

Устойчивость работы резонансного усилителя.

Введение 5мин

Учебные вопросы (основная часть)

1. Влияние внутренней обратной связи на устойчивость резонансного усилителя. 20мин

2. Коэффициент устойчивости и коэффициент устойчивого усиления каскада. 30мин

3. Методы повышения устойчивости избирательных усилителей. 20мин

4. Переходные (нестационарные) процессы в ИУ 10мин

Заключение 5мин

Литература:

Основная:

1. Румянцев К.Е. Прием и обработка сигналов: Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Академия, 2004, с. 6-11.

2. Колосовский Е.А. Устройства приема и обработки сигналов: Учебное пособие для вузов.- М.: Горячая линия-Телеком, 2007. - с. 5-57

3. Ю.Н. Максимов, П.Ю. Меус, Д.П. Николаев, Д.Ф. Смирнов. Радиоприемные устройства: Учебник для ВВУЗов.— ВИККИ им. А.Ф.Можайского, 1991.

4. ГОСТ 25928-83. Совместимость РЭС электромагнитная. Методы оценки МЭС локальных группировок РЭС КИП РК, с. 2.

4.1 Влияние внутренней обратной связи на устойчивость резонансного усилителя

2.1. Общие сведения об обратных связях в усилительных каскадах

В любом реальном усилительном каскаде существуют цепи обратной связи, через которые происходит связь входных и выходных элементов усилителя. Причинами возникновения обратных связей в усилителях являются:

- общие цепи питания и регулировок;
- магнитные и электрические связи между входными и выходными элементами усилительного каскада;
- наличие проводимости обратного действия усилительного прибора Y_{12} .

Рис.1



Через проводимость Y_{12} в усилителе может возникнуть как положительная обратная связь (ПОС), так и отрицательная (ООС). При ПОС напряжение с выхода усилителя на его вход поступает в фазе с входным напряжением, а при ООС, наоборот, в противофазе. Наиболее опасна в усилителях ПОС. Передача на входной контур с выхода усилителя через проводимость Y_{12} дополнительного напряжения, совпадающего по фазе с напряжением входного сигнала, эквивалентна подключению к этому контуру дополнительной вносимой проводимости, активная составляющая которой может иметь отрицательный знак. Вносимая отрицательная проводимость компенсирует собственные потери в контуре и при определенных условиях может привести к самовозбуждению усилителя.

Входной и выходной контуры усилителя настроены на частоту ω_0 и связаны друг с другом через проводимость обратного действия Y_{12} , реактивная составляющая которой носит ёмкостный характер. На частотах $\omega < \omega_0$ оба контура имеют индуктивный характер, и в усилителе выполняется *баланс фаз*. При определенных условиях в нем может наступить *баланс амплитуд*, что приводит к *самовозбуждению* усилителя.

4.1 Влияние внутренней обратной связи на устойчивость резонансного усилителя

2.2 Влияние внутренней обратной связи в усилителе на его работу

Из анализа эквивалентной схемы общее выражение для входной проводимости избирательного усилителя :

$$Y_{вх} = Y_{11} - \frac{Y_{12}Y_{21}}{Y_{22} + Y'_H}$$

Второе слагаемое представляет вносимую проводимость $Y_{вн.ос}$, обусловленную проводимостью обратного действия усилительного прибора

$$\dot{Y}_{вн.ос} = -\frac{\dot{Y}_{12} \dot{Y}_{21}}{\dot{Y}_{22} + \dot{Y}'_H} = G_{вн.ос} + jB_{вн.ос}$$

Соотношение можно представить следующим образом

$$\dot{Y}_{вн.ос} = \frac{P_1}{P_2} \dot{Y}_{12} \dot{K}$$

С учетом подстановки K из выражения получим

$$\dot{K} = -\frac{P_1 P_2 \dot{Y}_{21}}{G_3 (1 + j\xi)}$$

$$\dot{Y}_{вн.ос} = -\frac{P_1^2 \dot{Y}_{12} \dot{Y}_{21}}{G_3 (1 + j\xi)}$$

$$\dot{Y}_{вн.ос} = \frac{P_1^2 |Y_{21}| |Y_{12}| (1 - j\xi)}{G_3 (1 + \xi^2)} (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

откуда

$$G_{вн.ос}(\xi) = \frac{P_1^2 |Y_{21}| |Y_{12}| \cos \varphi + \xi \sin \varphi}{G_3 (1 + \xi^2)}, \quad (7)$$

$$B_{вн.ос}(\xi) = \frac{P_1^2 |Y_{21}| |Y_{12}| \sin \varphi - \xi \cos \varphi}{G_3 (1 + \xi^2)}$$

При этом **активная** составляющая вносимой проводимости шунтирует входной колебательный контур, а **реактивная** составляющая емкостного характера будет расстраивать его, т.е. изменять резонансную частоту.

4.1 Влияние внутренней обратной связи на устойчивость резонансного усилителя

2.2 Влияние внутренней обратной связи в усилителе на его работу

$$G_{\text{вн.ос}}(\xi) = \frac{p_1^2 |Y_{21}| |Y_{12}| \frac{\cos \varphi + \xi \sin \varphi}{1 + \xi^2}}, \quad (7)$$

Анализ выражения $G_{\text{вн.ос}}(\xi)$ показывает, что при обобщенной расстройке $\xi < 0$ активная составляющая вносимой проводимости отрицательна $G_{\text{вн.ос}}(\xi) < 0$, что свидетельствует о появлении положительной обратной связи в каскаде, и, наоборот, при $\xi > 0$ обратная связь всегда отрицательна и при этом $G_{\text{вн.ос}}(\xi) > 0$. Характер зависимости активной составляющей вносимой проводимости $G_{\text{вн.ос}}(\xi)$ от обобщенной расстройки для различных значений фазового сдвига φ показан на рис.3.

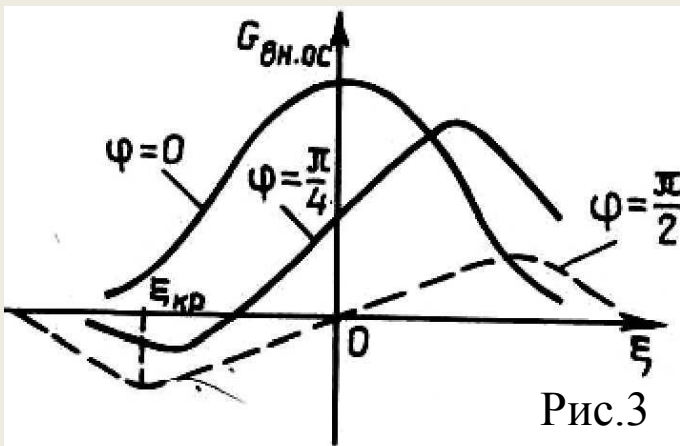


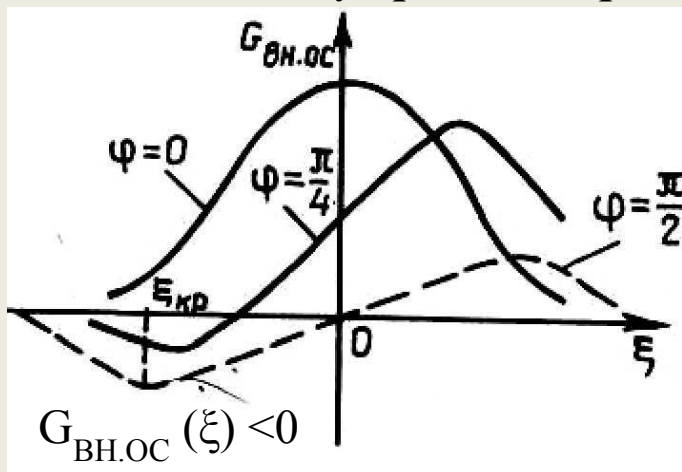
Рис.3

При **ООС** входной контур дополнительно шунтируется положительной активной составляющей $G_{\text{вн.ос}}(\xi) > 0$, что приводит к уменьшению добротности этого контура или к увеличению полосы пропускания и, следовательно, к снижению коэффициента усиления предыдущего каскада.

При **ПОС** входной контур дополнительно шунтируется отрицательной активной составляющей $G_{\text{вн.ос}}(\xi) < 0$, что приводит к компенсации потерь входного контура и к его регенерации. Добротность контура при этом увеличивается, а полоса пропускания уменьшается.

4.1 Влияние внутренней обратной связи на устойчивость резонансного усилителя

2.2 Влияние внутренней обратной связи в усилителе на его работу



Наиболее неблагоприятной обобщенной расстройкой является такая расстройка, при которой выражение (7) достигает максимального отрицательного значения (на рис.3, например, $\xi_{кр}$). Это возможно, если $\varphi \neq 0$.

Для нахождения экстремума функции продифференцируем выражение (7) по ξ и приравняем производную к нулю, полагая, что при небольших расстройках в первом приближении Y_{21} и Y_{12} не зависят от частоты:

$$\frac{dG_{вн.ос}(\xi)}{d\xi} = \frac{p_1^2 |Y_{21}| |Y_{12}| (1 + \xi^2) \sin \varphi - 2\xi \cos \varphi - 2\xi^2 \sin \varphi}{G_0 (1 + \xi^2)^2} = 0.$$

Найдем корни уравнения:

$$\xi_{1,2} = -\frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} \pm \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{\sin^2 \varphi} + 1} = \frac{-\cos \varphi \pm 1}{\sin \varphi}.$$

(Положительный и отрицательный «пики» характеристики $G_{вн.ос}$)

С точки зрения возможности самовозбуждения представляет интерес отрицательная расстройка, соответствующая частотам, на которых выполняется баланс фаз.

Корень, определяющий отрицательную расстройку:

$$\xi_2 = -\frac{\cos \varphi + 1}{\sin \varphi} = -\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}.$$

4.1 Влияние внутренней обратной связи на устойчивость резонансного усилителя

2.2 Влияние внутренней обратной связи в усилителе на его работу

Подставив полученное выражение для ξ_2 в (7), получим максимальное значение вносимой отрицательной проводимости в виде

$$G_{\text{вн.осmax}} = -\frac{P_1^2 |Y_{21}| |Y_{12}|}{G_{\Sigma}} \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

Выводы

1. Под устойчивостью работы усилителя понимается сохранение его параметров в заданных пределах, если возмущающие воздействия не превышают допустимой величины. Например, независимо от нагрузки он не должен самовозбуждаться.
2. ОС в усилителе называют передачу части энергии выходного сигнала на вход устройства. Цепь ОС – электрическая цепь, посредством которой осуществляется эта передача. ОС может быть по току или по напряжению, по каскадной и общей, по входу и по выходу и т.д.
3. При ПОС напряжение с выхода усилителя на его вход поступает в фазе с входным напряжением. При ООС все наоборот.
4. При ПОС растет усиление и снижается устойчивость, т.к. при достаточно глубокой возникает самовозбуждение. Кроме того, из-за увеличения неравномерности АЧХ сужается полоса пропускания устройства. При ООС все наоборот.

4.2 Коэффициент устойчивости и коэффициент устойчивого усиления каскада

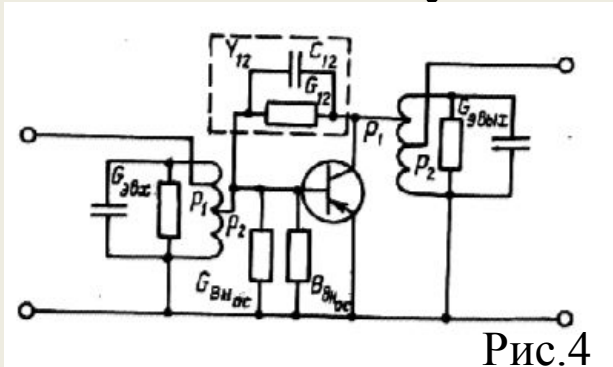


Рис.4

Для оценки устойчивости работы усилителя и определения условий отсутствия самовозбуждения необходимо пересчитать активную составляющую вносимой обратной связи к входному контуру (рис.4).

С учетом коэффициента включения p_2 можно записать эквивалентную проводимость *входного контура* с учетом обратной связи:

$$G_{\text{э.вх.ос}} = G_{\text{э.вх}} + p_2^2 G_{\text{вн.ос}}(\xi).$$

Одним из условий самовозбуждения усилителя является выполнение условия *баланса амплитуд*, $G_{\text{э.вх.ос}} = 0$. С точки зрения устойчивости усилителя рассматриваем худший случай, когда выполняется *баланс фаз*.

Условием отсутствия самовозбуждения является неравенство $G_{\text{э.вх.ос}} > 0$. При выполнении этого условия генерация в усилителе отсутствует, однако контур будет регенерирован (потери уменьшены). Для оценки степени удаленности усилителя от режима самовозбуждения служит *коэффициент устойчивости*.

Под *коэффициентом устойчивости* K_y понимают отношение эквивалентной проводимости входного контура с учетом обратной связи $G_{\text{э.вх.ос}}$ к эквивалентной проводимости этого контура при отсутствии обратной связи $G_{\text{э.вх}}$.

$$K_y = \frac{G_{\text{э.вх.ос}}}{G_{\text{э.вх}}} = \frac{G_{\text{э.вх}} + p_2^2 G_{\text{вн.ос}}(\xi)}{G_{\text{э.вх}}}$$
 коэффициент устойчивости изменяется от нуля до единицы. Так, если $G_{\text{вн.ос}}(\xi) = 0$, то $K_y = 1$ и усилитель абсолютно устойчив. В случае полной компенсации потерь входного контура $G_{\text{э.вх.ос}} = 0$, наступает режим самовозбуждения и $K_y = 0$.

4.2 Коэффициент устойчивости и коэффициент устойчивого усиления каскада

Найдем условие, при котором усилитель будет работать с коэффициентом устойчивости не менее заданного

$$\kappa_y = 1 - \frac{p_1^2 p_2^2 |Y_{21}| |Y_{12}| \sin^2 \varphi / 2}{G_y G_{э.вх}} \geq 0,$$

$$\frac{p_1^2 p_2^2 |Y_{21}| |Y_{12}| \sin^2 \varphi / 2}{G_y G_{э.вх}} \leq (1 - \kappa_y).$$

Или, после преобразований

$$\frac{p_1^2 p_2^2 |Y_{21}|^2}{G^2} \leq (1 - \kappa_y) \frac{|Y_{21}|}{|Y_{12}| \sin^2 \varphi / 2}. \quad (19)$$

Левая часть неравенства (19) представляет собой квадрат резонансного коэффициента усиления, который удовлетворяет заданному коэффициенту устойчивости.

Введем понятие *коэффициента устойчивого усиления* $K_{0уст}$.

Коэффициентом устойчивого усиления $K_{0уст}$ называют максимальный коэффициент усиления каскада, при котором коэффициент устойчивости равен заданному.

Этот коэффициент в соответствии с (19) определяется соотношением

$$K_{0,уст} = \sqrt{\frac{(1 - \kappa_y) |Y_{21}|}{\sin^2 \varphi / 2 |Y_{12}|}}. \quad (20)$$

Следовательно, для того чтобы коэффициент устойчивости был бы не менее заданного, должно выполняться условие:

$$K_0 \leq K_{0уст}.$$

Если выбрать $K_y = 0,9$, а фазовый сдвиг φ принять равным $\pi/2$, то в соответствии с выражением (20) коэффициент устойчивого усиления усилителей можно рассчитывать по формуле

$$K_{0уст} \approx 0,42 \sqrt{\frac{|Y_{21}|}{|Y_{12}|}}.$$

4.3 Методы повышения устойчивости избирательных усилителей

Пассивные методы:

- изменение коэффициентов включения КК;
- включение параллельно контуру шунтирующего сопротивления;
- экранирование КК;
- развязывающие фильтры по цепям питания и регулировок.

Активные методы:

- схемы нейтрализации проводимости обратного действия;
- каскодные схемы;
- схемы ИУ с ОБ.



4.3 Методы повышения устойчивости избирательных усилителей

Для повышения устойчивости избирательных усилителей могут быть использованы *пассивные* и *активные* методы.

Пассивные методы повышения устойчивости основаны на том, что величины, входящие в выражение

$$K_0 = \frac{p_1 p_2 |Y_{21}|}{G_{\Sigma}},$$

для резонансного коэффициента усиления изменяются с целью выполнения неравенства (21)

$$K_0 \leq K_{0уст}. \quad (21)$$

При уменьшении коэффициентов включения и наряду с уменьшением коэффициента усиления в соответствии с формулой

$$G_{\Sigma} = p_1^2 G_1 + G + p_2^2 G_2$$

происходит уменьшение вносимых в контур проводимостей. Это приводит к уменьшению эквивалентной проводимости контура и к сужению его полосы пропускания. Поэтому для сохранения требуемой полосы пропускания усилителя в этом случае к его контуру также дополнительно подсоединяется шунтирующая проводимость.



4.3 Методы повышения устойчивости избирательных усилителей

К *активным методам* повышения устойчивости относятся:

нейтрализация внутренней обратной проводимости электронного прибора внешней обратной связью и каскодное соединение активных элементов, применение схем избирательных усилителей с ОБ.

В случае нейтрализации внутренней обратной проводимости электронного прибора снижается ограничение величины коэффициента усиления, налагаемое условием устойчивости (21) и, следовательно, от усилителя можно получить максимально возможное усиление.

Известны различные *схемы нейтрализации*:

- последовательная,
- параллельная,
- последовательно-параллельная,
- параллельно-последовательная.

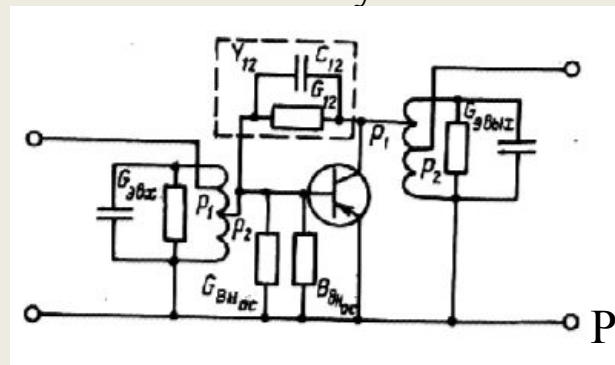


Рис.4

Наиболее широкое распространение получила схема нейтрализации параллельного типа, когда проводимость внешней цепи обратной связи $Y_{нт}$ подсоединена параллельно проводимости обратного действия Y_{12} усилительного прибора и должна удовлетворять условию $Y_{нт} = -Y_{12}$. В этом случае напряжение, поступающее на вход усилителя за счет проводимости $Y_{нт}$, оказывается в противофазе с напряжением, которое подается на вход усилителя за счет проводимости обратного действия. На рис. 4 для примера показана схема усилителя с автотрансформаторным фазоинвертором и параллельной цепью нейтрализации R2, C2

4.3 Методы повышения устойчивости избирательных усилителей

Для повышения устойчивости усилителей широко используют *каскадные схемы*, представляющие собой одну из разновидностей составных схем. В этих схемах выход одного активного элемента соединяется со входом второго непосредственно, без частотно зависимых цепей.

Повышение устойчивости в каскадных схемах происходит за счет того, что общая проводимость обратного действия каскадной схемы по сравнению с обратной проводимостью одного активного элемента оказывается значительно меньше.

Приближенный расчет Y -параметров основных каскадных схем через Y -параметры схемы с ОЭ при одинаковых транзисторах можно осуществить по формулам, приведенным в табл. 1.

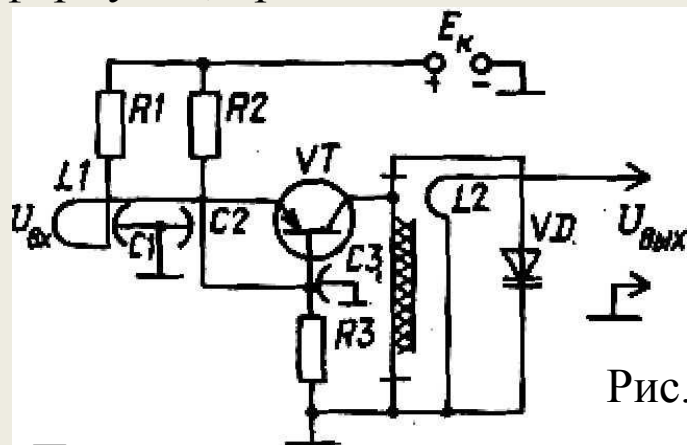


Рис.5

Для повышения устойчивости усилителя на метровых и более коротких волнах усилители могут строиться по схеме с **общей базой** (рис. 5):

Повышение устойчивости таких усилителей по сравнению с усилителями, выполненными по схеме с ОЭ, объясняется уменьшением проводимости обратного действия УП.

Y -параметры каскадной схемы	Схема ОЭ-ОЭ	Схема ОЭ-ОБ	Схема ОК-ОБ
Y_{11}	$Y_{11э} - \frac{Y_{12э}Y_{21э}}{Y_{11э} + Y_{22э}}$	$Y_{11э}$	$0,5Y_{11э}$
Y_{12}	$-\frac{Y_{12э}^2}{Y_{11э} + Y_{22э}}$	$Y_{11э} \frac{Y_{12э} + Y_{22э}}{Y_{21э}}$	$-\frac{Y_{11э}Y_{22э}}{2Y_{21э}}$
Y_{21}	$-\frac{Y_{21э}^2}{Y_{11э} + Y_{22э}}$	$Y_{21э}$	$-0,5Y_{21э}$
Y_{22}	$Y_{22э} - \frac{Y_{12э}Y_{21э}}{Y_{11э} + Y_{22э}}$	$-Y_{12э}$	$-0,5Y_{22э}$

4.3 Методы повышения устойчивости избирательных усилителей

Можно отметить следующие основные особенности избирательных усилителей, выполненных по схеме с ОБ.

1. В таких усилителях фазы входного и выходного *высокочастотных* напряжений совпадают, т.е. поворота фазы выходного напряжения относительно входного не происходит.

2. В усилителях, выполненных по схеме с ОБ, существует сильная отрицательная обратная связь по току. Этот ток создает на входном контуре напряжение, противоположное входному, обеспечивая тем самым отрицательную обратную связь по току. Действие отрицательной обратной связи приводит к уменьшению напряжения на входе усилителя или к увеличению его входной проводимости.

3. В таких усилителях существует также и параллельная обратная связь по напряжению между выходным контуром и входным.

Сравнение усилителей, выполненных по схемам с ОЭ и ОБ, доказывает, что эти схемы практически одинаковы по коэффициенту шума и коэффициенту усиления по напряжению. Усилитель, выполненный по схеме с ОБ, превосходит усилитель, выполненный по схеме с ОЭ, по коэффициенту устойчивости ($K_{\text{уст}}$) и коэффициенту устойчивого усиления ($K_{\text{устм}}$), но имеет малый коэффициент усиления по мощности. Входная проводимость усилителя, выполненного по схеме с ОБ, равна примерно проводимости усилительного прибора и значительно превосходит входную проводимость усилителя, выполненного по схеме с ОЭ.

Повышение устойчивости таких усилителей по сравнению с усилителями, выполненными по схеме с ОЭ, объясняется уменьшением проводимости обратного действия УП.



4.3 Методы повышения устойчивости избирательных усилителей

Выводы.

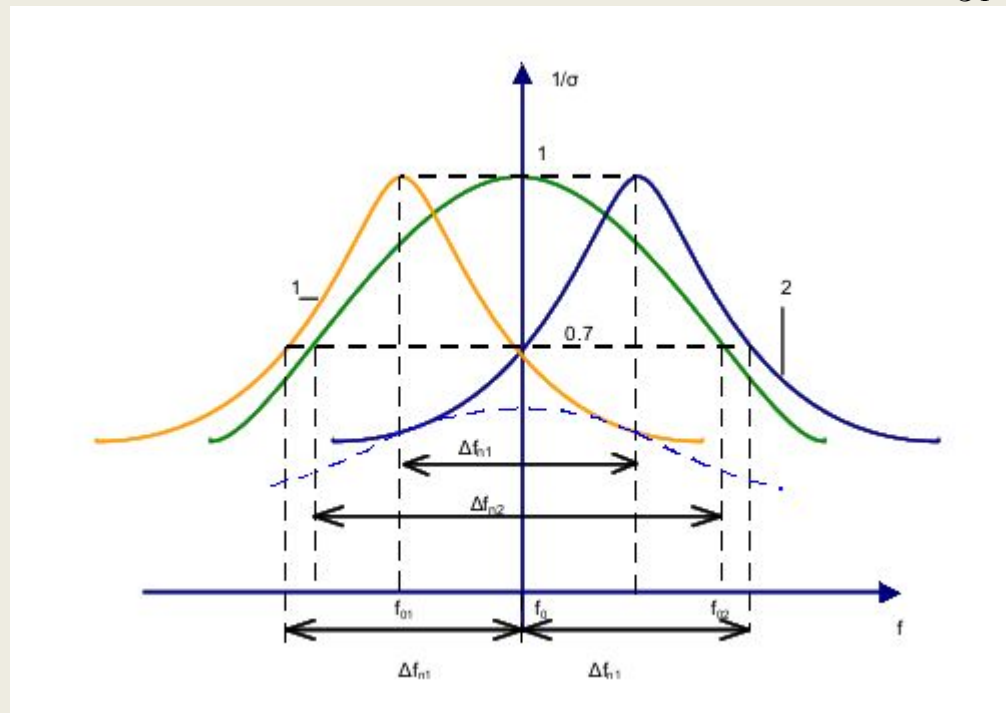
1. Численную оценку устойчивости работы РУ необходимо выполнять для получения возможности еще на этапе проектирования обеспечивать максимальное (требуемое) усиление при отсутствии условий самовозбуждения.
2. Под коэффициентом устойчивости работы РУ (каскада) понимают отношение эквивалентной проводимости входного контура с учетом обратной связи к эквивалентной проводимости этого контура при отсутствии обратной связи.
3. Многокаскадное построение РУ позволяет добиться большего по сравнению с одиночным каскадом усиления, но условия обеспечения устойчивой работы становятся сложнее.
4. Устойчивость работы РУ обеспечивается пассивными и активными методами.
5. При каскадном включении активных элементов собственная проводимость обратной связи составного активного элемента может сокращаться на три порядка. Т.о., увеличивается максимальный коэффициент усиления и устойчивость работы схемы. Кроме того, Ш схемы практически не отличается от Ш первого активного элемента. Усилитель, выполненный по схеме с ОБ, превосходит усилитель, выполненный по схеме с ОЭ, по коэффициенту устойчивости и коэффициенту устойчивого усиления, но имеет малый коэффициент усиления по мощности.
6. Включение активных элементов по схеме с ОБ позволяет добиться большей по сравнению со схемой с ОЭ устойчивости. Но такая схема проигрывает в усилении по току и по мощности при равном Ш.

4.4 Многокаскадные усилители с двойками расстроенных каскадов



4.4.1 Многокаскадные усилители с двойками расстроенных каскадов

Отличие рассматриваемого усилителя от резонансного состоит в том, что в каждой паре соседних каскадов один из контуров настраивается на частоту f_{01} , а другой – на частоту f_{02} . Величина расстройки контуров $\Delta f_0 = f_0 - f_{01} = f_{02} - f_0$ выбирается значительно меньшей, чем величина средней частоты полосы пропускания усилителя f_0 . При этом можно считать, что резонансные коэффициенты усиления обоих каскадов K_{01} одинаковы, а симметрия результирующей характеристики избирательности обеспечивается равенством эквивалентных затуханий контуров $d_{\Sigma 1} = d_{\Sigma 2} = d_{\Sigma}$.



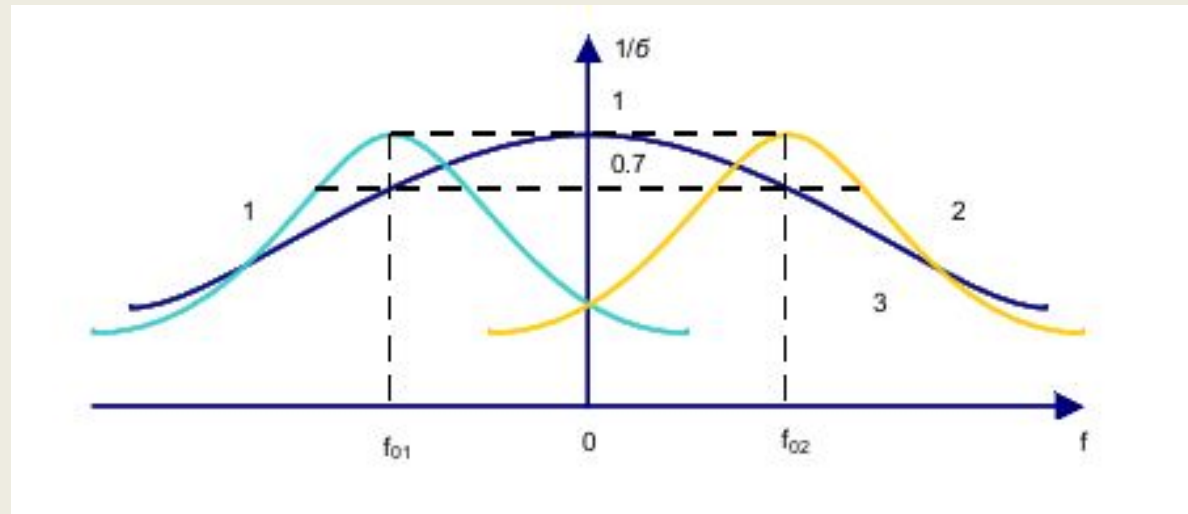
Возможность получения более широкой полосы пропускания при одном и том же коэффициенте усиления

4.4 Многокаскадные усилители с тройками расстроенных каскадов



4.4.2 Многокаскадные усилители с тройками расстроенных каскадов

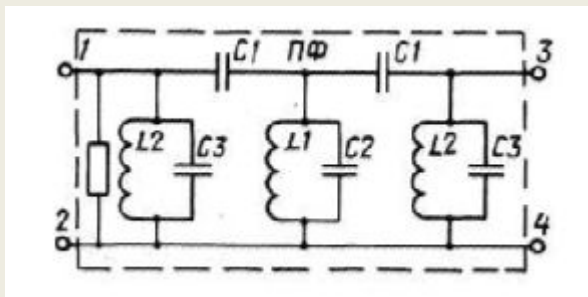
Полосовой фильтр усилителя с тройками расстроенных каскадов образуется тремя соответствующим образом настроенными колебательными контурами трех соседних каскадов. При этом, как показано на рис. 3, один из контуров настраивается на среднюю частоту полосы пропускания f_0 , а два других образуют расстроенную пару.



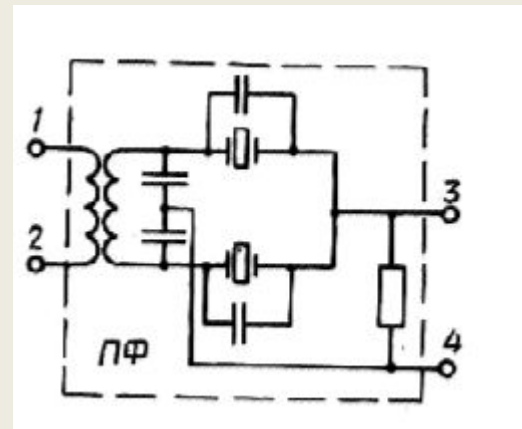
Возможность получения более широкой полосы пропускания при одном и том же коэффициенте усиления

4.4 Усилители с нагрузкой в виде ФСС

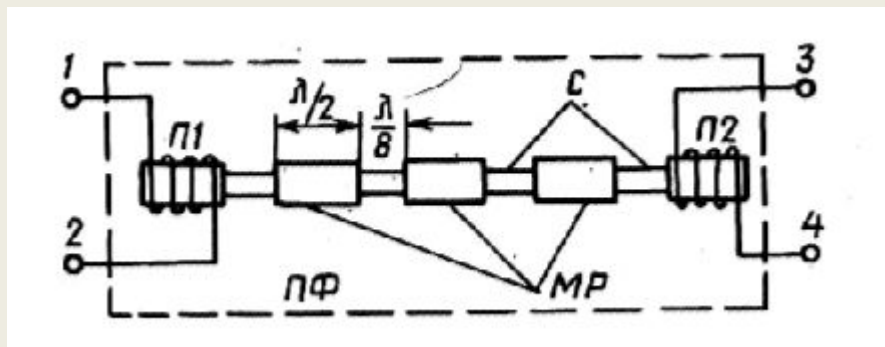
4.4.3 Многокаскадные усилители с нагрузкой в виде ФСС



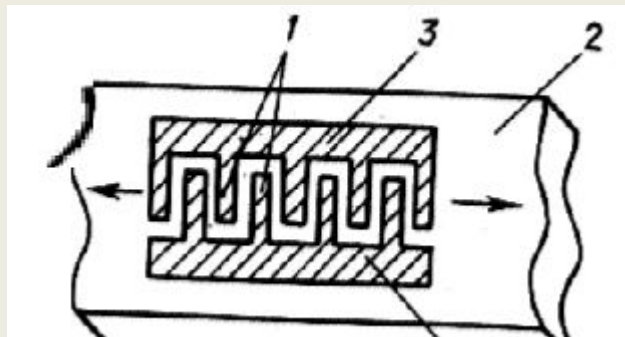
Многозвенные электрические фильтры, $K_{\text{п}} < 1.2$,



Кварцевые фильтры (пьезоэффект), $K_{\text{п}} < 1.2$, $df \sim \text{КГц}$



Электромеханические фильтры (магнитострикционный эффект), $F_c < 1 \text{ МГц}$, $K_{\text{п}} < 1.2$



Фильтры на ПАВ, $K_{\text{п}} < 1.2$