

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА**

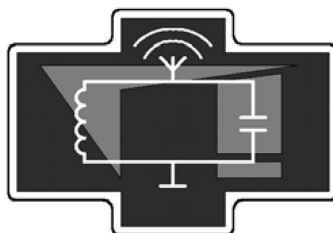
Физический факультет

Практикум кафедры физики колебаний

Методическая разработка к задаче

РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

А. А. Белов, Т. Б. Косых



Москва, 2013

УДК 534:621

Печатается по решению кафедры физики колебаний
физического факультета МГУ

Белов А. А., Косых Т. Б.

РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ.

Методическая разработка к одноименной задаче «Практикума колебаний» кафедры физики колебаний. — М., изд. физического факультета МГУ, 2013, 16 с.

Методическая разработка предназначена для студентов 3-5 курсов отделения радиофизики физического факультета МГУ, выполняющих задачи в «Практикуме колебаний». В разработке рассмотрены физические процессы в двухконтурном параметрическом усилителе с высокочастотной накачкой. Описаны методики измерений при выполнении упражнений.

Объем 1 п.л.

Тираж 30 экз.

Заказ №

Отпечатано в отделе оперативной печати физического факультета МГУ
им. М.В. Ломоносова

РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

Изучаются колебательные процессы в регенеративных параметрических усилителях и их амплитудно-частотные характеристики.

§ 1. ВВЕДЕНИЕ

Термин «параметрические усилители» относится к целому классу приборов для усиления и преобразования частоты, в которых используются свойства нелинейных или изменяющихся во времени реактивных элементов. Функцией такого реактивного элемента является передача энергии от источника высокочастотной мощности к полезной нагрузке. Источник высокочастотной мощности, питающий параметрический усилитель, называется генератором накачки. Поскольку реактивные элементы не шумят, а усиление в параметрическом усилителе происходит на основе применения реактивных элементов, то параметрические усилители должны иметь очень малые собственные шумы. Это и явилось основной причиной интенсивного развития параметрических усилителей.

В настоящее время известно несколько типов параметрических усилителей. Их можно разделить на две группы:

- 1) регенеративные усилители,
- 2) нерегенеративные усилители-преобразователи.

Данная задача знакомит с регенеративными параметрическими усилителями трёх типов: одноконтурный (вырожденный), двухконтурный усилитель с отрицательным сопротивлением и двухконтурный регенеративный усилитель-преобразователь.

§ 2. ТЕОРИЯ

Упрощенная схема двухконтурного параметрического усилителя показана на рис. 1. Усилитель состоит из двух колебательных контуров L_1, C_1, R_1 и L_2, C_2, R_2 . Один из колебательных контуров (для определенности будем считать, что это первый контур) настроен на частоту ω_{10} , близкую к частоте ω_1 входного сигнала. Второй колебательный контур настроен на частоту ω_{20} , близкую к комбинационной частоте $\omega_2 = \omega_n - \omega_1$. Колебательные контуры связаны через периодическую изменяющуюся во времени с частотой ω_n ёмкость конденсатора связи C_0 . В процессе работы усилителя периодическое изменение ёмкости конденсатора связи обеспечивает передачу энергии от генератора накачки к колебаниям на частоте сигнала и на комбинационной частоте.

На практике в качестве конденсатора связи C_0 часто используют запертый напряжением смещения p - n переход полупроводникового диода. Как известно, ёмкость p - n перехода зависит от напряжения смещения.

Поэтому для того, чтобы ёмкость p - n перехода периодически изменялась во времени, достаточно приложить к p - n переходу периодически изменяющееся напряжение. Частоту изменения ёмкости связи C_0 называют частотой накачки, а напряжение с частотой накачки на p - n переходе — напряжением накачки.

P - n переход является нелинейным конденсатором, поскольку его ёмкость зависит от величины приложенного напряжения. Поэтому, вообще говоря, параметрический усилитель с полупроводниковым конденсатором является нелинейным устройством, для которого не существует общего метода точного анализа. Для анализа параметрических усилителей используются различные приближенные методы.

Наиболее распространенным из них является метод малого сигнала, предполагающий, что напряжение сигнала мало по сравнению с напряжением накачки. Предполагается, что ёмкость конденсатора связи изменяется только под действием большого напряжения накачки, а малый сигнал на величину ёмкости не влияет. Таким образом, в приближении малого сигнала параметрический усилитель является для сигнала линейным устройством с переменным параметром (ёмкостью). Поэтому, анализируя свойства параметрических усилителей для малых сигналов, можно считать, что выполняется принцип суперпозиции и возможно применение таких методов, как спектральный анализ Фурье, метод комплексных амплитуд и т. д.

В соответствии с методом малого сигнала будем считать, что ёмкость C_0 конденсатора связи изменяется под действием напряжения накачки по закону

$$C_c = C_0 + \Delta C \cos \omega_H t. \quad (1)$$

Пусть от источника сигнала на первый колебательный контур усилителя поступает ток сигнала

$$i_c = I_c \cos \omega_1 t.$$

Напряжение на колебательных контурах представим в виде

$$u_1 = U_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1); \quad u_2 = U_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2). \quad (2)$$

Тогда, пользуясь методикой, изложенной в [1], для комплексных амплитуд напряжений на колебательных контурах получаем

$$\tilde{U}_1 = \frac{I_c}{\frac{1}{R_1}(1 + 2jQ_1\xi_1) - \frac{\omega_1\omega_2\Delta C^2}{\frac{4}{R_2}(1 + 2jQ_2\xi_1\omega_1/\omega_2)}}, \quad (3)$$

$$\tilde{U}_2 = \frac{j\omega_2 I_c \Delta C / 2}{\frac{1}{R_1} (1 + 2jQ_1 \xi_1) - \frac{1}{R_2} (1 + 2jQ_2 \xi_1 \omega_1 / \omega_2) - \frac{\omega_1 \omega_2 \Delta C^2}{4}}. \quad (4)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$\xi_1 = \frac{\omega_1 - \omega_{10}}{\omega_1}; \quad \omega_{10} = \frac{1}{\sqrt{L_1(C_1 + C_0)}}; \quad \xi_2 = \frac{\omega_2 - \omega_{20}}{\omega_2};$$

$$\omega_{20} = \frac{1}{\sqrt{L_2(C_2 + C_0)}}; \quad Q_1 = \omega_1(C_1 + C_0)R_1; \quad Q_2 = \omega_2(C_2 + C_0)R_2.$$

Параметрический двухконтурный усилитель с отрицательным сопротивлением

В этом случае входной сигнал подается на первый на первый колебательный контур и с него же снимается условный сигнал. Усиление по напряжению в этом случае можно определить как соотношение амплитуд напряжения сигнала на первом контуре в присутствии и в отсутствии напряжения накачки.

Из (3) следует, что в отсутствие напряжения накачки (модуляция емкости отсутствует, то есть $\Delta C = 0$) и при резонансной настройке контуров ($\xi_1 = 0$)

$$U_1 = I_c R_1. \quad (5)$$

Поделив (3) на (5), для коэффициента усиления получим

$$\tilde{K}_{\omega_1} = \frac{1}{(1 + 2jQ_1 \xi_1) - \frac{\omega_1 \omega_2 \Delta C^2}{4 \left(\frac{1}{R_1 R_2} \left(1 + 2jQ_2 \xi_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \right)}}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что если колебательные контуры усилителя настроены на резонанс на частоте сигнала и комбинационного колебания ($\xi_1 = 0$), то коэффициент усиления принимает максимальное значение

$$\tilde{K}_{\omega_1 \text{ макс}} = \frac{1}{1 - Q_1 Q_2 m^2}, \quad (7)$$

где

$$m = \frac{\Delta C}{2\sqrt{(C_1 + C_0)(C_2 + C_0)}} \quad (8)$$

— коэффициент модуляции емкости.

При увеличении амплитуды напряжения накачки коэффициент модуляции емкости растет. Как видно из (7), это приводит к увеличению коэффициента усиления. При

$$m = \frac{1}{\sqrt{Q_1 Q_2}} \quad (9)$$

из (7) получаем $\tilde{K}_{\omega_1, \text{ макс}} = \infty$.

Соотношение (9) определяет предельную величину коэффициента модуляции емкости и, следовательно, предельную величину амплитуды напряжения накачки, при превышении которых усилитель самовозбуждается.

Если частота сигнала ω_1 отличается от резонансной частоты ω_{10} , то $\xi_1 \neq 0$ и из (6) следует, что коэффициент усиления будет меньше, чем при резонансной настройке.

Чтобы определить полосу пропускания усилителя на уровне 3 дБ, нужно приравнять модуль знаменателя в (6) его значению при резонансе, умноженному на $\sqrt{2}$. Решая полученное уравнение, при условии, что $|K_{\omega_1}| \gg 1$, для полосы пропускания получим

$$(2\xi_1)_{\text{cp}} = \frac{\omega_2}{\omega_1 Q_2} \cdot \frac{1 - Q_1 Q_2 m^2}{Q_1 Q_2 m^2 + \frac{\omega_2}{\omega_1} \frac{Q_1}{Q_2}}. \quad (10)$$

Сравнивая выражения (7) и (10), можно заметить, что увеличение глубины модуляции емкости приводит к увеличению коэффициента усиления и сужению полосы пропускания. Произведение максимального значения коэффициента усиления на ширину полосы пропускания при большом усилении постоянно и равно

$$\tilde{K}_{\omega_1, \text{ макс}} (2\xi_1)_{\text{cp}} = \frac{1}{Q_1 + \frac{\omega_1}{\omega_2} Q_2}. \quad (11)$$

Регенеративный параметрический усилитель-преобразователь

В схеме, показанной на рис. 1, выходной сигнал усилителя можно снимать со второго колебательного контура на частоте ω_2 . В этом случае частоты

входного и выходного сигналов усилителя не совпадают, мы имеем дело с усилителем-преобразователем частоты. Коэффициент усиления и частотную характеристику и в этом случае можно проанализировать с помощью выражений (3) и (4). Определим коэффициент усиления \tilde{K}_{ω_2} в этом случае как отношение амплитуды напряжения на втором контуре к амплитуде напряжения на первом контуре при резонансной настройке в отсутствие напряжения накачки. С помощью соотношений (4) и (5) получим

$$\tilde{K}_{\omega_2} = \frac{j\omega_2 I_c (\Delta C/2) R_2}{(1 + 2jQ_1 \xi_1)(1 + 2jQ_2 \xi_1 \omega_1 / \omega_2) - \omega_1 \omega_2 \frac{\Delta C^2}{4} R_1 R_2}.$$

При резонансной настройке обоих контуров усилителя $|\tilde{K}_{\omega_2}|$ принимает максимальное значение, равное

$$|\tilde{K}_{\omega_2, \text{ макс}}| = \sqrt{\frac{\omega_2 R_2}{\omega_1 R_1} \frac{1}{1 - m^2 Q_1 Q_2}}. \quad (12)$$

Полученное соотношение показывает, что и в этом случае при $m^2 Q_1 Q_2 \rightarrow 1$ коэффициент усиления стремится к бесконечности. Анализ частотной характеристики и произведений усиления на полосу пропускания в рассматриваемом случае приводит к тем же самым результатам, что и в случае параметрического усилителя с отрицательным сопротивлением.

Одноконтурный (вырожденный) параметрический усилитель

В схеме, показанной на рис. 1, второй колебательный контур служит для выделения колебаний на комбинационной частоте $\omega_2 = \omega_n - \omega_1$. Если частота входного сигнала близка к $\omega_n / 2$, т. е. $\omega_1 \approx \omega_n / 2$, то $\omega_2 \approx \omega_n / 2$. В этом случае оба колебания (колебание с частотой сигнала и колебание комбинационное) могут быть выделены с помощью единственного общего колебательного контура. Схема параметрического усилителя приобретает вид, показанный на рис. 2. Такой одноконтурный усилитель называют вырожденным.

Если частота сигнала точно равна половине частоты накачки, то комбинационная частота точно равна частоте сигнала:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_n / 2.$$

Такой режим работы усилителя называют когерентным. Усиление в этом случае зависит от фазовых соотношений между колебаниями сигнала и накачки. В зависимости от фазовых соотношений энергия может

передаваться либо от генератора накачки к сигналу, либо в обратном направлении. В первом случае происходит усиление сигнала, во втором — сигнал ослабляется. В первом случае имеет место сильный резонанс, во втором — слабый.

Если частота сигнала не равна точно половине частоты накачки, то частота комбинационного колебания не совпадает с частотой сигнала. В этом случае напряжение на колебательном контуре усилителя будет суммой напряжения усиленного сигнала с частотой ω_1 и комбинационного колебания с частотой ω_2 . Если

$$\omega_1 = \frac{\omega_n}{2} - \Delta\omega, \quad \text{то} \quad \omega_2 = \frac{\omega_n}{2} + \Delta\omega.$$

При малых расстройках $\Delta\omega$ имеем:

$$\omega_1 \approx \omega_2; \quad Q_1 \approx Q_2; \quad R_1 \approx R_2. \quad (13)$$

Здесь Q_1 ; Q_2 ; R_1 ; R_2 — соответственно добротности и сопротивления потерь колебательного контура усилителя на частотах ω_1 и ω_2 . С учетом соотношений (13) сравнение выражений (7) и (12) показывает, что $K_{\omega_1} \approx K_{\omega_2}$. Следовательно, при достаточно большом усилении колебаний с частотами ω_1 и ω_2 в вырожденном усилителе имеют близкие амплитуды.

Пусть колебание с частотой сигнала имеет вид

$$u_1 = A \cos \left[\left(\frac{\omega_n}{2} - \Delta\omega \right) t + \varphi_1 \right].$$

Тогда колебание комбинационной частоты можно представить в виде

$$u_2 = A \cos \left[\left(\frac{\omega_n}{2} + \Delta\omega \right) t + \varphi_2 \right].$$

Сложение этих колебаний приводит к появлению биений

$$u_1 + u_2 = 2A \cos \left(\Delta\omega t + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) \cos \left(\omega_n t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right).$$

Суммарное колебание можно рассматривать как колебание с частотой $\omega_n / 2$, амплитуда которого периодически изменяется во времени по закону

$$2A \cos \left(\Delta\omega t + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right).$$

Определим коэффициент усиления вырожденного усилителя как отношение амплитуды биений в максимуме к амплитуде в контуре на частоте $f_n/2$ в отсутствие напряжения накачки и при резонансной настройке контура на частоте $f_n/2$. Легко видеть, что в этом случае максимальное в полосе пропускания значение коэффициента усиления определяется удвоенным выражением (7). С учетом (13) будем иметь

$$\tilde{K}_{\text{макс.выр.}} = \frac{2}{1 - Q^2 m^2}. \quad (14)$$

Для коэффициента модуляции емкости m в этом случае с помощью (8) получим

$$m = \frac{\Delta C}{2(C_1 + C_0)}. \quad (15)$$

Полоса пропускания определяется выражениями (10) и (13):

$$(2\xi)_{\text{гр}} = \frac{1 - Q^2 m^2}{2Q}. \quad (16)$$

Произведение максимального значения коэффициента усиления на полосу пропускания остается постоянным:

$$\tilde{K}_{\text{макс.выр.}} \cdot (2\xi)_{\text{гр}} = 1/Q.$$

При $mQ \rightarrow 1$ коэффициент усиления стремится к бесконечности, и при $mQ = 1$ наступает параметрическое возбуждение усилителя.

§ 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

1. Блок-схема экспериментальной установки

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Помимо параметрического усилителя, экспериментальная установка содержит генератор накачки, три вспомогательных усилителя и блок питания. Необходимость в использовании вспомогательных усилителей вызвана тем, что параметрический усилитель работает с малыми напряжениями накачки. В данной установке максимальная амплитуда напряжения накачки имеет величину порядка 0,1 В. Напряжение сигнала на колебательных контурах усилителя много меньше, чем напряжение накачки. Вспомогательные

усилители используются для того, чтобы облегчить измерение и наблюдение этих напряжений на экране осциллографа. Два усилителя используются для усиления напряжений на колебательных контурах параметрического усилителя. Выходные клеммы этих усилителей выведены на переднюю панель экспериментальной установки и снабжены надписями « $KU(\omega_1)$ » и « $KU(\omega_2)$ ». Усилители сигналов, появляющихся на колебательных контурах, снабжены полосовыми фильтрами. Это исключает помехи при исследовании малых сигналов в колебательных контурах параметрического усилителя. Усилитель напряжения на первом контуре параметрического усилителя имеет фильтр с полосой пропускания от 180 кГц до 350 кГц. Усилитель напряжения на втором контуре параметрического усилителя имеет полосу пропускания от 340 кГц до 600 кГц.

Третий вспомогательный усилитель в экспериментальной установке служит для усиления напряжения накачки. Он имеет коэффициент усиления, равный пяти. Выходные клеммы этого усилителя снабжены надписью « $U_n \times 5$ ».

2. Параметрический усилитель

Принципиальная схема параметрического усилителя показана на рис. 4. Колебательные контуры параметрического усилителя состоят из индуктивностей L_1 и L_2 , конденсаторов переменной ёмкости C_1 и C_2 . Оси конденсаторов выведены на переднюю панель экспериментальной установки, снабжены ручками и шкалами, по которым можно определить величины ёмкостей C_1 и C_2 . С помощью переключателя П1А параллельно контуру L_1, C_1 подключается дополнительный конденсатор $C'_1 = 100$ пф. Переключатель П1А связан переключателем П1Б, который может замыкать и размыкать контур L_2, C_2 , причем, когда переключатель П1Б замкнут, переключатель П1А разомкнут, и наоборот. Благодаря этому, когда контур L_2, C_2 замкнут, схема представляет собой одноконтурный усилитель с контуром L_1, C_1 . Когда же контур L_2, C_2 разомкнут, устройство превращается в двухконтурный усилитель, при этом в первый колебательный контур включается дополнительный конденсатор C'_1 , что понижает резонансную частоту этого контура.

Колебательные контуры L_1, C_1 и L_2, C_2 связаны с помощью двух полупроводниковых кремниевых диодов КВ104А. Ёмкость этих диодов изменяется под действием напряжения накачки. Напряжение накачки подаётся на диоды от генератора e_n через высокочастотный трансформатор Tr . Диоды последовательно включены в цепь вторичной обмотки трансформатора. Последовательно с диодами включены конденсаторы C_3 и C_4 . Вторичная обмотка трансформатора Tr имеет отвод от средней точки. Из схемы видно, что трансформатор, два диода КВ104А и конденсаторы C_3, C_4 образуют симметричную мостовую схему. Напряжение накачки приложено к

одной диагонали моста (концы вторичной обмотки трансформатора), а колебательные контуры L_1, C_1 и L_2, C_2 подключены ко второй диагонали (средняя точка вторичной обмотки трансформатора и общая клемма конденсаторов C_3 и C_4). Благодаря этому, при условии, что схема симметрична, напряжение накачки, приложенное к диодам КВ104А, не проникает в колебательные контуры усилителя. Конденсаторы C_3 и C_4 позволяют подать на диоды КВ104А, помимо напряжения накачки, ещё постоянное напряжение смещения. Это необходимо для измерения коэффициента модуляции емкости. Напряжение смещения подается на диоды через резисторы R_3, R_4 . Величина сопротивления резисторов R_3, R_4 выбрана достаточно большой, чтобы резисторы не вносили существенных потерь в колебательные контуры L_1, C_1 и L_2, C_2 . Напряжение смещения подается на диоды от стабилизированного источника питания через переключатель П2А, имеющий три положения. С помощью этого переключателя можно установить напряжение смещения равным $-0,1$ В; 0 ; $+0,1$ В. При установке переключателя П2А в среднее положение (напряжение смещения равно нулю) переключатель П2Б, расположенный на одной оси с переключателем П2А, соединяет клеммы диодов КВ104А, связанные с резисторами R_3 и R_4 . Это сделано для того, чтобы исключить возможность появления напряжения автоматического смещения из-за детектирования диодами КВ104А переменных напряжений накачки и сигналов. Напряжение усиленного сигнала подается на колебательный контур L_1, C_1 (или L_2, C_2) с клемм « $\mathcal{E}(\omega_1)$ » (или « $\mathcal{E}(\omega_2)$ ») через резистор R_1 (или R_2) с достаточно большим сопротивлением, чтобы не снижать добротность контуров L_1, C_1 и L_2, C_2 .

3. Методика измерений

Целью экспериментальной части данной работы является измерение коэффициента модуляции емкости, проверка условия возбуждения одноконтурного параметрического усилителя, исследование амплитудно-частотной характеристики одноконтурного и двухконтурного параметрических усилителей.

Величина коэффициента модуляции ёмкости m измеряется при исследовании одноконтурного параметрического усилителя. Величина m в этом случае определяется соотношением (15):

$$m = \frac{\Delta C}{2(C_0 + C_1)}$$

При выполнении данной работы максимальное значение амплитуды накачки имеет величину порядка $0,1$ В. При таких малых переменных напряжениях на полупроводниковых диодах их ёмкость практически линейно зависит от

напряжения накачки. Гармоническое напряжение накачки вызывает изменение ёмкости также по гармоническому закону, причем амплитуду изменения ёмкости ΔC можно измерить, не прикладывая к диоду высокочастотное напряжение накачки. Для этого достаточно изменить напряжение смещения (постоянное!) на величину амплитуды накачки U_n и измерить вызванное этим приращение ΔC ёмкости. Именно такая методика используется в данной работе. В этом случае коэффициент модуляции ёмкости можно представить в виде

$$m = \frac{C(U_0 + U_n) - C(U_0)}{2C(U_0)} \quad (17)$$

Здесь $C(U_0)$ — ёмкость колебательного контура при напряжении смещения, равном U_0 ; $C(U_0 + U_n)$ — ёмкость колебательного контура при напряжении смещения, равном $U_0 + U_n$. Коэффициент модуляции ёмкости зависит от напряжения смещения и амплитуды напряжения накачки. В данной работе рекомендуется использовать напряжение смещения, равное нулю, амплитуда же накачки может быть различной. Для того чтобы упростить определение коэффициента модуляции ёмкости m при различных амплитудах накачки, воспользуемся тем, что при малых напряжениях накачки m практически прямо пропорциональна амплитуде накачки. Поэтому в данной работе рекомендуется измерить коэффициент m при амплитуде накачки $U_1 = 0,1$ В, а расчет коэффициента модуляции m для других значений амплитуды накачки провести, пользуясь линейным соотношением

$$m = m_1 \frac{U_n}{0,1 \text{ В}}, \quad (18)$$

где m_1 — коэффициент модуляции ёмкости, измеренной для амплитуды накачки $U_1 = 0,1$ В, U_n — амплитуда накачки, для которой определяется коэффициент модуляции m .

В процессе экспериментальной проверки условия возбуждения одноконтурного параметрического усилителя его колебательный контур настраивается на частоту $f_n/2$, после чего напряжение накачки плавно увеличивают до наступления параметрического возбуждения. По измеренной величине амплитуды накачки рассчитывается коэффициент модуляции ёмкости m . Добротность Q колебательного контура усилителя рассчитывается по измеренным значениям его резонансной частоты и ширины полосы пропускания. Измеренные таким образом значения m и Q используются для проверки соотношения

$$Qm = 1,$$

определяющего условия возбуждения одноконтурного параметрического генератора.

При исследовании параметрических регенеративных усилителей экспериментально снимаются их амплитудно-частотные характеристики, соответствующие различным величинам коэффициента усиления. Изменение коэффициента усиления достигается за счёт регулировки амплитуды накачки.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Измерение коэффициента модуляции емкости

1. Измерить частоту генератора накачки, используя частотомер или осциллограф. В последнем случае подать на вход «У» осциллографа напряжение с клемм « $U_n \times 5$ », а на вход «Х» — напряжение с генератора стандартных сигналов. Изменяя настройку генератора, добиться, чтобы на экране осциллографа фигура Лиссажу имела вид эллипса. В этом случае частота ГСС равна частоте f_n генератора накачки.
2. Переключатель П1 (см. рис. 4) перевести в положение «одноконтурный усилитель». Установить амплитуду накачки, равную нулю. Настроить первый контур на частоту $f_n / 2$. Для этого подключить ГСС к клеммам « $\mathcal{E}(\omega_1)$ », а осциллограф к клеммам « $KU(\omega_1)$ ». Установить максимальное усиление на осциллографе. Настроить ГСС на частоту $f_n / 2$. Установить напряжение смещения, равное нулю. Изменяя емкость конденсатора C_1 и амплитуду напряжения на выходе ГСС, настроить первый контур на частоту $f_n / 2$ при минимальной амплитуде ГСС, допускающей четкую фиксацию резонанса по максимуму амплитуды на экране осциллографа. По шкале конденсатора C_1 определить емкость настроенного конденсатора $C_n(0)$. Установить напряжение смещения, равное $-0,1$ В и аналогично определить емкость настроенного конденсатора $C_n(-0,1$ В). Найти изменение емкости конденсатора ΔC_k при изменении смещения на $0,1$ В:

$$\Delta C_k = C_n(0) - C_n(-0,1 \text{ В}).$$

Пользуясь известным значением индуктивности контура $L_1 = 412$ мкГн и измеренным значением резонансной частоты, рассчитать полную емкость контура по формуле:

$$C_k = \frac{1}{\pi^2 f_n^2 L}$$

Используя полученные значения ΔC_k и C_k , с помощью (17) найти коэффициент модуляции емкости m_1 при напряжении смещения $U_0 = 0$ и амплитуде накачки $U_n = 0,1$ В.

2. Проверка условия возбуждения одноконтурного параметрического усилителя

Подключить ГСС к гнездам « $\mathcal{E}(\omega_1)$ ». Осциллограф подключить к гнездам « $KU(\omega_1)$ ». Установить напряжение смещения и амплитуду накачки равными нулю. Настроить первый контур на частоту $f_n/2$. Отключить ГСС. Увеличить амплитуду накачки до наступления параметрического возбуждения. При этом на экране осциллографа появится гармонический сигнал с частотой $f_n/2$. Изменяя в небольших пределах емкость конденсатора C_1 и амплитуду накачки, подстроить первый контур таким образом, чтобы возбуждение наступало при минимальной амплитуде накачки. Измерить амплитуду накачки с помощью вольтметра. С помощью соотношения (18) определить коэффициент модуляции емкости m . Проводя расчет величины m , необходимо принять во внимание, что вольтметр проградуирован в эффективных значениях, а напряжение накачки усиливается вспомогательным усилителем с коэффициентом усиления равным пяти.

Уменьшить амплитуду накачки до нуля. Подключить ГСС к гнездам « $\mathcal{E}(\omega_1)$ ». Перестраивая ГСС, с помощью осциллографа определить полосу пропускания Δf колебательного контура по уровню 0,7 от максимума резонансной кривой. Измерения проводить при минимальной амплитуде, допускающей надежные измерения. Определить добротность колебательного контура по соотношению

$$Q = \frac{f_n}{2\Delta f}.$$

Найденные значения Q и m использовать для проверки соотношения

$$Qm = 1.$$

3. Исследование одноконтурного параметрического усилителя

Установить амплитуду накачки и напряжение смещения равными нулю. К гнездам « $\mathcal{E}(\omega_1)$ » подключить ГСС. К гнездам « $KU(\omega_1)$ » — осциллограф. Настроить ГСС и колебательный контур усилителя на частоту $f_n/2$. Установить на выходе ГСС такое напряжение, чтобы при максимальной чувствительности осциллографа амплитуда на экране была

равна, к примеру, 25 мм. Увеличить амплитуду накачки настолько, чтобы максимальная амплитуда сигнала на экране осциллографа возросла на 20÷50 %. Из-за неточной настройки ГСС на частоту $f_n/2$ на экране осциллографа будут наблюдаться биения. Установить такую частоту развертки, чтобы на экране было видно несколько периодов биений. Подстраивая ГСС, установить частоту биений равную 50÷100 Гц. С помощью конденсатора C_1 подстроить параметрический усилитель, добиваясь максимальной амплитуды биений на экране осциллографа. Уменьшить напряжение на выходе ГСС в 5 раз, при этом амплитуда выходного сигнала на экране осциллографа тоже уменьшится. Теперь, увеличивая амплитуду накачки, добиться, чтобы амплитуда биений в максимуме достигла прежней величины (в нашем примере — 25 мм). При этом коэффициент усиления параметрического усилителя будет равен пяти. Перестраивая частоту ГСС и измеряя амплитуду напряжения с помощью осциллографа, снять зависимость коэффициента усиления от частоты.

Уменьшить напряжение на выходе ГСС еще в два раза, и, увеличивая амплитуду накачки, снова довести амплитуду биений в максимуме до прежней величины (у нас — 25 мм) при частоте биений 50÷100 Гц. Максимальное значение коэффициента усиления при этом будет равно десяти. Перестраивая частоту ГСС, снять амплитудно-частотную характеристику при таком усилении. Построить обе зависимости на одном графике, сравнить полосу пропускания усилителя в обоих случаях.

4. Исследование двухконтурного регенеративного параметрического усилителя

Перевести переключатель П1 (см. рис. 4) в положение «двухконтурный усилитель». Установить напряжение смещения и амплитуды накачки равными нулю. Подключить ГСС к гнездам « $\mathcal{E}(\omega_1)$ », осциллограф — к гнездам « $KU(\omega_1)$ ». Подстраивая емкость C_1 , настроить первый колебательный контур на какую-либо частоту f_1 в интервале 190÷210 кГц по максимуму выходного сигнала. Переключить ГСС на гнезда « $\mathcal{E}(\omega_2)$ », переключить осциллограф на гнезда « $KU(\omega_2)$ ». Настроить второй колебательный контур на комбинационную частоту $f_2 = f_n - f_1$.

Переключить ГСС на гнезда « $\mathcal{E}(\omega_1)$ », осциллограф — на гнезда « $KU(\omega_1)$ ». Установить на выходе ГСС напряжение примерно 40 мВ и частоту f_1 . Изменяя чувствительность осциллографа, добиться, чтобы удвоенная амплитуда колебаний на экране осциллографа составляла около 25 мм. Увеличивая амплитуду накачки, добиться увеличения амплитуды колебаний на экране на 20÷50 %. Слегка подстроить конденсаторы C_1 и C_2 таким образом, чтобы амплитуда колебаний на экране приняла максимальное значение. Эту операцию повторить несколько раз. Уменьшить амплитуду

накачки до нуля и, изменяя чувствительность осциллографа, добиться, чтобы при выходном напряжении ГСС, равном 40 мВ, удвоенная амплитуда колебаний на экране осциллографа составляла примерно 5 мм (т. е., уменьшилась в 5 раз по сравнению с исходной величиной). Увеличивая амплитуду накачки, добиться, чтобы удвоенная амплитуда сигнала на экране осциллографа достигла прежнего уровня (25 мм). Коэффициент усиления по напряжению при этом равен пяти. Еще раз убедиться, что емкости конденсаторов C_1 и C_2 соответствуют максимуму амплитуды. Перестраивая ГСС по частоте и измеряя амплитуду колебаний с помощью осциллографа, снять зависимость коэффициента усиления от частоты при $K_{\text{макс}} = 5$.

Настроить ГСС на частоту максимального усиления. Уменьшить выходное напряжение ГСС в два раза. Увеличивая амплитуду накачки, довести удвоенную амплитуду на экране осциллографа до прежней величины (25 мм) При этом $K_{\text{макс}} = 10$. Снять зависимость коэффициента усиления от частоты.

Построить обе зависимости на одном графике, сравнить полосу пропускания усилителя для обоих случаев.

5. Исследование двухконтурного регенеративного усилителя-преобразователя

Не изменяя настройку контуров усилителя после упражнения 4, переключить осциллограф на гнезда « $KU(\omega_2)$ ». Перестроить ГСС на частоту, соответствующую максимуму амплитуды колебаний на осциллографа. Регулируя амплитуду накачки, установить амплитуду колебаний на экране осциллографа равной примерно 25 мм. (Если после упражнения 4 выходное напряжение ГСС не было изменено, то коэффициент усиления равен десяти.) Снять амплитудно-частотную характеристику усилителя.

Настроить ГСС на частоту максимального усиления. Увеличить напряжение на выходе ГСС в два раза. Уменьшая амплитуду накачки, довести амплитуду колебаний на экране осциллографа до прежнего значения (примерно 25 мм). Получим значение $K_{\text{макс}} = 5$. Снять амплитудно-частотную характеристику усилителя.

Построить обе зависимости на одном графике, сравнить полосу пропускания усилителя для обоих значений коэффициента усиления.

Литература:

1. Блекуэлл Л., Коцебу К. Параметрические усилители на полупроводниковых диодах. Пер. с англ. М., «Мир», 1964. 244 с.
2. И.Н. Бобров. Параметрические усилители и преобразователи СВЧ. Киев, «Техника», 1969. 240 с.

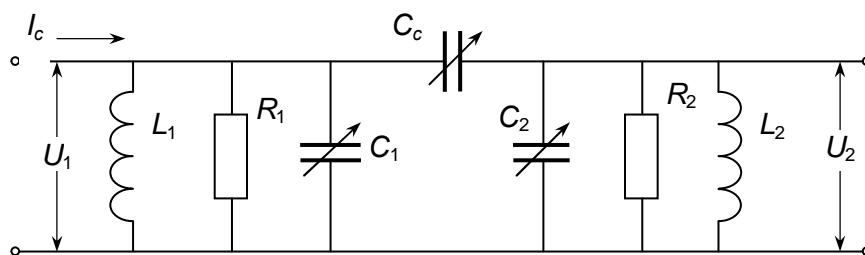


Рис. 1.

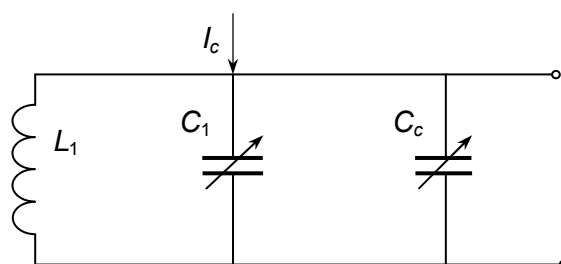


Рис. 2.

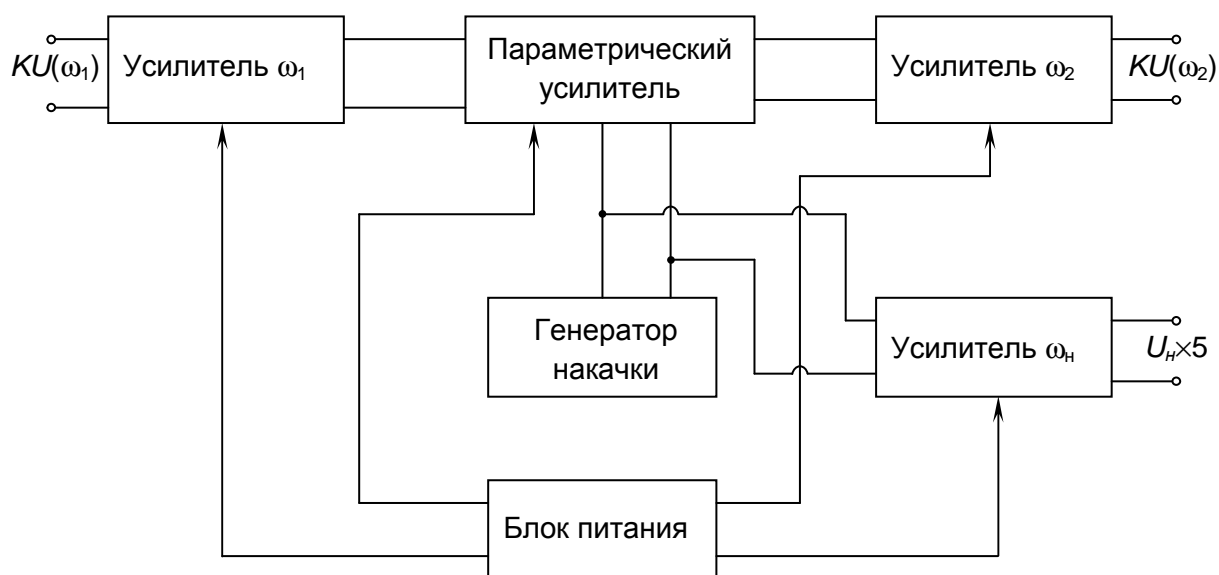


Рис. 3.

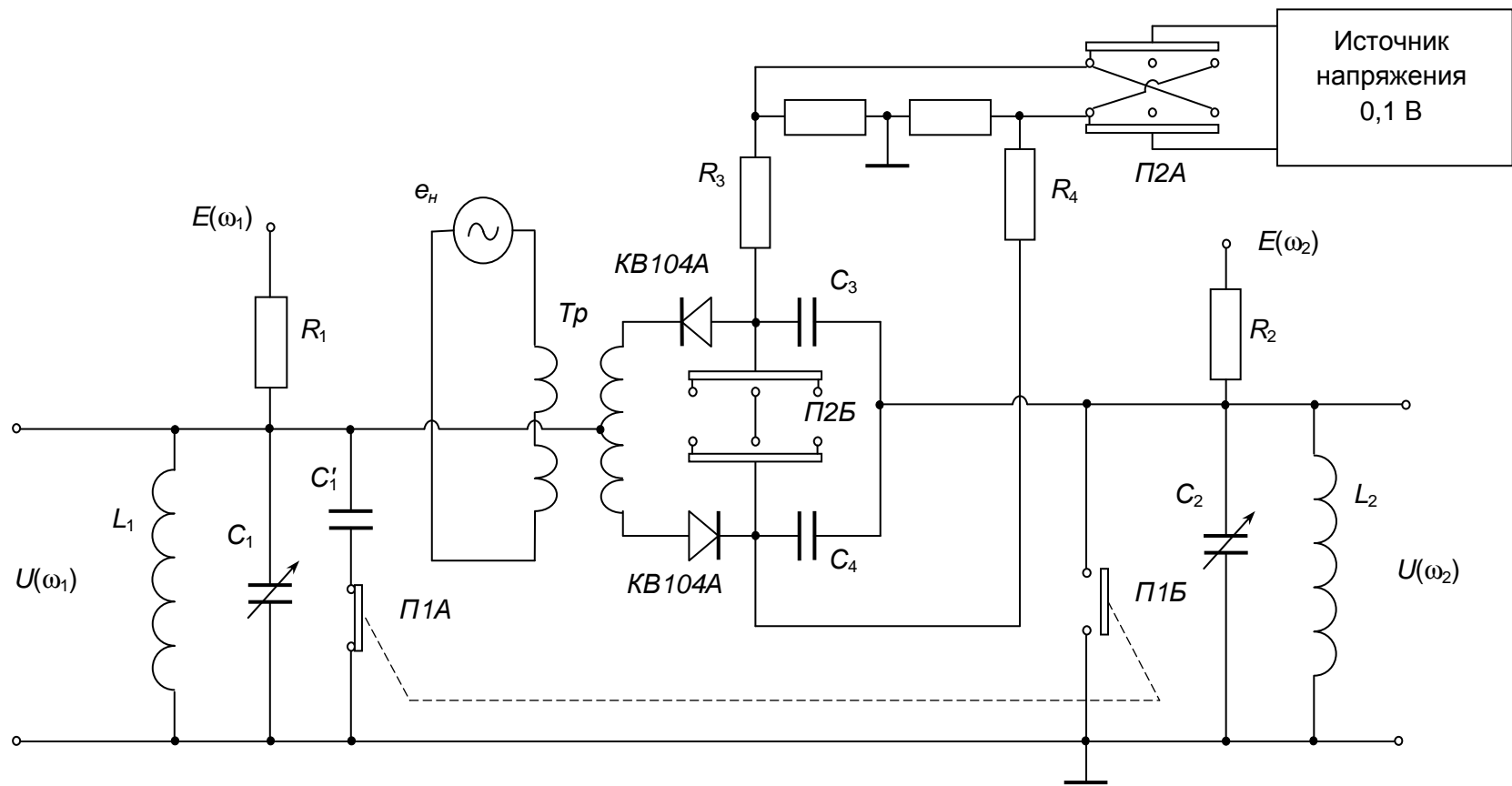


Рис. 4.