

1.4 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО СХЕМОТЕХНИКЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

1.4.1 Общие замечания и порядок выполнения заданий практикума

Для выполнения лабораторных работ практикума по схемотехнике операционных усилителей используется лабораторная установка NI ELVIS (производство National Instrument, США). Перед выполнением работ следует внимательно изучить руководство пользователя NI ELVIS (см. Приложение 1) из которого четко прояснить, какие средства лабораторной установки будут использованы для решения поставленной задачи и порядок работы с ними. В частности, следует изучить описание аппаратных компонентов (раздел 2.1. руководства), программное обеспечение (подразделы 2.2.1. и 2.2.2.), описание макетной платы (раздел 3.3.) и порядок подключения к ней сигналов (раздел 3.4.).

Рекомендуемый порядок действий при выполнении заданий практикума иллюстрируется следующим примером.

Пусть требуется собрать макет схемы усилителя ограничителя, типовая схема которого приведена на рисунке 1.12.

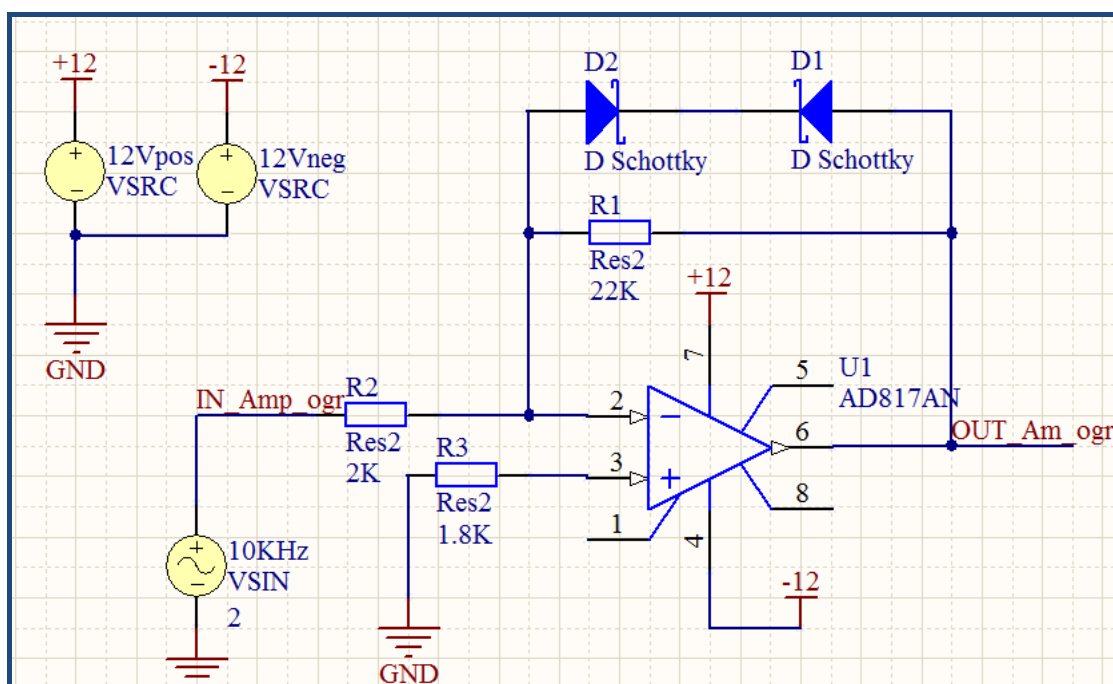


Рисунок 1.12 – Схема ограничения сигнала по амплитуде.

А) В ходе анализа принципиальной схемы, следует определить необходимые для выполнения задания аппаратные и программные компоненты и нарисовать эскизную схему соединений элементов макетной платы и аппаратуры лабораторной установки.

В данном примере потребуется использование выхода функционального генератора и двух входов осциллографа для регистрации входного и выходного сигналов схемы ограничителя.

Б) Из имеющихся в наличии комплектующих элементов следует выбрать и подготовить к монтажу требуемые компоненты для сборки устройства на макетной плате.

В) Важным этапом работы является разработка монтажной схему проектируемого устройства с четким определением всех входных, выходных сигналов и цепей питания и указанием точек их подключения к выводам макетной платы лабораторной установки NI ELVIS. Вариант такой схемы для данного примера приведен на рисунке 1.13.

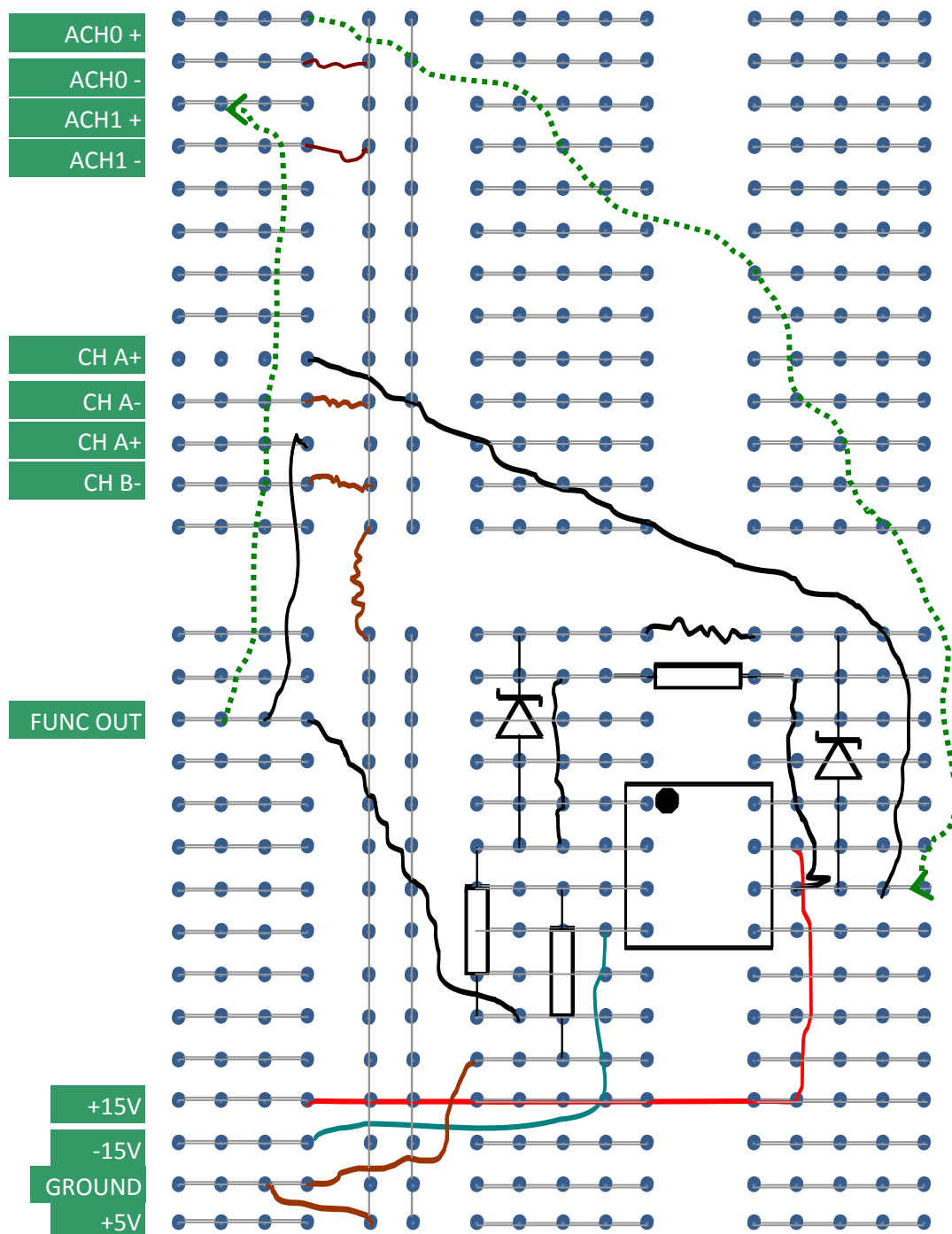


Рисунок 1.13 – Монтажная схема ограничителя сигнала по амплитуде (пунктирными линиями показано, как следует подключать исследуемую схему при измерениях АЧХ).

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

Г) Выполнить сборку схемы на макетной плате, установить компоненты и перемычки в контактные отверстия. При этом корпус ОУ следует установить на свое место в последнюю очередь только после визуальной проверки правильности подключения источников питания, земляного вывода и отсутствия короткого замыкания выхода ОУ. Пример выполненного монтажа амплитудного ограничителя приведен на рисунке 1.14.

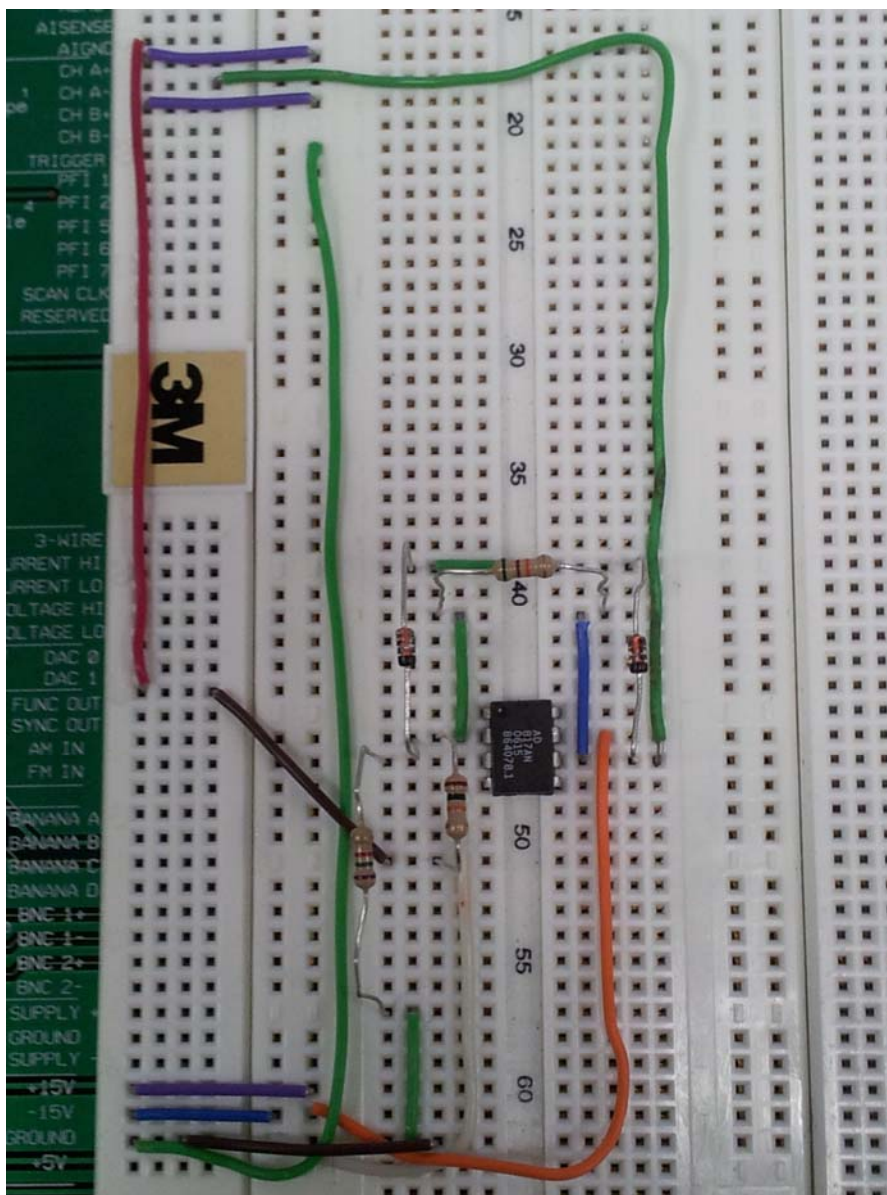


Рисунок 1.14 –Ограничитель сигнала по амплитуде, собранный на макетной плате лабораторной установки NI ELVIS.

Д) Запустить на выполнение программу управления NI ELVIS и открыть окно необходимого программного компонента лабораторной установки. В данном случае это двухлучевой осциллограф.

У) При необходимости установить в рабочие положения органы ручного управления лабораторной установки. В частности, в данном случае следует задать диапазон выходной частоты функционального генератора - 5 кГц, и вывести потенциометр регулировки амплитуды в крайнее левое положение.

Е) Не включая питания, перед началом работы следует предъявить собранный макет устройства и настройки интерфейса пользователя преподавателю или лаборанту для проверки.

Ж) После разрешения преподавателя или лаборанта включить питание на лицевой панели, провести измерения и при необходимости - подстройку органов управления интерфейса пользователя для удобной регистрации выходных сигналов и записать снимки экрана с полученными данными экспериментов с собранным макетом устройства. В данном примере – это снимок экрана двухлучевого осциллографа с входным и выходным сигналами амплитудного ограничителя (см. рисунок 1.15.).

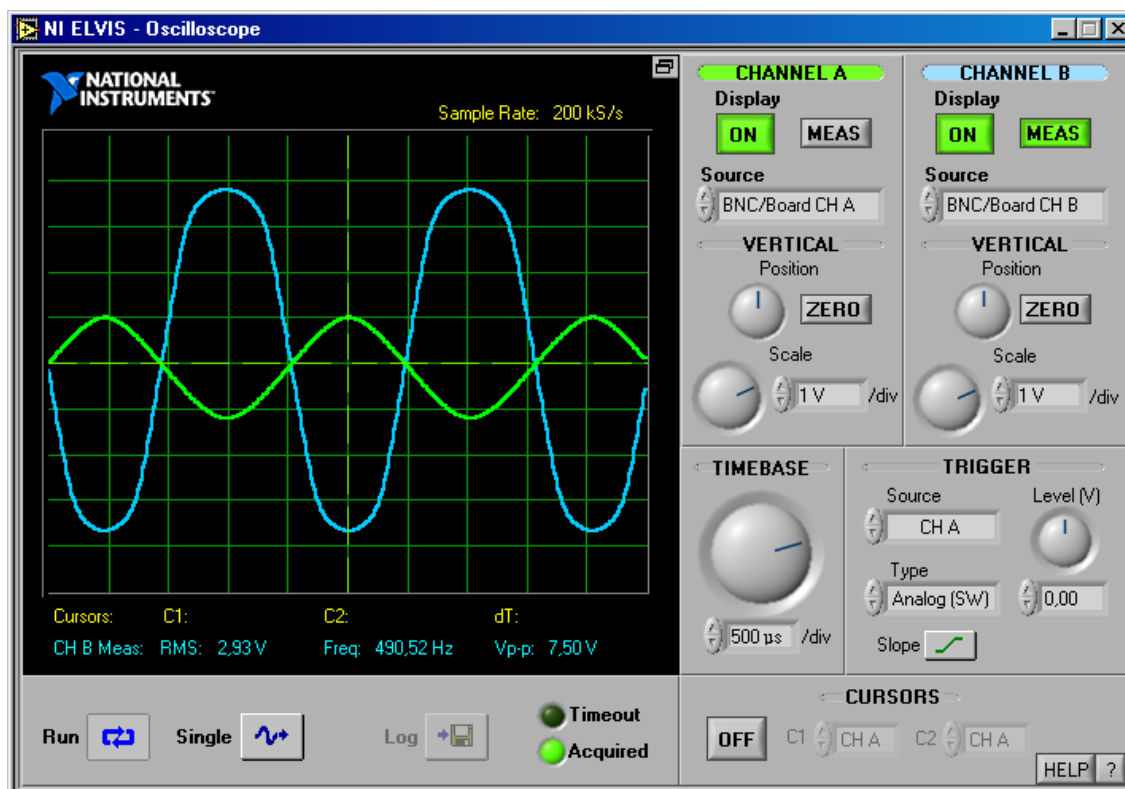


Рисунок 1.15 –Интерфейс виртуального осциллографа NI ELVIS с результатами исследования работы схемы амплитудного ограничителя.

1.4.2 Варианты заданий лабораторного практикума

1.4.2.1 Фильтр низких частот с крутизной спада -20дБ/декаду

Схема обычного фильтра НЧ представлена на рисунке 1.16. Фильтрацию выполняет RC-цепь, а ОУ используется как усилитель с единичным усилением. Резистор

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

R_{oc} включен в схему для компенсации сдвига по постоянному току, поскольку на нулевой частоте сопротивление с обоих входов ОУ на землю должно быть одинаково, то $R_{oc}=R$. Т.к. дифференциальное напряжение между входами ОУ практически равно нулю, то выходное напряжение повторит напряжение на конденсаторе C . При этом входное Цепь R - C составит делитель для входного напряжения $E_{вх}$:

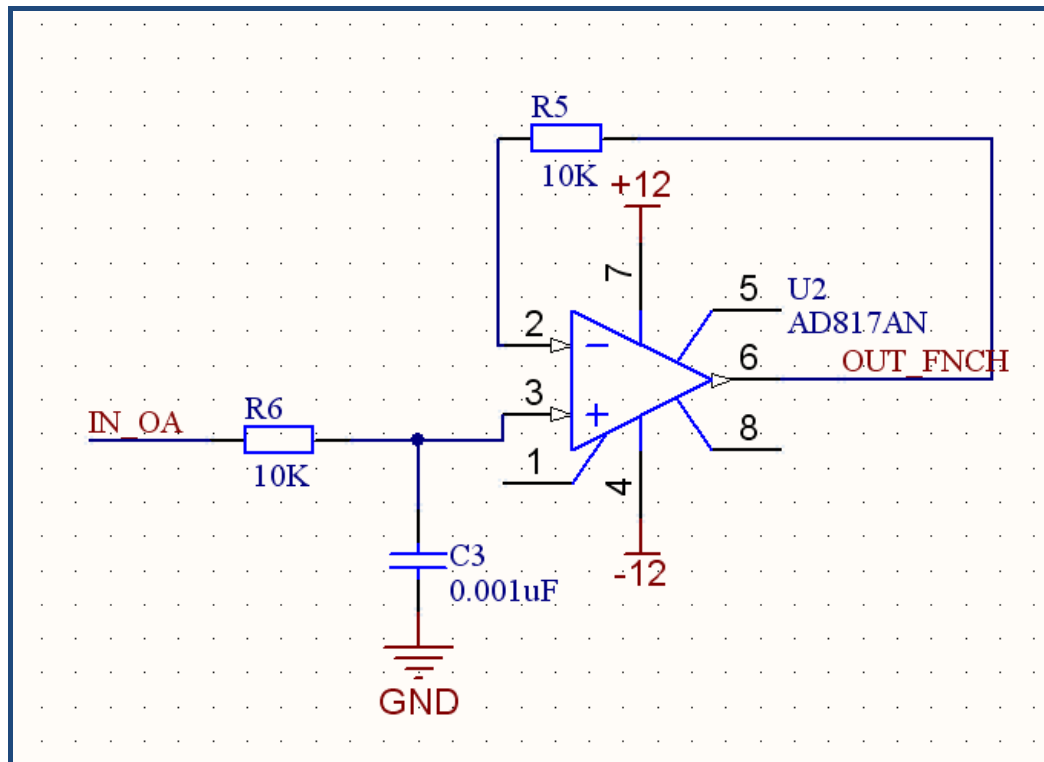


Рисунок 1.16 - Схема ФНЧ с крутизной -20дБ/декада.

Тогда

$$U_{\text{вых}} = U_C = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} E_{\text{вх}} \quad (1.8)$$

Где ω - частота $E_{вх}$ в радианах в секунду ($\omega=2\pi f$). Тогда коэффициент усиления схемы зависит от частоты:

$$K_{oc} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{1 + j\omega C} \quad (1.9)$$

Частота среза фильтра определяется как частота, на которой коэффициент усиления уменьшается до 0,707:

$$\omega_{cp} = \frac{1}{RC} = 2\pi f_{cp}, \quad (1.10)$$

где f измеряется в герцах.

Рекомендуемая последовательность расчета ФНЧ:

1. Выбрать частоту среза f_{cp} ;
2. Выбрать входное сопротивление R (обычно от 10 до 100 кОм);

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

3. Вычислить соответствующее f_{cp} и R значение C .

Задание 1:

1. Рассчитайте параметры схемы ФНЧ, приведенной на рисунке 1.16 с заданной частотой среза.
2. Соберите на макетной плате NI ELVIS схему ФНЧ.
3. Измерьте АЧХ фильтра, по данным измерений определите частоту среза, крутизну спада и фазовый сдвиг на частоте среза.
4. Сравните полученные экспериментально значения параметров фильтра п.3. со значениями, рассчитанными в п.1. Объясните расхождения эксперимента и расчета.

1.4.2.2 Фильтр низких частот по Баттерворту с крутизной спада -40дБ/декаду

Фильтр Баттерворта используется в тех случаях, когда в пределах полосы пропускания требуется получить максимально плоскую амплитудно-частотную характеристику. Типовая принципиальная схема фильтра Баттерворта с наклоном -40дБ/декаду приведена на рисунке 1.17.

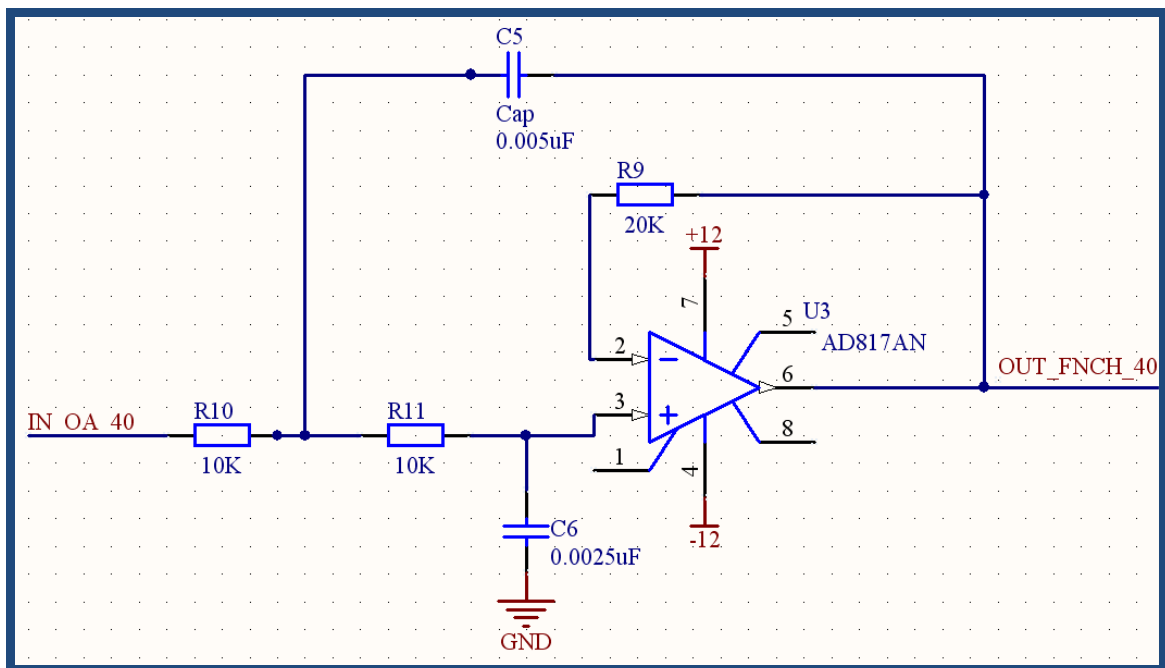


Рисунок 1.17 - Схема ФНЧ с крутизной -40дБ/декада.

ОУ в данной схеме на постоянном токе имеет единичное усиление, причем резистор R_{oc} обеспечивает компенсацию сдвига уровня выходного сигнала по постоянному току. В этом случае напряжение на конденсаторе $C1$ равно выходному напряжению $U_{вых}$.

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

Рекомендуемая последовательность действий для расчета ФНЧ по схеме рисунка 1.16:

1. Выбрать частоту среза f_{cp} ;
2. Назначить $R1=R2=R$, обычно значение этого сопротивления выбирается в диапазоне от 10 до 100 кОм. При этом должно выполняться соотношение $R_{oc}=2R$.
3. Вычислить значение $C1$:

$$C1 \approx \frac{0,707}{\omega_{cp} R} \quad (1.11)$$

4. Выбрать $C2=2C1$.

Задание 2:

1. Рассчитайте параметры схемы ФНЧ, приведенной на рисунке 1.17 с заданной частотой среза.
2. Соберите на макетной плате NI ELVIS схему ФНЧ.
3. Измерьте АЧХ фильтра, по данным измерений определите частоту среза, крутизну спада на частоте среза. Определите область частот, для которых собранный фильтр с точностью до 5% обеспечивает плоскую характеристику на уровне 0 дБ. Определите, в каком диапазоне изменяется сдвиг фазы сигнала с частотой.
4. Сравните полученные экспериментально значения параметров фильтра п.3. со значениями, рассчитанными в п.1. Объясните расхождения эксперимента и расчета.

1.4.2.3 Фильтр высоких частот с крутизной спада -20 дБ/декада

Схема фильтра высоких частот с крутизной спада -20 дБ/декада приведена на рисунке 3. Резистор $R7=R_{oc}$ включен для минимизации сдвига по постоянному току. Сравнение схемы простейшего активного фильтра высоких частот (ФВЧ), изображенной на рисунке 3 со схемой ФНЧ, изображенной на рисунке 1.18, показывает, что, как и должно быть в соответствии с правилами, справедливыми для упрощенного расчета схем на основе ОУ, в них конденсатор в цепи обратной связи заменен резистором, а входной резистор, подключенный к неинвертирующему входу ОУ, заменен конденсатором реактивное сопротивление которого возрастает с частотой, что приводит к единичному значению коэффициента усиления на высоких частотах.

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

Действительно, поскольку ОУ включен в схеме с неинвертирующим входом, то выходное напряжение $U_{вых}$ равно падению напряжения на резисторе $R8=R7$:

$$U_{вых} = \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega RC}} E_{вх} \quad (1.12)$$

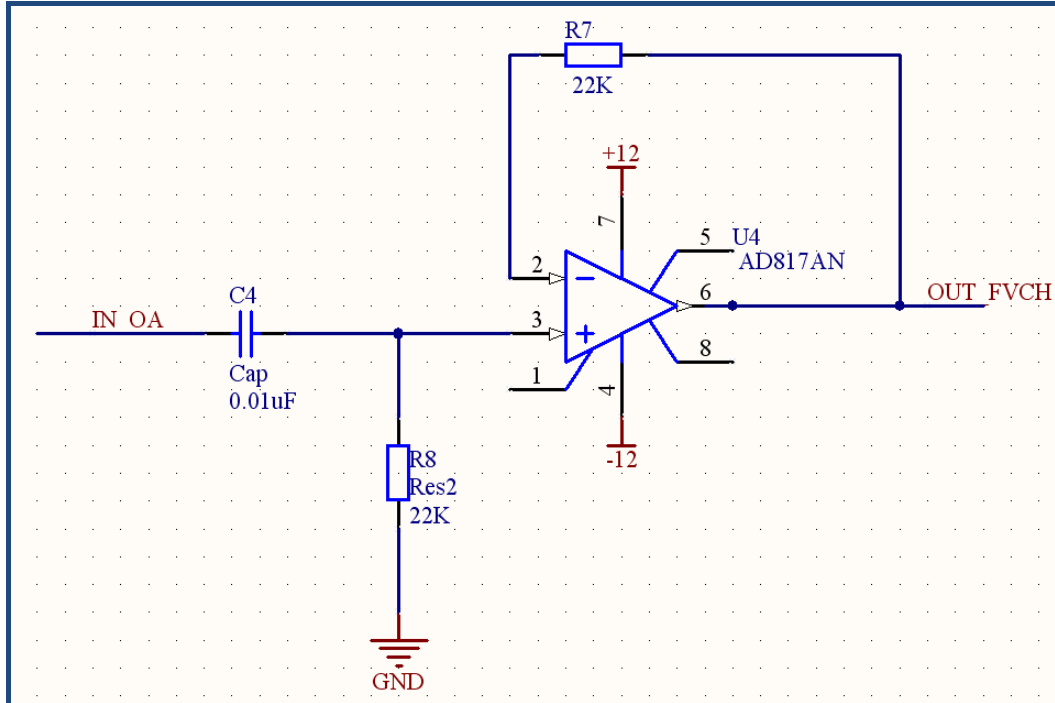


Рисунок 1.18 - Схема ФВЧ с крутизной -20дБ/декада.

На высокой частоте $U_{вых}=E_{вх}$. При $\omega RC=1$ коэффициент усиления с обратной связью:

$$K_{oc} = \frac{1}{1 - j} = \frac{1}{\sqrt{2}e^{-j45^\circ}} \approx 0,707e^{j45^\circ}, \text{ и его амплитуда: } |K_{oc}| = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707 = -3\text{дБ}$$

Соответственно, частота среза определяется из соотношения:

$$\omega_{cp} = 2\pi f_{cp} = \frac{1}{RC}. \quad (1.13)$$

На практике при расчете ФВЧ для заданной ω_{cp} выбирается величина C и рассчитывается R .

Т.е. порядок расчета схемы ФВЧ таков:

1. Выбирается частота среза ω_{cp} или f_{cp} .
2. Выбирается удобное значение C .
3. Вычисляется соответствующее значение R :

$$R = \frac{1}{\omega_{cp} C} = \frac{1}{2\pi f_{cp} C} \quad (1.14)$$

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

4. Выбирается $R_{oc}=R$.

В действительности реальная схема ОУ не может обеспечить постоянство усиления при неограниченном возрастании частоты и ФВЧ неизбежно имеет спад АЧХ («завал») на высоких частотах.

Задание 3:

1. Рассчитайте параметры схемы ФВЧ, приведенной на рисунке 1.18 с заданной частотой среза.
2. Соберите на макетной плате NI ELVIS схему ФВЧ.
3. Измерьте АЧХ фильтра, по данным измерений определите частоту среза, крутизну спада на частоте среза. Определите, в каком диапазоне изменяется сдвиг фазы сигнала с частотой.
4. Сравните полученные экспериментально значения параметров фильтра п.3. со значениями, рассчитанными в п.1. Объясните расхождения эксперимента и расчета.

1.4.2.4 Схема фильтра высоких частот с крутизной спада -40 дБ/декада

Как показано на рисунке 1.19, по аналогии с рисунком 1.17 схема фильтра Баттерворта высоких частот с наклоном – 40дБ/декаду получается соответствующей перестановкой в нем резисторов и конденсаторов.

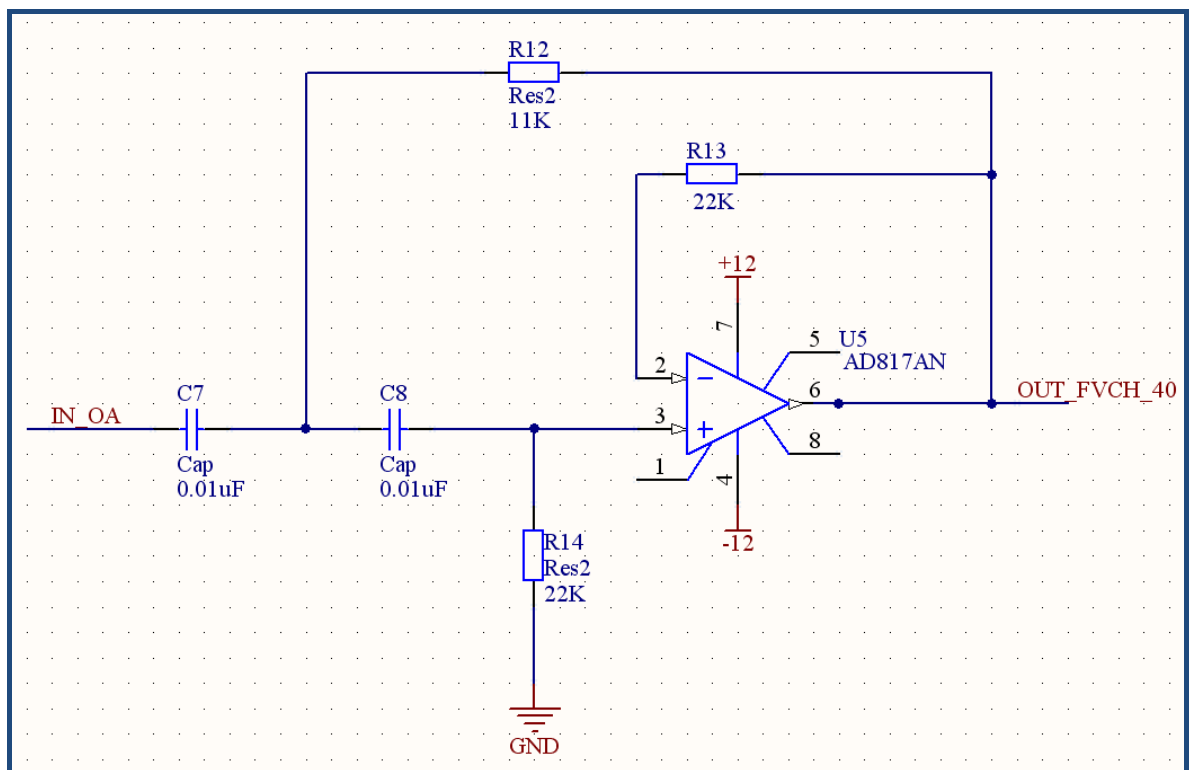


Рисунок 1.19 - Схема ФВЧ с крутизной -40дБ/декада.

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

Чтобы удовлетворять критериям, предъявляемым к фильтрам Баттерворта, его АЧХ в пределах полосы пропускания должна обеспечивать затухание 0дБ и на частоте среза спадать на 3дБ (т.е. до 0,707 от значения внутри полосы пропускания). Эти условия выполняются, если придерживаться следующего порядка расчета:

1. Выбрать частоту среза ω_{cp} или f_{cp} .
2. Положить $C7=C8=C$ и выбрать подходящее значение этой емкости.
3. Вычислить значение $R14$ и $R12$ по формулам:

$$R14 = \frac{1,414}{\omega_{cp}C} \text{ и } R12 = \frac{R14}{2} \quad (1.15)$$

4. Для минимизации сдвига по постоянному току принять $R_{oc}=R13=R14$.

Задание 4:

1. Рассчитайте параметры схемы ФВЧ, приведенной на рисунке 1.19 с заданной частотой среза.
2. Соберите на макетной плате NI ELVIS схему ФВЧ.
3. Измерьте АЧХ фильтра, по данным измерений определите частоту среза, крутизну спада на частоте среза. Определите область частот, для которых собранный фильтр с точностью до 5% обеспечивает плоскую характеристику на уровне 0 дБ. Определите, в каком диапазоне изменяется сдвиг фазы сигнала с частотой.
4. Сравните полученные экспериментально значения параметров фильтра п.3. со значениями, рассчитанными в п.1. Объясните расхождения эксперимента и расчета.

1.4.2.5 Полосовые фильтры

Схема простейшего активного полосового фильтра приведена на рисунке 1.20. Полосовой фильтр – это схема, пропускающая сигналы в определённой полосе частот: между нижней частотой среза и верхней частотой среза. За границами этой полосы схема осуществляет подавление (режекцию) сигналов. Поскольку прямоугольной амплитудной характеристики достичь не удастся, то за критерий границ полосы пропускания принимают значения частот, при которых сигнал по напряжению ослабляется до 0,707 от максимального значения. Частота, на которой напряжение принимает максимальное значение, называется резонансной.

Отношение резонансной частоты к полосе пропускания B называется добротностью фильтра (коэффициентом добротности) Q :

$$Q = \frac{\omega_{cp}}{B}. \quad (1.16)$$

Полосовой фильтр считается узкополосным, если полоса пропускания не превышает десятой доли резонансной частоты, т.е. для узкополосных фильтров $Q < 10$.

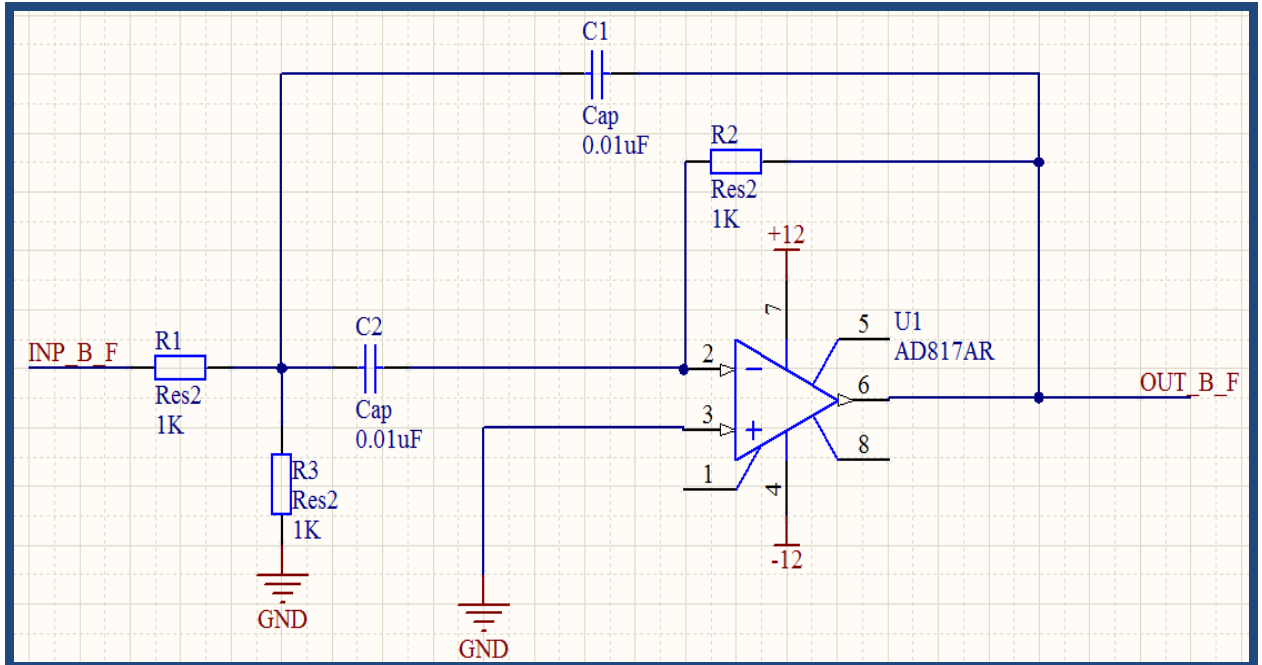


Рисунок 1.20 - Схема полосового фильтра.

В отличие от ФНЧ и ФВЧ для полосовых фильтров коэффициент усиления схемы с обратной связью может быть больше 1. Обычно при расчете исходными данными служат требуемая резонансная частота, полоса пропускания B и коэффициент усиления Kp , принимающий максимальное значение на резонансной частоте.

Если $C1=C2=C$, то значения номиналов сопротивлений определяют из соотношений:

$$R2 = \frac{2}{BC} \quad (1.17)$$

$$R1 = \frac{R2}{2Kp} \quad (1.18)$$

$$R3 = \frac{R2}{4Q^2 - 4Kp} \quad (1.19)$$

при этом требуется обеспечить условие $4Q^2 > 2Kp$.

Пример 1: пусть требуется рассчитать полосовой фильтр по схеме рисунка 1.20 и обеспечивающий $\omega_p=10000$ рад/с, $Kp=40$, $Q=20$ и $C1=C2=C=0,01$ мкФ. Тогда:

$$B = \frac{10 \cdot 10^3}{20} = 500 \text{ рад/с,}$$

$$R2 = \frac{2}{500(0,01 \cdot 10^{-6})} = 400 \text{ кОм,}$$

$$R1 = \frac{400 \cdot 10^3}{2 \cdot 40} = 5 \text{ кОм}$$

$$R3 = \frac{400 \cdot 10^3}{(4 \cdot 400) - (2 \cdot 40)} = 263 \text{ Ом}$$

Схему, представленную на рисунке 1.20 можно рассчитать как широкополосный фильтр, используя те же уравнения при условии, что $4Q^2 > 2Kp$.

Пример 2: Рассчитать схему широкополосного фильтра, имеющую $\omega p = 20000$ рад/с, $Kp = 10$, $Q = 5$ и $C1 = C2 = C = 0,01$ мкФ.

$$B = \frac{20 \cdot 10^3}{5} = 4000 \text{ рад/с}$$

$$R2 = \frac{2}{(4 \cdot 10^3)(0,01 \cdot 10^{-6})} = 50 \text{ кОм}$$

$$R1 = \frac{50 \cdot 10^3}{2 \cdot 10} = 2,5 \text{ кОм}$$

$$R3 = \frac{50 \cdot 10^3}{(4 \cdot 25) - (2 \cdot 10)} = 625 \text{ Ом}$$

Другой вариант реализации широкополосных фильтров – последовательное включение ФНЧ и ФВЧ.

Задание 5:

1. Рассчитайте параметры полосового фильтра, схема которого приведена на рисунке 1.20 с заданной резонансной частотой пропускания, коэффициентом усиления на резонансной частоте, равным 50 и добротностью, равной 30.
2. Соберите на макетной плате NI ELVIS схему полосового фильтра.
3. Измерьте АЧХ фильтра, по данным измерений определите полосу пропускания. Определите, в каком диапазоне изменяется сдвиг фазы сигнала с частотой.
4. Сравните полученные экспериментально значения параметров фильтра п.3. со значениями, рассчитанными в п.1. Объясните расхождения эксперимента и расчета.

1.4.2.6 Простой режекторный фильтр

Схема, представленная на рисунке 1.21, представляет собой режекторный или заграждающий фильтр. Такой фильтр, может использоваться, например, когда требуется ослабить сигналы шумов частотой 50 или 400 Гц. Сигналы нежелательной частоты, лежащие в полосе заграждения, ослабляются. Исходными данными при проектировании служат требуемая полоса пропускания B или добротностью Q , а также резонансная частота ωp . Как обычно, полоса пропускания соответствует уровню 3дБ от минимального значения пропускания на частоте резонанса.

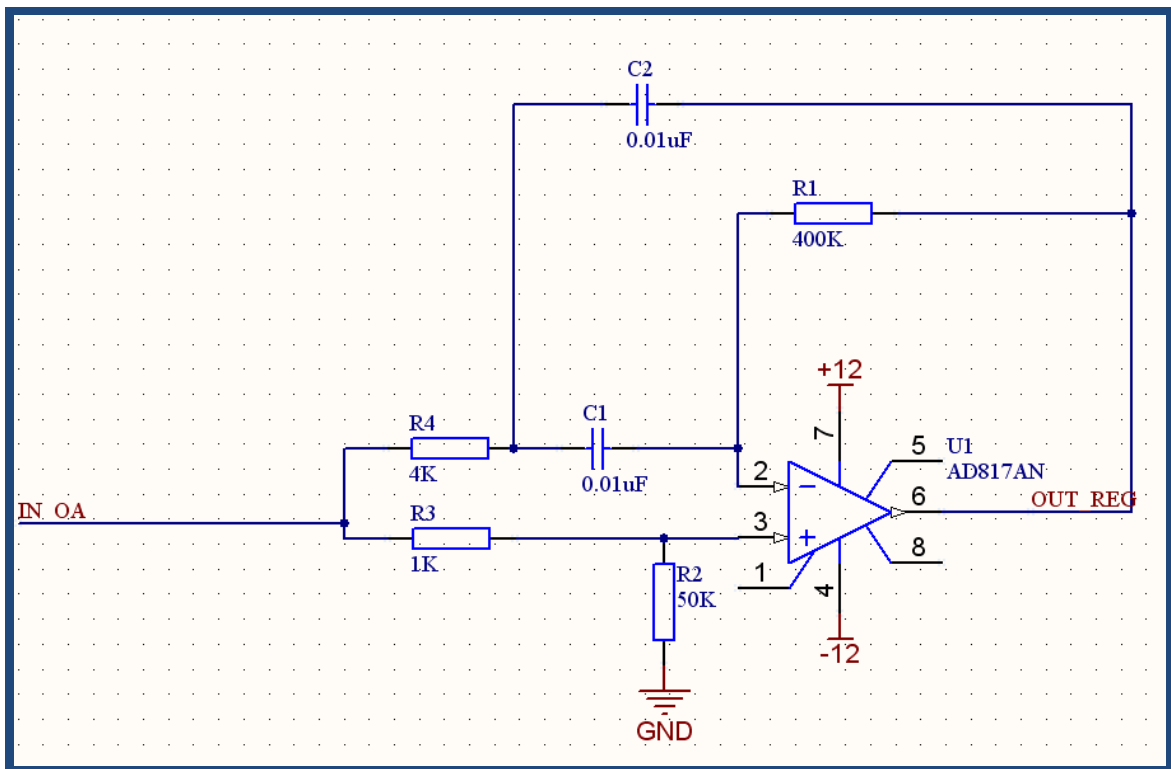


Рисунок 1.21 - Схема режекторного фильтра на одном ОУ.

Порядок расчета:

1. Выбираем некоторое удобное значение номинала емкости конденсаторов:

$$C1 = C2 = C.$$

2. Определяем $R1$:

$$R1 = \frac{2}{BC}, \quad (1.20)$$

где B измеряется в радианах в секунду.

3. Вычисляем $R1$:

$$R4 = \frac{R1}{4Q^2} \quad (1.21)$$

4. Выбираем удобное значение $R3$, например, 1кОм.

5. Вычисляем $R2$:

$$R2 = 2Q^2 R3 \quad (1.22)$$

Пример: рассчитать режекторный фильтр по схеме из рисунка 1.21 так, чтобы $f_p=400$ Гц и $Q=5$. Пусть $C1=C2=C=0,01$ мкФ.

Решение:

$$\omega p = 2\pi f p \approx 6,28 \cdot 400 = 2510 \text{ рад/с}$$

$$B = \frac{2,51 \cdot 10^3}{5} \approx 500 \text{ рад/с}$$

$$R1 = \frac{2}{BC} = \frac{2}{500(0,01 \cdot 10^{-6})} = 400 \text{ Ом}$$

$$R4 = \frac{R1}{4Q^2} = \frac{400}{4 \cdot 25} = 4 \text{ кОм}$$

Выбираем $R3=1$ кОм, откуда $R2 = 2 \cdot 25 \cdot 1 \text{ кОм} = 50 \text{ кОм}$.

При настройке режекторного фильтра следует придерживаться следующей последовательности действий:

1. Заземлить вход (+) ОУ. Полученная схема является полосовым фильтром, аналогичным показанному на рисунке 1.9, но без $R3$. Усиление этого полосового фильтра на частоте ωp равно $2Q^2$. Для точной настройки на частоту ωp следует подобрать номиналы резисторов $R1$ и $R4$.

2. Удалить заземление с входа (+) ОУ и подстроить номинал $R2$ до расчетного значения.

Задание 6:

1. Рассчитайте параметры режекторного фильтра, схема которого приведена на рисунке 1.21 с заданной резонансной частотой режекции и полосой пропускания.
2. Соберите на макетной плате NI ELVIS схему режекторного фильтра.
3. Измерьте АЧХ фильтра, по данным измерений определите полосу пропускания. Определите, в каком диапазоне изменяется сдвиг фазы сигнала с частотой.
4. Сравните полученные экспериментально значения параметров фильтра п.3. со значениями, рассчитанными в п.1. Объясните расхождения эксперимента и расчета.

1.4.2.7 Режекторный фильтр с улучшенной характеристикой

В схеме, представленной на рисунке 1.22, удается получить лучшее ослабление сигнала на резонансной частоте, поскольку между неинвертирующим выводом ОУ и землей включен активный преобразователь импедансов (*гиратор*).

Ги́ратором называется электронное устройство, предназначенное для преобразования сопротивлений реактивных элементов. Поскольку реализация катушек индуктивностей с помощью твердотельной технологии сопряжена с большими трудностями, как правило, гираторы используются для преобразования емкости в индуктивность, т.е. являются эквивалентами индуктивности. Отсюда другое название гираторов - синтезаторы индуктивностей. Применение схем гираторов позволяет получить относительно большую индуктивность при малых размерах элементов. Недостаток гираторов - это активные схемы, для работы которых требуется питание.

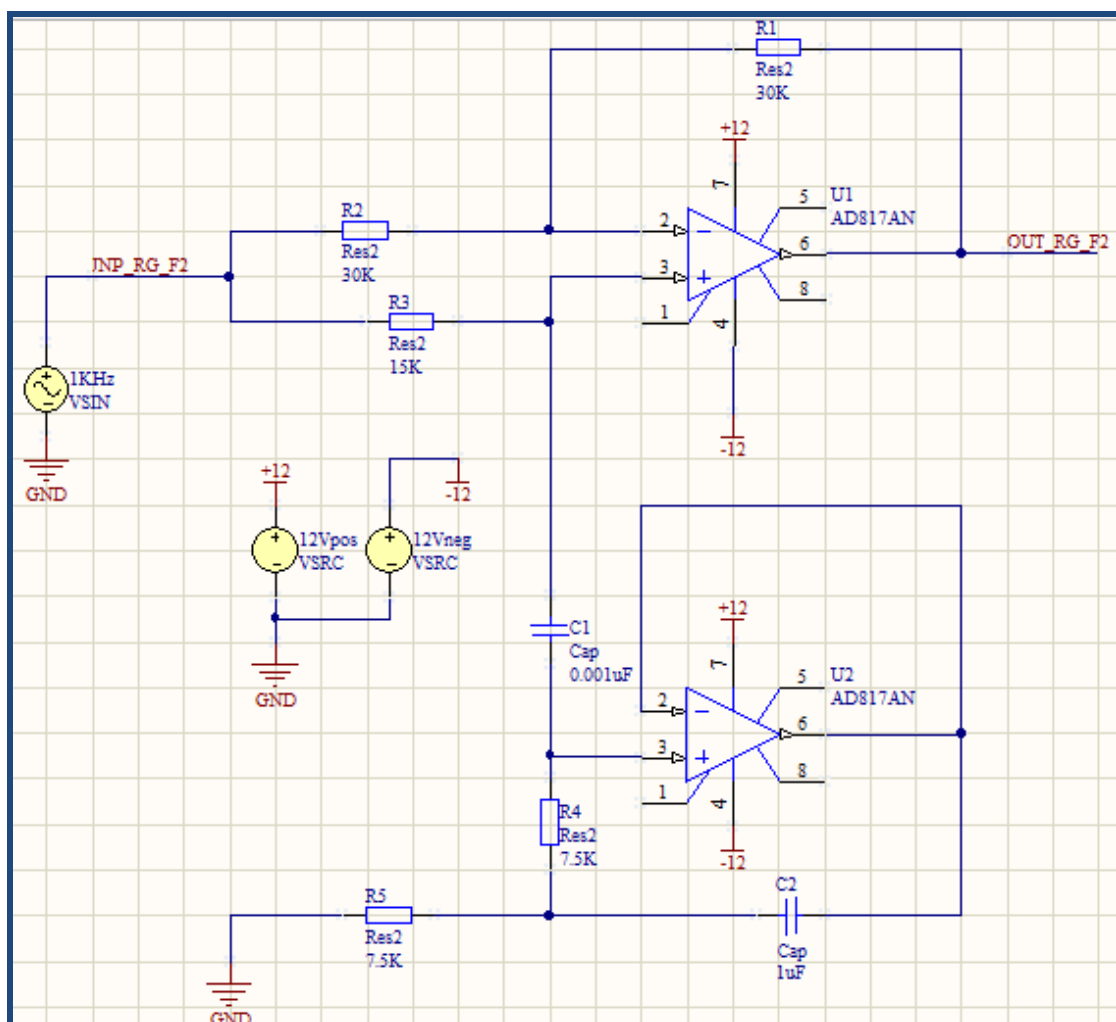


Рисунок 1.21 - Схема режекторного фильтра с ОУ в качестве гиратора.

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

На рисунке 1.22 приведена электрическая схема одного из вариантов гиратора, представляющего собой повторитель на ОУ, охваченный частотно-избирательной положительной обратной связью (R_f и $C1$).

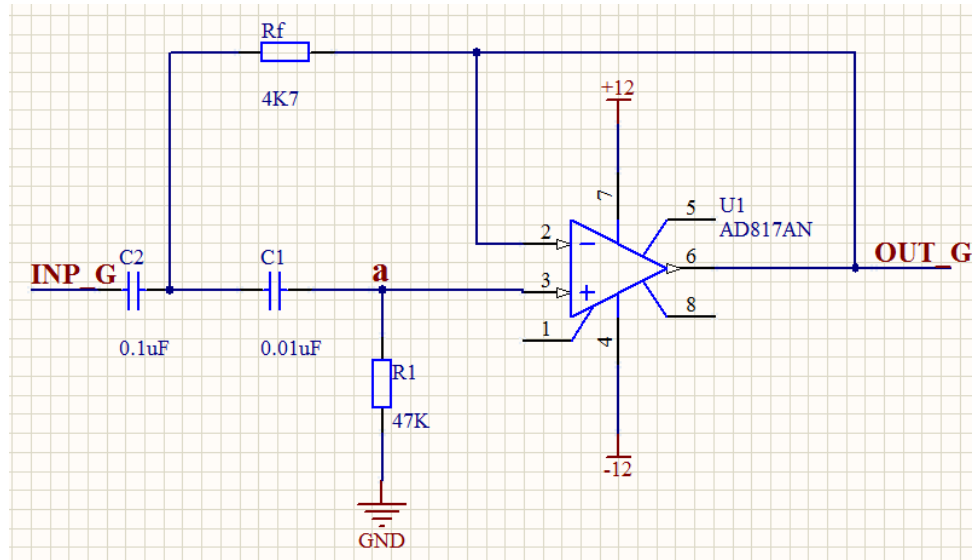


Рисунок 1.22 – Гиратор на ОУ.

Поскольку с увеличением частоты сигнала емкостное сопротивление конденсатора $C1$ уменьшается, то напряжение в точке **a** будет возрастать. Вместе с ним будет возрастать напряжение на выходе ОУ. Увеличенное напряжение с выхода по цепи ПОС поступает на неинвертирующий вход, что приводит к дальнейшему росту напряжения в точке **a**, причем тем интенсивнее, чем выше частота. Таким образом, напряжение в точке **a** ведет себя подобно напряжению на катушке индуктивности. Синтезированная индуктивность определяется по формуле:

$$L = R1 \cdot R_f \cdot C1 \quad (1.23)$$

Добротность гиратора определяется как:

$$Q = 0.5 \cdot \sqrt{\frac{R1}{R_f}} \quad (1.24)$$

Одной из основных проблем при создании гираторов является трудность в получении эквивалента индуктивности, у которой оба вывода не соединены с общей шиной. Такой гиратор выполняется, как минимум, на четырех ОУ. Другой проблемой является относительно узкий диапазон рабочих частот гиратора (до нескольких килогерц на ОУ широкого применения).

Для успешной работы схемы на рисунке 1.21 требуется, чтобы выполнялось соотношение

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{2R4} \quad (1.25)$$

Частота режекции определяется номинальным значением емкости $C1$. Для проектирования фильтра удобно воспользоваться графиком, приведенным на рисунке 1.23.

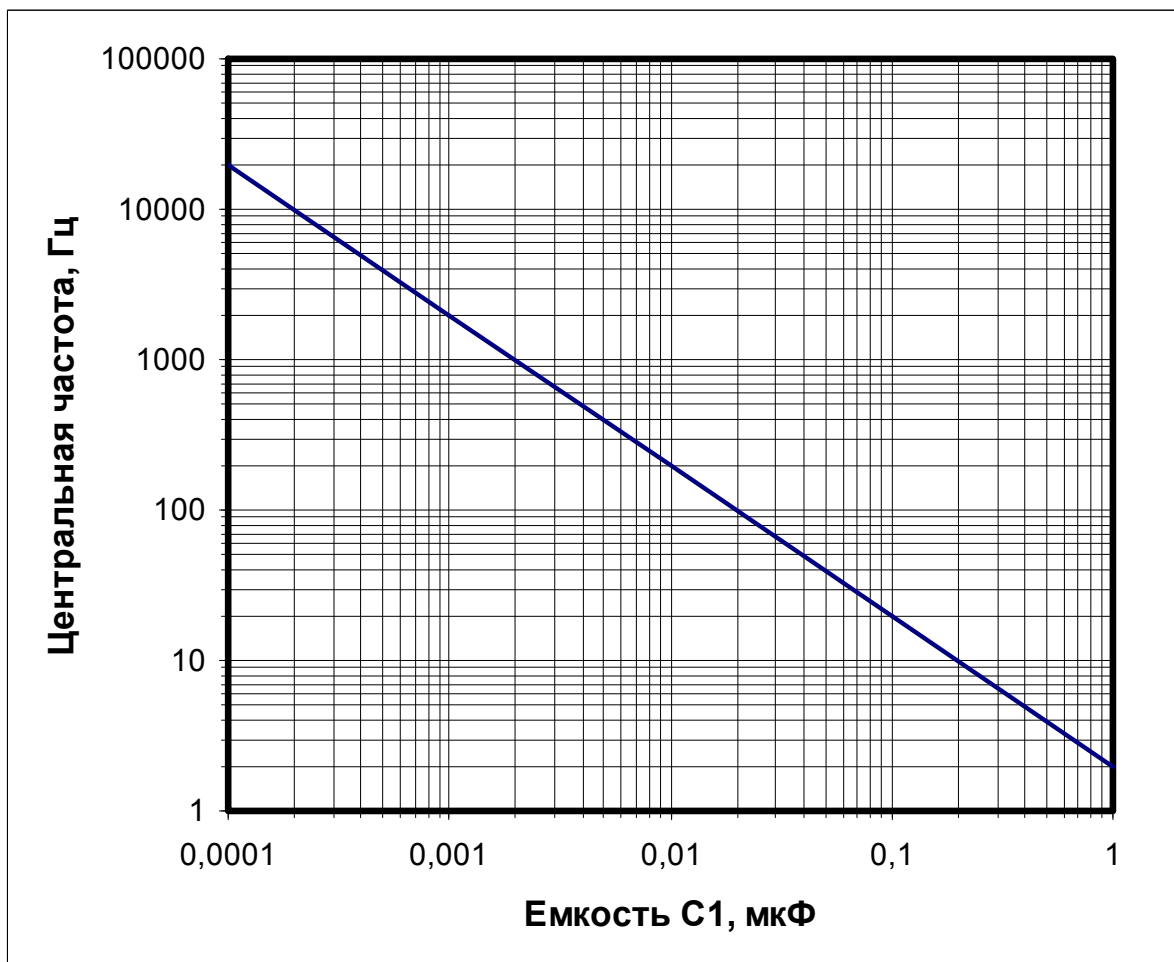


Рисунок 1.23 – Зависимость частоты режекции от емкости в схеме с гиратором.

Задание 7:

1. По графику 1.23, исходя из заданного значения частоты режекции, определите значение емкости $C1$ режекторного фильтра, схема которого приведена на рисунке 1.21.
2. Соберите на макетной плате NI ELVIS схему режекторного фильтра с гиратором.
3. Измерьте АЧХ фильтра, по данным измерений определите полосу пропускания. Определите, в каком диапазоне изменяется сдвиг фазы сигнала с частотой.
4. По полученным данным оцените добротность фильтра.

1.4.2.8 Простейший интегратор

Схема простейшего интегратора приведена на рисунке 1.24. Принцип работы интегратора основан на физическом смысле понятия электрической емкости конденсатора. Поскольку заряд, накапливаемый на обкладках конденсатора пропорционален его емкости и приложенному напряжению, то схему с конденсатором в цепи обратной связи можно применить для интегрирования напряжения:

$$Q = \int I_{\text{вых}} dt = C1 \cdot U_{\text{вых}} \quad (1.26)$$

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{R2C1} \int U_{\text{вх}} dt, \quad (1.27)$$

$$\text{т.к. } I_{\text{вых}} = -I_{\text{вх}} = -\frac{U_{\text{вх}}}{R2} \quad (1.28)$$

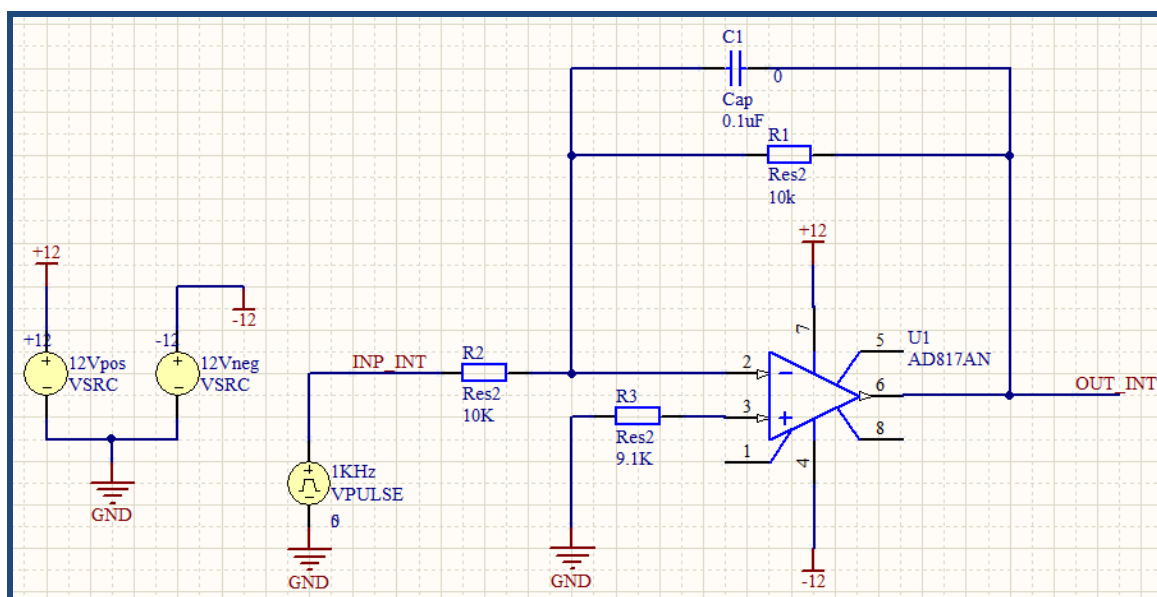


Рисунок 1.24 - Схема простейшего интегратора.

Частотная характеристика интегратора обратно пропорциональна частоте:

$$K(j\omega) = -\frac{1}{j\omega R2C1} \quad (1.29)$$

Постоянная времени интегрирования, т.е. время, за которое при постоянном входном напряжении $U_{\text{вх}}$ линейное приращение выходного напряжения достигнет этого же значения равно произведению $R2C1$.

Роль сопротивления $R1$ в цепи обратной связи интегратора в схеме на рисунке 1.24 – обеспечение разрядки конденсатора $C1$ в интервалы времени между импульсами входного сигнала. При произвольной форме входного сигнала существует возможность насыщения выходного сигнала. Чтобы интегратор не уходил в зону насыщения необходимо, в частности, ограничивать входное напряжение: т.е. при известных

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

параметрах сопротивления $R2$ и емкости C необходимо уменьшать амплитуду входного напряжения; а при постоянной амплитуде необходимо подбирать элементы $R2$ и $C1$.

Если постоянная времени интегрирования должна быть большой, то и значения $R2$ и $C1$ должны быть большими, порядка мегаом и микрофард. Это вызывает определенные проблемы, т.к. конденсаторы емкости более 1 мкФ имеют большие сопротивления утечки, обладают повышенной диэлектрической абсорбцией и диэлектрическими потерями, а введение в схему резисторов более 1 Мом, делает ее более подверженной влиянию паразитных емкостей и утечек. Типовое решение этих проблем – использование Т-образного соединения резисторов для увеличения значения эквивалентного сопротивления.

Задание 8:

1. Исходя из заданного значения интегрирующей емкости $C1$ и частоты входного сигнала определите значение сопротивления $R2$ на схеме рисунка 1.24.
2. Соберите на макетной плате NI ELVIS схему интегратора.
3. Задайте на входе импульсный сигнал заданной частоты амплитудой 5 В и убедитесь, что на выходе формируется пилообразный сигнал той же частоты (см. рисунок 1.25).
4. Изменяя частоту входного сигнала, наблюдайте на двухлучевом осциллографе, встроенном в NI ELVIS входной и выходной сигналы и определите диапазон частот, в котором интегрирование входного сигнала выполняется без искажений.

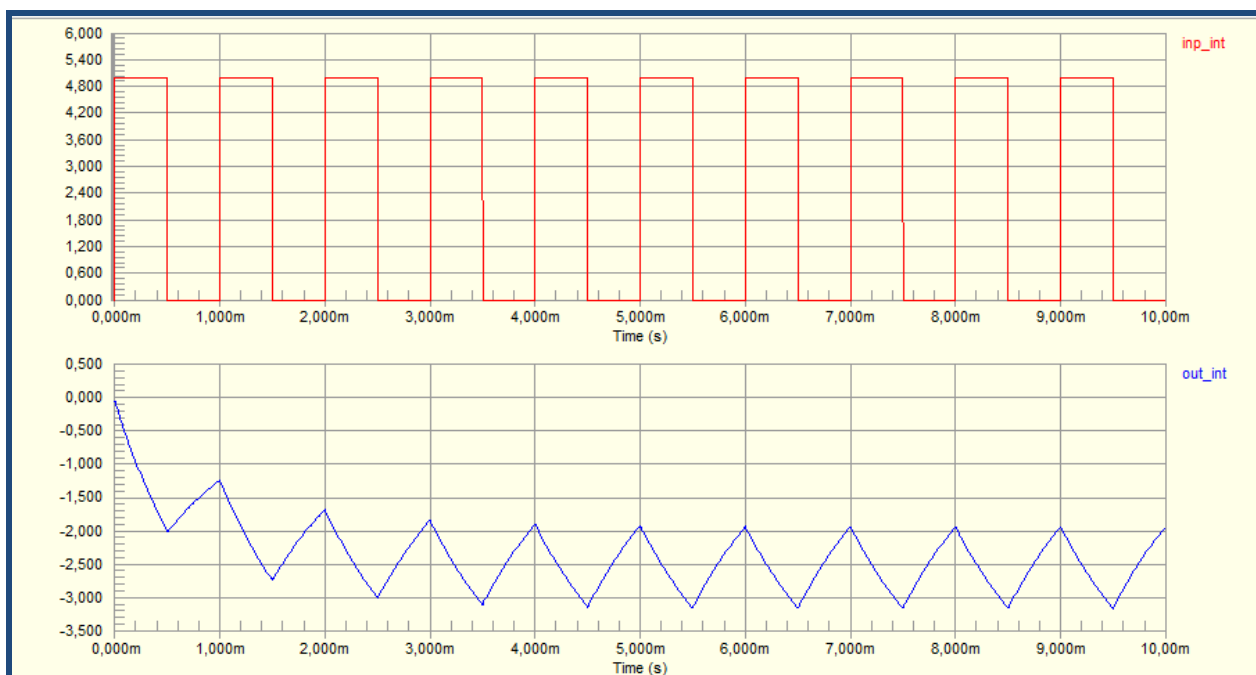


Рисунок 1.25 – Результаты моделирования схемы интегратора.

1.4.2.9 Простейшая дифференцирующая схема

Если конденсатор включен не в цепь обратной связи, а подключен к инвертирующему входу ОУ, то схема будет реализовывать дифференцирование входного сигнала. Такая схема простейшего дифференциатора приведена на рисунке 1.26.

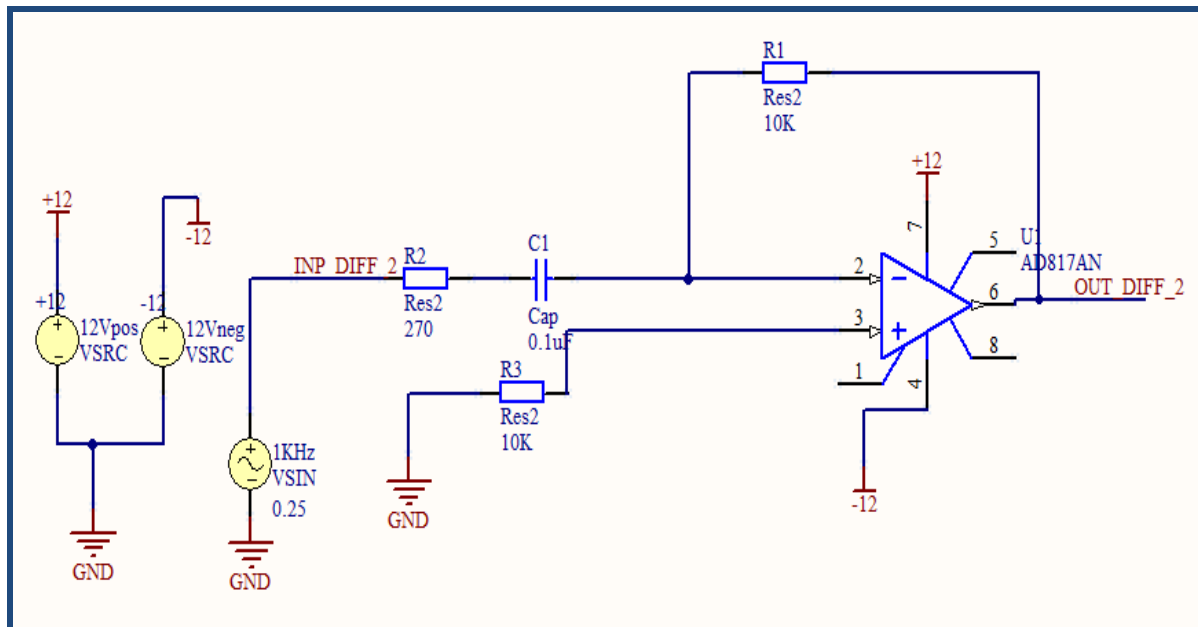


Рисунок 1.26 - Схема простейшего дифференциатора.

Без сопротивления R_2 во входной цепи модуль передаточной функции дифференциатора пропорционален частоте f :

$$|K| = \omega R_1 C_1 = 2\pi f R_1 C_1 \quad (1.30)$$

Действительно, поскольку токи, втекающие в инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ можно практически принять равными нулю, то ток через емкость протекает через резистор R_1 в цепи обратной связи. Тогда справедливы следующие соотношения:

$$dQ = \frac{U_{\text{вых}}}{R_1} dt = -C_1 dU_{\text{вх}} \quad (1.31)$$

$$U_{\text{вых}} = -R_1 C_1 \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} \quad (1.32)$$

Следует отметить, что дифференцирование в области высоких частот приводит к увеличению в сигнале высокочастотных составляющих, что ухудшает отношение сигнала к шуму.

По этой же причине на высоких частотах трудно добиться устойчивой работы дифференциатора. В петле обратной связи ОУ оказывается включенным инерционное звено первого порядка, создающее в области высоких частот запаздывание по фазе до 90° :

$\beta(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega R1C1}$. которое суммируется с фазовым сдвигом ИС ОУ (значение которого в свою очередь которое может составлять или даже превышать 90°).

Кроме того, нежелательно иметь чисто емкостное входное сопротивление схемы, что может привести к возбуждению предыдущего каскада

Эти проблемы устраняет введение в дифференцирующую схему дополнительного последовательного сопротивления $R2$, включенного последовательно с емкостью $C1$, и ограничивающего добротность схемы на высоких частотах. Сказанное иллюстрирует рисунок 1.27.

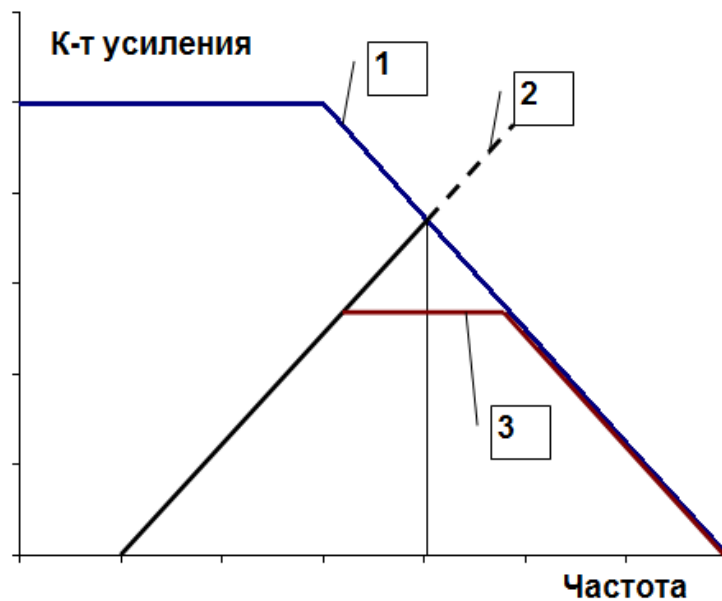


Рисунок 1.27 – Амплитудно-частотные характеристики: 1 – АЧХ ОУ при разомкнутой петле обратной связи; 2 – АЧХ идеальной дифференцирующей цепи; 3 – АЧХ реального дифференциатора, обеспечивающего постоянное значение произведения усиления на полюсу пропускания.

Как отмечалось выше, полоса частот работы ОУ ограничена за счет внутренних емкостей. Точка пересечения АЧХ дифференциатора и схемы ОУ при разомкнутой петле обратной связи соответствует частоте

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{W}{R1C1}} \tag{1.33}$$

Где – коэффициент $W = A_0\omega_0$ - произведение коэффициента усиления на ширину полосы для конкретного типа ОУ (обычно указывается в паспортных данных). Величину

RCI целесообразно выбирать так, чтобы на рабочей частоте $f = \frac{\omega}{2\pi}$ усиление петли обратной связи было единичным:

$$R2 = \sqrt{\frac{R1}{WC1}} \quad (1.34)$$

Задание 9:

1. Исходя из заданного значения дифференцирующей емкости $C1$ и частоты входного сигнала, паспортных данных ОУ определите значение сопротивлений $R1$ и $R2$ на схеме рисунка 1.26.
2. Соберите на макетной плате NI ELVIS дифференцирующую схему.
3. Задайте на входе синусоидальный сигнал заданной частоты амплитудой 0,25 В и убедитесь, что на выходе формируется сигнал, представляющий собой производную входного сигнала той же частоты (см. рисунок 1.28).
4. Изменяя частоту входного сигнала, наблюдайте на двухлучевом осциллографе, встроенном в NI ELVIS входной и выходной сигналы и определите диапазон частот, в котором дифференцирование входного сигнала выполняется без искажений.

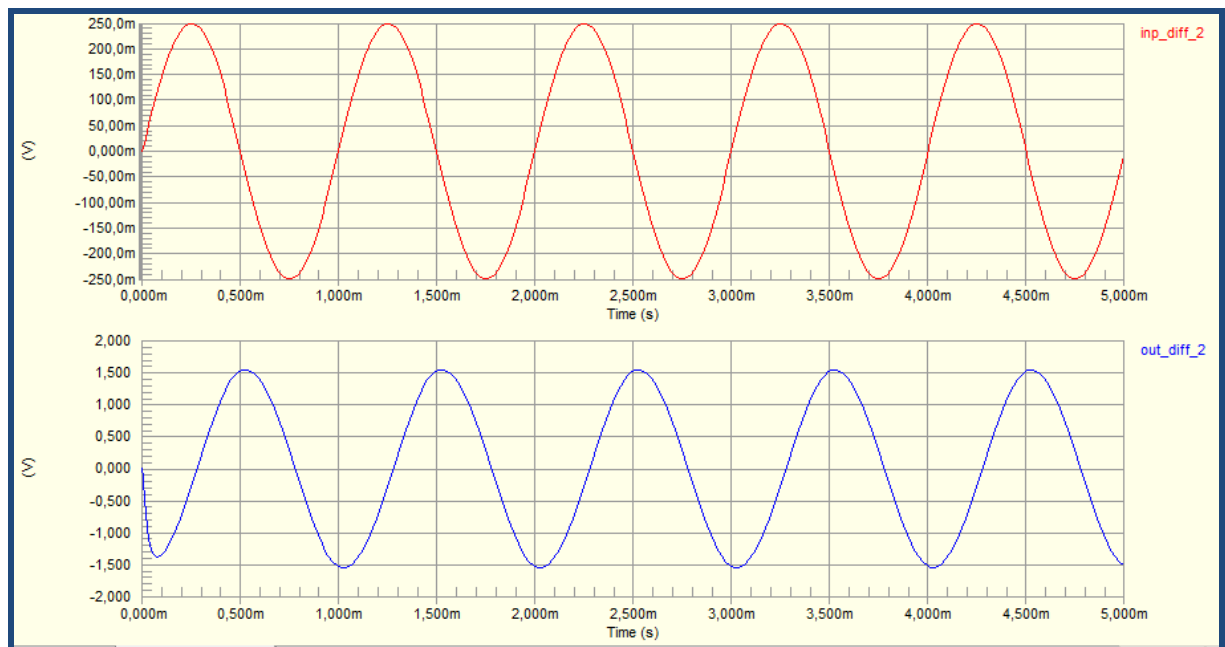


Рисунок 1.28 – Входной и выходной сигналы дифференцирующей схемы.

1.4.2.10 Компаратор с гистерезисом

Размыкание цепи обратной связи в схеме ОУ приводит к тому, что при равенстве напряжений входных сигналов состояние выхода является неустойчивым и ОУ переходит

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

в режим насыщения принимая значение $-V_s$ как только или $+V_s$ $v_n < v_p$. Схема, сигнал на выходе которой принимает два состояния в зависимости от результата сравнения входных сигналов, представляет собой компаратор. Время переключения компаратора на основе ОУ ограничено скоростью нарастания выходного напряжения. Очевидным недостатком такой схемы с разомкнутой петлей обратной связи является высокая чувствительность к шумам, что может приводить к флуктуациям выходного напряжения между уровнями $-V_s$ и $+V_s$. Как показано выше, в обзоре типовых схем с ОУ, исключить такие флуктуации можно путем реализации гистерезиса за счет введения положительной обратной связи. Типовая принципиальная схема компаратора с гистерезисом еще раз воспроизведена на рисунке 1.29. Как показано выше, ширина гистерезиса напряжения срабатывания такой схемы определяется по формулам:

$$\Delta v_r = (v_{OUT} - v_{REF}) \frac{R1}{R1 + R2} \quad \text{или} \quad \Delta v_r = (-V_s - v_{REF}) \frac{R1}{R1 + R2}, \quad (1.35)$$

где V_s – значение напряжения насыщения ОУ, v_{REF} – опорное напряжение, с которым сравнивается входной сигнал.

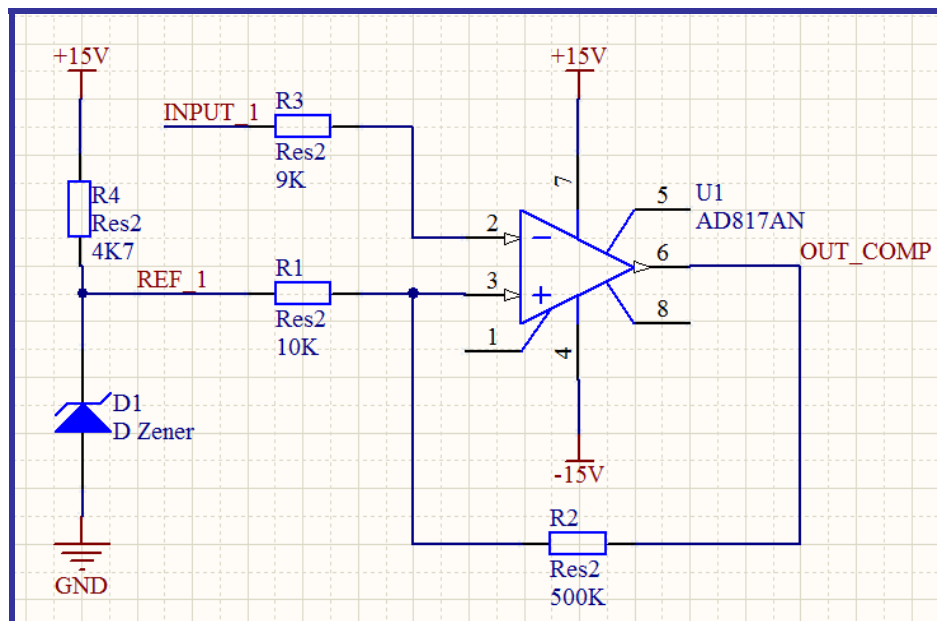


Рисунок 1.29 – Принципиальная схема компаратора с гистерезисом.

Порог срабатывания компаратора определяется номиналом опорного напряжения REF_1, ширина петли гистерезиса - значением сопротивления резисторов R1 и R2.

Задание 10:

1. Соберите на макетной плате NI ELVIS схему компаратора с гистерезисом.
2. Изменяя значение входного сигнала, убедитесь, что сигнал на выходе схемы, представляет собой результат переключения состояния выхода между

Часть 1. Схемотехника на основе операционных усилителей

положительным и отрицательным напряжениями насыщения (пример осциллограмм входного и выходного сигналов приведен на рисунке 1.30).

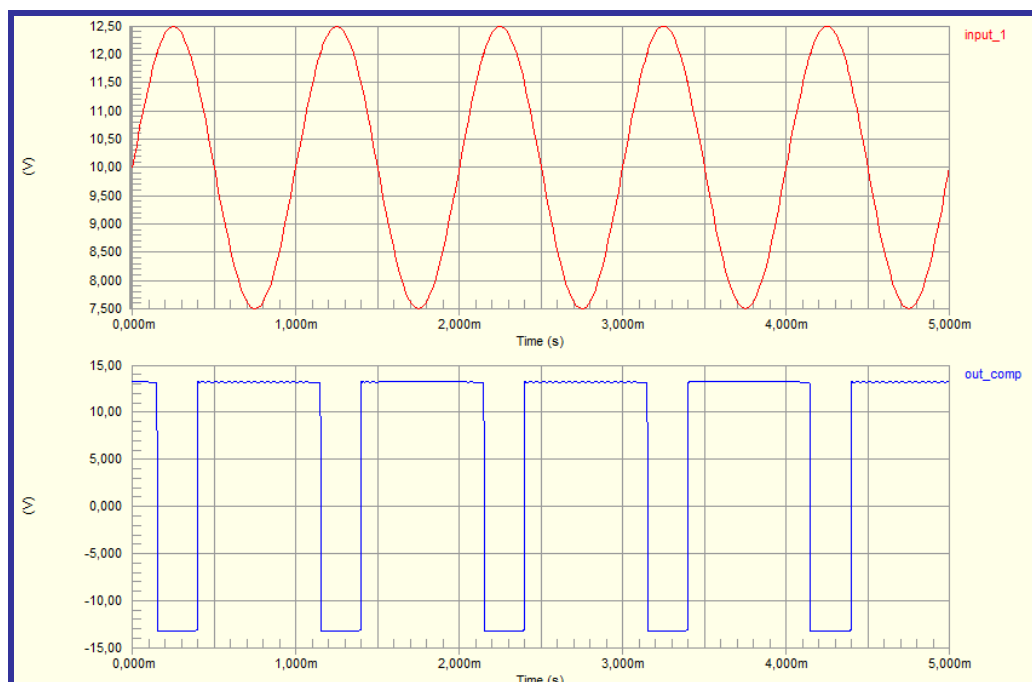


Рисунок 1.30 – Результаты моделирования схемы компаратора с гистерезисом.

3. Оцените по данным эксперимента значение гистерезиса напряжения срабатывания и сравните его с расчетным.
4. Рассчитайте, как нужно изменить, параметры схемы, чтобы ширина гистерезиса увеличилась на 20% и экспериментально проверьте результаты расчета.
5. Покажите, как нужно изменить схему, чтобы полярность выходного сигнала изменилась на противоположную, соберите нужную схему и проверьте ее работоспособность.

Источники ЛИТЕРАТУРЫ К ЧАСТИ 1:

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника Справочное руководство // М.: - ДМК Пресс, 2008, - 828 с.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники // М.: Мир, 1998, - 700 с.
3. <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/index.htm> // Курс лекций