

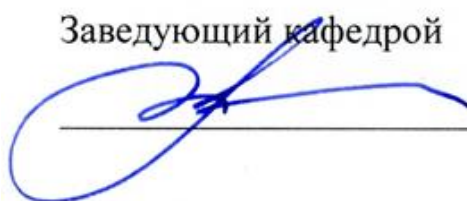
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева
Кафедра «Системы автоматического управления»

Утверждено на заседании кафедры
«Системы автоматического управления»
«27» января 2023 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой



О.В.Горячев

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

**к курсовому проектированию по дисциплине
«Электроника и электронные устройства в мехатронике»**

**основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки
15.03.06 Мехатроника и робототехника

с направленностью (профилем)
Мехатроника

Форма обучения: очная

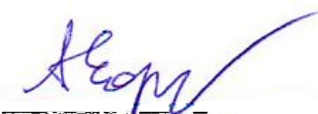
Идентификационный номер образовательной программы: 150306-01-23

Тула 2023 год

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Разработчик:

Ефромеев Андрей Геннадьевич, доц. каф. САУ, к.т.н.
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)


(подпись)

Содержание

Введение	4
1. Разработка усилителя-преобразователя на операционных усилителях (ОУ)	5
1.1. Общие положения	5
1.2. Фильтр	6
1.3. Усилитель	9
1.4. Смещение	11
1.5. Общая схема устройства	13
2. Разработка документации	15
3. Пример реализации усилителя-преобразователя	21
Список литературы	28
Приложение 1	29
Приложение 2	30

Введение

В настоящее время подавляющее большинство современных систем управления являются цифровыми электронными системами, однако на входе таких систем часто присутствует аналоговый сигнал с различных датчиков физических величин. Для преобразования этого сигнала в цифровой вид используются специальные устройства – аналого-цифровые преобразователи (АЦП). При этом для максимально эффективной работы АЦП входной аналоговый сигнал должен соответствовать определённым требованиям: чаще всего он должен быть знакопостоянным и максимально полно укладываться в диапазон от 0 В до опорного напряжения АЦП. Сигнал с датчиков как правило имеет знакопеременную форму с небольшой амплитудой и часто зашумлён. Поэтому актуальной является задача разработки аналоговых схем усилителей-преобразователей, которые подготавливают аналоговый сигнал для последующей передачи на вход АЦП.

1. Разработка усилителя-преобразователя на операционных усилителях (ОУ)

1.1. Общие положения

Пример исходных данных для проектирования усилителя-преобразователя (далее устройства) представлен в таблице 1:

Таблица 1.

Параметр	Обознач.	Величина	Ед. изм.
Амплитуда входного сигнала ($\pm U_{вх}$)	$U_{вх}$	0,2	В
Нижняя граница частоты входного сигнала	$f_{н}$	0,02	кГц
Верхняя граница частоты входного сигнала	$f_{в}$	1	кГц
Диапазон выходного сигнала преобразователя	ΔU	0..5	В
Характер помех	Высокочастотные помехи 5кГц и выше		
Операционный усилитель	К140УД8Б		

Задача разрабатываемого устройства заключается в преобразовании исходного двухполярного сигнала амплитудой $U_{вх}$ в униполярный сигнал в диапазоне ΔU с учетом помех, т.е. реализации следующей функции:

$$U_{вых}(t) = K_y \cdot U_{вх}(t) + \frac{U_A}{2},$$

где $U_{вх}(t)$ – входной сигнал;

$U_{вых}(t)$ – выходной сигнал;

U_A – верхняя граница диапазона ΔU ;

$K_y = \frac{U_A}{2 \cdot U_{вх}}$ – коэффициент усиления.

Разрабатываемое устройство функционально можно разделить на три части (рис. 1):

1) фильтр – удаляет из сигнала помеху

2) усилитель – усиливает сигнал таким образом, чтобы он имел амплитуду

от $-\frac{U_A}{2}$ до $\frac{U_A}{2}$;

3) смещение – сдвиг усиленного сигнала в диапазон от 0 до U_A .

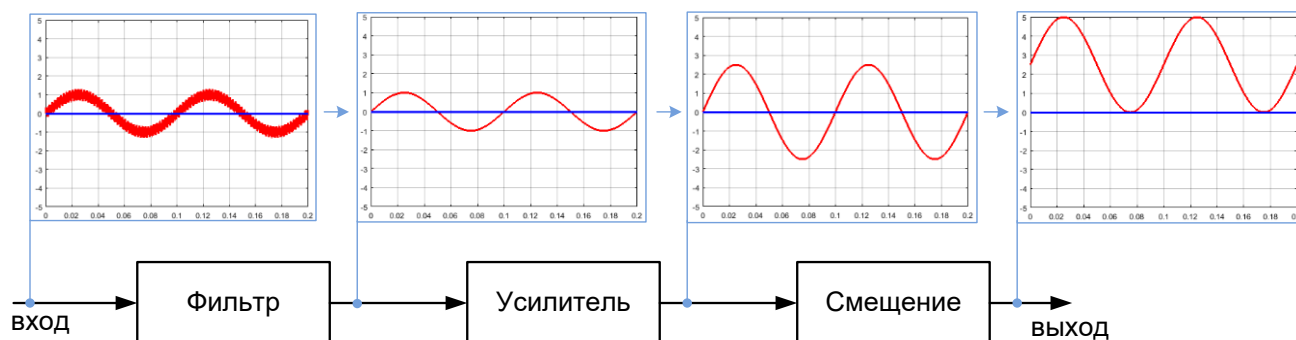


Рис. 1. Функциональная схема устройства.

Рассмотрим подробнее функциональные части устройства на примере с исходными данными в табл. 1.

1.2. Фильтр

Тип фильтра выбирается в зависимости от характера помехи.

С точки зрения частотных свойств можно выделить четыре основных вида фильтров:

1) фильтр нижних частот – устройство, эффективно пропускающее частотный спектр сигнала ниже некоторой частоты (частоты среза) и подавляющий частоты сигнала выше этой частоты.

2) фильтр верхних частот – устройство, эффективно пропускающее частотный спектр сигнала выше некоторой частоты (частоты среза) и подавляющий частоты сигнала ниже этой частоты.

3) полосный фильтр – устройство, эффективно пропускающее частотный спектр сигнала в определённой полосе частот, либо в окрестностях определённой частоты.

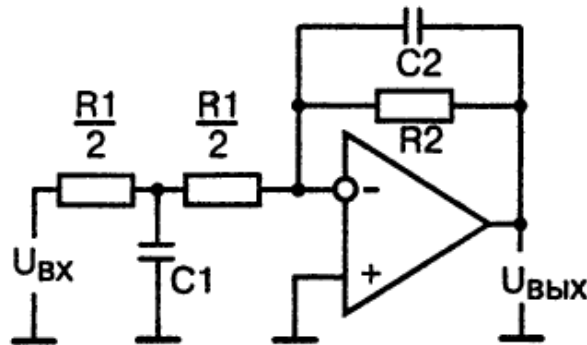
4) режекторный (заградительный) частот – устройство, эффективно пропускающее весь частотный спектр кроме сигнала определённой частоты.

Более подробно реализация этих типов фильтров на базе операционных усилителей описана в Приложении 2.

При расчете параметров фильтра коэффициент усиления следует задавать равным 1. При этом все резисторы желательно устанавливать в интервале от 10 Ом до 100 кОм, а ёмкости – от 1 нФ до 100 мкФ.

Для удаления помехи из примера в Таблице 1 целесообразно использовать фильтр нижних частот с частотой среза 2 кГц.

Рассчитаем такой фильтр.



Зададим для начала ёмкости конденсаторов равными 1 нФ:

$$C_1 = C_2 = 1 \text{ нФ}$$

Отсюда найдём R_2 исходя из частоты среза в 2 кГц:

$$2000 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

Откуда:

$$R_2 = 79577 \text{ Ом}$$

Т.к. сопротивление R_2 соответствует реальному резистору, необходимо привести его к ряду E24. Ближайшее значение 82 кОм, его и будем использовать в дальнейших расчетах.

Сопротивление R_1 найдём исходя из условия, что коэффициент передачи фильтра равен 1 по модулю:

$$K = -\frac{R_2}{R_1} = -1$$

Следовательно:

$$R_1 = 82000 \text{ Ом}$$

Сопротивление резисторов в схеме $R_1/2 = 41000 \text{ Ом}$, или из ряда E24 соответствующие резисторы выбираем сопротивлением 43 кОм.

Обратите внимание, что выбранная нами схема фильтра инвертирующая, поэтому после него необходимо ещё раз инвертировать сигнал, т.е. умножить его

на «-1». Для этого воспользуемся инвертором – стандартным инвертирующим включением ОУ с коэффициентом усиления 1 по модулю.

Смоделируем работу разработанного фильтра в соответствии с схемой на рисунке 2:

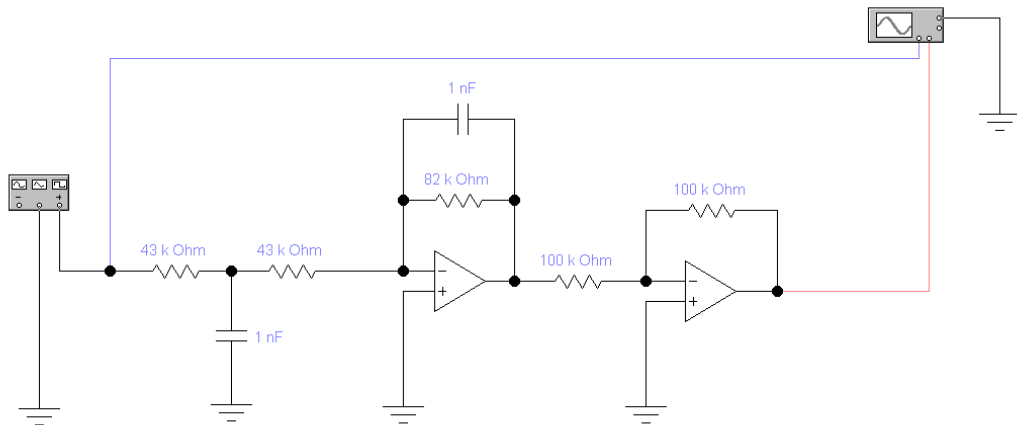
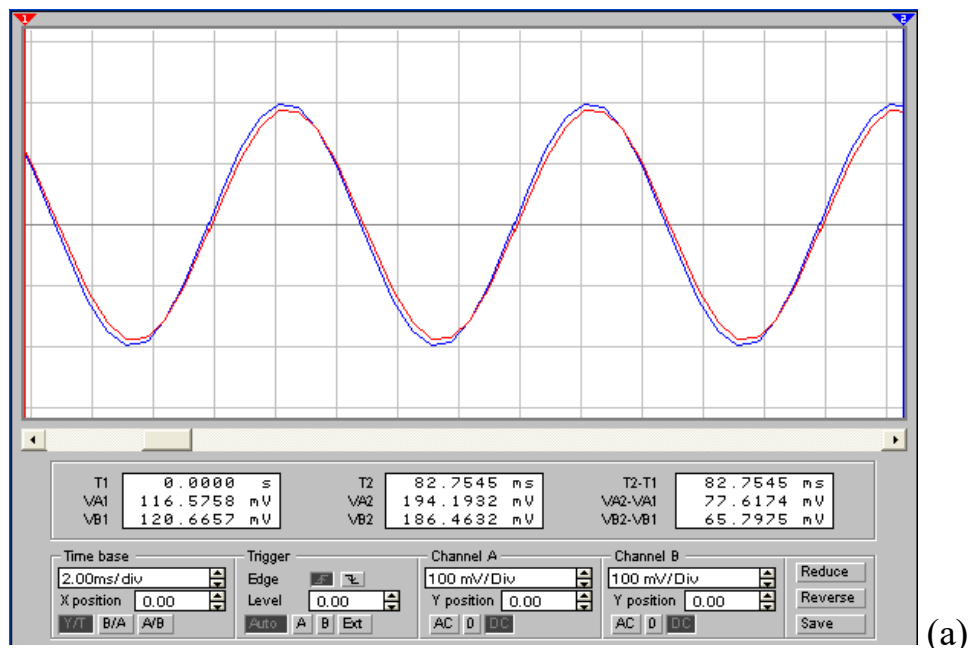


Рис. 2. Схема моделирования фильтра.

По заданию из примера входной сигнал у нас лежит в диапазоне от 0 до 1 кГц, а высокочастотные помехи начинаются на частоте 5 кГц, поэтому для проверки работы подадим на фильтр сигналы частотой 100 Гц, 1 кГц и 10 кГц:



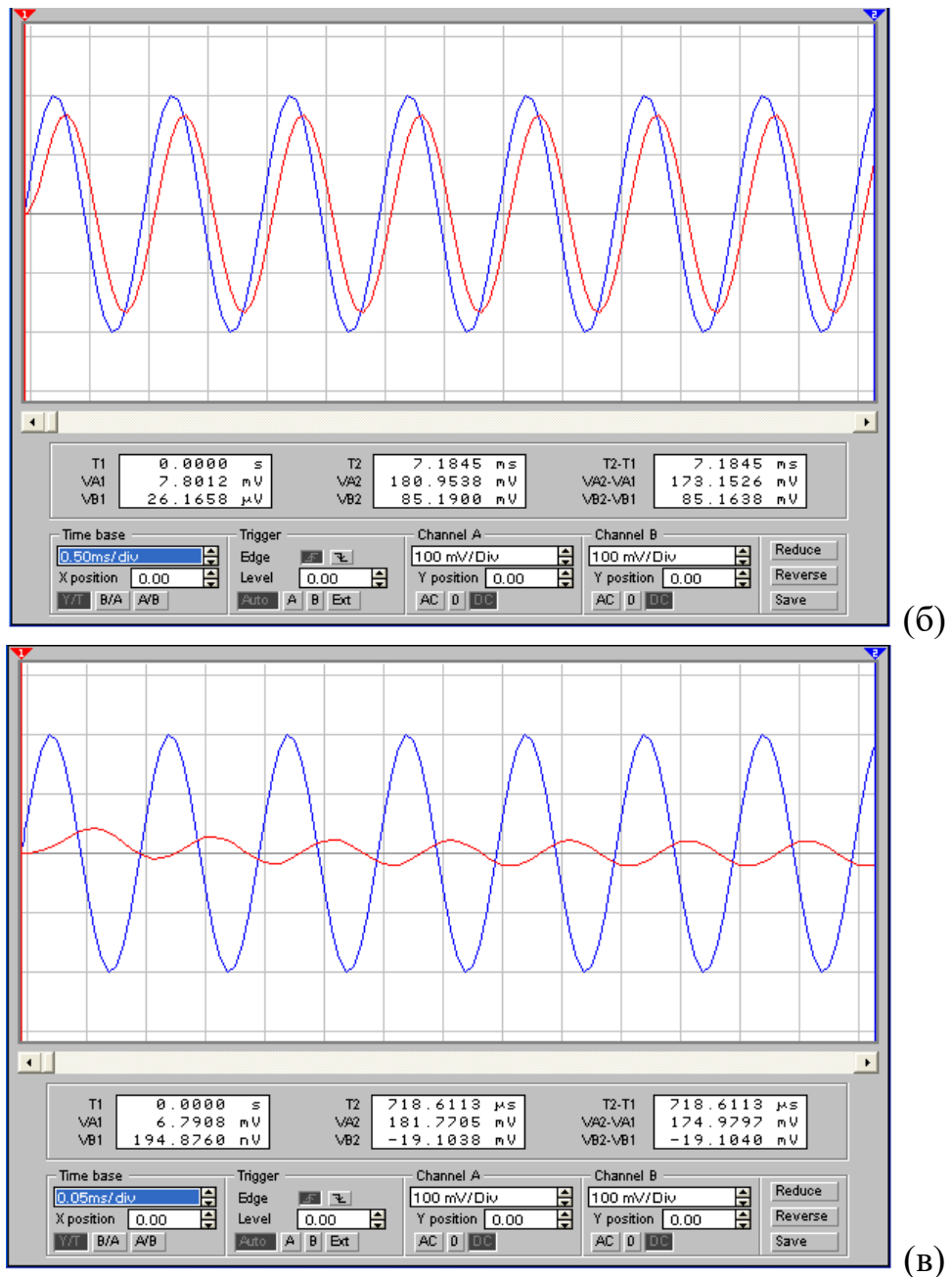


Рис. 3. Моделирование работы фильтра при сигналах 100 Гц (а), 1 кГц (б) и 10 кГц (в).

Как видно на графиках полезный сигнал передаётся практически без искажений, в то время как на частотах выше частоты среза происходит существенное ослабление сигнала.

1.3. Усилитель

Задачей усилителя является усиления сигнала с коэффициентом передачи:

$$K_y = \frac{U_A}{2 \cdot U_{вх}}$$

Реализовать данное свойство можно различными способами, например, используя последовательно два каскада инвертирующего включения (рис. 4). За счет двойного инвертирования знак сигнала не изменится, а коэффициент усиления будет равен произведению коэффициентов усиления каскадов.

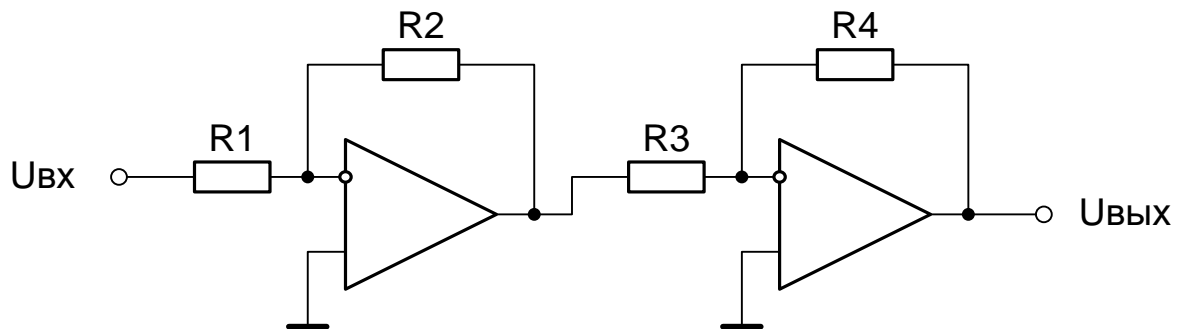


Рис. 4. Вариант схемы усилителя из двух инвертирующих включений.

Для схемы на рисунке 4:

$$K_y = K_{y1} \cdot K_{y2} = \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \left(-\frac{R_4}{R_3} \right)$$

В нашем примере требуемый коэффициент усиления равен:

$$K_y = \frac{5}{2 \cdot 0,2} = 12,5$$

Распределим его по каскадам следующим образом:

$$K_y = K_{y1} \cdot K_{y2} = (-2,5) \cdot (-5)$$

Примечание. При распределении коэффициентов усиления по каскадам, желательно не устанавливать коэффициент усиления одного каскада больше 50.

Взяв резисторы R2 и R4 в обратных связях равными 100 кОм можно рассчитать сопротивления R1 и R3:

$$R_1 = 40000 \text{ Ом} \text{ и } R_3 = 20000 \text{ Ом}$$

С учетом ряда E24 сопротивления резисторов:

$$R_1 = 43 \text{ кОм} \text{ и } R_2 = 20 \text{ кОм}$$

Смоделируем работу усилителя:

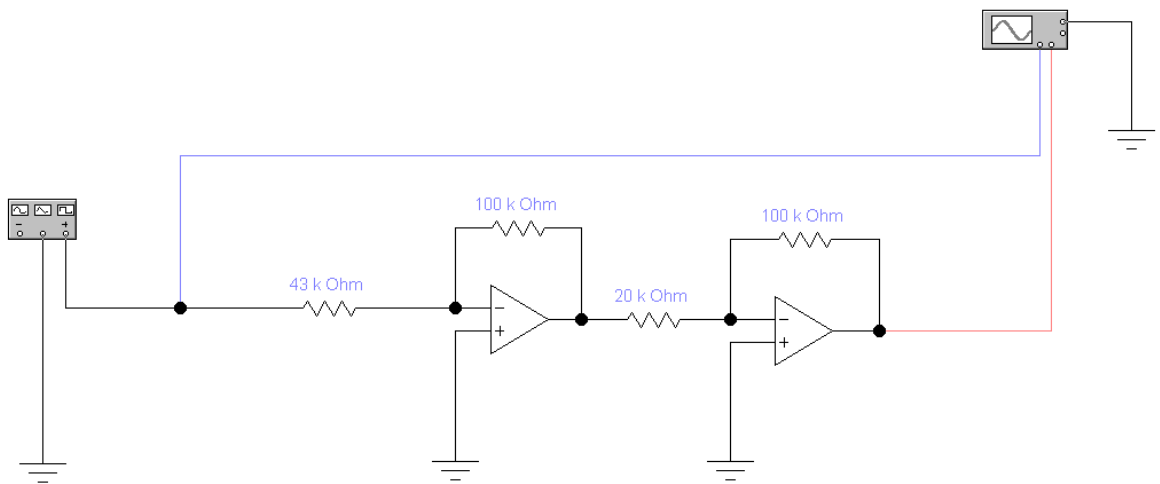


Рис. 5. Схема моделирования усилителя.

Результаты симуляции (рис. 6) показывают полную работоспособность усилителя:

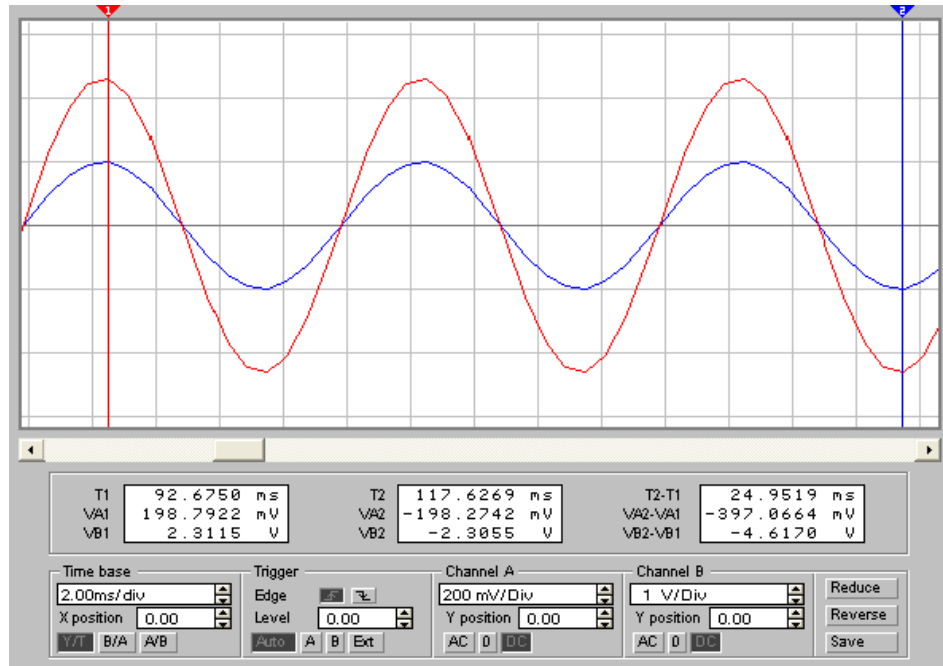


Рис. 6. Результаты симуляции работы усилителя.

1.4. Смещение

Последнее преобразование, которое необходимо выполнить с сигналом, заключается в смещении усиленного и отфильтрованного сигнала находящегося в диапазоне от $-\frac{U_A}{2}$ до $\frac{U_A}{2}$ на напряжение равное $\frac{U_A}{2}$ В вверх. Т.е. нам необходимо выполнить сложение входного сигнала с постоянным напряжением $\frac{U_A}{2}$ В:

$$U_{\text{вых}}(t) = U'_{\text{ex}}(t) + \frac{U_A}{2},$$

где $U'_{\text{ex}}(t)$ – сигнал после фильтра и усилителя.

Такое смещение удобно выполнить с помощью аналогового сумматора с инвертором (рис. 7):

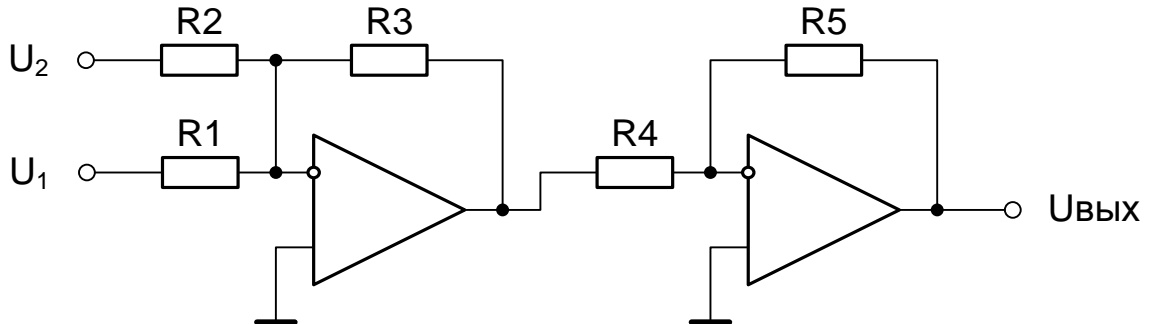


Рис.7. Схема смещения сигнала.

Работу сумматора можно описать следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} = -\left(\frac{R3}{R1}U_1 + \frac{R3}{R2}U_2\right)$$

Как видите, сумматор выполнен по инвертирующей схеме, поэтому после него в схему добавлен ещё один инвертор, аналогичный тому, что мы ставили на выходе фильтра.

В данном случае U_1 – это собственно входной сигнал $U'_{\text{ex}}(t)$ после фильтра и усилителя, дополнительно усиливать его не требуется, поэтому резистор R1 будет равен $R3 = 100 \text{ кОм}$.

Чтобы получить напряжение требуемое смещения возьмем в качестве напряжения U_2 положительное напряжение питания операционного усилителя U_{Π} (для большинства операционных усилителей – это +15 В, но точное значение необходимо смотреть в документации).

Таким образом, резистор R2 рассчитывается, исходя из выражения:

$$\frac{R3}{R2}U_{\Pi} = \frac{U_A}{2}$$

Для рассматриваемого примера:

$$\frac{100000}{R2}15 = \frac{5}{2}, \text{ откуда } R2 = 600000 \text{ Ом}$$

С учетом ряда E24 сопротивление $R2 = 620 \text{ кОм}$.

Смоделируем работу схемы смещения:

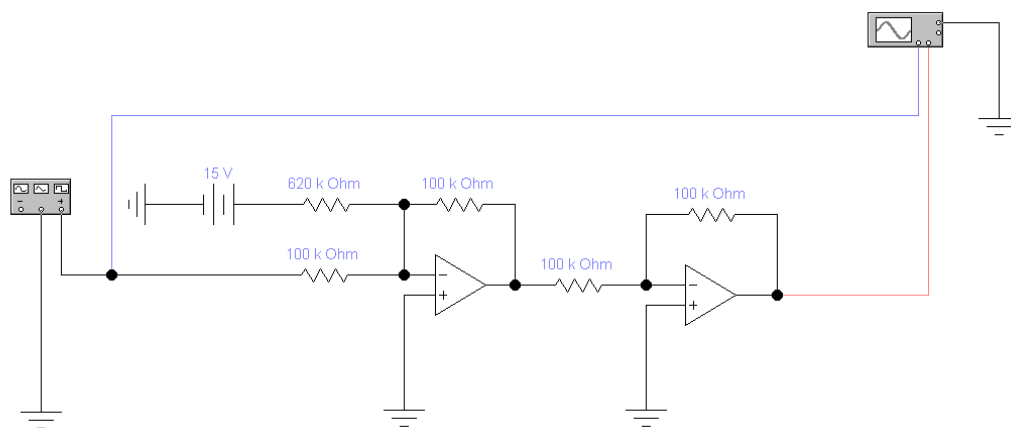


Рис. 8. Модель схемы смещения.

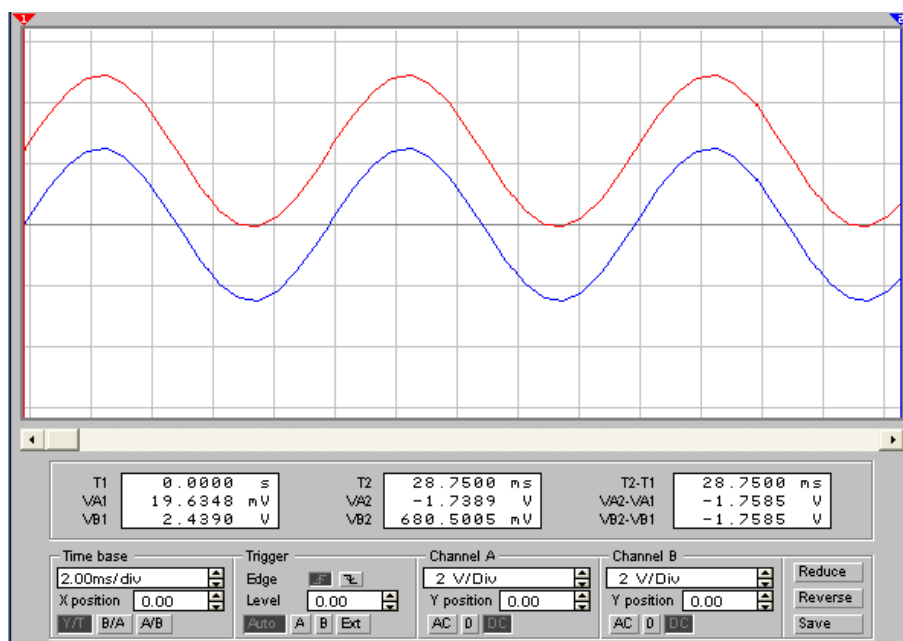


Рис. 9. Результаты симуляции работы схемы смещения.

Из рисунка 9 видно, что цель достигнута и сигнал сместился без искажений в диапазон 0..5 В.

1.5. Общая схема устройства

Теперь соберём модель всей схемы в целом и проверим её работу:

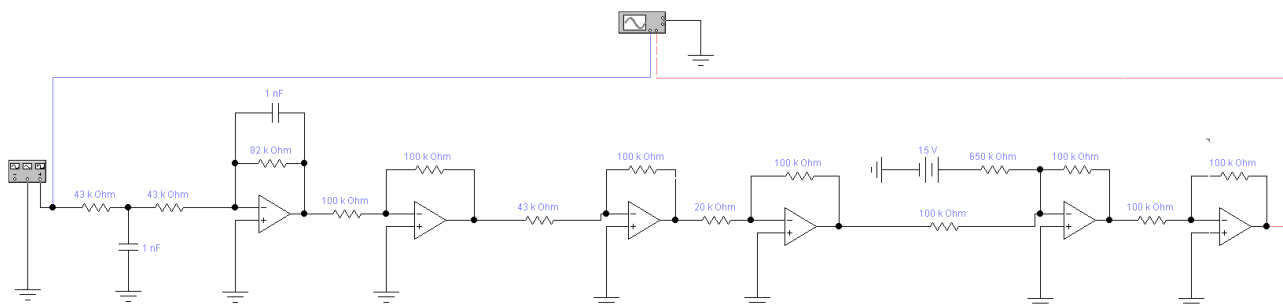


Рис. 10. Модель усилителя-преобразователя.

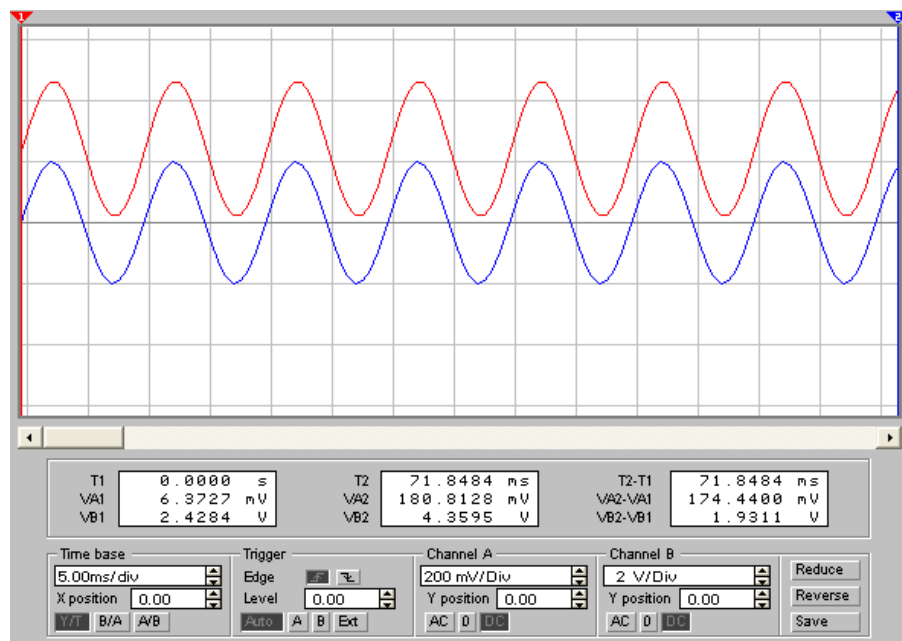


Рис. 11. Результат моделирования работы устройства в целом.

Из рисунка 11 видно, что разработанное устройство выполняет заданные функции.

Представленная схема является правильной, но не оптимальной, и те же функции можно реализовать, используя меньшее число операционных усилителей.

2. Разработка документации

В соответствии с заданием вам необходимо подготовить комплект конструкторской документации на разработанное устройство, включающий:

- электрическую принципиальную схему;
- перечень элементов;
- чертёж печатной платы.

Указанные документы должны быть выполнены в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД), т.е. в соответствии с ГОСТами. Также в виде пояснительного рисунка (может быть выполнен в произвольной форме) должна быть представлена схема расположения элементов на печатной плате.

Основной стандарт, который вам потребуется для выполнения электрической принципиальной схемы и перечня элементов – ГОСТ 2.702-2011 «Правила выполнения электрических схем», также могут пригодиться:

- ГОСТ 2.701-2008 «Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению»;
- ГОСТ 2.728-74 «Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы»;
- ГОСТ 2.759-82 «Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники».

Чертеж печатной платы должен быть выполнен в соответствии со стандартами:

- ГОСТ 2.417-91 «Платы печатные. Правила выполнения чертежей»;
- ГОСТ Р 53429-2009 «Платы печатные. Основные параметры конструкции»;
- ГОСТ Р 51040-97 «Платы печатные. Шаги координатной сетки».

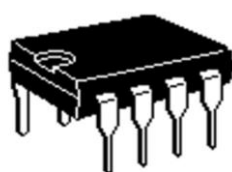
Конструкторскую документацию удобно готовить в электронном виде с использованием специализированных систем автоматизированного проектирования (САПР) электронных устройств, таких как: Altium Designer, Eagle CAD, OrCAD, P-CAD, Delta Design, KiCad, DipTrace и др.

Отдельно электрические схемы можно выполнить в КОМПАС-Электрик, AutoCAD Electrical, sPlan и др. векторных редакторах. Печатную плату независимо можно выполнить в программе Sprint-Layout.

Также допускается выполнение всех чертежей и в ручном режиме с соблюдением всех стандартов.

Для того чтобы правильно выполнить схему и печатную плату, необходимо изучить документацию на заданный ОУ.

В примере используется операционный усилитель К140УД8Б, внешний вид и схема назначения выводов которого показаны на рис. 12 и 13.



Корпус DIP-8

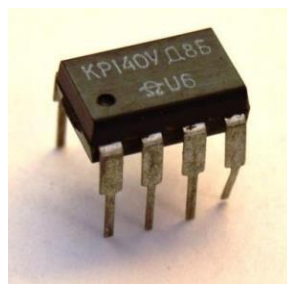


Рис. 12. Корпус операционного усилителя К140УД8Б.

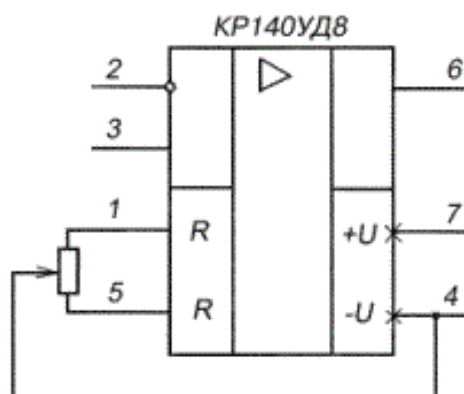


Рис. 13. Назначение выводов К140УД8Б в корпусе DIP8

1,5 – балансировка; 2 – вход инвертирующий; 3 – вход неинвертирующий; 4 – «минус» напряжения питания; 6 – выход; 7 – «плюс» напряжения питания.

В соответствии с этим можно составить электрическую принципиальную схему, соответствующую разработанной схеме устройства на рис. 10:

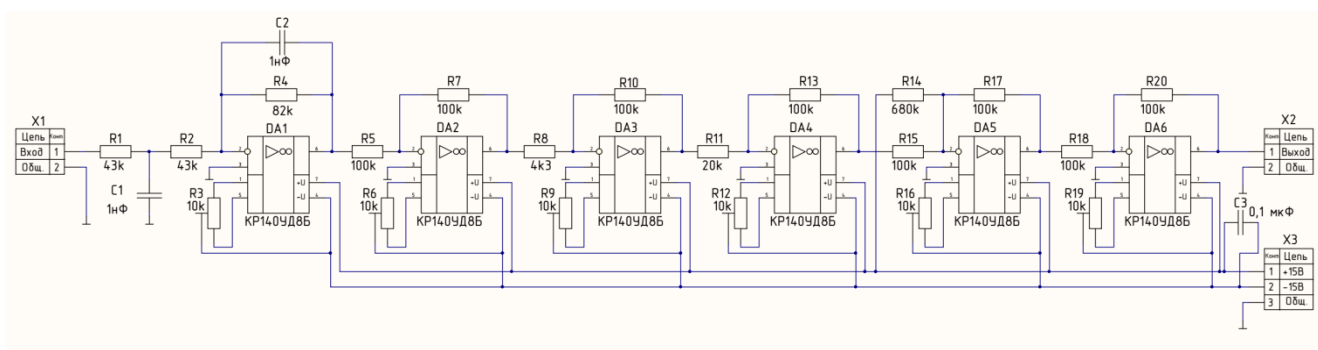


Рис. 14. Электрическая принципиальная схема разработанного устройства (более детально схема представлена в приложении)

Обратите внимание на подстрочные резисторы, они требуются по документации на ОУ К140УД8Б для балансировки, т.е. компенсации напряжения смещения нуля. *Не у всех ОУ это необходимо.*

Рассматриваемая в примере микросхема К140УД8Б включает в себя один ОУ, но встречаются микросхемы с большим числом ОУ (2, 4, 8 и т.д.). В подобных случаях на схемах удобно изображать такие элементы по секциям. Например, микросхема К1460УД2 также как и К140УД8Б поставляется в корпусе DIP8, но имеет в своём составе два операционных усилителя (рис. 15).

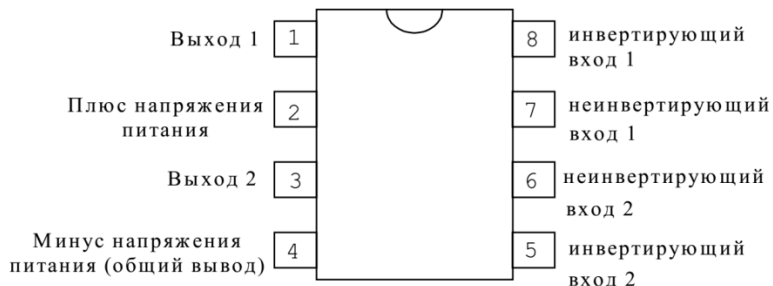


Рис. 15. Назначение выводов микросхемы К1460УД2.

На рисунке 16 показана часть схемы усилителя на базе микросхемы К1460УД2, в которую входит 2 ОУ.

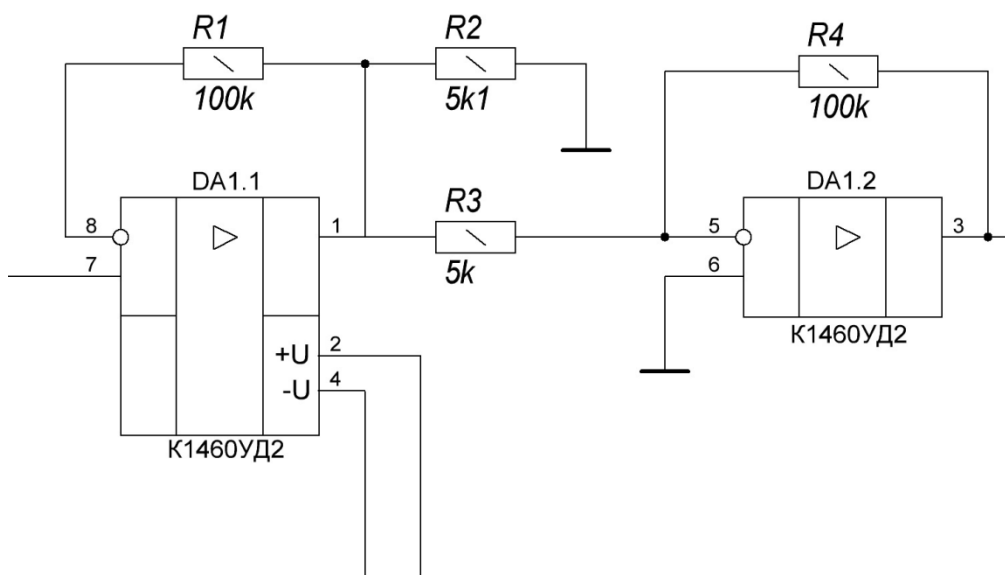


Рис. 16. Пример части схемы с многоканальной микросхемой ОУ.

На рисунке 16 видно, что два каскада усиления построены на двух операционных усилителях DA1.1 и DA1.2, входящих в состав одной микросхемы DA1. Видно, что линии питания нарисованы только у одной секции, т.к. питание у всех секций микросхемы общее, а вот входы-выходы ОУ у каждой секции свои, что видно по их номерам. В перечне элементов такая микросхема будет фигурировать под номером DA1.

После составления схемы можно подготовить к ней перечень элементов. Для этого необходимо выбрать оставшиеся компоненты схемы из реальных

семейств элементов, например резисторы можно подобрать в серии С2-33Н, а конденсаторы – в серии К10-47М.

Эти данные также понадобятся для проектирования печатной платы, при выборе посадочных мест соответствующих элементов.

Печатная плата (англ. printed circuit board, PCB, или printed wiring board, PWB) – изделие, состоящее из одного или двух проводящих рисунков, расположенных на поверхности основания, или из системы проводящих рисунков, расположенных в объеме и на поверхности основания, соединенных между собой в соответствии с электрической схемой узла, предназначенное для электрического соединения и механического крепления устанавливаемых на нем изделий электронной техники, квантовой электроники и электротехнических изделий.



Рис. 17. Примеры печатных плат.

Основание печатной платы – элемент конструкции печатной платы, на поверхности или на поверхности и в объеме которого расположен проводящий рисунок или система проводящих рисунков печатной платы.

Рисунок печатной платы – конфигурация, образованная проводниковым и (или) диэлектрическим материалом на печатной плате.

Проводящий рисунок печатной платы – рисунок печатной платы, образованный проводниковым материалом на основании или в объеме. Проводящий рисунок состоит из печатных проводников, контактных площадок, экранов, металлизированных отверстий, теплоотводящих и других печатных компонентов.

Непроводящий рисунок печатной платы – рисунок печатной платы, образованный диэлектрическим материалом основания печатной платы.

ПП можно классифицировать различными способами в соответствии с их различными атрибутами. Одна из основных конструкций печатной платы,

являющейся для всех общей, – разводка электрического проводника, который соединяет все устанавливаемые на ней компоненты между собой.

Для формирования проводки существует два основных способа:

1. Субтрактивный. В субтрактивном процессе ненужная часть медной фольги на подложке удаляется, оставляя нужный рисунок схемных межсоединений на своем месте.

2. Аддитивный. В аддитивном процессе формирование рисунка схемы межсоединений выполняется добавлением меди на голую (без медной фольги) подложку нужного рисунка и в нужном месте. Это можно сделать гальваническим покрытием медью, трафаретным нанесением проводящей пасты или укладкой провода с изоляцией на подложку в предварительно определенных токопроводящих дорожках.

Односторонние платы (ОПП или SSB) имеют схему только на одной стороне и их часто называют отпечатанной и протравленной платой, потому что стойкий к травлению защитный слой обычно печатается с помощью технологии трафаретной печати, а рисунок проводки затем формируется травлением незащищенной и ненужной медной фольги. Этот метод изготовления плат обычно используется для недорогих, крупносерийных и относительно низкофункциональных плат.

В некоторых случаях поверхность проводника ПП изолируется, оставляя открытыми только контактные площадки, а затем проводящая паста наносится трафаретной печатью для формирования дополнительных проводников на той же самой стороне платы, тем самым формируя пару проводящих слоев на одной стороне. Большинство печатных плат с металлической сердцевиной, предназначенных для широкого потребления, изготавливаются с алюминиевой подложкой, которая поступает в виде материала с электроосажденной медью. ПП, изготовленные из такого материала, не должны иметь сквозных отверстий, а все компоненты обычно крепятся на них с помощью поверхностного монтажа. Эти схемы часто формируются в трехмерные структуры.

Двусторонние платы (ДПП или DB) имеют проводящий рисунок, расположенный с двух сторон печатных плат. Их можно классифицировать на две категории:

- 1) без сквозной металлизации отверстий;
- 2) со сквозной металлизацией отверстий.

Печатная плата для устройства из примера, схема которого изображена на рис. 18, представлена на рис.

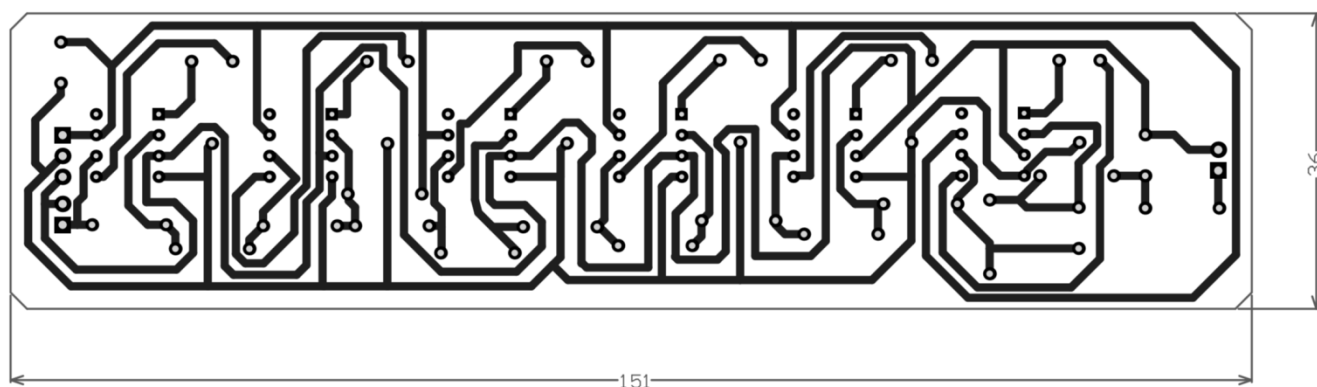


Рис. 18. Печатная плата разработанного устройства.

Расположение элементов на такой плате:

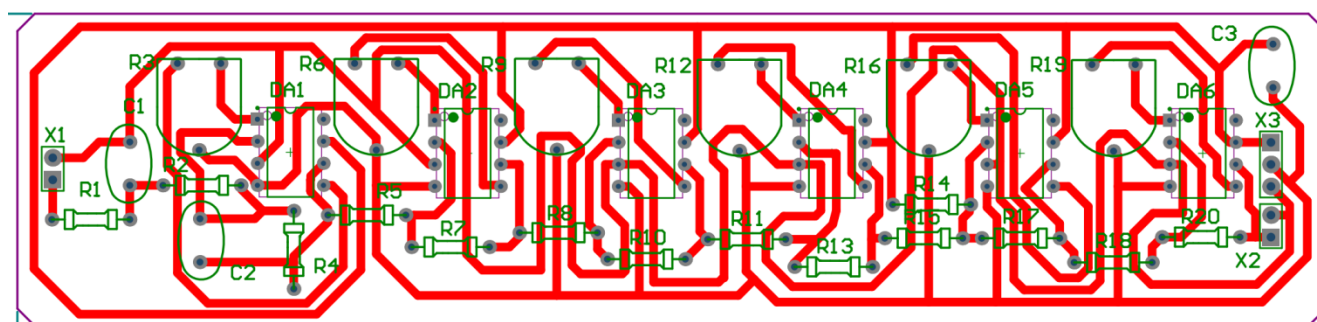


Рис. 19. Схема расположения элементов на плате разработанного устройства.

Обратите внимание, что печатная плата односторонняя, и проводящий рисунок 18 расположен на обратной стороне от элементов, поэтому на рисунке он изображен в зеркальном виде, каким и должен быть на чертеже. Если разработанная плата будет двусторонней, то на чертеже платы необходимо **отдельно** изобразить оба слоя.

3. Пример реализации усилителя-преобразователя

Если изготовить печатную плату, представленную на рисунке 18, то можно собрать разработанный усилитель-преобразователь:

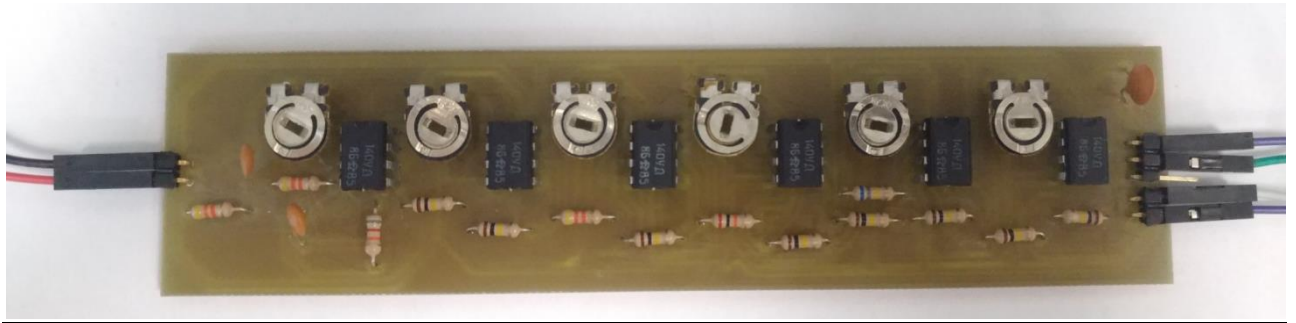


Рис.20. Внешний вид собранного устройства.

Изучим работу устройства, подадим с генератора тестовый сигнал на его вход и посмотрим с помощью осциллографа сигналы на выходах каждого каскада:

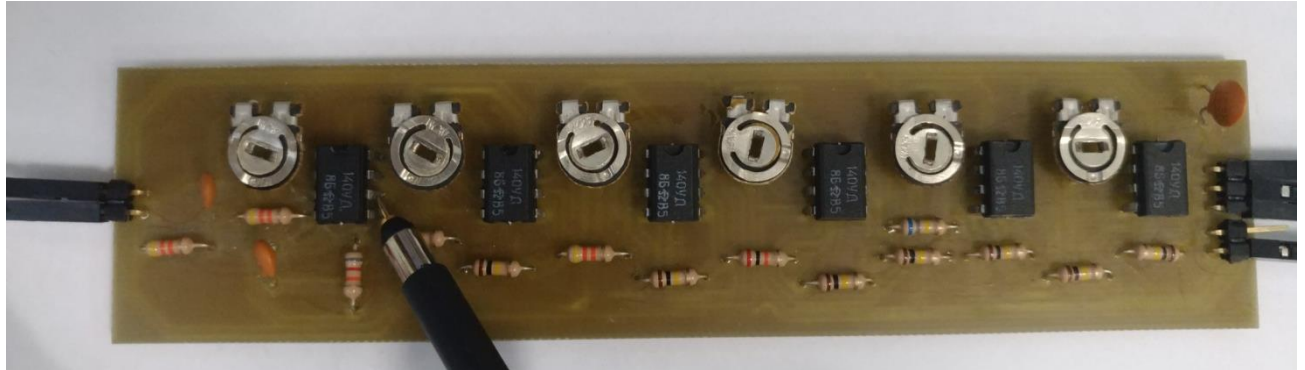


Рис.21. Щуп на выводе ОУ первого каскада

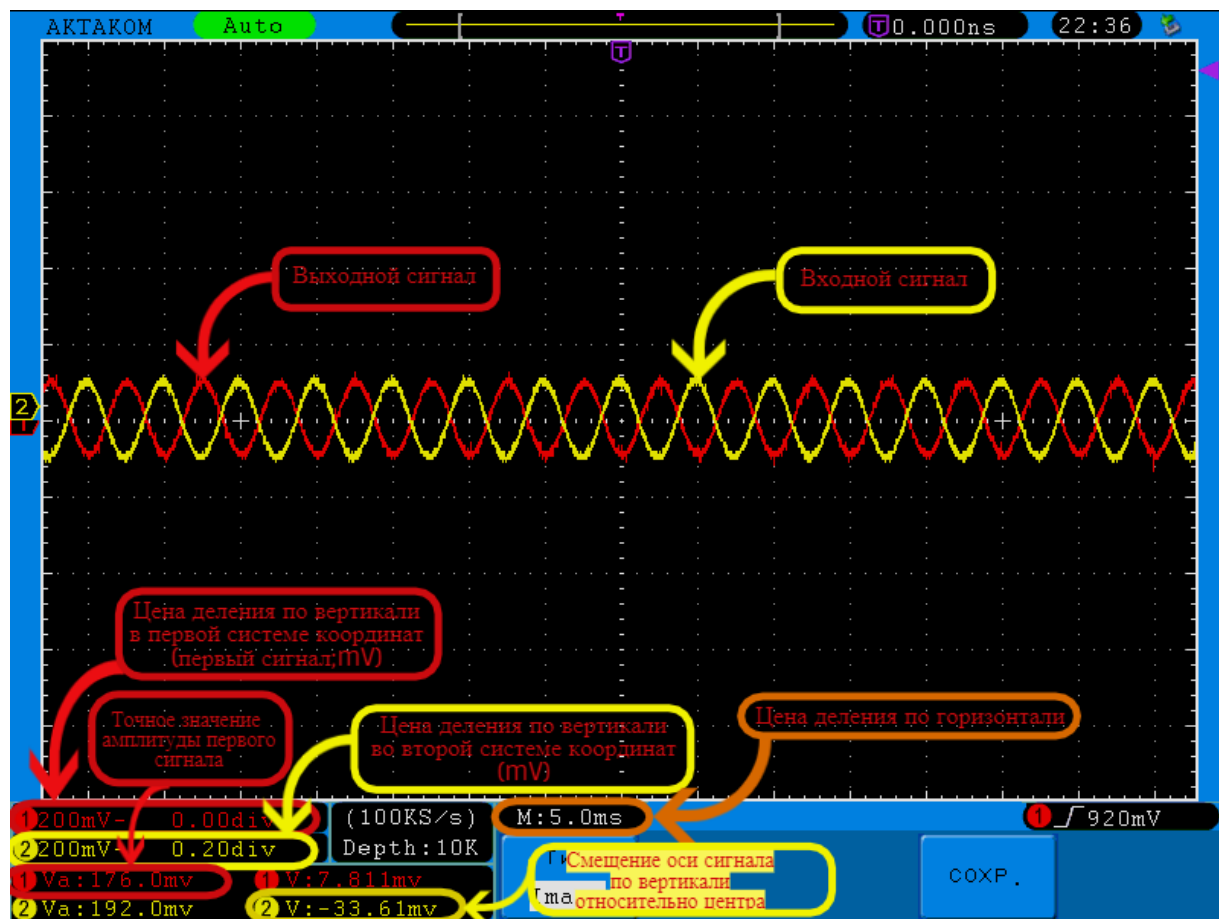


Рис.21. Входной и выходной сигналы после первого каскада

На первом каскаде фильтр на низких частотах без изменения передает сигнал, а на высоких частотах обеспечивает затухание относительного входного сигнала.

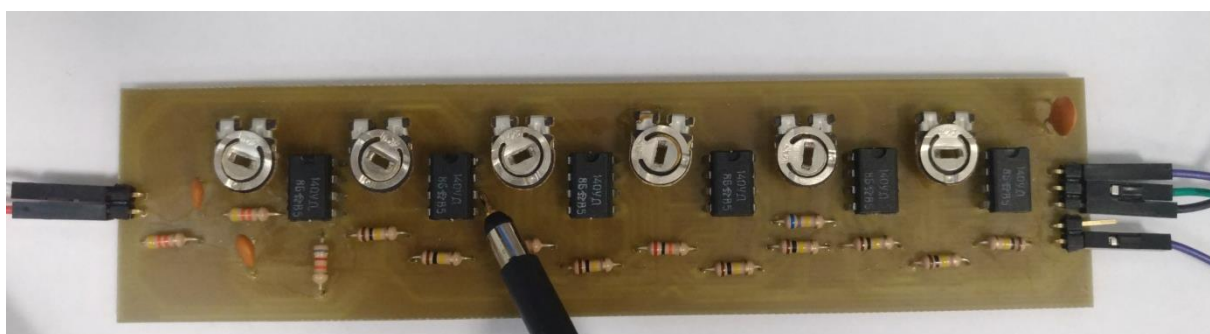


Рис.22. Щуп на выводе ОУ второго каскада

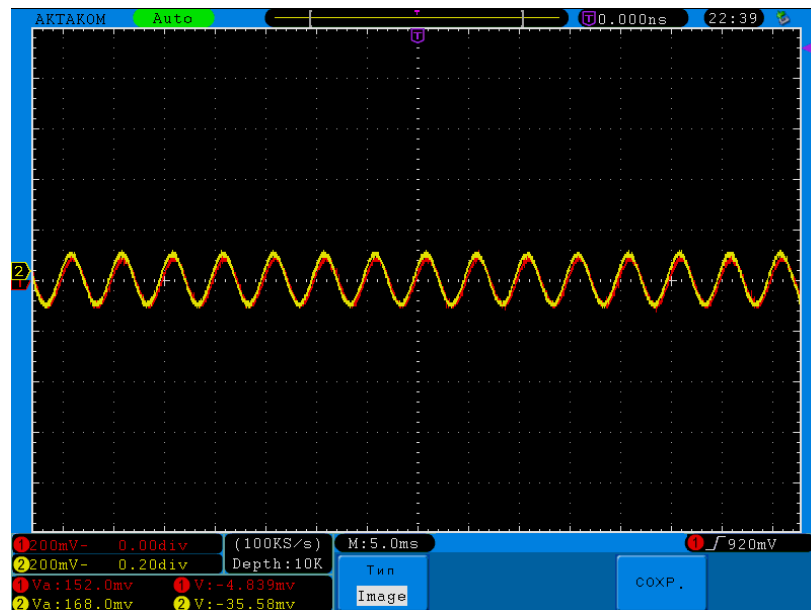


Рис. 23. Входной и выходной сигналы после второго каскада

На втором каскаде произошло инвертирование выходного сигнала, вследствие «совпадения» его со входным.

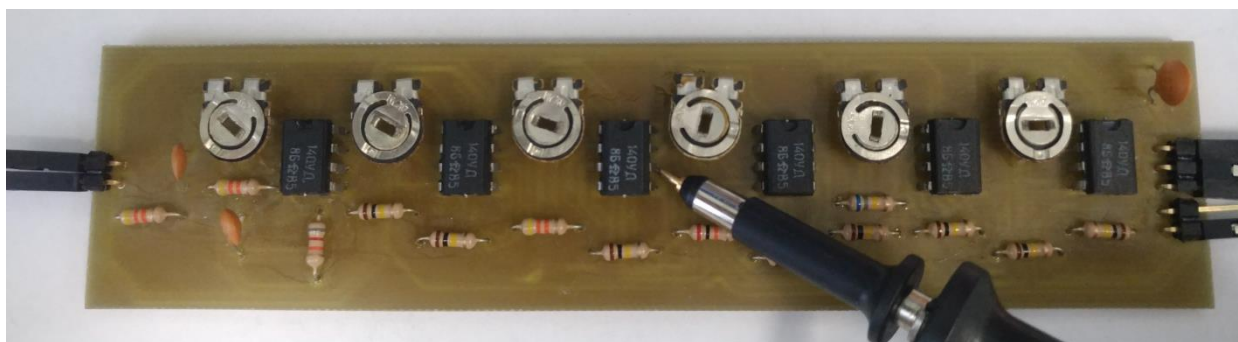


Рис. 24. Щуп на выводе ОУ третьего каскада.

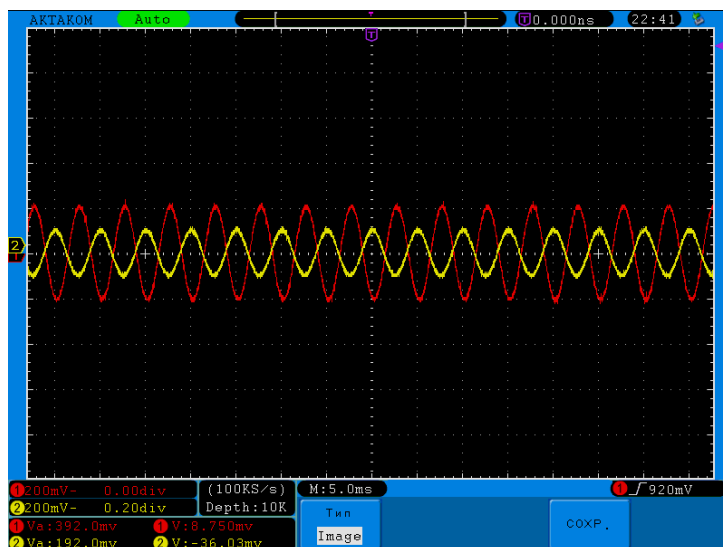


Рис. 25. Входной и выходной сигналы после третьего каскада.

Как видно по осциллограмме, после первого усилительного каскада выходной сигнал в 2,5 раза больше входного, что и должно было получиться.

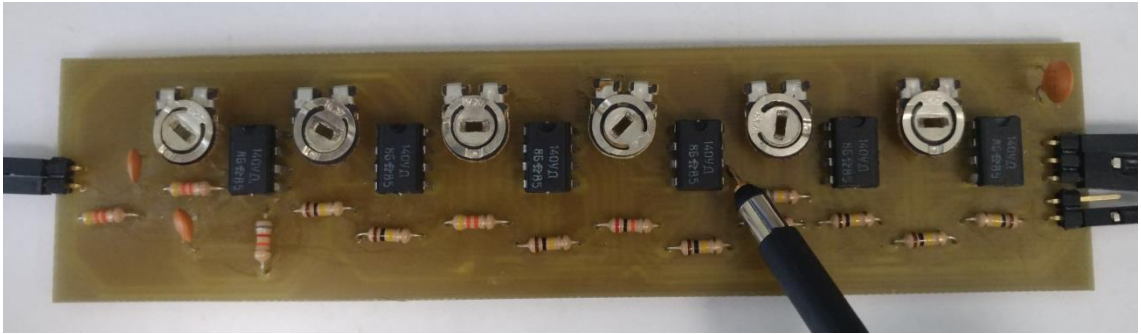


Рис. 26. Щуп на выводе ОУ четвертого каскада.

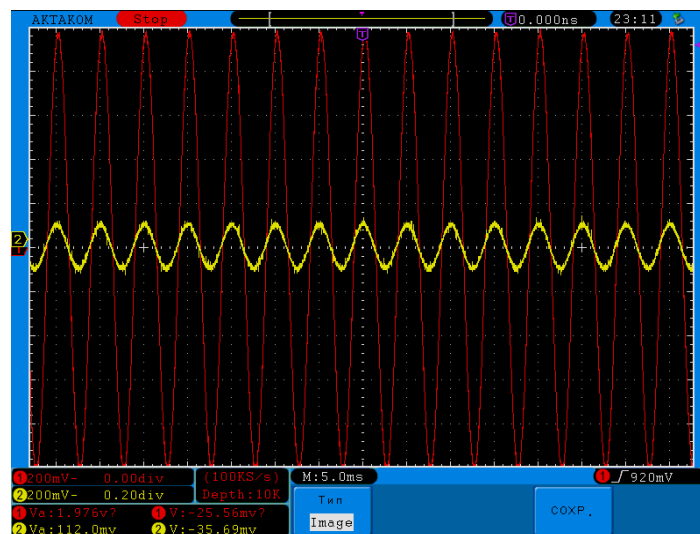


Рис. 27. Входной и выходной сигналы после четвертого каскада.

Как можно наблюдать, после второго усилительного каскада выходной сигнал увеличился еще в пять раз.

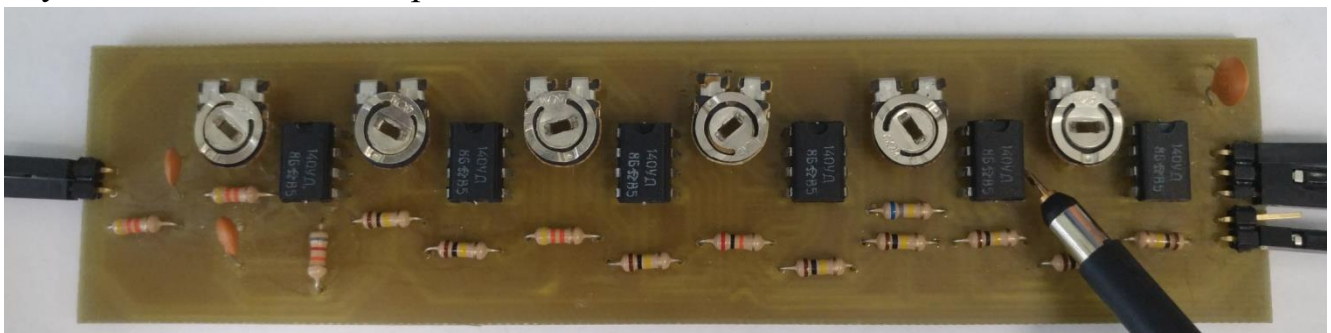


Рис. 28. Щуп на выводе ОУ пятого каскада

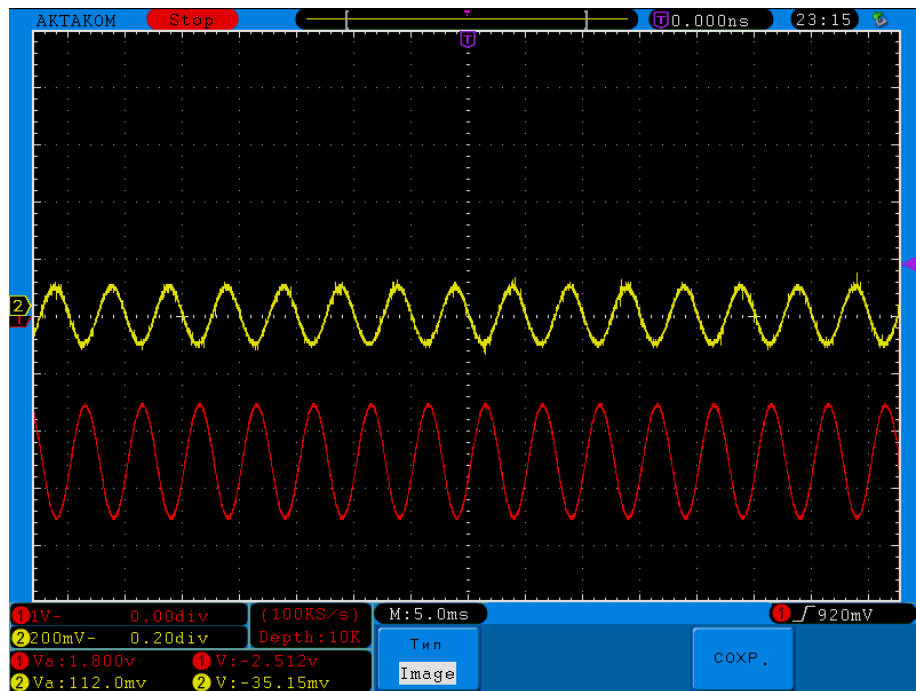


Рис. 29. Входной и выходной сигналы после пятого каскада

После пятого каскада произошло смещение сигнала на необходимые 2,5В (стоит заметить, что изменилась цена деления в системе координат выходного сигнала, поэтому он «уменьшился» по амплитуде).

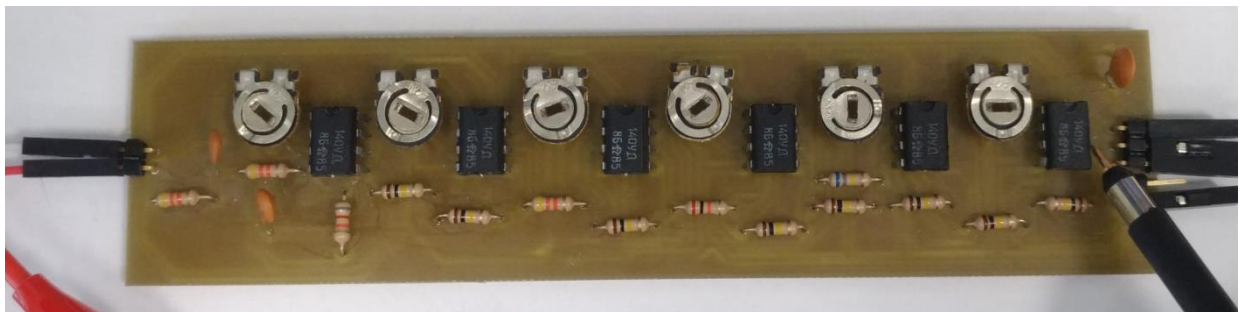


Рис. 30. Щуп на выводе ОУ шестого каскада.

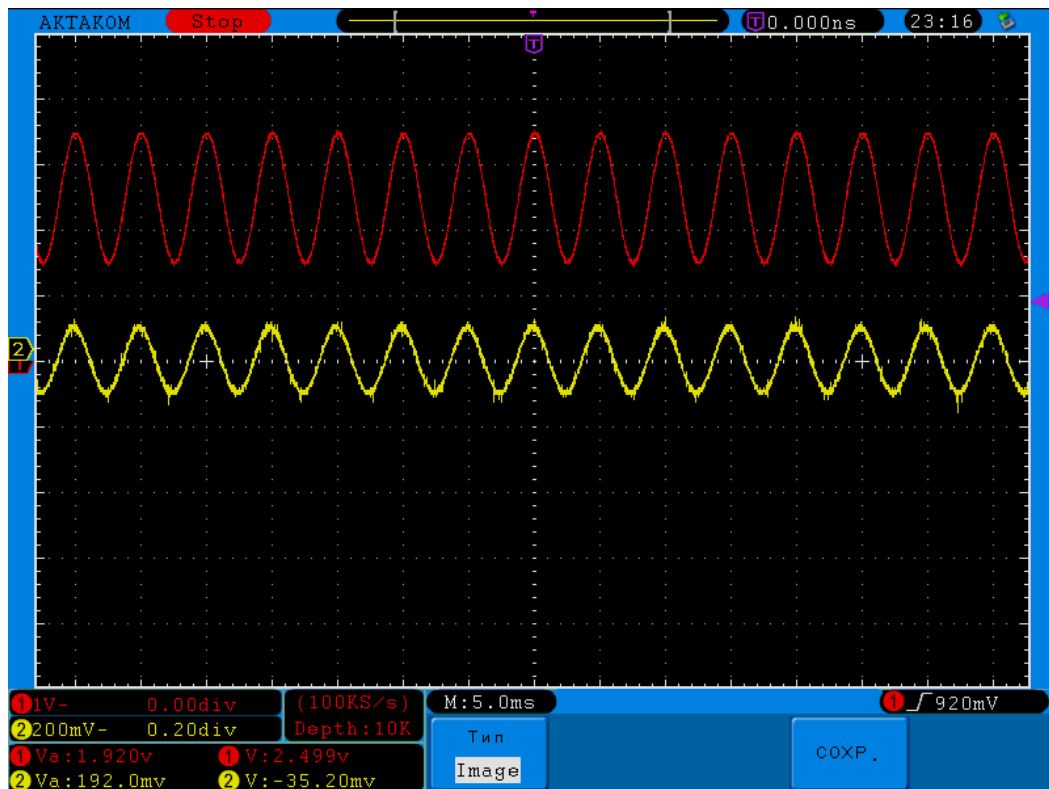


Рис. 31. Входной и выходной сигналы после шестого каскада.

На шестом каскаде произошло инвертирование, и в результате был получен сигнал, который в $\sim 12,5$ раз больше входного сигнала и смещен на 2,5В.

Отметим, что в процессе проверки работы устройства проводилась балансировка для компенсации/корректировки напряжения смещения ОУ, которая проводится на каждом каскаде с помощью балансировочных построечных резисторов. На первых четырех каскадах напряжение смещения должно быть равно нулю. На пятом, шестом можно подкорректировать уже имеющееся смещение 2,5В.

Далее приведен наглядный пример зависимости изменения величины смещения сигнала от подстроечного резистора.

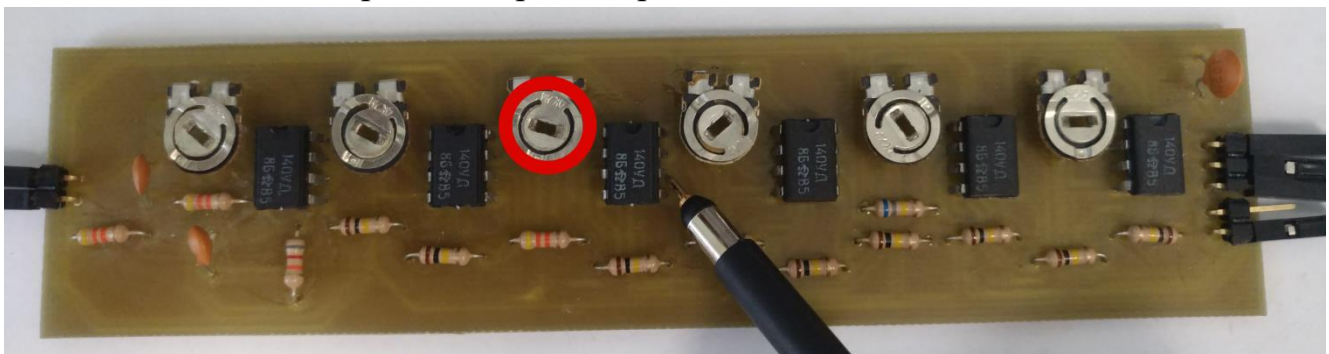


Рис. 32. Резистор, сопротивление которого изменяем.

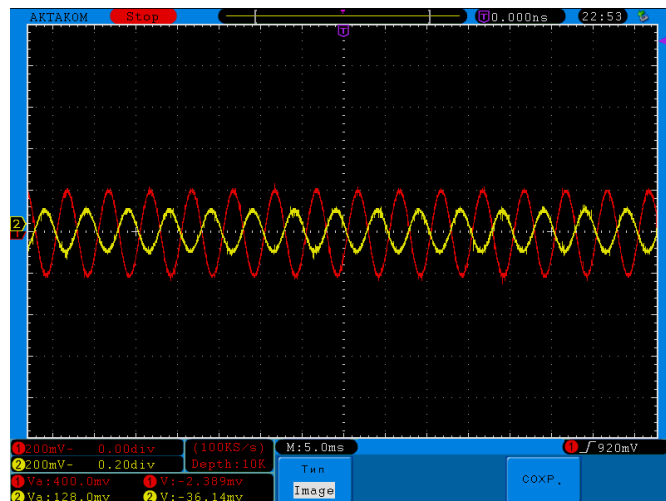


Рис. 33. Сигнал с нулевым смещением

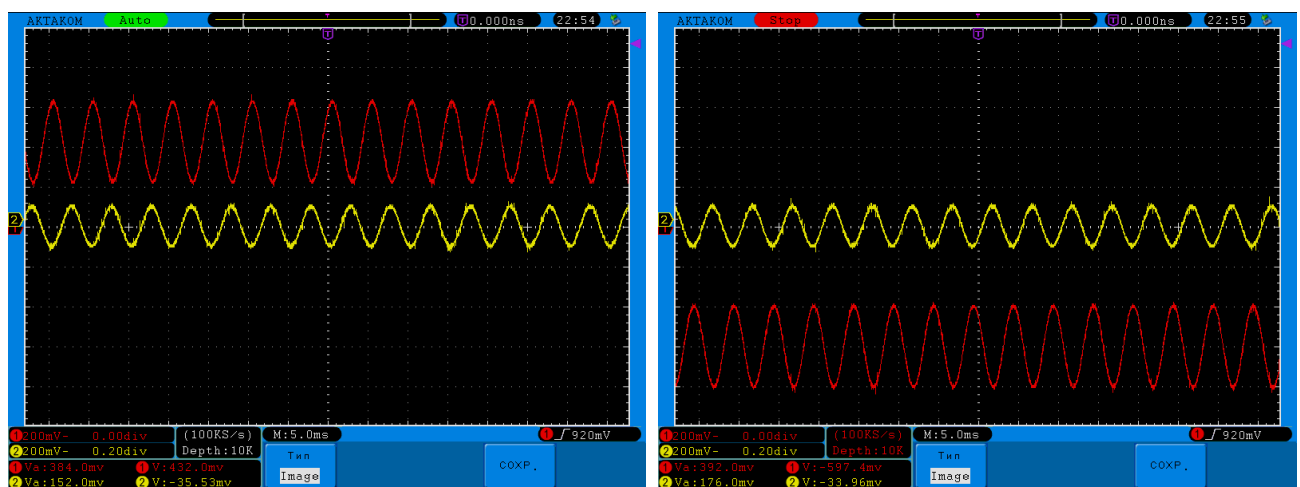


Рис. 34. Сигнал со смещением, отличным от нуля, при различных положениях подвижного контакта подстроечного резистора.

Список литературы

1. Прянишников В.А. Электроника. Полный курс лекций. – СПб.: Издательство «Корона. Век», 2014. – 416 с., ил.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / Пер.с англ. Б. Н. Бронин [и др.]. – 7-е изд. – Москва : БИНОМ, 2012. – 704 с.
3. Аналоговые интегральные микросхемы: Справочник/ Под ред. Б. П. Кудряшова – М.: Радио и связь , 1981.
4. Москатов Е. А. Справочник по полупроводниковым приборам. –М.: Журнал «Радио», 2005. – 208 с., ил.
5. Печатные платы: Справочник / Под ред. К. Ф. Кумбза. Пер. с англ. Под ред. А. Медведева. В 2-х кн. Книга 1. М.: Техносфера, 2011.
6. Единая система конструкторской документации:
 - ГОСТ 2.702-2011 «Правила выполнения электрических схем»
 - ГОСТ 2.701-2008 «Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению»
 - ГОСТ 2.728-74 «Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы»
 - ГОСТ 2.759-82 «Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники»
 - ГОСТ 2.417-91 «Платы печатные. Правила выполнения чертежей»
 - ГОСТ Р 53429-2009 «Платы печатные. Основные параметры конструкции»
 - ГОСТ Р 51040-97 «Платы печатные. Шаги координатной сетки»

Приложение 1

Ряд E24

номинал	допуск	номинал	допуск	номинал	допуск	номинал	допуск	номинал	допуск	номинал	допуск	номинал	допуск
0 Ом	5%	10 Ом	1%	100 Ом	5%	1 кОм	5%	10 кОм	1%	100 кОм	5%	1 МОм	5%
1 Ом	5%	11 Ом	5%	110 Ом	5%	1,1 кОм	5%	11 кОм	5%	110 кОм	1%	1,1 МОм	5%
1,1 Ом	5%	12 Ом	5%	120 Ом	5%	1,2 кОм	5%	12 кОм	5%	120 кОм	5%	1,2 МОм	5%
1,2 Ом	5%	13 Ом	5%	130 Ом	5%	1,3 кОм	1%	13 кОм	5%	130 кОм	5%	1,3 МОм	5%
1,3 Ом	1%	15 Ом	5%	150 Ом	5%	1,5 кОм	5%	15 кОм	5%	150 кОм	1%	1,5 МОм	5%
1,5 Ом	1%	16 Ом	5%	160 Ом	5%	1,6 кОм	5%	16 кОм	5%	160 кОм	1%	1,6 МОм	5%
1,6 Ом	1%	18 Ом	5%	180 Ом	5%	1,8 кОм	1%	18 кОм	5%	180 кОм	5%	1,8 МОм	5%
1,8 Ом	5%	20 Ом	5%	200 Ом	5%	2 кОм	5%	20 кОм	5%	200 кОм	5%	2 МОм	5%
2 Ом	5%	22 Ом	5%	220 Ом	5%	2,2 кОм	5%	22 кОм	5%	220 кОм	1%	2,2 МОм	5%
2,2 Ом	5%	24 Ом	5%	240 Ом	5%	2,4 кОм	5%	24 кОм	5%	240 кОм	5%	2,4 МОм	5%
2,4 Ом	5%	27 Ом	5%	270 Ом	1%	2,7 кОм	1%	27 кОм	5%	270 кОм	5%	2,7 МОм	5%
2,7 Ом	5%	30 Ом	5%	300 Ом	5%	3 кОм	5%	30 кОм	1%	300 кОм	5%	3 МОм	5%
3 Ом	5%	33 Ом	5%	330 Ом	1%	3,3 кОм	5%	33 кОм	5%	330 кОм	5%	3,3 МОм	5%
3,3 Ом	5%	36 Ом	5%	360 Ом	5%	3,6 кОм	5%	36 кОм	1%	360 кОм	5%	3,6 МОм	5%
3,6 Ом	5%	39 Ом	5%	390 Ом	5%	3,9 кОм	5%	39 кОм	5%	390 кОм	5%	3,9 МОм	5%
3,9 Ом	5%	43 Ом	5%	430 Ом	5%	4,3 кОм	5%	43 кОм	1%	430 кОм	1%	4,3 МОм	5%
4,3 Ом	1%	47 Ом	5%	470 Ом	5%	4,7 кОм	5%	47 кОм	5%	470 кОм	1%	4,7 МОм	5%
4,7 Ом	5%	51 Ом	5%	510 Ом	5%	5,1 кОм	5%	51 кОм	5%	510 кОм	1%	5,1 МОм	5%
5,1 Ом	5%	56 Ом	1%	560 Ом	5%	5,6 кОм	5%	56 кОм	5%	560 кОм	1%	5,6 МОм	1%
5,6 Ом	5%	62 Ом	5%	620 Ом	5%	6,2 кОм	5%	62 кОм	1%	620 кОм	5%	6,2 МОм	5%
6,2 Ом	5%	68 Ом	5%	680 Ом	5%	6,8 кОм	5%	68 кОм	5%	680 кОм	5%	6,8 МОм	1%
6,8 Ом	5%	75 Ом	5%	750 Ом	5%	7,5 кОм	5%	75 кОм	5%	750 кОм	1%	7,5 МОм	5%
7,5 Ом	5%	82 Ом	5%	820 Ом	5%	8,2 кОм	1%	82 кОм	5%	820 кОм	1%	8,2 МОм	5%
8,2 Ом	5%	91 Ом	5%	910 Ом	5%	9,1 кОм	5%	91 кОм	5%	910 кОм	5%	9,1 МОм	5%
9,1 Ом	5%											10 МОм	5%

Приложение 2

Активные фильтры

Активный фильтр представляет собой четырёхполюстник, содержащий пассивные RC-цепи и активные элементы, чаще всего операционные усилители. Активные фильтры обычно не содержат катушек индуктивности. Стремление исключить катушки индуктивности из фильтра вызвано рядом причин: 1) катушки имеют большие габариты и массу; 2) потери в катушках приводят к отклонению расчетных характеристик фильтра от реальных значений; 3) в катушка рассеивается большая мощность; 4) в катушках с сердечником проявляется нелинейный эффект, связанный с насыщением сердечника.

Пассивные частотные фильтры, обычно рассматриваемые в курсе электротехники, выполняются на LC- или на RC-цепях без применения усилительных активных элементов. Такие фильтры не требуют источников питания и имеют простое исполнение, однако они не обеспечивают хорошего разделения полосы пропускания от полосы затухания; в области пропускания и затухания могут наблюдаться большие неравномерности передаточной характеристики; очень сложно выполнить условие согласования фильтра с нагрузкой.

В отличие от пассивных, активные фильтры обеспечивают более качественное разделение полос пропускания и затухания. В них сравнительно просто регулировать неравномерности частотной характеристики в области пропускания и затухания, не предъявляется жестких требований к согласованию нагрузки с фильтром. Все эти преимущества активных фильтров обеспечили им самое широкое применение.

Активные фильтры можно разделить и группы по различным признакам: назначению, полосе пропускаемых частот, типу усилительных элементов, виду обратных связей, и др. По полосе пропускаемых частот фильтры делятся на четыре основные группы: нижних частот, верхних частот, полосовые и заграждающие. Фильтры нижних частот пропускают сигнал от постоянного напряжения до некоторой предельной частоты, называемой частотой среза фильтра. Фильтры верхних частот, наоборот, пропускают сигнал начиная с частоты среза и выше. Полосовые фильтры пропускают сигналы в некоторой полосе частот, а заграждающие фильтры имеют характеристику, противоположную полосовым, и пропускают сигналы с частотой ниже и выше

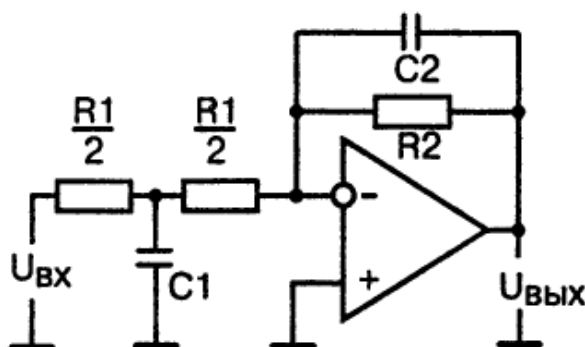
определённой частоты. Как полосовые, так и заграждающие фильтры могут иметь гребенчатую частотную характеристику, в которой будет несколько полос пропускания и затухания.

По назначению фильтры делятся на сглаживающие фильтры источников питания, заграждающие фильтры помех, фильтры для селективных усилителей низкой или высокой частоты и др.

Все рассмотренные фильтры могут иметь одну цепь обратной связи или несколько. В связи с этим различают фильтры с одноконтурной и с многоконтурной обратной связью. Кроме этого, различают фильтры по числу полюсов на частотной характеристике – фильтры первого порядка, второго и более высоких порядков. Фильтры высоких порядков имеют более крутые границы полос пропускания и затухания и более плоскую характеристику в области полосы пропускания. К таким фильтрам относятся фильтры Чебышева, Баттерворта, Бесселя и др.

Рассмотрим типовые схемы активных фильтров.

Активный фильтр нижних частот второго порядка



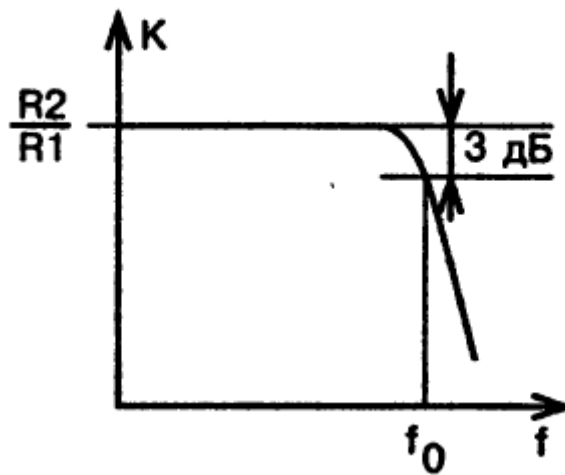
Коэффициент усиления фильтра нижних частот второго порядка такой же, как у фильтра первого порядка, в связи с тем что суммарное сопротивление резисторов в цепи инверсного входа выражается значением R_1 :

$$K = -\frac{R_2}{R_1}$$

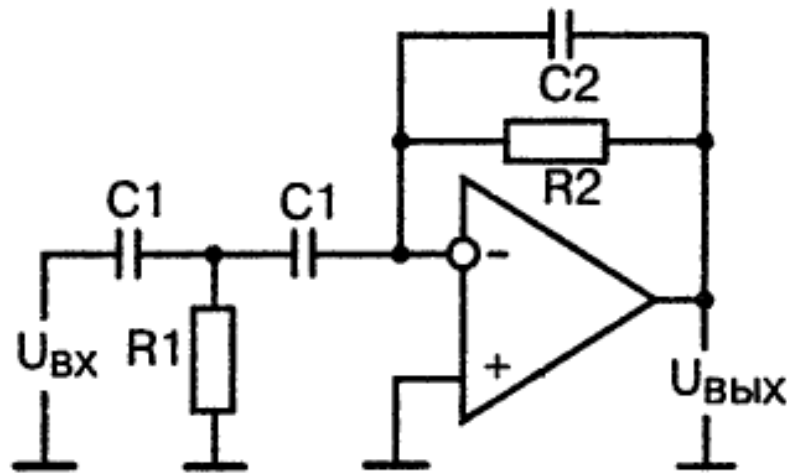
Граничная частота при выполнении условия $R_1 C_1 = 4 R_2 C_2$ также выражается прежней формулой:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

ЛАЧХ фильтра:



Активный фильтр верхних частот второго порядка

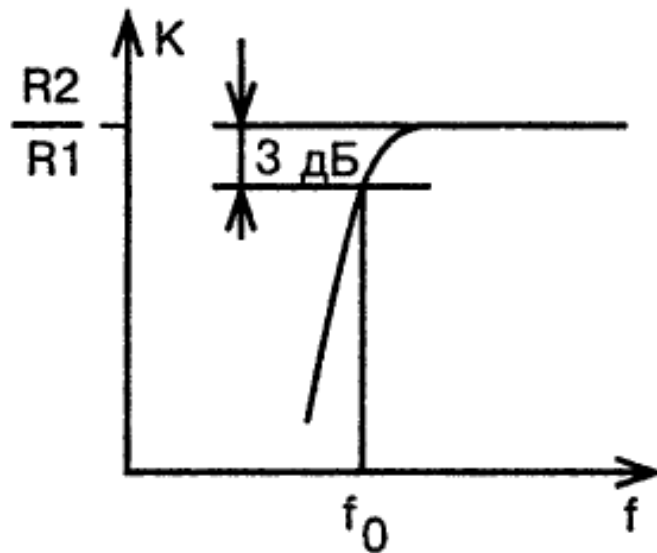


Коэффициент усиления фильтра верхних частот второго порядка такой же, как у фильтра первого порядка, в связи с тем, что суммарное сопротивление резисторов в цепи инверсного входа, выражается значением R_1 :

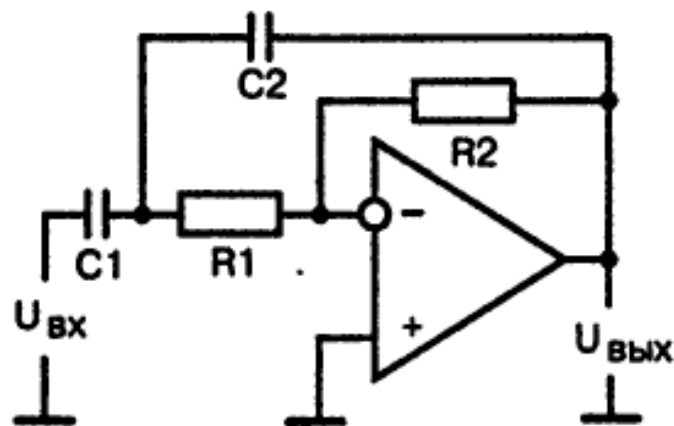
$$K = -\frac{R_2}{R_1}$$

Граничная частота при выполнении условия $R_1 C_1 = R_2 C_2$ выражается формулой:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$



Активный полосовой фильтр

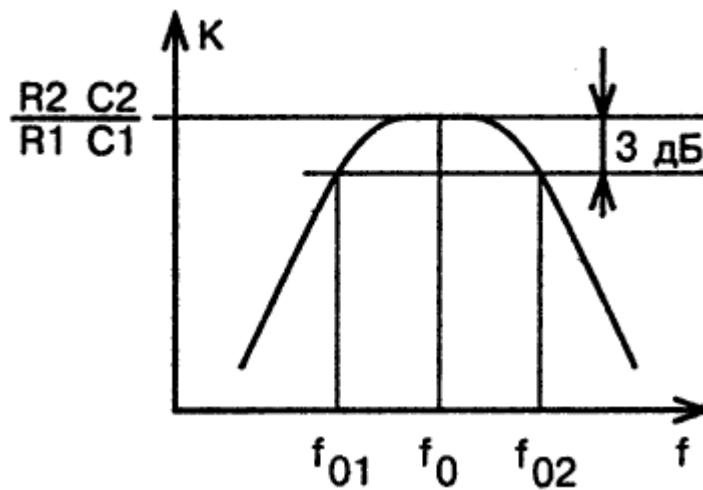


Для рассматриваемого полосового фильтра частота квазирезонанса f_0 определяется элементами цепи обратной связи:

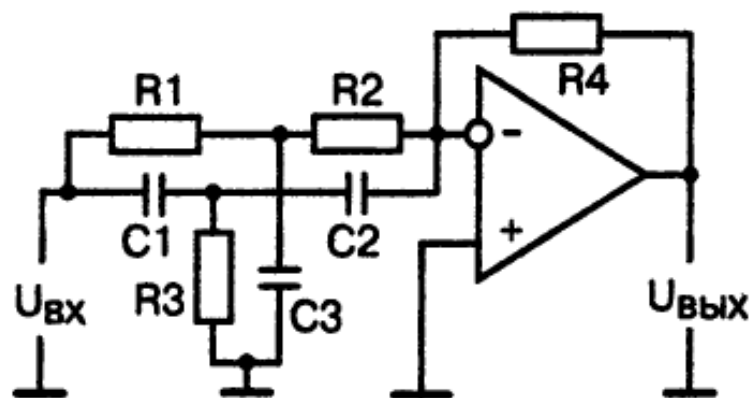
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

Максимальный коэффициент усиления на частоте квазирезонанса оказывается равным:

$$K = -\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}$$



Активный режекторный (заградительный) фильтр



При выполнении условий

$$R_1 = R_2 = R, R_3 = \frac{R}{2}, C_1 = C_2 = R \text{ и } C_3 = 2C$$

амплитудно-частотная характеристика активного фильтра, имеющего во входной цепи двойной Т-фильтр, содержит квазирезонанс, частота которого определяется формулой:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

