

НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



УЧЕБНАЯ СТОЙКА УРПС

**РАДИОПРИЁМНЫЕ И ПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА
ЧАСТЬ II
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ
ЧАСТОТЫ (УПЧ).**

Тула, 2012 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ (УПЧ).

Цель работы: исследовать теоретические принципы построения схемы усилителя промежуточной частоты (УПЧ), экспериментально определить параметры сигналов в контрольных точках схемы.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Общие сведения.

Усилитель промежуточной частоты (УПЧ) в супергетеродинном радиоприёмнике размещается после преобразователя частоты и выполняет следующие функции:

- обеспечивает основное усиление сигнала до величины, необходимой для нормальной работы демодулятора (коэффициент усиления УПЧ по напряжению обычно составляет $10^3 - 10^6$);
- обеспечивает избирательность приёмника по соседнему каналу ($\sigma_{ск}=20 - 60$ дБ);
- повышает чувствительность РПУ в целом благодаря частотной селекции сигнала на фоне шума (особенно в приёмнике СВЧ диапазона с диодным смесителем без УРЧ).

УПЧ работает на фиксированной частоте f_0 , что позволяет упростить его конструкцию и применять для повышения избирательности сложные системы фильтров. АЧХ УПЧ определяет частотную характеристику приёмника в целом, полоса пропускания Блока Высокой Частоты (БВЧ) практически равна полосе УПЧ.

Существуют два вида требований к амплитудно-частотной и фазочастотной характеристикам УПЧ в зависимости от вида принимаемых сигналов:

1) для приёмника АМ сигналов и импульсных сигналов АЧХ стремятся сделать близкой к прямоугольной, причём в пределах полосы пропускания создать равномерное усиление, а вне полосы пропускания обеспечить необходимое ослабление мешающих сигналов соседних станций; при этом специальных требований к форме ФЧХ не предъявляется;

2) для приёмников сигналов с угловой модуляцией (ФМ и ЧМ сигналов) задаются требования на линейность ФЧХ, а к форме АЧХ особых требований не предъявляют, за исключением того, что она должна обеспечивать необходимую избирательность по соседнему каналу.

Далее, при определении параметров УПЧ, мы будем задаваться только видом АЧХ. На практике наиболее распространены три формы АЧХ УПЧ (рис. 1.1):

- с одним максимумом («одногогорбая»);
- с максимально плоской вершиной;
- с несколькими максимумами («многогорбая»).

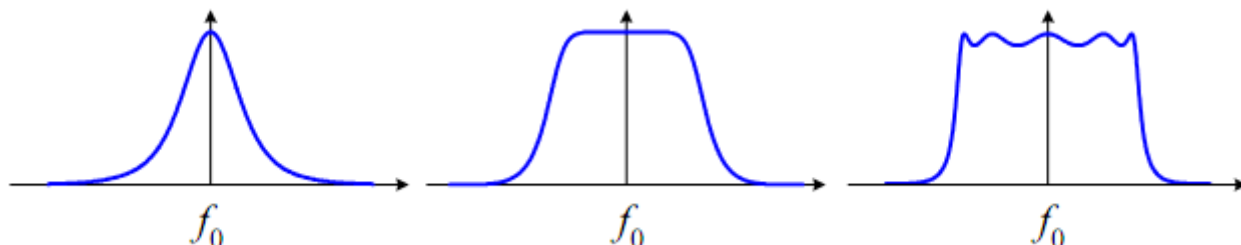


Рис. 1.1. Виды АЧХ УПЧ

Степень близости АЧХ УПЧ к идеально прямоугольной характеризуется коэффициентом прямоугольности:

$$K_{\text{пк}} = \frac{\Pi_{\kappa}}{\Pi_{0,707}} > 1, \quad (1.1)$$

где Π_{κ} – полоса пропускания по заданному уровню $\kappa < 1/\sqrt{2}$;

$\Pi_{0,707}$ – полоса пропускания по стандартному уровню $1/\sqrt{2} \approx 0,707$;

κ – уровень требуемого ослабления на границе полосы пропускания (обычно 0,1 или 0,01) (Рис. 1.2.).

Чем ближе коэффициент прямоугольности к единице, тем круче склоны АЧХ, т.е. тем она ближе к прямоугольной. В соответствии с используемым способом обеспечения частотной избирательности УПЧ делят на две большие группы:

- УПЧ с распределённой избирательностью – когда каждый каскад вносит равный вклад как в усиление, так и в избирательность УПЧ в целом;
- УПЧ с сосредоточенной избирательностью – когда избирательность обеспечивается одним (обычно первым) узкополосным каскадом, а усиление – остальными, широкополосными, каскадами.

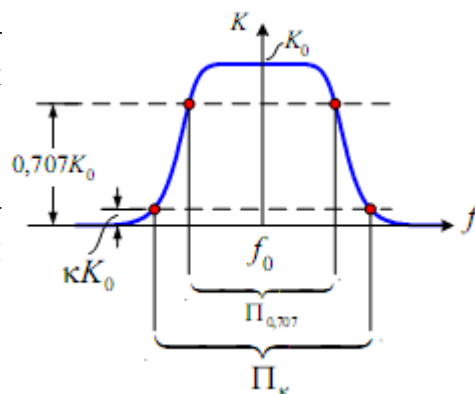


Рис. 1.2. К определению коэффициента прямоугольности АЧХ

УПЧ с распределённой избирательностью строятся с использованием следующих типов каскадов:

с одиночными настроенными в резонанс контурами;	} в узкополосных УПЧ ($P_{\text{упч}} / f_0 < 0,1$)
с двухконтурными полосовыми фильтрами (связанными контурами);	
с фильтрами сосредоточенной селекции: LC-фильтрами, электромеханическими и пьезоэлектрическими фильтрами	
пары и тройки каскадов с симметрично расстроенными контурами	} в широкополосных УПЧ

Для радиовещательных приёмников значение промежуточной частоты определяется стандартом:

- 465 кГц – для приёмников АМ сигналов;
- 6,5 МГц и 10,7 МГц – для приёмников ЧМ сигналов.

Для приёмников радиолокаторов и радиосистем передачи информации диапазона СВЧ типовые значения промежуточной частоты составляют 30 МГц, 60 МГц, 90 МГц, 200 МГц.

Полоса пропускания УПЧ определяется шириной спектра сигнала и, следовательно, зависит от типа сигнала и вида модуляции. Типовые значения ширины спектра некоторых видов сигналов составляют:

радиотелефонная связь с АМ –	6 кГц
радиовещание с АМ –	9-13 кГц
радиовещание с ЧМ –	250 кГц
импульсная радиолокация –	1-10 МГц

Поскольку узкополосный УПЧ легче реализовать, чем широкополосный, то чем больше ширина спектра сигнала, тем выше должна быть промежуточная частота с тем, чтобы УПЧ оставался узкополосным.

Анализ УПЧ с одинаково настроенными каскадами.

Рассмотрим узкополосный УПЧ с распределённой избирательностью, когда каждый каскад вносит равный вклад как в усиление, так и в избирательность УПЧ в целом. Укрупнённая структурная схема такого УПЧ приведена на рис. 1.3. Все каскады идентичны, т. е. имеют одинаковый резонансный коэффициент усиления K_0 , настроены на одну и ту же частоту f_0 и имеют одинаковые АЧХ.

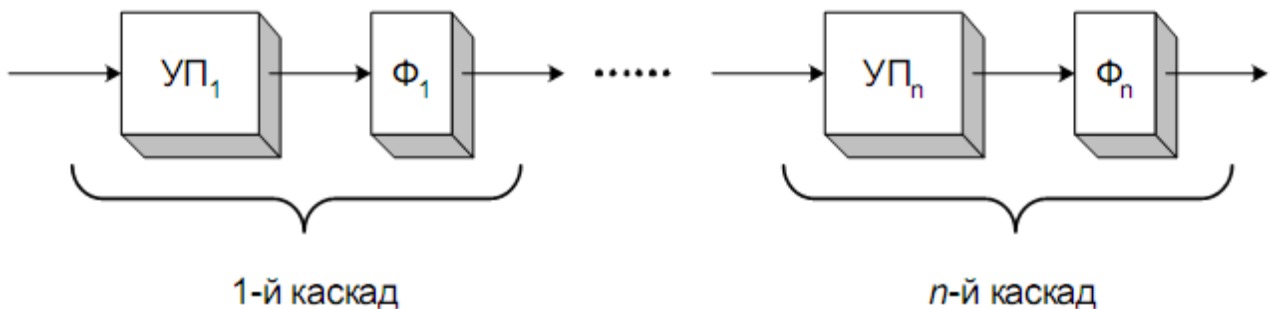


Рис. 1.3. Укрупнённая структурная схема УПЧ с распределённой избирательностью. УП – усилительный прибор; Ф – фильтр

Определим, как зависят параметры n -каскадного узкополосного УПЧ от количества каскадов.

Резонансный коэффициент усиления УПЧ равен произведению коэффициентов усиления всех каскадов:

$$K_{0n} = K_{0(1)} K_{0(2)} \dots K_{0(n)} = K_0^n. \quad (1.2)$$

Если УПЧ построен так, что коэффициент усиления каждого каскада не зависит от числа каскадов, то K_{0n} с увеличением n экспоненциально возрастает.

Амплитудно-частотная характеристика УПЧ равна произведению АЧХ всех каскадов:

$$K_n(f) = K_{(1)}(f) K_{(2)}(f) \dots K_{(n)}(f) = K(f)^n. \quad (1.3)$$

Для дальнейшего анализа её удобно, во-первых, рассматривать как функцию обобщённой расстройки ξ , а во-вторых, представить как произведение резонансного коэффициента усиления УПЧ K_{0n} и нормированной АЧХ $\kappa_n(\xi)$:

$$K_n(f) = K_{0n} \kappa_n(\xi(f)),$$

где $\xi(f) = Q_{\text{кз}} \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)$. Поскольку каскады узкополосны, то $\xi(f) \approx \frac{2\Delta f}{P_{\text{кз}}}$, где $\Delta f = f - f_0$ – отклонение частоты сигнала от частоты настройки УПЧ, $P_{\text{кз}}$ – эквивалентная полоса пропускания одного каскада.

Нормированная АЧХ одного резонансного каскада равна:

$$k(\xi) = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}},$$

поэтому нормированная АЧХ n-каскадного усилителя определяется как:

$$k_n(\xi) = k_{(1)}(\xi)k_{(2)}(\xi)\dots k_{(n)}(\xi) = k(\xi)^n = \frac{1}{\left(\sqrt{1 + \xi^2}\right)^n}. \quad (1.4)$$

Поскольку при $\xi \neq 0$ $k(\xi) < 1$, то $k_2(\xi) = k(\xi)^2 < k(\xi)$, $k_3(\xi) = k(\xi) \cdot k_2(\xi) < k_2(\xi)$ и т.д. Следовательно, с увеличением числа каскадов нормированная АЧХ УПЧ сжимается (Рис. 1.4) и полоса пропускания усилителя уменьшается:

$$P_{0,707\,1} > P_{0,707\,2} > P_{0,707\,3} > \dots > P_{0,707\,n}.$$

Кроме этого, изменяется и форма АЧХ – её склоны становятся более крутыми, следовательно, уменьшается коэффициент прямоугольности.

Определим, как изменяется полоса пропускания и коэффициент прямоугольности АЧХ УПЧ с увеличением числа каскадов. Для этого зададим некоторый уровень k , по которому измеряется полоса пропускания, и найдём обобщённую расстройку ξ_k , соответствующую этому уровню. Затем выразим полосу пропускания P_k через ξ_k .

Для n-каскадного УПЧ в соответствии с (1.4) обобщённая расстройка ξ_k , соответствующая границе полосы пропускания находится из условия:

$$\frac{1}{\left(\sqrt{1 + \xi_k^2}\right)^n} = k \text{ или } \left(1 + \xi_k^2\right)^{-n/2} = k,$$

$$\text{откуда } \xi_k = \sqrt{k^{-2/n} - 1}.$$

Для узкополосных каскадов УПЧ можно считать, что:

$$\xi_{\kappa} = \frac{2\Delta f_{\kappa}}{\Pi_{\kappa}}$$

Здесь Δf_{κ} – расстройка по частоте, соответствующая уровню κ и равная половине полосы пропускания, измеренной по этому уровню:

$$\Delta f_{\kappa} = \Pi_{\kappa} / 2$$

Следовательно:

$$\xi_{\kappa} = \frac{\Pi_{\kappa}}{\Pi_{\kappa}}$$

и

$$\Pi_{\kappa} = \Pi_{\kappa} \xi_{\kappa} = \Pi_{\kappa} \sqrt{\kappa^{-2/n} - 1}. \quad (1.5)$$

При $\kappa = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ формула (6.5) определяет полосу пропускания УПЧ по стандартному уровню:

$$\Pi_{0,707n} = \Pi_{\kappa} \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^{-2/n} - 1} = \Pi_{\kappa} \sqrt{\sqrt[n]{2} - 1}. \quad (1.6)$$

Зависимость $\Pi_{0,707n}$ – убывающая, что подтверждает качественный вывод о сужении полосы пропускания УПЧ при увеличении числа каскадов.

При проектировании УПЧ необходимо решить обратную задачу – определить требуемую полосу пропускания одного каскада по заданной полосе УПЧ. Из (1.6) следует, что эквивалентная полоса пропускания одного каскада равна:

$$\Pi_{\kappa} = \frac{\Pi_{\text{УПЧ}}}{\sqrt{\sqrt[n]{2} - 1}} = \Pi_{\text{УПЧ}} \psi(n), \quad (1.7)$$

где $\psi(n) = \frac{1}{\sqrt{\sqrt[n]{2} - 1}}$ – функция расширения полосы.

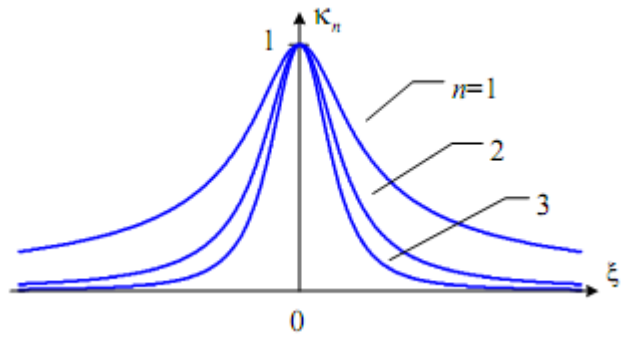


Рис. 1.4. Нормированная АЧХ УПЧ при различном числе каскадов.

$\Pi_{\text{УПЧ}} = \Pi_{0,707n}$ — полоса пропускания УПЧ.

Функция $\psi(n)$ показывает, во сколько раз полоса пропускания каждого каскада УПЧ должна превышать полосу всего усилителя. Её график приведён на рис. 1.5.

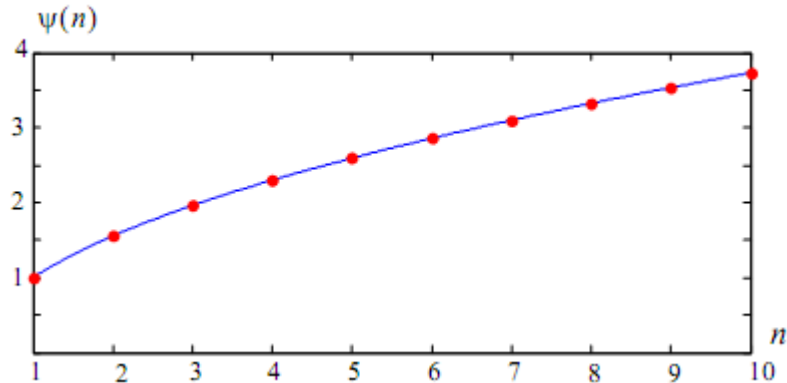


Рис. 1.5. Функция расширения полосы.

Теперь найдём зависимость коэффициента прямоугольности АЧХ от числа каскадов. Подставляя в определение коэффициента прямоугольности (1.1) выражения для полосы пропускания по заданному уровню (1.5) и по стандартному уровню $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ (1.6), получим:

$$K_{\text{пк}} = \frac{\Pi_{\text{кн}}}{\Pi_{0,707n}} = \frac{\Pi_{\text{кэ}} \sqrt{\kappa^{-2/n} - 1}}{\Pi_{\text{кэ}} \sqrt{\sqrt[n]{2} - 1}} = \sqrt{\frac{\kappa^{-2/n} - 1}{\sqrt[n]{2} - 1}}. \quad (1.8)$$

Величина коэффициента прямоугольности для двух значений уровня κ приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Коэффициент прямоугольности АЧХ УПЧ
с одинаково настроенными каскадами**

n	1	2	3	4	...	10	...	∞
$K_{\text{п } 0,1}$	10	4,7	3,7	3,4	...	2,9	...	2,6
$K_{\text{п } 0,01}$	100	16	9,0	7,0	...	4,6	...	3,6

Видно, что с увеличением числа каскадов УПЧ коэффициент прямоугольности уменьшается, стремясь к некоторому предельному значению, которое зависит от уровня κ .

Некоторые выводы.

- 1) Для того чтобы при увеличении числа каскадов обеспечить заданную полосу пропускания УПЧ, необходимо расширять полосу пропускания каждого каскада.
- 2) Полоса пропускания одного каскада прямо пропорциональна требуемой полосе УПЧ.
- 3) С увеличением числа каскадов УПЧ (при условии поддержания неизменной полосы пропускания усилителя) коэффициент прямоугольности АЧХ уменьшается, стремясь к некоторому предельному значению. Можно показать, что при этом форма АЧХ УПЧ приближается к гауссовой кривой $\kappa(f) = e^{-[c(f-f_0)]^2}$, где $c = \sqrt{2 \ln 2} / \Pi_{\text{УПЧ}}$.
- 4) С увеличением числа каскадов УПЧ его усиление растёт до определённого значения n , после чего оно уменьшается. Это вызвано необходимостью расширения полосы пропускания каждого каскада, что снижает его усиление.
- 5) Чем выше единичное усиление, тем больше достижимый коэффициент усиления УПЧ. При этом значение числа каскадов, при котором коэффициент усиления максимален, увеличивается.

УПЧ с сосредоточенной избирательностью.

Если радиоприёмник должен работать в условиях интенсивных внешних помех, то избирательность УПЧ необходимо обеспечить возможно ближе к его входу, чтобы предотвратить нелинейные искажения из-за перегрузки усилительных каскадов. В таких случаях целесообразно строить УПЧ по схеме с сосредоточенной избирательностью, включая полосовой фильтр сосредоточенной селекции (ФСС) непосредственно на входе усилителя. В качестве ФСС используются:

- многозвенные *LC*-фильтры;
- активные *ARC*-фильтры;
- электроакустические фильтры;
- электромеханические фильтры.

На рис. 1.6 показан пример схемы двух каскадов УПЧ с многозвенным *LC*-фильтром. В этом фильтре применена емкостная связь между колебательными контурами. Для согласования ФСС с выходом предыдущего и входом последующего каскадов используется автотрансформаторная связь. АЧХ такого ФСС может быть как много горбой (для фильтров Чебышева), так и с максимально плоской вершиной (для фильтров Баттерворта).

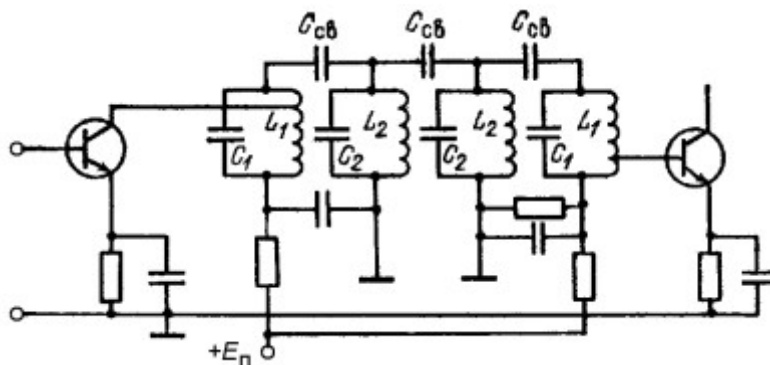


Рис. 1.6. УПЧ с многозвенным *LC*-фильтром

ARC-фильтры строятся на основе широкополосного усилителя и *RC*-цепи, включённой в контур обратной связи. Для получения требуемой АЧХ используются многозвенные фильтры. Такие фильтры удобны для микросхеменной реализации и могут применяться при не очень высокой промежуточной частоте.

В электроакустических фильтрах электрический сигнал с помощью пьезоэлектрического эффекта преобразуется в механические колебания акустической системы – резонатора. В выходном преобразователе за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта происходит преобразование механических колебаний в электрические. В качестве материала,

обладающего пьезоэлектрическими свойствами, (пьезоэлектрика) используются кристаллы кварца и пьезокерамика.

В зависимости от того, какие акустические волны возбуждаются и распространяются в пьезоэлектрике, различают два типа электроакустических фильтров – на объёмных акустических волнах и на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Фильтры на объёмных акустических волнах (к ним относятся кварцевые и пьезокерамические резонаторы) используются в качестве дискретных частотно-избирательных элементов.

Поскольку механические резонаторы обладают гораздо более высокой добротностью, чем колебательный контур, то такие фильтры имеют очень узкую полосу пропускания. На их основе могут быть построены многосвязные фильтры с АЧХ, близкой к прямоугольной.

Простейшая схема фильтра с одним кварцевым резонатором показана на рис. 1.7. Конденсатор $C_{\text{комп}}$, на который подаётся напряжение сигнала, противофазное напряжению, прикладываемому к кварцевому резонатору, служит для компенсации паразитной ёмкости между электродами резонатора (для удобства настройки обычно используют подстроечный конденсатор).

Фильтры на ПАВ представляют собой помещённую в герметичный корпус подложку монокристаллического пьезоэлектрика, на поверхности которой располагаются тонкоплёночные металлические электроды (рис. 1.8).

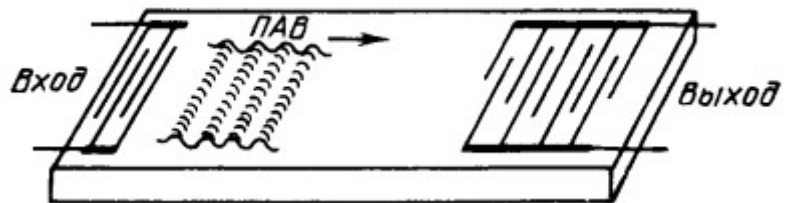


Рис. 1.7. Фильтр на одном кварцевом резонаторе

Рис. 1.8. Фильтр на поверхностных акустических волнах

При подаче на входные электроды напряжения сигнала в результате пьезоэлектрического эффекта образуется поверхностная акустическая волна, которая распространяется в направлении выходных электродов. Напряжение на выходе фильтра представляет собой взвешенную сумму копий входного сигнала, задержанных на время $\tau_i = \frac{x_i}{v_{\text{ПАВ}}}$, где x_i – координата i -го электрода выходного преобразователя, $v_{\text{ПАВ}}$ – скорость распространения ПАВ:

$$u_{\text{вых}}(t) = \sum_{i=1}^{N_2} A_i s_i(t) = \sum_{i=1}^{N_2} A_i u_{\text{вх}}(t - x_i / v_{\text{ПАВ}}) = \sum_{i=1}^{N_2} A_i u_{\text{вх}}(t - \tau_i),$$

т.е. фильтр на ПАВ представляет собой аналоговый фильтр с конечной импульсной характеристикой. Путём задания формы и расположения электродов можно реализовать фильтр с требуемой импульсной характеристикой, вид которой определяется заданной формой АЧХ. С уменьшением рабочей частоты размеры фильтра на ПАВ увеличиваются, поэтому они применяются, главным образом, на частотах выше 10 МГц.

Электромеханический фильтр состоит из входного магнитострикционного преобразователя электрического сигнала в механические колебания, системы механических резонаторов и выходного преобразователя механических колебаний в напряжение. Поскольку каждый механический резонатор обладает высокой добротностью, то можно получить АЧХ фильтра, близкую к прямоугольной. Такие фильтры используются при сравнительно невысокой промежуточной частоте (например, на частоте 465 кГц).

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

1. **Ефимов И. Е., Козырь И. Я.** Основы микроэлектроники — М-Связь, 1975. — 272 с.
2. **Справочник** по интегральным микросхемам/ Под ред. Б В Та-рабрина. 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Энергия, 1980. — 816 с
3. **Банк М. У.** Аналоговые интегральные схемы в радиоаппаратуре. — М.: Радио и связь, 1981. — 136 с.
4. **Полевые** транзисторы и интегральные микросхемы. Технический каталог. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1975. — 112 с.
5. **Батушев В. А.** Электронные приборы. 2-е изд. перераб и доп — М.: Высшая школа, 1980. — 383 с.
- Г Бедрековский М. А., Волга В. В., Кручинкин Н. С.** Микропроцессоры. — М.: Радио и связь, 1981. — 94 с.
7. **Бедрековский М. А., Кручинкин Н. С., Подолян В. А.** Микропроцессоры. — М.: Радио и связь, 1981. — 72 с.
8. **Микропроцессорные БИС и микро-ЭВМ/** Под ред. А. А. Васен-кова. — М.: Сов. радио, 1980. — 280 с.
9. Микро-ЭВМ «Электроника С-5» и их применение/ Под ред. В. М. Пролейко. — М.: Сов. радио, 1980. — 160 с.
10. **Микросхемы** и их применение. — М.: Энергия, 1978. — 248 с.
11. **Огнев И. В., Шамаев Ю. М.** Проектирование запоминающих устройств. — М.: Высшая школа, 1979. — 320 с.
12. **Прангишвили И. В.** Микропроцессоры и микро-ЭВМ. — М.: Энергия, 1979. — 232 с.
13. **Степаненко И. П.** Основы микроэлектроники. — М.: Сов. радио, 1980. — 424 с.
14. **Проектирование** мнкроэлектронных цифровых устройств/ Под ред. С. А. Майорова. — М.: Сов. радио, 1977. — 272 с.
15. **Кузнецов В.** и др. Развитие микро-ЭВМ семейства «Электроника С-5» и систем на их основе. — Электронная промышленность, 1979, № И, 12, с. 9 — 12.

ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»