

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДОВ УПЧ С ФИЛЬТРАМИ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Основы приема и обработки сигналов»
для студентов очной и заочной форм обучения
по направлениям 11.03.01 — «Радиотехника»,
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
и специальности 11.05.01 — «Радиоэлектронные
системы и комплексы»

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 621.396.62 (75)

Р е ц е н з е н т:

А.А. Савочкин - канд. техн. наук, доцент
кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Ответственный за выпуск:

И.Л. Афонин - заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»,
доктор техн. наук, профессор

Составители: С.Р. Зиборов, А.В. Лукьянчиков

Исследование каскадов УПЧ с фильтрами сосредоточенной селекции:
учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторной работы по дисциплине
«Основы приема и обработки сигналов» для студентов очной и заочной форм
обучения по направлениям подготовки 11.03.01 — радиотехника, 11.04.02 —
инфокоммуникационные технологии и системы связи и специальности 11.05.01
— радиоэлектронные системы и комплексы / сост. С.Р. Зиборов,
А.В. Лукьянчиков. — Севастополь: СевГУ, 2018. — 19 с.

Целью учебно-методического пособия является оказание помощи студентам всех форм
обучения при выполнении лабораторной работы «Исследование каскадов УПЧ с фильтрами
сосредоточенной селекции» по дисциплине «Основы приема и обработки сигналов».

УДК 621.396.62 (75)

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию на
заседании учёного совета Института радиоэлектроники и информационной
безопасности, протокол № 6 от 25 мая 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы	4
2. Краткие теоретические сведения.....	4
3. Описание лабораторной установки.....	11
4. Подготовка лабораторной установки к работе	13
5. Исследование каскада УПЧ с LC -фильтром.....	14
6. Исследование каскада УПЧ с пьезоэлектрическим фильтром.....	15
7. Исследование каскада УПЧ с электромеханическим фильтром.....	16
8. Содержание и оформление отчета.....	16
9. Вопросы для самоконтроля.....	17
Библиографический список	18
Приложение А Образец титульного листа	19

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение принципов построения и исследование характеристик каскадов усилителей промежуточной частоты (УПЧ) радиоприёмных устройств, содержащих фильтры сосредоточенной избирательности (ФСИ).

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В супергетеродинном приемнике УПЧ обычно представляет собой узкополосный многокаскадный усилитель, настроенный на фиксированную промежуточную частоту, который обеспечивает основное усиление принимаемого сигнала, а также избирательность приемника по соседнему каналу.

Схемотехнически УПЧ строятся по принципу распределенной или сосредоточенной частотной избирательности [1 — 4].

В УПЧ с распределенной избирательностью каждый каскад представляет собой резонансный усилитель с одиночным LC -контуром или с двумя связанными LC -контурами. При этом каждый каскад УПЧ вносит свой вклад как в частотную избирательность, так и в усиление, то есть эти параметры распределены между каскадами.

В УПЧ с сосредоточенной избирательностью частотная избирательность может обеспечиваться с помощью одного пассивного ФСИ, а усиление — с помощью многокаскадного широкополосного усилителя. Такое разделение функций между узлами УПЧ позволяет повысить его устойчивость и реализовать многокаскадный широкополосный усилитель в интегральном исполнении. Обычно ФСИ включают либо на выходе преобразователя частоты, либо на выходе первого каскада УПЧ, уровень выходного сигнала которых не превышает милливольт. При этом амплитуда колебаний, возбуждаемых в резонаторах ФСИ, не выходит за пределы линейного участка амплитудной характеристики резонаторов, и нелинейных искажений сигнала не наблюдается.

Различают следующие виды пассивных ФСИ [1, 2, 3]:

- ФСИ с колебательными LC -контурами (LC -фильтры);
- ФСИ с механическими резонаторами.

Пассивные LC -фильтры используются на частотах от 100 кГц до 300 МГц. На частотах ниже 100 кГц создание таких фильтров затруднено увеличением габаритов катушек индуктивности. На частотах выше 300 МГц параметры индуктивностей и емкостей становятся соизмеримыми с паразитными параметрами монтажа и поэтому трудно реализуемы с заданной точностью. Для получения хорошей прямоугольности АЧХ пассивные LC -фильтры содержат от 4 до 10 слабосвязанных колебательных контуров.

В качестве примера на рис. 1 изображена электрическая схема LC -фильтра с пятью контурами, связь между которыми осуществляется с помощью емкостей $C_{св1} \dots C_{св4}$. Чтобы избежать уменьшения добротности первого и последнего контуров фильтра его вход необходимо подключать к каскаду с большим выходным сопротивлением, а выход — к каскаду с большим входным сопротивлением, либо использовать частичное включение входного и выходного LC -контуров, как показано на рис. 1. В последнем случае коэффициент передачи LC -фильтра может существенно уменьшиться.

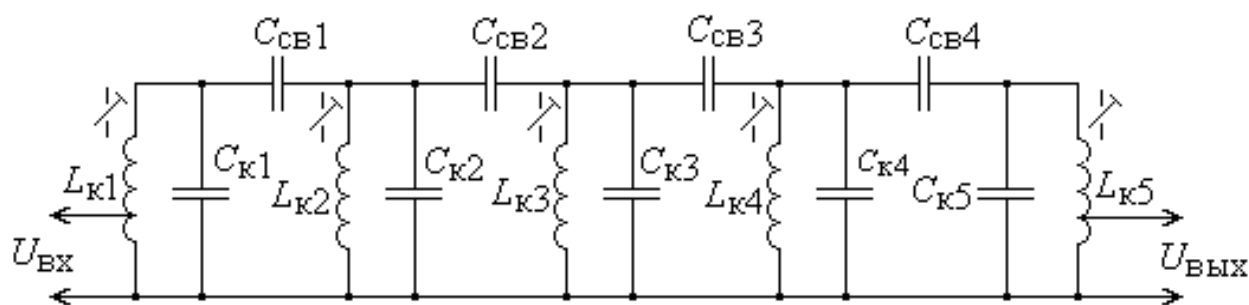


Рис. 1. Электрическая схема LC -фильтра

Достоинствами LC -фильтра являются: монотонно убывающий вид АЧХ в полосе задерживания и возможность коррекции формы АЧХ путём подстройки контуров, используя катушки индуктивности с сердечником.

К недостаткам таких фильтров относятся: невысокая добротность LC -контуров (обычно не более 100), что ограничивает возможности повышения

частотной избирательности, температурная и временная нестабильность АЧХ, обусловленная нестабильностью параметров L и C -элементов, а также большие габариты [3, 4].

Поэтому в настоящее время более широкое применение в радиоприёмниках находят фильтры, в которых электрические колебания преобразуются в механические колебания и затем фильтруются с помощью высокочастотных механических резонаторов, после чего снова преобразуются в электрические колебания.

Известно, что геометрические размеры как механических, так и электрических резонаторов должны быть соизмеримы с длиной возбуждаемой в них волны. Однако в механических резонаторах возбуждаются акустические волны, а в электрических — электромагнитные волны, которые по физическим свойствам существенно отличаются от акустических волн.

Поскольку скорость распространения акустических волн в твердом теле $V_a \leq 6000$ м/с много меньше скорости распространения электромагнитных волн в свободном пространстве $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, то при одной и той же частоте f длина акустической волны много меньше длины электромагнитной волны. Например, электромагнитные волны с частотой 1 МГц имеют длину волны $\lambda_{\text{э}} = c/f = 3 \cdot 10^8 / 10^6 = 300$ м, а акустические волны с той же частотой — всего лишь $\lambda_a = V_a/f = 6 \cdot 10^3 / 10^6 = 6$ мм. Следовательно, при одной и той же частоте колебаний габариты акустических резонаторов, а значит, и фильтров, построенных на их основе, будут намного меньше габаритов электромагнитного резонатора.

Различают следующие виды фильтров с механическими резонаторами: электромеханические, пьезоэлектрические и пьезомеханические.

Принцип действия **электромеханических фильтров** основан на магнитострикционном эффекте. Прямой магнитострикционный эффект состоит в способности материала деформироваться под действием внешнего магнитного поля, а обратный эффект — в способности материала возбуждать магнитное поле

под действием механической деформации [2, 3]. Материалы, обладающие двумя указанными эффектами, называются магнитострикционными, и к ним относятся никель, феррит, пермаллой, соединения редкоземельных элементов и др.

На рис. 2 показана структура электромеханического фильтра. В качестве возбuditеля и приемника механических колебаний используются поляризованные электромагниты ПЭМ1 и ПЭМ2, каждый из которых состоит из катушки индуктивности с магнитострикционным сердечником и постоянного магнита.

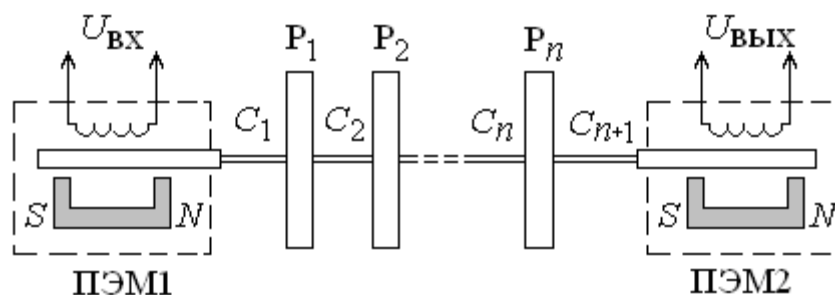


Рис. 2. Структура электромеханического фильтра

Входное напряжение $U_{ВХ}$ промежуточной частоты, приложенное к катушке ПЭМ1, вызывает в ней переменный ток, при протекании которого возникает переменное магнитное поле. Под действием этого поля в магнитострикционном сердечнике возбуждаются продольные механические колебания с промежуточной частотой. С помощью упругих связей $C_1, C_2, \dots, C_n$ эти колебания передаются дисковым резонаторам $P_1, P_2, \dots, P_n$. При совпадении частоты входного напряжения $U_{ВХ}$ с частотой механического резонанса резонаторов амплитуда механических колебаний достигает максимального значения. Колебания последнего резонатора P_n с помощью связи C_{n+1} вызывают продольные колебания сердечника электромагнита ПЭМ2. В результате, возникает переменное магнитное поле, под действием которого в катушке ПЭМ2 наводится ЭДС промежуточной частоты, используемая как выходное напряжение $U_{ВЫХ}$.

Достоинствами электромеханических фильтров являются: высокая добротность ($Q_3 = 10^3 - 10^4$) и хорошая прямоугольность АЧХ ($K_{пр} = 1,7 - 3$), мо-

нотонное нарастание затухания в полосе задерживания, большое входное сопротивление ($R_{\text{вх}} = 2 - 75 \text{ кОм}$), высокая стабильность параметров.

К недостаткам электромеханических фильтров относятся: ограниченный частотный диапазон работы (от 1 кГц до 1 МГц), невозможность перестройки по частоте, наличие паразитных резонансов в полосе задерживания, сложность конструкции, большие габариты и высокая стоимость.

Принцип действия **пьезоэлектрических фильтров** основан на пьезоэлектрическом эффекте. Различают прямой пьезоэлектрический эффект, который состоит в способности материала возбуждать электрическое поле под действием механической деформации, и обратный пьезоэлектрический эффект, который заключается в способности материала деформироваться под действием внешнего электрического поля [1, 3]. Материалы, обладающие обоими указанными эффектами, называются пьезоэлектриками, к которым относятся кварц, некоторые виды керамики, титанат бария и др. Пьезоэлектрические резонаторы могут иметь форму пластин, стержней, дисков, пленок и т. п.

Пьезоэлектрические фильтры изготавливаются на частоты от 10 кГц до 1 ГГц. Деформация, возбуждаемая в резонаторах таких фильтров, может иметь вид либо объемной акустической волны внутри пьезоэлектрика, либо поверхностной акустической волны в поверхностном слое пьезоэлектрика. Пьезоэлектрические фильтры, в которых используются поверхностные акустические волны, называются ПАВ-фильтрами. На рис. 3 показана электрическая схема такого фильтра, содержащего четыре пьезоэлектрических резонатора $ZQ_1 - ZQ_4$ с емкостной связью между ними.

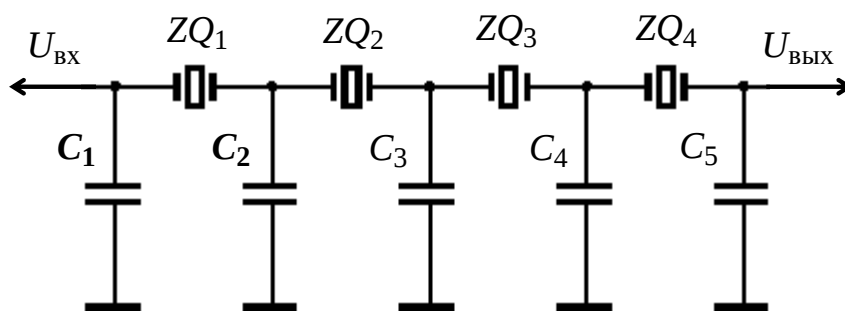


Рис. 3. Электрическая схема пьезоэлектрического фильтра

Пьезоэлектрические фильтры с объемными акустическими волнами используются на частотах от 10 кГц до 30 МГц.

Поскольку добротность пьезоэлектрических резонаторов достаточно высока (у пьезокерамических резонаторов — от 400 до 500, а у кварцевых — от 10000 до 50000), то это позволяет получить полосу пропускания фильтра от нескольких процентов до сотых долей процента от средней частоты АЧХ.

Достоинствами пьезоэлектрических фильтров являются: высокая стабильность и повторяемость параметров, надежность в работе, технологичность и низкая стоимость. Поэтому такие фильтры находят широкое применение, как в бытовой, так и профессиональной радиоаппаратуре. К недостаткам пьезоэлектрических фильтров относятся: невозможность их перестройки по частоте и наличие паразитных резонансов в полосе задерживания.

На рис. 4 изображена АЧХ пьезоэлектрического фильтра [4], на примере которой рассмотрим методику определения основных параметров фильтра:

— полоса пропускания по уровню 0,7 относительно максимума АЧХ

$$\Pi_{0,7} = f_2 - f_1, \quad (1)$$

где f_1 , f_2 — граничные частоты полосы пропускания;

— средняя частота полосы пропускания

$$f_0 = \frac{f_2 + f_1}{2}; \quad (2)$$

— модуль коэффициента передачи на средней частоте f_0 полосы пропускания

$$K_0 = U_0 / U_{\text{вх}}, \quad (3)$$

где U_0 , $U_{\text{вх}}$ — выходное и входное напряжения фильтра на частоте f_0 ;

— коэффициент прямоугольности АЧХ $K_{\text{пр}}$

$$K_{\text{пр}} = \frac{\Pi_{\gamma}}{\Pi_{0,7}}, \quad (4)$$

где Π_γ — полоса пропускания ФСИ по уровню γ (обычно $\gamma = 0,1$);

— частотная избирательность, выраженная в децибелах

$$Se = 20 \lg \frac{K(f)}{K_0}, \quad (5)$$

где $K(f)$ — модуль коэффициента передачи УПЧ на произвольной частоте f ;

— коэффициент передачи на частоте дополнительного (паразитного) резонанса f_d в полосе задерживания

$$K_d = U_d / U_{вх}, \quad (6)$$

где U_d — выходное напряжение фильтра на частоте f_d .

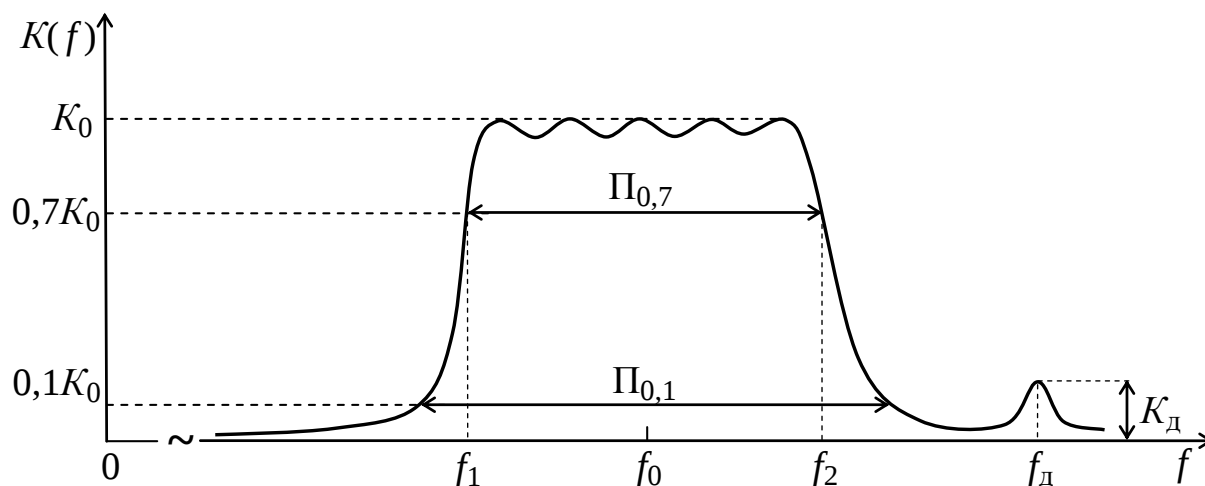


Рис. 4. АЧХ пьезоэлектрического фильтра

На частотах выше 30 МГц используются ПАВ-фильтры. Типовая структура ПАВ-фильтра, показанная на рис. 5, содержит излучающий преобразователь ИП и приёмный преобразователь ПП. Каждый из преобразователей выполнен в виде встречно-штыревой системы электродов, нанесенных методом фотолитографии на поверхность пьезоэлектрической пластины. Под действием высокочастотного входного напряжения $U_{вх}$ в зазорах между электродами излучающего преобразователя возникает переменное электрическое поле, которое вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта материала подложки вызывает механические колебания в ее поверхностном слое, которые распространяются в направлении, перпендикулярном электродам, в виде поверхностных акустических волн. Эти волны вызывают появление между электродами при-

емного преобразователя выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта материала подложки.

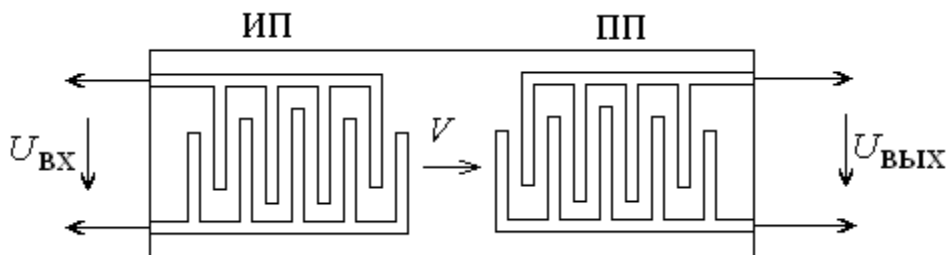


Рис. 5. Структура ПАВ-фильтра

Технические характеристики ПАВ-фильтра зависят от формы и геометрических размеров используемых систем электродов [1, 2].

Пьезоэлектрические ПАВ-фильтры позволяют получить АЧХ, близкую к прямоугольной, с полосой пропускания от 1 % до 100 % относительно средней частоты АЧХ при линейной ФЧХ в пределах полосы пропускания. Затухание ПАВ-фильтров в полосе пропускания не превышает 10 — 15 дБ [1, 2]. ПАВ-фильтры изготавливаются с использованием интегральной технологии, имеют малые габариты и хорошо компонуются с интегральными микросхемами.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 6. изображена структурная схема лабораторной установки, которая состоит из генератора стандартных сигналов ГСС, лабораторного макета, двух милливольтметров переменного напряжения МВ1, МВ2 и цифрового частотомера ЦЧ.

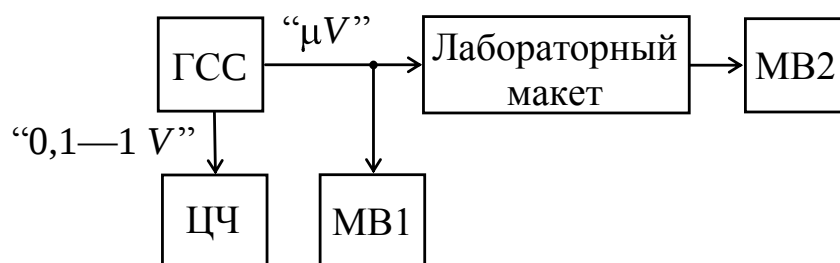


Рис. 6. Структурная схема лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема лабораторного макета показана на рис. 7.

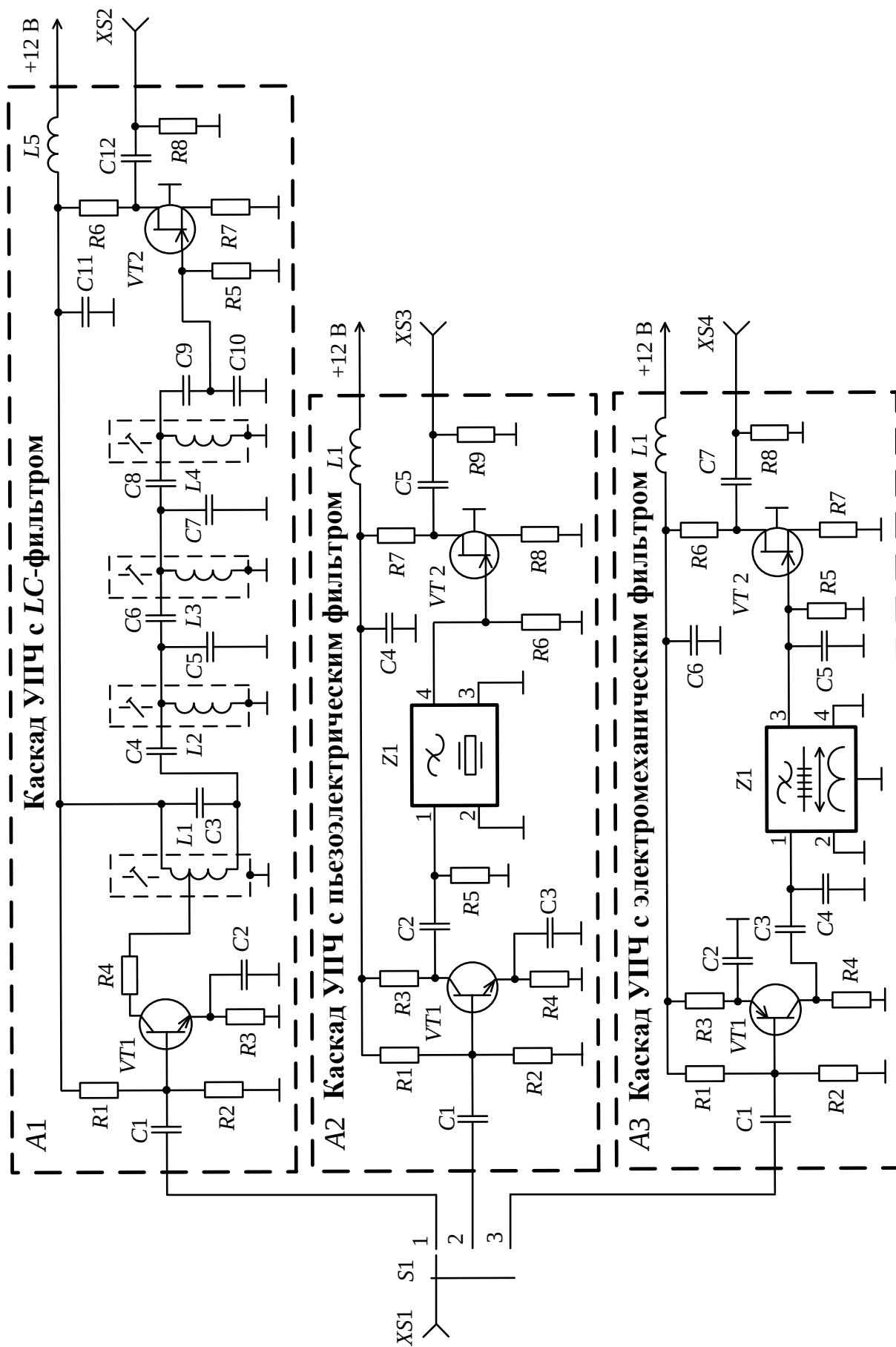


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема лабораторного макета

Макет содержит три блока $A1$, $A2$ и $A3$ каждый из которых представляет собой каскад УПЧ с ФСИ одного из рассмотренных видов:

- каскад УПЧ с LC -фильтром;
- каскад УПЧ с пьезоэлектрическим фильтром

каскад УПЧ с электромеханическим фильтром. На входе каждого каскада УПЧ включен усилитель на биполярном транзисторе $VT1$, собранный по схеме с общим эмиттером, а на выходе — на полевом транзисторе $VT2$, собранный по схеме с общим истоком.

В блоке $A1$ каскад УПЧ содержит LC -фильтр, состоящий из четырех связанных LC -контуров. Коллектор транзистора $VT1$ частично подключен к индуктивной ветви $L1$ первого контура фильтра. К емкостной ветви $C9$, $C10$ последнего контура частично подключен затвор транзистора $VT2$. Такое включение обеспечивают большое выходное сопротивление усилителя на транзисторе $VT1$ и большое входное сопротивление усилителя на транзисторе $VT2$, что позволяет избежать уменьшения добротности контуров фильтра, обусловленного потерями, вносимыми в контура внешними цепями.

В блоках $A2$ и $A3$ каскады УПЧ содержат пьезоэлектрический и электромеханический фильтры соответственно. В этих каскадах в коллекторную цепь транзистора $VT1$ включено сопротивление, равное входному характеристическому сопротивлению фильтра, используемого в каскаде, а в цепь затвора транзистора $VT2$ — сопротивление, равное выходному характеристическому сопротивлению того же фильтра. При этом фильтр работает в согласованном режиме, и его параметры соответствуют номинальным значениям.

4. ПОДГОТОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

4.1. Собрать лабораторную установку (рис. 6). Выход “ μV ” генератора стандартных сигналов подключить к входу $XS1$ макета, а выход “0,1–1 V” — к цифровому частотомеру. Вход первого милливольтметра подключить к входу макета $XS1$, а вход второго милливольтметра — к выходу макета $XS2$.

4.2. Установить органы управления генератора в следующие положения:

- переключатель рода работы в положение “ВНЕШ. МОД”;
- переключатель поддиапазонов в положение “0,3–1 МГц”;
- тумблер “Уровень К — М%” в положение “Уровень К”.

4.3. Включить питание измерительных приборов и прогреть их в течение 2—3 минут.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДА УПЧ С LC-ФИЛЬТРОМ

5.1. Установить переключатель $S1$ в положение “1”.

5.2. С помощью аттенуаторов, встроенных в генератор, установить на входе макета $XS1$ напряжение $U_{вх} = 10$ мВ по показаниям первого милливольтметра.

5.3. Плавнo перестраивая генератор стандартных сигналов по частоте, найти частоту, при которой выходное напряжение УПЧ достигает максимального значения U_{max} . Найденные значения частоты и выходного напряжения занести в протокол лабораторной работы.

Примечание. При перестройке генератора следует поддерживать постоянство уровня входного напряжения макета по показаниям первого милливольтметра.

5.4. Плавнo изменяя частоту генератора, найти частоты $f_1 < f_0$ и $f_2 > f_0$, на которых выходное напряжение каскада принимает значение $0,7U_{max}$. Найденные значения частоты и выходного напряжения занести в протокол лабораторной работы. Рассчитать полосу пропускания $\Pi_{0,7}$ и среднюю частоту f_0 полосы пропускания каскада по формулам (1) и (2). Найденные значения $\Pi_{0,7}$ и f_0 занести в таблицу 1.

5.5. Выполняя действия, аналогичные п. 5.4, определить полосу пропускания каскада по уровню 0,1. Значения частоты и выходного напряжения, соответствующие границам полосы пропускания каскада по уровню 0,1 занести в протокол лабораторной работы. По формуле аналогичной формуле (1) рассчитать полосу пропускания $\Pi_{0,1}$ и найденное значение занести в таблицу 1.

6.4. Плавнo изменяя частоту генератора стандартных сигналов, определить частоту f_d дополнительного резонанса в полосе задерживания каскада, при которой выходное напряжение U_d каскада максимально. Рассчитать коэффициент передачи K_d каскада по формуле (6). Найденные значения частоты f_d , U_d и K_d занести в табл. 2.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДА УПЧ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ФИЛЬТРОМ

7.1. Установить переключатель $S1$ в положение “3”.

7.2. Подключить вход второго милливольтметра к выходу макета XS4.

7.3. Выполнить действия, указанные в п. п. 5.2...5.8 и п. 6.4. Полученные результаты занести в табл. 3.

Таблица 3 — Параметры каскада УПЧ с электромеханическим фильтром

$\Pi_{0,7}$, кГц	f_0 , кГц	$\Pi_{0,1}$, кГц	$K_{пр}$	U_0 , мВ	K_0	$f_{ск}$, кГц	$U_{ск}$, мВ	$Se_{ск}$, дБ	$f_{др}$, кГц	$U_{др}$, мВ	$K_{др}$

8. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

8.1. В отчете следует указать цель работы и привести структурную схему лабораторной установки.

8.2. В отчёте необходимо привести результаты всех прямых измерений, выполненных в процессе лабораторной работы. Результаты могут быть представлены как в виде текста, так и в виде таблиц содержащих численные значения величин, полученные путём измерения или расчёта.

8.2. На основании полученных экспериментальных результатов, сведённых в таблицы, следует построить АХЧ каждого исследованного каскада УПЧ.

8.3. В выводах необходимо привести сравнительный анализ параметров и

характеристик исследованных каскадов УПЧ.

8.4. Отчет оформляется в соответствии с требованиями, предъявляемыми кафедрой к текстовым работам [5].

9. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

9.1. Чем отличается УПЧ с распределенной избирательностью от УПЧ с сосредоточенной избирательностью?

9.2. Для чего предназначен ФСИ и где он включается в линейном тракте приемника?

9.3. Назовите основные параметры ФСИ и поясните, как они определяются.

9.4. Каковы достоинства и недостатки ФСИ с колебательными LC -контурами?

9.5. Почему геометрические размеры механических резонаторов много меньше размеров электромагнитных резонаторов при одинаковых резонансных частотах?

9.6. Дайте определение прямого и обратного магнитострикционных эффектов и приведите примеры магнитострикционных материалов.

9.7. Дайте определение прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов и приведите примеры пьезоэлектрических материалов.

9.8. Каковы достоинства и недостатки пьезоэлектрических ФСИ?

9.9. Каковы достоинства и недостатки магнитострикционных ФСИ?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Онищук А. Г. Радиоприемные устройства: учеб. пособие / А. Г. Онищук, И. И. Забеньков, А. М. Амелина. — Минск: Новое знание, 2007. — 240 с.
2. Головин О. В. Радиоприемные устройства / О. В. Головин. — М.: Горячая линия-Телеком, 2004. — 384 с.
3. Воллернер, Н. Ф. Радиоприёмные устройства / Н. Ф. Воллернер. — Киев: Вища школа, 1993. — 391 с.
4. Буга, Н. Н. Радиоприёмные устройства / Н. Н. Буга, А. И. Фалько, Н. И. Чистяков. — М.: Радио и связь, 1986. — 320 с.
5. Методические указания по оформлению текстовых работ / СевГУ; сост. В. Г. Слёзкин, П. П. Ермолов. — Севастополь: Изд-во СевГУ, 2015. — 18 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Образец титульного листа

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Отчёт по лабораторной работе

«Исследование каскадов УПЧ с фильтрами сосредоточенной селекции»
по дисциплине «Основы приема и обработки сигналов»

Выполнил студент _____
(ФИО)

Группа _____

Отметка о защите _____

Преподаватель _____
(ФИО)

Севастополь

20__

ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДОВ УПЧ С ФИЛЬТРАМИ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ

*Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы*

Составители:
Зиборов С.Р., Лукьянчиков А.В.

Изд. № 103/18. Объем 1,25 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»