega_0 t)}{L \epsilon_a S} x = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 [1 + m \text{sgn}(\sin 2\omega_0 t)] x = 0 \quad (5)$$

Заряд постоянного конденсатора  $q_m = C_0 U_m$ , а энергия его электрического поля  $W = C_0 U_m^2/2 = q_m^2/2C_0$ . При изменении емкости конденсатора его заряд остается неизменным. Поэтому

$$\frac{dW}{dC} = -\frac{q_m^2}{2C^2} = -\frac{W}{C}, \quad m = \frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta W}{W},$$

т.е. уменьшение емкости вызывает увеличение энергии электрического поля и наоборот. Модулируя  $C(t)$  последовательностью прямоугольных импульсов (рис. 1, 2), можно добиться скачкообразного увеличения или уменьшения амплитуды напряжения на управляемом конденсаторе, а значит, и энергии, накачиваемой в контуре.

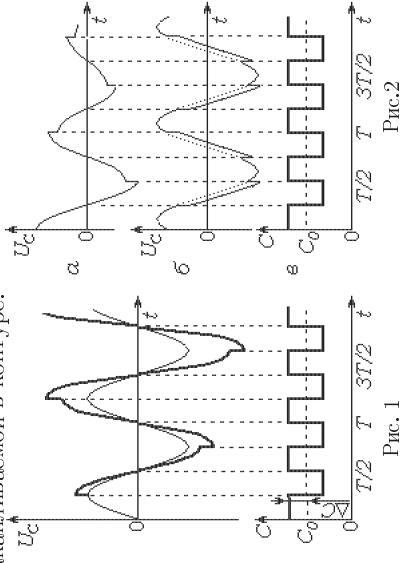


Рис. 2

Рис. 1

"ВЫХОД МВ" для подключения 2-го электронного милливольтметра ВЗ-38 к переменной емкости (в положениях 3) и измерения величины управляющего сигнала  $U_{\sim}$  или к выходу двухконтурного ПУ,  
 "ВЫХОД ОСЦ." для подключения 2-го канала осциллографа GOS-6031 к выходу двухконтурного ПУ.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Ознакомиться с экспериментальной установкой и с помощью тумблера СЕТЬ включить электропитание.

### 1. Исследование гираторных индуктивностей

1. Установить переключатель "РЕЖИМ РАБОТЫ" в положение 1. Соединить разъем "ВХОД ГЕН." с генератором сигналов GFG-3015, а разъем "ВХОД МВ ОСЦ." с помощью тройника - с милливольтметром ВЗ-38 и 1-ым каналом осциллографа GOS-6031. При этом генератор сигналов через резистор  $R_{н1}$ , милливольтметр и 1-ый канал осциллографа GOS-6031 подключаются к 1-му контуру.

**Внимание:** Перед повторным нажатием на кнопку Power на генераторе сигналов GFG-3015 должно пройти не менее 5 секунд, чтобы не вывести генератор из строя.

2. Задать на генераторе GFG-3015 синусоидальную форму колебаний, частоту 1000 Гц и выходное напряжение  $\approx 100$  мВ. Изменяя  $R_1$  от 1.4 до 9 кОм и настраивая генератор в резонанс с колебательным контуром, определить для 5-6 различных значений  $R_1$  резонансные частоты и граничные частоты полос пропускания на уровне половинной мощности для каждого значения  $R_1$ .

Рассчитать и построить зависимости резонансной частоты  $f_{рез}$ , добротности  $Q_1$  и индуктивности  $L_1$  первого гираторного контура от  $R_1$ . Сопоставить теоретически рассчитанную по формуле (17) и экспериментально полученную зависимости  $L_1(R_1)$  и объяснить расхождение результатов.

3. Установить переключатель "РЕЖИМ РАБОТЫ" в положение 2 и для 5-6 значений  $R_2$  произвести аналогичные измерения и расчеты для 2-го гираторного контура.

### 2. Исследование характеристик управляемой емкости

1. Сохраняя соединения генератора, милливольтметра и осциллографа, установить переключатель "РЕЖИМ РАБОТЫ" в положение 1 и настроить первый контур на частоту 8 кГц.

2. Перевести переключатель "РЕЖИМ РАБОТЫ" в положение 3. При этом параллельно емкости 1-го контура включается дополнительная емкость, управляемая постоянным напряжением, а резонансная частота контура и его добротность изменяются. Величина управляющего напряжения задается переключателем " $U_{-1} \div 1$ " и позволяет изменять величину дополнительной емкости.

3. Установить переключатель " $U_{-1} \div 1$ " в положение "0". Измерить резонансную частоту колебательного контура с дополнительной емкостью  $f_0$  и рассчитать  $C_0$ .

Пусть емкость конденсатора скачкообразно уменьшается в моменты времени, когда его заряд и напряжение  $U_C$  достигают амплитудных значений. Тогда запасенная в контуре энергия возрастает. Если при  $U_C = 0$  емкость конденсатора возвращается в первоначальное состояние, то запасенная в контуре энергия не изменяется. Таким образом, за период колебаний результирующая амплитуда напряжения в контуре нарастает. Если увеличение  $C$  происходит вблизи максимальных значений  $U_C$ , а уменьшение - при нулевых значениях  $U_C$  (рис. 2,а), то колебания сопровождаются расфокусировкой сигнала (рис. 2,б) сопровождаются только локальным увеличением накопленной энергии и амплитуда  $U_C$  уменьшается. Небольшая расфокусировка сигналов (рис. 2,б) сопровождается только локальным увеличением и уменьшением  $U_C$ .

Параметрическое усиление колебаний возможно и при других частотах управляющих сигналов, если наблюдаются фазовые соотношения между управляющим и возбуждаемым колебаниями, т.е. уменьшение емкости  $C$  происходит в моменты, когда накопленная энергия максимальна, а увеличение  $C$  - когда она минимальна. В общем случае

$$T_{н} = n \cdot \frac{T}{2},$$

где  $T_{н}$  период управляющего напряжения,  $T$  - период собственных колебаний, а  $n$  - целое число.

Параметрическое увеличение амплитуды колебаний в консервативном контуре может происходить и в тех случаях, когда емкость изменяется по другому периодическому закону, например, по синусоидальному. Если расстояние  $\ell$  между пластинами в плоском конденсаторе изменяется по формуле  $\ell = \ell_0 + \Delta \ell \sin 2\omega t = \ell_0(1 + m \sin 2\omega t)$ , то дифференциальное уравнение параметрических колебаний принимает вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2[1 + m \sin 2\omega t]x = 0. \quad (6)$$

Это уравнение Матье.

- Возникновение нарастающих колебаний при периодическом изменении величины энергоемкого параметра с частотой, кратной собственной частоте контура, будем называть *параметрическим возбуждением* колебаний или *параметрическим резонансом*, а генератор, управляющий изменением параметра и *накачивающий энергию* в контур, - *генератором накачки*. Параметрический резонанс возможен лишь при ненулевых начальных условиях в контуре.

**Собственные колебания в диссипативном параметрическом контуре.** Пусть  $LCR$ -контур обладает малым показателем затухания  $\alpha$ , настроен на частоту  $\omega_c \approx \omega_0$  и находится в режиме собственных колебаний. При этом амплитуда колебаний уменьшается незначительно

$$q(t) = q_m e^{-\alpha t} \sin \omega_c t \approx q_m \sin \omega_0 t, \quad I(t) \approx q_m \omega_0 \cos \omega_0 t = I_m \cos \omega_0 t,$$

а в резистивном сопротивлении контура  $R$  за период  $T$  собственных колебаний расходуется энергия

$$W_1 = \frac{1}{2} I^2 R T = \frac{1}{2} q_m^2 \omega_0^2 R \frac{T}{\omega_0} = \pi q_m^2 \omega_0 R.$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка представляет собой автономный блок. Он содержит два гираторных колебательных контура, электрически управляемую емкость и источник питания микросхем. Все постоянные резисторы имеют величину 8 кОм, а переменные резисторы – последовательные соединения резистора 8 кОм и реостата  $R_1$  или  $R_2$ . Емкость конденсатора в первом гираторе 1.13 нФ, во втором – 3.53 нФ. Электрическая принципиальная схема установки без источников питания изображена на рис. 11.

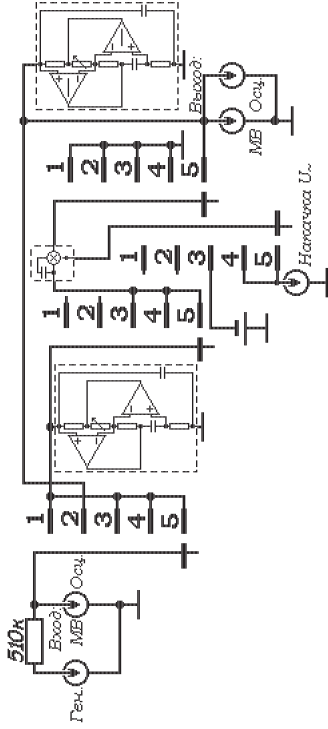


Рис. 11

В качестве контрольно-измерительных приборов в работе используются функциональные генераторы сигналов GFG-3015 и GFG-8210, двухканальный осциллограф GOS-6031 и два милливольтметра ВЗ-38.

На передней панели прибора расположены кнопка "СЕТЬ" для подключения прибора к сети переменного тока, кнопочный переключатель "РЕЖИМ РАБОТЫ", позволяющий выбрать

- 1 – исследование характеристик первого колебательного контура,
  - 2 – исследование характеристик второго колебательного контура,
  - 3 – исследование характеристик электрически управляемой емкости,
  - 4 – исследование одноконтурного параметрического усилителя,
  - 5 – исследование двухконтурного параметрического усилителя,
- реостат " $R_1$ " регулирующий величину резистора, а значит и величину индуктивности в 1-ом контуре, реостат " $R_2$ " регулирующий величину резистора, а значит и величину индуктивности в 2-ом контуре, переключатель " $U = -1 \div 1$ ", позволяющий задавать постоянное напряжение на управляющем входе переменной емкости, и коаксиальные разъемы:

"ВХОД ГЕН." для подключения источника сигналов GFG-8210 или GFG-3015,

"ВХОД МВ ОСЦ." для подключения 1-го электронного милливольметра ВЗ-38 или 1-го канала осциллографа GOS-6031 к 1-му колебательному контуру в положениях 1, 3 - 5 или к 2-му колебательному контуру в положении 2,

"Накачка  $U_{\sim}$ " для подключения генератора сигналов GFG-3015, управляющего периодическим изменением емкости,

1. Если емкость  $C(t)$  дважды за период уменьшается на величину  $2\Delta C$  (рис. 3), то полная энергия  $W_2$ , вносимая в контур за период  $T$  собственных колебаний, принимает вид

$$W_2 = 2 \frac{q_m^2}{2C_0^2} 2\Delta C = 2 \frac{q_m^2}{C_0} \cdot \frac{\Delta C}{C_0} = 2m \frac{q_m^2}{C_0},$$

где  $C_0$  - среднее значение емкости,  $m = \Delta C/C_0$  - глубина модуляции  $C(t)$ .

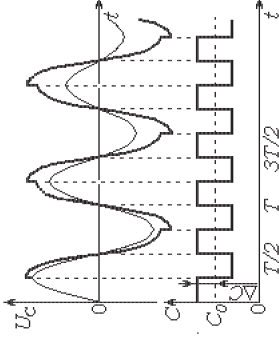


Рис. 3

При малой глубине модуляции параметра  $W_2 < W_1$  и вносимое в контур отрицательное сопротивление меньше сопротивления потерь, т.е. генератор накачки лишь частично компенсирует потери энергии в контуре. При некотором значении  $m = m_{кр}$  происходит полная компенсация потерь и  $W_1 = W_2$  (см. рис. 3). Тогда

$$m_{кр} = \frac{\pi}{2} \omega_0 C_0 R = \frac{\pi}{2Q}, \quad (7)$$

где  $\omega_0$  - резонансная частота контура,  $Q = 1/\omega_0 C_0 R$  - добротность контура. Для реальных значений  $Q$  величины  $m_{кр}$  и, следовательно,  $\Delta C$  невелики: при  $C_0 = 100$  пФ и  $Q = 100$  достаточно реализовать  $\Delta C = 1.57$  пФ.

2. Практически  $C(t)$  изменяется по гармоническому закону и, как будет показано ниже, при том же значении  $m$  в контур вносится иная отрицательная энергия. Для определения  $m_{кр}$  в этом случае будем считать, что  $C(t)$  изменяется по закону

$$C(t) = C_0 / (1 + m \sin(2\omega_0 t + \varphi_n)), \quad (8)$$

где  $\varphi_n$  - сдвиг фаз между напряжением накачки и собственными колебаниями контура. Тогда

$$\begin{aligned} W_2 &= \int_0^T U I dt = \int_0^T \frac{q}{C} I dt = \frac{\omega_0 q_m^2}{C_0} \int_0^T (1 + m_{кр} \sin(2\omega_0 t + \varphi_n)) \sin \omega_0 t \cos \omega_0 t dt = \\ &= \frac{\omega_0 q_m^2}{2C_0} \left( \int_0^T \sin 2\omega_0 t dt + m_{кр} \int_0^T \sin(2\omega_0 t + \varphi_n) \sin 2\omega_0 t dt \right) = \\ &= \frac{\omega_0 q_m^2}{2C_0} m_{кр} \cos \varphi_n T. \end{aligned} \quad (9)$$

Другие слагаемые в правой части обращаются в нуль.

Полная компенсация потерь происходит при  $W_2 = W_1$  и для критической глубины модуляции параметра имеем:

$$m_{кр} = \frac{\omega_0 C_0 R}{\cos \varphi_H} = \frac{1}{Q \cos \varphi_H} \quad (10)$$

Изменяя фазовые соотношения между напряжением накачки и собственными колебаниями контура ( $\varphi_H$ ), можно управлять величиной  $m_{кр}$ .

Итак, при изменении  $C(t)$  по импульсному или гармоническому закону в параметрическом контуре возникает дополнительное *отрицательное сопротивление*, величину которого нетрудно определить из соотношений (7) и (10) соответственно

$$R_{вн1} = \frac{2m}{\pi \omega_0 C_0} = \frac{2m\rho}{\pi}, \quad R_{вн2} = \frac{m \cos \varphi_H}{\omega_0 C_0} = m\rho \cos \varphi_H, \quad (11)$$

резистивное сопротивление контура уменьшается, а эквивалентная добротность контура

$$Q_{экр} = \frac{\rho}{R - R_{вн}}$$

возрастает. Это явление можно использовать для усиления сигналов.

## 2. Вынужденные колебания в параметрических контурах.

### Параметрические усилители

**Вынужденные колебания.** Пусть диссипативный последовательный параметрический контур подключен к источнику переменного напряжения  $U = U_m \sin \omega_c t$ . При отключенном генераторе накачки в контуре возникает резонанс напряжений и для  $\omega_c \approx \omega_0$ , где  $\omega_0$  - резонансная частота контура, амплитуда напряжений на конденсаторе  $C$  и индуктивности  $L$  в  $Q$  раз превышает напряжение источника сигнала, т.е.

$$U_{Cm} = QU_m, \quad U_{Lm} = QU_m,$$

где  $Q$  - добротность контура.

Если же емкость контура изменяется по синусоидальному закону с частотой  $\omega_H = 2\omega_0$ , а сдвиг фаз между напряжением накачки и собственными колебаниями контура равен нулю, то внесится отрицательное сопротивление (11) и эквивалентная добротность контура  $Q_{экр}$  принимает вид:

$$Q_{экр} = \frac{\rho}{R - R_{вн}} = \frac{\rho}{R - m\rho} = \frac{\rho/R}{1 - m\rho/R} = \frac{Q}{1 - m/m_{кр}} \quad (12)$$

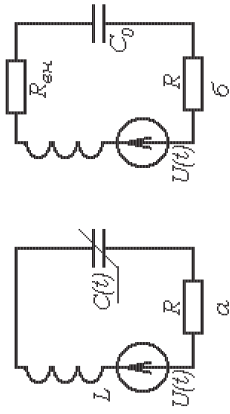


Рис. 4

Таким образом, совместное действие двух связанных друг с другом ОУ, охваченных цепями положительной и отрицательной обратной связи, позволяет создавать дуальные реактивные элементы, т.е. трансформировать емкости в индуктивности, и наоборот.

Величина гираторной индуктивности становится регулируемой, если один из резисторов гиратора сделать переменным. Тогда

$$L = \frac{R_1 R_3 R_5}{R_2} C_1. \quad (17)$$

Гираторы позволяют создавать резонансные колебательные контуры без катушек индуктивности. Пример параллельного контура с регулируемой гираторной индуктивностью представлен на рис. 9. Здесь  $C_1$  - элемент гираторной индуктивности, а  $C_2$  - емкость контура. Переменный резистор  $R_2$  позволяет изменить величину реализуемой индуктивности, а значит, и резонансную частоту колебательного контура.

Как известно [6, с.186-187], источники сигналов для параллельных контуров должны обладать большим внутренним сопротивлением (источники тока). Хорошую модель источника тока представляет последовательное соединение источника напряжения  $E$  и резистора  $R_{и}$  с сопротивлением значительно превышающим резонансное сопротивление параллельного контура. **Переменная емкость на аналоговом перемножителе напряжений.** Переменную электрически управляемую емкость можно реализовать различными способами. Наиболее простое решение задачи удается получить с помощью варикапов [2], но величина емкости оказывается пропорциональной управляющему напряжению лишь в узком диапазоне напряжений (до 10 В), можно реализовать на основе микросхем аналоговых перемножителей напряжений. Функционирование такой управляемой емкости (рис. 10) нетрудно объяснить из простых физических соображений.

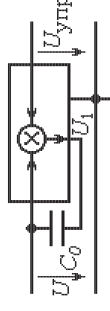


Рис. 10

Пусть на входы перемножителя поступают напряжение  $U$ , действующее на емкости  $C_0$ , и управляющее напряжение  $U_{упр}$ , а напряжение на выходе перемножителя сигналов  $U_1 = U \cdot U_{упр}/10$  В. При  $U_{упр} = 0$ ,  $U_1 = 0$ , а заряд  $q$  конденсатора  $C_0$  удовлетворяет равенству  $q = C_0 U$ . Когда  $U_{упр} \neq 0$  и постоянно, напряжение на  $C_0$  принимает вид  $U - U_1 = U(1 - U_{упр}/10)$ , и в силу неизменности  $q$  эквивалентная емкость

$$C = q/(U - U_{упр}/10) = C_0/(1 - U_{упр}/10)$$

возрастает ( $U_{упр} > 0$ ) или уменьшается ( $U_{упр} < 0$ ) по сравнению с  $C_0$ .

Если для гармонического напряжения  $U_{упр}(t) = U_m \sin(2\omega_0 t + \varphi_H)$  ввести коэффициент модуляции  $m = U_m/10$  В, то получим следующее уравнение для параметрической емкости:

$$C(t) = \frac{C_0}{1 - m \sin(2\omega_0 t + \varphi_H)}$$

При создании экспериментальной установки ПУ в диапазоне звуковых частот возникают различные технические трудности, главная из которых состоит в создании электрически управляемого реактивного элемента: индуктивности или емкости. Эту трудность легко преодолеть с помощью стандартных микроэлектронных схем.

### 3. Микроэлектронные элементы ПУ

**Гираторные индуктивности и гираторные контуры.** Электрическая схема гиратора представлена на рис. 8. Как следует из рис. 8, с выхода первого ОУ сигнал поступает на входы второго ОУ, а сигнал с выхода второго ОУ - на входы первого ОУ, т.е. в системе действуют цепи положительной и отрицательной ОС. Если учесть все токи, протекающие через  $\dot{Z}_1 - \dot{Z}_5$  и считать ОУ идеальными (входные токи отсутствуют, а потенциалы входов одинаковы), то

$$\dot{U} = \dot{I}\dot{Z}_1 + (\dot{I} + \dot{I}_1)(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3) + (\dot{I} + \dot{I}_1 + \dot{I}_2)(\dot{Z}_4 + \dot{Z}_5), \quad (15)$$

$$\dot{I}(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{I}_1\dot{Z}_2 = 0, \quad (\dot{I} + \dot{I}_1)(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_4) + \dot{I}_2\dot{Z}_4 = 0.$$

$$\text{Отсюда } \dot{I}_1 = -\dot{I}\left(1 + \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2}\right), \quad \dot{I}_2 = \dot{I}\frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2}\left(1 + \frac{\dot{Z}_3}{\dot{Z}_4}\right).$$

Подставляя  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  в (15), получим,

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\dot{Z}_1\dot{Z}_3\dot{Z}_5}{\dot{Z}_2\dot{Z}_4} \quad (16)$$

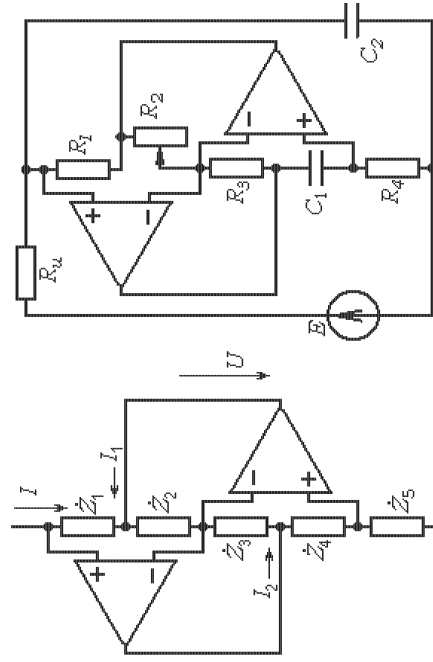


Рис. 8

Если  $\dot{Z}_2$  или  $\dot{Z}_4$  имеет емкостной характер (например,  $\dot{Z}_4 = 1/j\omega C_1$ ), а остальные  $\dot{Z}_1 = R$  - одинаковые резисторы, то  $\dot{Z}_{\text{вх}} = j\omega CR^2 = j\omega L$ ,  $L = CR^2$ . При  $C = 10$  нФ и  $R = 10$  кОм получим  $L = 1$  Гн. Подобная индуктивность, выполненная в виде катушки, имела бы весьма внушительные размеры.

При ( $m < m_{\text{кр}}$ ) амплитуда колебаний, а значит, и мощность сигнала  $R_{\text{вых}}$ , выделяемого в нагрузку, превышает  $R_{\text{вх}}$ , т.е. параметрическая система преобразуется в усилитель сигналов. Следует отметить, что наличие  $\varphi_n \neq 0$  в режиме вынужденных колебаний может приводить к ослаблению сигналов вместо усиления.

**Одноконтурный параметрический усилитель** можно выполнить по схеме, представленной на рис. 4,а. Собственно ПУ образует контур из индуктивности  $L$ , сопротивлений  $R$  и параметрической емкости  $C(t)$ , настроенный в отсутствие накачки на частоту  $\omega_0 = \omega_n/2$ . Для анализа процесса параметрического усиления можно использовать упрощенную эквивалентную схему, содержащую постоянную емкость  $C = C_0$  и вносимое отрицательное сопротивление  $R_{\text{вн}}$  (рис. 4,б).

Различают два режима работ одноконтурного ПУ: синхронный ( $\omega = \omega_n/2$ ) и асинхронный (бигармонический), когда частота сигнала несколько отличается от  $\omega_n/2$ .

**Синхронный режим ПУ.** Пусть частота сигнала вдвое меньше частоты накачки переменной емкости  $\omega_c = \omega_n/2$ , а сдвиг фаз  $\varphi_n = 0$ . При  $\varphi_n = 0$  и конечном значении  $m < m_{\text{кр}}$  эквивалентная добротность контура  $Q_{\text{эвк}}$  возрастает. Если в качестве коэффициента усиления по мощности  $K_P$  рассматривать отношение квадратов напряжений на емкости при  $m \neq 0$  и  $m = 0$  (напряжения  $U'_c$  и  $U''_c$  соответственно), то

$$K_P = (U'_c/U''_c)^2 = \frac{1}{(1 - m/m_{\text{кр}})^2}. \quad (17)$$

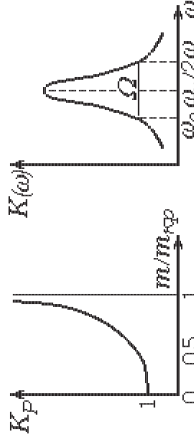


Рис. 5

Рассматриваемый усилитель является регенеративным и при  $m \rightarrow m_{\text{кр}}$  становится неустойчивым (рис. 5). ПУ, работающие в синхронном режиме при оптимальных фазовых соотношениях часто называют *вырожденными*. Вырожденные ПУ, кроме усиления, могут выполнять функции фазовой фильтрации, но на практике трудно осуществить синхронную накачку, и  $\omega_n$  лишь приближенно равна  $2\omega_c$ .

**Асинхронный (бигармонический) режим ПУ.** Пусть  $\omega_n = 2\omega_c + \Omega$  ( $\Omega \ll \omega_c$ ) и синхронизм между  $\omega_n$  и  $2\omega_c$  отсутствует. Тогда в цепи управляемой емкости возникают сигналы с комбинационными частотами [4, с.357]:

$$\omega_+ = \omega_n + \omega_c = 3\omega_c + \Omega, \quad \omega_- = \omega_n - \omega_c = \omega_c + \Omega.$$

Если колебательный контур настроен на частоту  $\omega_0 = \omega_n/2$ , то колебания с частотой  $\omega_+$  подавляются, а в полосе пропускания контура оказываются

два сигнала с частотами  $\omega_c = \omega_0 - \Omega/2$  и  $\omega_- = \omega_n - \omega_c = \omega_0 + \Omega/2$ , равноотстоящими от  $\omega_0 = \omega_n/2$ . Амплитуды этих колебаний примерно одинаковы, и возникают биения с частотой  $\omega_- - \omega_c = \Omega$ . Напряжение биений выступает в роли выходного сигнала. Отсюда еще одно название асинхронного режима - *бигармонический*. Коэффициент усиления ПУ в асинхронном режиме определяется по формуле (13), но теперь вносимое отрицательное сопротивление, а значит, и  $K_R$ , периодически изменяются с частотой  $\Omega$ . Таким образом, в одноконтурных невырожденных ПУ вместо гармонического колебания получается квазигармонический сигнал с периодически изменяющейся амплитудой.

**Двухконтурный параметрический усилитель.** В одноконтурном ПУ при небольшой расстройке  $\omega_c$  относительно  $\omega_0 = \omega_n/2$  в полосу пропускания контура одновременно оказываются два гармонических колебания с частотами  $\omega_c$  и  $\omega_-$ . Если же расстройка велика, то для колебания с частотой  $\omega_c$  можно использовать один колебательный контур, для сигнала с частотой  $\omega_-$  - другой контур, а связь между ними осуществить через переменную емкость, управляемую сигналом накачки. Это - двухконтурный ПУ (рис. 7).

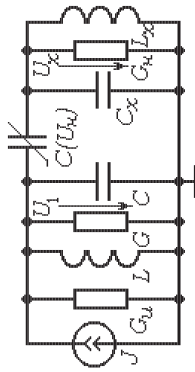


Рис. 7

Пусть источник сигнала в виде генератора тока нагружен на параллельный колебательный  $LCR$ -контур, настроенный на частоту сигнала, а элементы  $L_x$ ,  $C_x$  и проводимость нагрузки  $G_n$  образуют так называемый "холостой" параллельный контур, настроенный на частоту  $\omega_x = \omega_- = \omega_n - \omega_c$ . Частота  $\omega_x$  должна быть настолько удалена от  $\omega_c$  и  $\omega_n$ , чтобы  $\omega_n$  не попала в полосу пропускания сигнального и холостого контуров.

Если входной сигнал создает на первом (сигнальном) контуре напряжение  $U_1 = U_{mc} \sin \omega_c t$  и частота  $\omega_c$  не попадает в полосу пропускания холостого контура, то напряжение  $U_x = 0$ , а суммарное напряжение на переменной емкости  $U_{var} = U_c + U_x = U_c$ . Емкость  $C(t)$  периодически изменяется с частотой накачки  $\omega_n$  и при малой глубине модуляции  $m$

$$C(t) = C_0/[1 + m \sin(\omega_n t + \varphi)] \cong C_0[1 - m \sin(\omega_n t + \varphi)],$$

а для тока, протекающего через  $C(t)$ , имеем

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(C(t)U_c) = C(t) \frac{dU_c}{dt} + \frac{dC(t)}{dt} U_c = \\ &= \omega_c C_0 [1 - m \sin(\omega_n t + \varphi)] U_{mc} \cos \omega_c t - \\ &- \omega_n m C_0 U_{mc} \cos(\omega_n t + \varphi) \sin \omega_c t = \omega_c C_0 U_{mc} \cos \omega_c t - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{2} \omega_c m C_0 U_{mc} \{\sin[(\omega_n - \omega_c)t + \varphi] + \sin[(\omega_n + \omega_c)t + \varphi]\} + \\ & + \frac{1}{2} \omega_n m C_0 U_{mc} \{\sin[(\omega_n - \omega_c)t + \varphi] - \sin[(\omega_n + \omega_c)t + \varphi]\} = \\ & = \omega_c C_0 U_{mc} \cos \omega_c t + \frac{1}{2} (\omega_n - \omega_c) m C_0 U_{mc} \{\sin[(\omega_n - \omega_c)t + \varphi] - \\ & - \frac{1}{2} (\omega_n + \omega_c) m C_0 U_{mc} \sin[(\omega_n + \omega_c)t + \varphi]\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Холостой контур настроен на частоту  $\omega_x = \omega_n - \omega_c$ , и ненулевое напряжение на нем создает только составляющая  $I(t)$  с частотой  $\omega_x$ , т.е.

$$U_x = \frac{1}{2} \omega_- m C_0 U_{mc} R_x \sin(\omega_- t + \varphi),$$

где  $R_x = \rho_x^2 G_n = L_x G_n / C_x$  и  $\rho_x$  - резонансное и характеристическое сопротивление холостого контура. Так как колебания с частотой  $\omega_-$  не попадают в полосу пропускания входного контура, его сопротивление для этих колебаний близко к нулю. Напряжение  $U_x$  создает в цепи  $C(t)$  дополнительный ток [3, с.167-168]. Одна из составляющих этого тока

$$I' = \frac{1}{4} \omega_- \omega_c m^2 C_0^2 U_{mc} R_x \sin \omega_c t$$

оказывается синхронной с входным сигналом. Однако ток  $I'$  направлен навстречу току  $I$  и поэтому вносит в сигнальный контур отрицательную проводимость  $\omega_c$  и  $\omega_-$ .

$$G_{вн} = -\frac{I''}{U_c} = -\frac{1}{4} \omega_- \omega_c m^2 C_0^2 R_x.$$

Последняя частично компенсирует собственную проводимость входного контура и вызывает усиление сигнала.

$$Q_3 = \frac{\rho}{R - \rho^2 |R_{вн}|} = \frac{Q}{1 - Q \rho |C_{вн}|}.$$

Коэффициент усиления  $K_R$  двухконтурного ПУ определяется соотношением (13), если в качестве  $U_c'$  и  $U_c''$  использовать  $U_1$  при  $m \neq 0$  и  $m = 0$  соответственно.

• Основные преимущества двухконтурных ПУ:

- 1) частоты  $\omega_c$  и  $\omega_n$  могут быть любыми, лишь бы  $\omega_- = \omega_n - \omega_c$  не попала в полосу пропускания сигнального контура, а  $\omega_c$  - в полосу пропускания холостого контура;
- 2) выходной сигнал не изменяется по амплитуде, как это было в одноконтурном невырожденном ПУ;
- 3) амплитуда колебаний выходного сигнала нечувствительна к разности фаз напряжений сигнала и накачки;
- 4) двухконтурный ПУ является симметричной системой, ибо отрицательное сопротивление вносится как в сигнальный, так и в холостой контуры. Усиленный сигнал можно снимать как с сигнального, так и с холостого контура. В последнем случае усиление происходит с преобразованием частоты сигнала.