



Проф. Барри Патон,
Dalhousie University

Издание: Июль 2000

Код продукта 322877A-01

Fundamentals of Analog Electronics

Copyright

Copyright © 2000 by National Instruments Corporation, 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas 78759-3504.

Университеты, институты и другие образовательные учреждения вправе воспроизводить настоящую публикацию или любую ее часть в образовательных целях. Для любых иных целей настоящая публикация не может быть воспроизведена либо передана ни в какой форме – ни в электронной, ни в виде твердой копии, включая фотокопию, запись на любом носителе информации, а также переведена на другой язык (полностью или частично), без предварительного письменного разрешения от компании National Instruments Corporation.

Торговые марки:

LabVIEW™ является зарегистрированной торговой маркой компании National Instruments Corporation. Наименования продуктов и названия компаний, упоминающиеся в тексте данной публикации, являются торговыми марками соответствующих компаний.

Дополнительная информация

Дополнительная информация

Если у Вас есть какие-либо вопросы или пожелания относительно этого руководства, пожалуйста, смотрите следующую ссылку в Интернете:

[http://sensor.phys.dal.ca/Digital Electronics/](http://sensor.phys.dal.ca/Digital_Electronics/).

National Instruments Corporate Headquarters

11500 North Mopac Expressway Austin, Texas 78759-3504 USA Tel: 512 794 0100

Worldwide Offices

Australia 03 9879 5166, Austria 0662 45 79 90 0, Belgium 02 757 00 20, Brazil 011 284 5011, Canada (Calgary) 403 274 9391, Canada (Ontario) 905 785 0085, Canada (Québec) 514 694 8521, China 0755 3904939, Denmark 45 76 26 00, Finland 09 725 725 11, France 01 48 14 24 24, Greece 30 1 42 96 427, Germany 089 741 31 30, Hong Kong 2645 3186, India 91805275406, Israel 03 6120092, Italy 02 413091, Japan 03 5472 2970, Korea 02 596 7456, Mexico (D.F.) 5 280 7625, Mexico (Monterrey) 8 357 7695, Netherlands 0348 433466, New Zealand 09 914 0488, Norway 32 27 73 00, Poland 0 22 528 94 06, Portugal 351 1 726 9011, Singapore 2265886, Spain 91 640 0085, Sweden 08 587 895 00, Switzerland 056 200 51 51, Taiwan 02 2528 7227, United Kingdom 01635 523545



Содержание

Введение

Занятие 1

Операционные усилители: Основы.

| | |
|---|-----|
| Пример 1.1: Коэффициент усиления ОУ..... | 1-2 |
| Пример 1.2: Передаточная характеристика ОУ..... | 1-2 |
| Схемы на основе ОУ с контуром обратной связи..... | 1-3 |
| Инвертирующий усилитель..... | 1-4 |
| Пример 1.3: Инвертирующий усилитель..... | 1-5 |
| Реальная инвертирующая схема на базе ОУ..... | 1-7 |
| Лабораторная работа №1..... | 1-7 |
| Компьютерная автоматизация 1: Основы..... | 1-9 |

Занятие 2

Схемы на основе ОУ

| | |
|---|------|
| Еще раз об инвертирующей схеме..... | 2-2 |
| Пример 2.1: Инвертирующий ОУ..... | 2-2 |
| Неинвертирующая схема на основе ОУ..... | 2-3 |
| Пример 2.2: Неинвертирующий ОУ..... | 2-5 |
| Дифференциальный усилитель..... | 2-6 |
| Пример 2.3: Дифференциальная схема на основе ОУ..... | 2-7 |
| Схема интегратора на основе ОУ..... | 2-8 |
| Пример 2.4: Схема интегратора..... | 2-9 |
| Суммирующая схема на основе ОУ..... | 2-11 |
| Пример 2.5: Суммирующая схема | 2-12 |
| Лабораторная работа №2..... | 2-13 |
| Компьютерная автоматизация 2: Передаточная характеристика ОУ..... | 2-14 |

Занятие 3

Полупроводниковые диоды

| | |
|---|-----|
| Пример 3.1: Вольтамперная характеристика кремниевого диода..... | 3-2 |
| Полупроводниковые диоды | 3-4 |
| Пример 3.2: Свойства диода при прямом смещении | 3-5 |

| | |
|--|------|
| Пример 3.3: Свойства диода при обратном смещении..... | 3-6 |
| Фотодиод | 3-6 |
| Пример 3.4: Типичная ВАХ фотодиода..... | 3-7 |
| Пример 3.5: Свойства фотометра на базе фотодиода и ОУ..... | 3-8 |
| Лабораторная работа №3 | 3-9 |
| Компьютерная автоматизация 3: ВАХ диода..... | 3-11 |
| Задания по улучшению программы..... | 3-11 |

Занятие 4

Характеристики ОУ по переменному току

| | |
|--|-----|
| Пример 4.1: Идеальная кривая частотного отклика (ОУ с разомкнутой цепью ОС)..... | 4-3 |
| Пример 4.2: Кривая частотного отклика (ОУ с разомкнутой цепью ОС)..... | 4-4 |
| Частотный отклик схем на основе ОУ с контуром ОС..... | 4-5 |
| Пример 4.3 Динамический частотный отклик схем на основе ОУ с контуром ОС..... | 4-6 |
| Лабораторная работа №4 | 4-7 |
| Компьютерная автоматизация 4: Сигналы входного воздействия..... | 4-8 |
| Техника программирования на LabVIEW..... | 4-9 |

Занятие 5

Фильтры на основе ОУ

| | |
|---|------|
| Импеданс..... | 5-1 |
| Фильтр нижних частот | 5-3 |
| Пример 5.1: Простейший фильтр нижних частот..... | 5-5 |
| Фильтр верхних частот..... | 5-6 |
| Пример 5.2: Простейший фильтр верхних частот..... | 5-8 |
| Полосовой фильтр..... | 5-9 |
| Пример 5.3: Простейший полосовой фильтр..... | 5-10 |
| Лабораторная работа №5 | 5-12 |
| Компьютерная автоматизация 5: Отклик на сигналы входного воздействия..... | 5-13 |
| Задания по улучшению программы..... | 5-14 |

Занятие 6

Автоколебательная схема на основе интегрального таймера КР1006ВИ1

| | |
|---|-----|
| Введение..... | 6-1 |
| Интегральный таймер КР1006ВИ1..... | 6-2 |
| Пример 6.1: Схема мультивибратора на основе КР1006ВИ1..... | 6-3 |
| Как работает схема..... | 6-4 |
| Пример 6.2: Временная диаграмма работы мультивибратора на основе КР1006ВИ1..... | 6-5 |
| Импульсная работа светодиода..... | 6-6 |

| | |
|---|------|
| Пример 6.3: Импульсная работа светодиода в схеме на базе КР1006ВИ1..... | 6-6 |
| Температурный преобразователь..... | 6-8 |
| Пример 6.4: Преобразователь температуры..... | 6-8 |
| Лабораторная работа №6 | 6-9 |
| Компьютерная автоматизация 6: Цифровые сигналы..... | 6-11 |
| Задания по улучшению схемы..... | 6-11 |
| Задания по улучшению программы..... | 6-11 |

Занятие 7

Схема одновибратора на основе интегрального таймера КР1006ВИ1

| | |
|---|------|
| Моделирование LabVIEW: Работа схемы одновибратора на основе таймера КР1006ВИ1 | 7-2 |
| Моделирование LabVIEW: Управляемый светодиодный сигнал тревоги..... | 7-4 |
| Датчик на базе фоторезистора..... | 7-5 |
| Моделирование LabVIEW: Фотометр..... | 7-6 |
| Моделирование LabVIEW: Преобразователь углового смещения..... | 7-7 |
| Моделирование LabVIEW: X-Y джойстик..... | 7-8 |
| Лабораторная работа №7 | 7-9 |
| Компьютерная автоматизация 7: Измерение временного интервала..... | 7-10 |
| Задания по улучшению схемы..... | 7-11 |
| Задания по улучшению программы..... | 7-11 |

Занятие 8

Преобразователь напряжения в частоту

| | |
|--|------|
| Блок 1: Интегратор на основе ОУ..... | 8-3 |
| Пример 8.1: Работа схемы интегратора на основе ОУ..... | 8-4 |
| Лабораторная работа: Реальный интегратор на основе ОУ..... | 8-4 |
| Блок 2: Компаратор..... | 8-5 |
| Пример 8.2: Компаратор на основе ОУ в действии..... | 8-5 |
| Пример 8.3: Последовательное соединение интегратора и компаратора..... | 8-5 |
| Блок 3: Одновибратор..... | 8-6 |
| Пример 8.4: Работа одновибратора | 8-7 |
| Блок 4: Реальный ПНЧ | 8-8 |
| Пример 8.5: Работа ПНЧ | 8-8 |
| Лабораторная работа №8 | 8-9 |
| Компьютерная автоматизация 8: Калибровочная кривая ПНЧ..... | 8-10 |
| Программирование на LabVIEW..... | 8-11 |
| Задания по улучшению программы..... | 8-11 |

Занятие 9

Нелинейные схемы: Логарифмические усилители

| | |
|---|-----|
| Схема логарифмического усилителя..... | 9-1 |
| Пример 9.1: Схема логарифмического усилителя..... | 9-2 |
| Аналоговый преобразователь в децибелы..... | 9-3 |
| Пример 9.2: Вычислитель децибелов..... | 9-5 |
| Схема экспоненциального усилителя..... | 9-5 |
| Аналоговое умножение двух переменных..... | 9-6 |
| Возведение входного сигнала в степень..... | 9-7 |
| Лабораторная работа №9..... | 9-8 |

Введение



Аналоговая электроника – один из фундаментальных курсов, входящих в радиотехнические научно-образовательные дисциплины. Большое разнообразие логических и числовых индикаторов, управляющих элементов, структур и функций программирования делают пакет LabView превосходным инструментом для визуализации и демонстрации многих фундаментальных принципов аналоговой электроники. Модульный принцип работы, применяемый в LabView, используется и при построении сложных аналоговых интегральных схем из более простых схем, в основном состоящих из усилителей. Данная книга создана как учебный курс, который может применяться в аудиторном практикуме, для самостоятельных занятий или в лаборатории.

Операционный усилитель (ОУ) – это основа всех современных электронных приборов. Гибкость в использовании, стабильность и возможность выполнять многие функции делают ОУ идеальным инструментом для построения аналоговых схем. Исторически, ОУ эволюционировали с развитием научной области – аналоговых вычислений, которая занимается созданием схем для проведения операций сложения, вычитания, умножения, интегрирования, дифференцирования и т.д. Такие схемы необходимы для решения дифференциальных уравнений, возникающих во многих технических задачах. Сегодня аналоговые вычислительные операционные усилители находят применение в бесчисленных электронных схемах и инструментах. В данном пособии ОУ рассматривается как важнейшая часть всех аналоговых электронных приборов.

На занятиях будут изучаться основы ОУ, их характеристики по постоянному и переменному напряжению, построение фильтров, схем с одним устойчивым состоянием (одновибраторов), автоколебательных цепей (мультивибраторов) и логарифмических усилителей. Описания реальных экспериментов находятся в конце каждого занятия. Эти эксперименты предназначены для демонстрации основ электроники, но могут использоваться и в качестве основы для построения более

сложных схем с использованием ОУ. Для построения более сложных схем, таких как преобразователь напряжения в частоту (ПНЧ), в пособии изучаются и используются микросхемы К140УД6 и КР1006ВИ1 (западные аналоги 741 и 555). Для создания фотометра и датчика температуры используются схемы с ОУ, фотодиодом и термистором. Все эксперименты и их результаты подробно описываются в тексте. В конце соответствующего лабораторного занятия находится описание эксперимента по компьютерной автоматизации. В этих экспериментах применяется многофункциональная плата ввода-вывода для того, чтобы показать, как пакет LabView может быть использован для автоматизированной проверки и анализа схем.

Используя данное пособие в аудиторном практикуме и при работе на вашем домашнем компьютере, вы можете легко изменять параметры ОУ, чтобы отобразить их визуальные характеристики. Виртуальные приборы, предложенные в данном курсе, могут являться шаблоном для дальнейшего улучшения модели ОУ во время самостоятельных занятий. Экспериментальные занятия в рамках лабораторного практикума, когда необходимо создавать реальные схемы, способствуют лучшему пониманию принципов моделирования и конструирования более сложных схем. В продолжение всего курса для проведения вычислений, моделирования и сбора данных используется пакет LabView. Читатели, которые одновременно желают изучить LabView, могут «заглянуть» за лицевую панель, т.е. посмотреть на панель диаграмм, где используется много уникальных конструкций LabView, позволяющих моделировать и производить измерения. Вперед!

Занятие 1.

Операционные усилители: Основы.



Операционный усилитель (ОУ) – это основа всех современных электронных инструментов. Гибкость в использовании, стабильность и возможность выполнять многие функции делают ОУ идеальным инструментом для построения аналоговых схем. Исторически, ОУ эволюционировали с развитием научной области – аналоговых вычислений, которая занимается созданием схем для проведения операций сложения, вычитания, умножения, интегрирования, дифференцирования и т.д. Такие схемы необходимы для решения дифференциальных уравнений, возникающих во многих технических задачах. В настоящее время аналоговые вычислители в основном заменены цифровыми, однако высокая функциональность схем на основе ОУ позволяет применять их в многочисленных электронных приборах и инструментах.

Чаще всего, под операционным усилителем (ОУ) понимается дифференциальный усилитель с большим коэффициентом усиления и биполярным выходом. Передаточная характеристика ОУ показывает, что выходное напряжение V_{out} определяется формулой

$$V_{out} = -A (V_- - V_+) = -A (\Delta V) \quad (1-1)$$

где A – коэффициент усиления (КУ) ОУ с разорванной петлей обратной связи (ОС), V_- – входное напряжение на инвертирующем входе, V_+ – входное напряжение на неинвертирующем входе. Отрицательный знак перед КУ инвертирует выходной сигнал. КУ может быть определен как отношение амплитуд выходного напряжения к дифференциальному входному напряжению ΔV . На практике, КУ может меняться от 10000 до 20000000. Поэтому достаточно очень слабого входного сигнала, чтобы получить большой выходной сигнал. Например, если КУ равен 1000000, то напряжение 5 мкВ на входе операционного усилителя приведет к 5 В на его выходе.

Большая часть ОУ – биполярные. Это означает, что выходной сигнал может быть и положительным и отрицательным. Следовательно, чтобы ОУ начал работать, необходимо приложить к нему напряжения питания разной полярности. В этом тексте, мы будем полагать, что для всех схем с ОУ напряжение питания равно +15 и –15 В. Выходное напряжение ОУ не может превышать напряжения питания. Обычно, номинальное выходное напряжение V_{\max} меньше напряжения питания на один вольт. Этот предел часто называют положительным или отрицательным напряжением ограничения.

Пример 1.1: Коэффициент усиления ОУ

Запустите программу LabVIEW, озаглавленную OpAmp1.vi, которая находится в 1 разделе электронной библиотеки данного пособия. Чтобы включить ОУ, нажмите на кнопку Run.

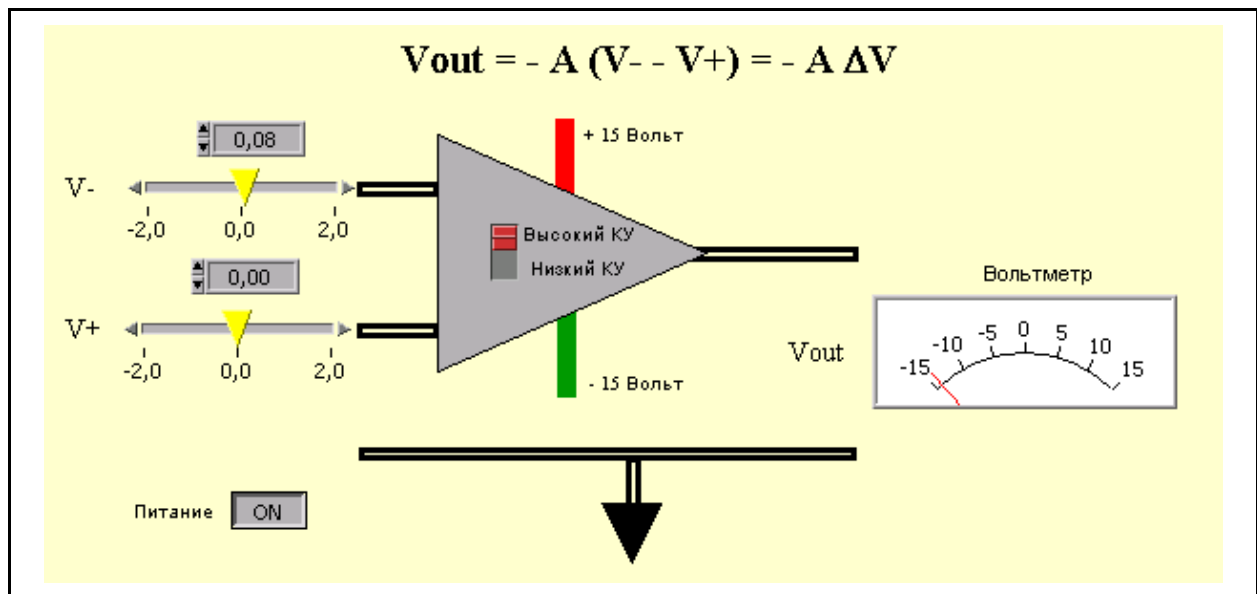


Рисунок 1-1. Схема на базе ОУ без контура ОС

Исследуйте чувствительность и знак выходного напряжения в зависимости от величин входного напряжения V_- и V_+ . В данном примере существует два значения КУ. Положение переключателя "Низкий КУ", устанавливающее $A = 10$, позволяет увидеть как функционирует ОУ. Позиция "Высокий КУ" устанавливает $A = 100000$, что более типично для реальных ОУ. Заметим, что напряжение ограничения меньше напряжения питания приблизительно на 1 В. Когда выходное напряжение достигает величины напряжения ограничения, говорят, что ОУ работает в режиме насыщения. В случае больших коэффициентов усиления, операционные усилители почти всегда работают в режиме насыщения в схемах с разомкнутым контуром ОС.

Чтобы яснее представить себе передаточную характеристику операционного усилителя необходимо построить зависимость выходного напряжения от дифференциального входного напряжения ΔV .

Пример 1.2: Передаточная характеристика ОУ

Запустите программу LabVIEW, озаглавленную OpAmp2.vi, которая находится в 1 разделе библиотеки. Эта программа похожа на предыдущую за исключением того, что были убраны линии заземления и напряжения питания. В реальных схемах эти линии должны всегда присутствовать, но на принципиальных схемах их обычно не отображают. Еще одно отличие – появление графика X-Y, который используется для динамического отображения передаточной характеристики. Запустите программу, как и в предыдущем примере.

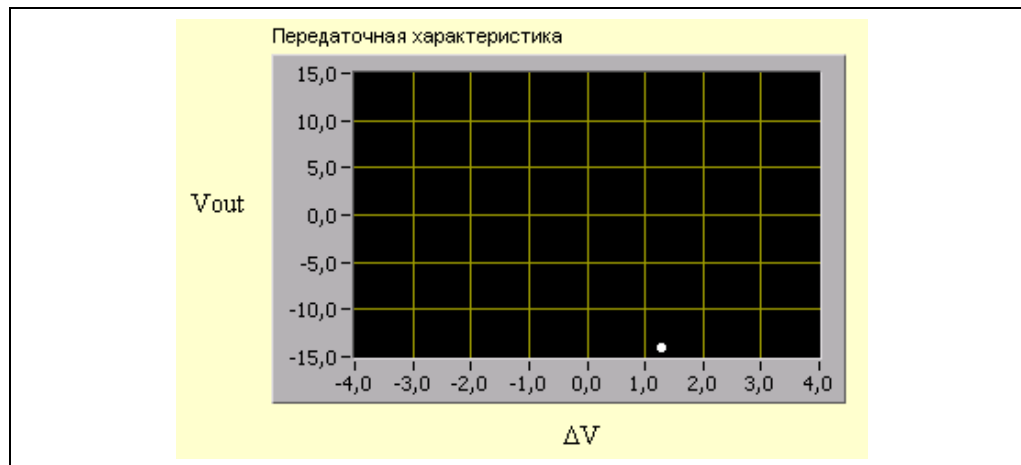


Рисунок 1-2. Передаточная характеристика ОУ без ОС

Снова положение переключателя "Низкий КУ" используется, чтобы увидеть, как функционирует ОУ. Для моделирования реального ОУ, используйте позицию переключателя "Высокий КУ". Выбирая различные уровни входного напряжения, можно построить полную передаточную характеристику. Двухцветные светодиодные индикаторы загораются тогда, когда ОУ находится в режиме насыщения при + или – напряжении ограничения.

Схемы на основе ОУ с контуром обратной связи

Усилителями с большим КУ трудно управлять и удерживать их от режима насыщения. При помощи некоторых дополнительных элементов схемы часть выходного сигнала может быть подана на вход. Такая конфигурация называется операционным усилителем с обратной связью (ОС). Из-за отрицательной ОС, означающей, что входной

сигнал не синфазен с выходным сигналом, поданным на вход, усилитель становится стабильным. На практике, ОС уменьшает КУ в пользу стабильности, в отличие от схемы с разомкнутым контуром ОС. Типичные схемы на основе ОУ с петлей ОС имеют коэффициент усиления от 10 до 1000, в то время как схемы на основе ОУ с разомкнутой петлей ОС имеют КУ от 10^5 до 10^7 . Если ОС – положительная, то усилитель становится генератором.

Инвертирующий усилитель

Следующий пример (наверное, наиболее распространенная схема на основе ОУ) демонстрирует, как уменьшение КУ приводит к тому, что усилитель работает в очень стабильном линейном режиме. Резистор ОС, названный R_f , используется, чтобы подать часть выходного сигнала на вход. Тот факт, что эта часть подается на инвертирующий вход, говорит об отрицательности обратной связи. Входное напряжение V_1 вызывает входной ток i_1 через входной резистор R_1 . Отметим, что дифференциальное напряжение ΔV определяется как разность напряжений на входах усилителя (–) и (+). Неинвертирующий вход усилителя заземлен.

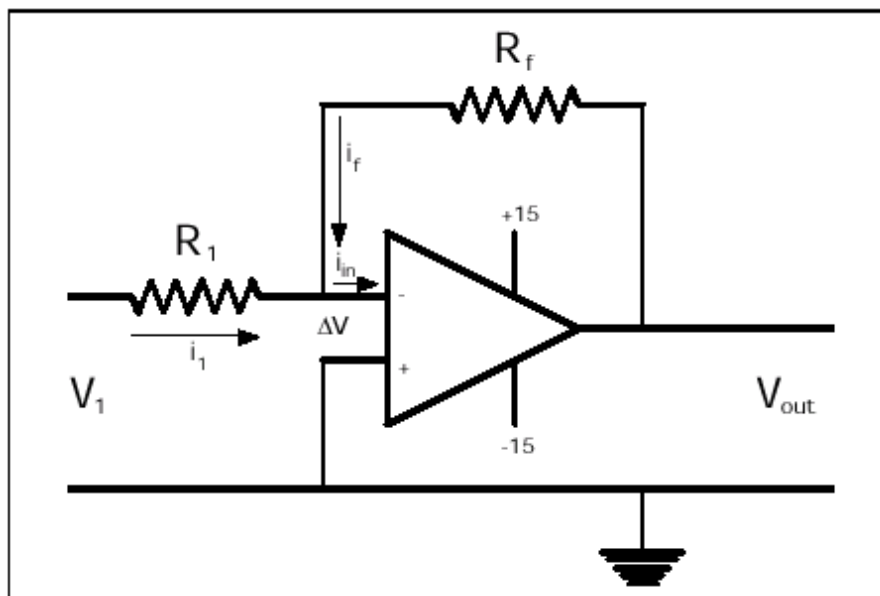


Рисунок 1-3. Принципиальная схема инвертирующего усилителя

Чтобы получить передаточную характеристику, будем использовать законы Кирхгофа и уравнения для замкнутого контура.

$$\text{Входной контур:} \quad V_1 = i_1 R_1 + \Delta V. \quad (1-2)$$

$$\text{Петля ОС:} \quad V_{\text{out}} = -i_f R_f + \Delta V. \quad (1-3)$$

$$\text{Уравнение токов для узла:} \quad i_1 = -i_f + i_{in} . \quad (1-4)$$

$$\text{Определение КУ:} \quad V_{out} = -A \Delta V . \quad (1-5)$$

Решая эти уравнения, получим:

$$V_{out} = i_{in}/Z - (V_1/R_1)/Z , \quad (1-6)$$

где $Z = 1/R_f + 1/AR_1 + 1/AR_f$ – полный импеданс контура ОС.

Обычно сопротивления входного резистора и резистора контура ОС имеют большую величину (кОмы), также и усиление A – очень большое ($>100,000$), следовательно $Z = 1/R_f$. Более того, поскольку дифференциальное входное напряжение ΔV всегда весьма мало (несколько микровольт), то в случае большой величины входного импеданса усилителя Z_{in} (обычно около 10 МОм) входной ток $i_{in} = \Delta V/Z_{in}$ пренебрежимо мал и может быть положен равным нулю. Тогда уравнение 1-5 для передаточной характеристики запишется в виде

$$V_{out} = - (R_f / R_1) V_1 = - (G) V_1 \quad (1-7)$$

Отношение R_f/R_1 называется коэффициентом усиления G операционного усилителя с контуром ОС. Знак $(-)$ говорит о том, что выход инвертирован. Отметим, что КУ ОУ с петлей ОС можно варьировать, изменяя величины двух резисторов – R_1 и R_f .

Пример 1.3: Инвертирующий ОУ

Запустите программу LabVIEW, озаглавленную OpAmp3.vi, которая находится в 1 разделе библиотеки. Данная программа моделирует работу простейшего ОУ, работающего в режиме инвертирующего усилителя. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы увидеть работу схемы. Изменять величины сопротивлений можно нажатием и одновременным перемещением ползунка над каждым резистором или введением числа в соответствующий цифровой дисплей. Изменяя резисторы входного контура и контура ОС и меняя входное напряжение проверьте, что выходной сигнал удовлетворяет уравнению для передаточной характеристики (1-6).

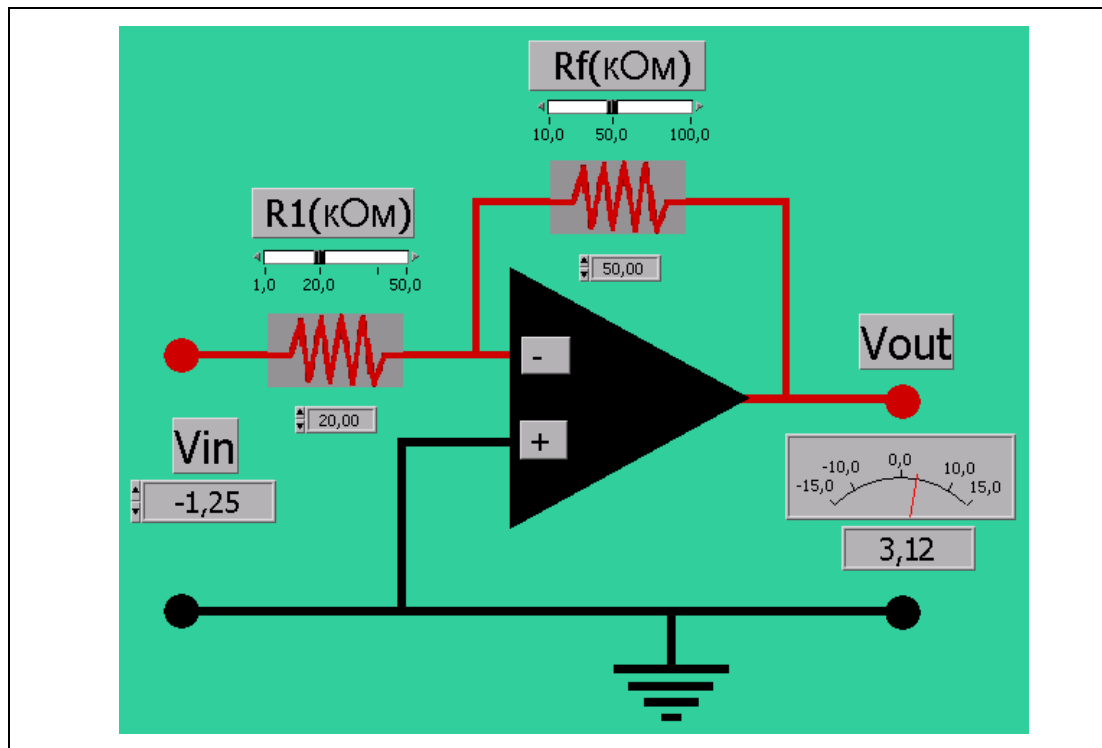


Рисунок 1-4. Моделирование инвертирующей схемы усилителя

Вопросы.

Что произойдет когда выходное напряжение попытается превысить напряжение питания + или – 15 В?

Что произойдет, если входное напряжение достигнет величины напряжения питания?

Что произойдет, если входное напряжение превысит напряжение питания на 1 или 2 вольта?

Реальная инвертирующая схема на базе ОУ

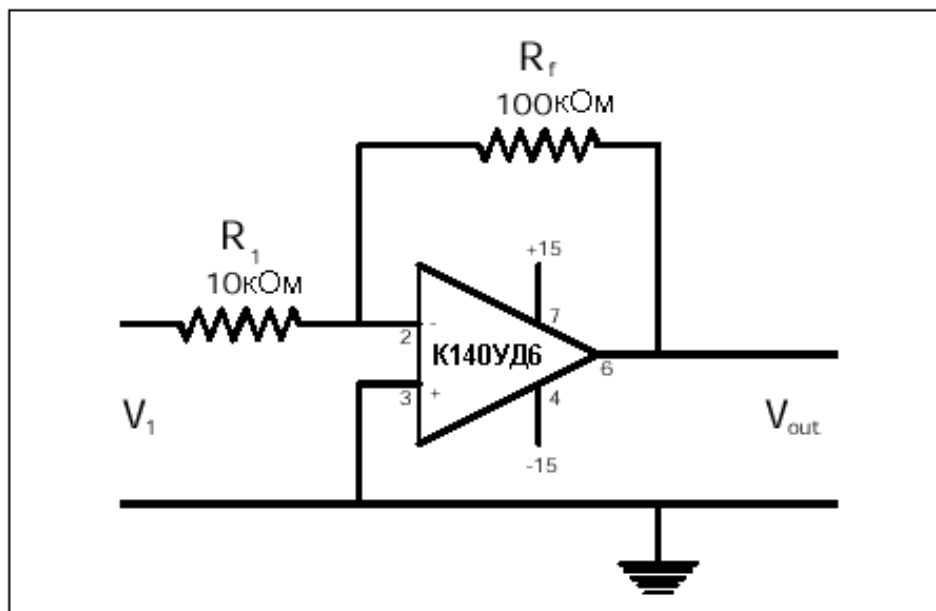


Рисунок 1-5. Принципиальная схема инвертирующего усилителя с КУ 10

Задание повышенной сложности. Моделирование инвертирующего ОУ с использованием пакета LabView.

В программе OpAmp3.vi замените упрощенное выражение для передаточной характеристики 1-7 на более правильное уравнение 1-6. Вам понадобится дополнительная ручка управления на лицевой панели для изменения числа A – коэффициента усиления ОУ с разорванной петлей ОС – в пределах от 10000 до 1000000. Исследуйте, для каких величин R_1 и R_f упрощенное уравнение для передаточной характеристики не является хорошей аппроксимацией. Сохраните вашу программу как OpAmp3_2.vi.

Лабораторная работа №1

Цель работы

Целью данной лабораторной работы является демонстрация простоты построения усилителя с известным КУ и определение точности работы усилителя.

Порядок выполнения

Соберите усилитель по схеме, отображенной на рисунке 1-5. Фотография усилителя показана ниже. Для построения схемы необходимы распространенный ОУ марки K140УД6, несколько

резисторов и два источника питания. Все это можно найти в вашей лаборатории. Установите входное напряжение в пределах от –1 до +1 вольт.

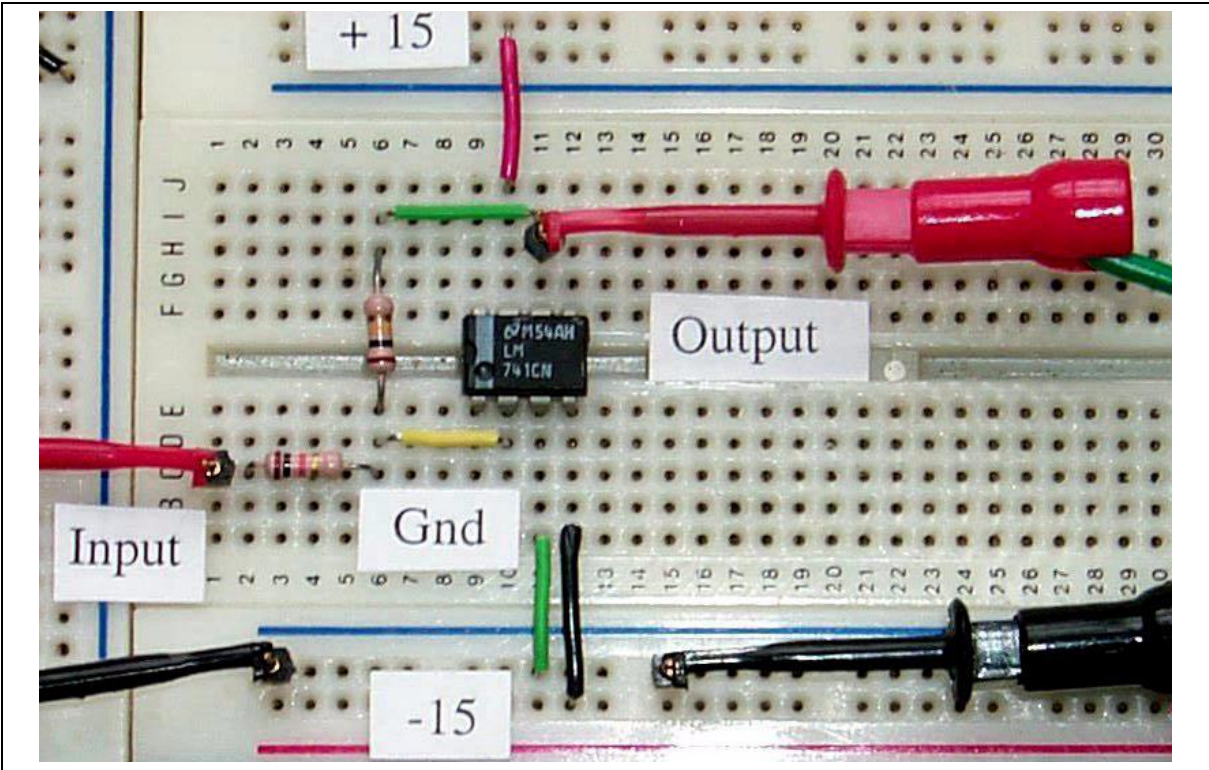


Рисунок 1-6. Расположение компонентов схемы инвертирующего усилителя

Перед тем как включить схему, измерьте сопротивление ОС, а также входное сопротивление и входное напряжение (когда его источник не соединен со схемой). Вычислите величину выходного сигнала, используя уравнение для передаточной характеристики 1-7. Оцените ошибку каждого измерения и вычислите ожидаемую ошибку. После этого соедините все компоненты, включите питание схемы и измерьте выходное напряжение.

Заполните таблицу:

| R_f (кОм) | R_1 (кОм) | $K_U (R_f / R_1)$ | V_{in} | V_{out} (вычисленное) | V_{out} (измеренное) |
|-------------|-------------|-------------------|----------|----------------------------|---------------------------|
| | | | | | |

Насколько выходное измеренное напряжение совпадает с теоретически вычисленным?

Компьютерная автоматизация 1: Основы.

В процессе измерения характеристик устройства часто необходимо знать выходное напряжение при различных параметрах схемы. Например, график для передаточной характеристики инвертирующего усилителя имеет особенный линейный вид только тогда, когда выходное напряжение не превышает напряжения ограничения. Этот факт накладывает определенные рамки на величину входного сигнала, в противном случае устройство не будет функционировать как линейный усилитель. Компьютерная автоматизация позволяет широко варьировать пробные напряжения для измерения и анализа откликов схемы. В данной работе мы увидим генерацию тестового сигнала и измерим отклик усилителя.

Запустите программу LabVIEW, озаглавленную TestAmp1.vi, которая находится в 1 разделе библиотеки.

В данной программе используется многофункциональная плата ввода-вывода для генерации постоянного тестового сигнала с амплитудой от -0.5 до 0.5 вольт с последующим выводом этого сигнала по одному из каналов платы. Далее в программе измеряется и отображается на индикаторе лицевой панели отклик схемы на входной сигнал с платы ввода-вывода.



Замечание. Необходимо сконфигурировать аналоговые вход и выход многофункциональной платы ввода-вывода таким образом, чтобы можно было работать с биполярными сигналами (в пределах от -5 до $+5$ вольт). Используйте напряжение ± 5 вольт для питания ОУ.

После соединения многофункциональной платы ввода-вывода с вашей схемой, нажмите кнопку **Run**, чтобы ее включить. Введите пределы изменения входного сигнала и постройте график зависимости измеренного выходного напряжения как функции входного сигнала. График будет похож на тот, который был ранее смоделирован при помощи LabView для инвертирующей схемы на основе ОУ, только теперь вы видите его для реального устройства.

Вопросы для размышления.

Чему равна измеренная величина положительного напряжения ограничения?

Чему равна измеренная величина отрицательного напряжения ограничения?

Каково будет выходное напряжение, когда входное равно нулю?

Это напряжение называется напряжением смещения нуля на выходе ОУ.

В каких пределах может меняться входное напряжение, чтобы усилитель оставался линейным?

Чему равен КУ инвертирующего усилителя?

Занятие 2.

Схемы на основе ОУ.



В первой части было продемонстрировано, что простейшее уравнение для передаточной характеристики 1-7 является хорошей аппроксимацией работы схемы на основе реального ОУ. Основное предположение, которое допускалось при этом, заключается в том, что входное дифференциальное напряжение ΔV было настолько мало, что им можно было пренебречь. Это предположение математически может быть описано по-разному. В большинстве схем ΔV можно мысленно заменить соединением входных контактов (+) и (–), так что напряжение на инвертирующем входе равно напряжению на неинвертирующем. Другой способ – считать входной ток i_{in} в ОУ бесконечно малым, так что им можно пренебречь. Еще один способ – считать входной импеданс Z_{in} бесконечно большим. Идеальный ОУ обладает всеми тремя свойствами, и уравнение для КУ, входного и выходного импеданса большинства схем могут быть получены с использованием этой модели ОУ.

Идеальный ОУ обладает следующими свойствами:

- КУ ОУ с разомкнутым контуром ОС бесконечен и $\Delta V = 0$
- Нет тока на входе или выходе входных контактов ОУ
- Напряжение смещения и ток смещения нуля на выходе ОУ равны нулю.
- Входной импеданс ОУ Z_{in} равен бесконечности.
- Выходной импеданс ОУ Z_{out} равен нулю.

В наиболее распространенных режимах работы модель идеального ОУ может с успехом применяться для вывода математических соотношений, описывающих работу реальных ОУ. Давайте еще раз рассмотрим инвертирующую схему на основе ОУ.

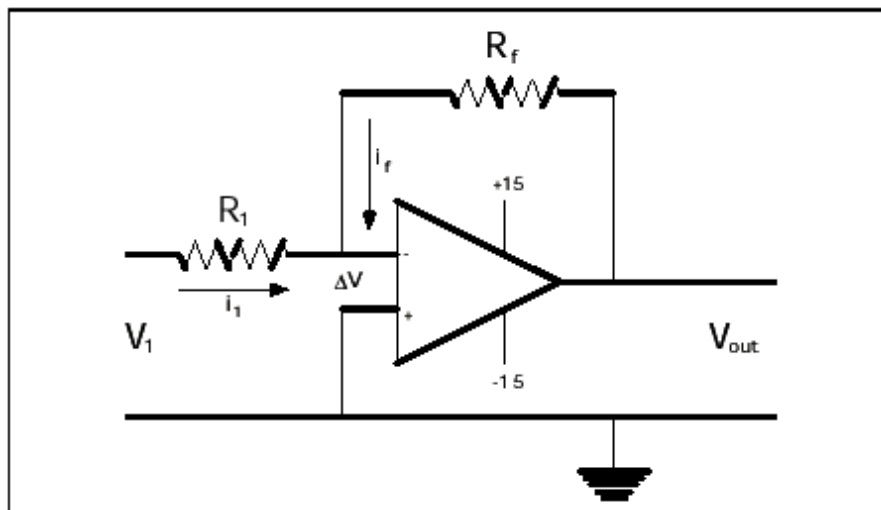


Рисунок 2-1. Инвертирующая схема на базе ОУ

Еще раз об инвертирующей схеме

Наиболее часто инвертирующие схемы на основе ОУ применяются для умножения входного сигнала на отрицательную константу. Величина константы равна коэффициенту усиления ОУ с петлей ОС (R_f / R_1), а знак обуславливает изменение полярности выходного сигнала. Инвертирующий вход ОУ эффективно закорочен на землю. Поэтому входной ток, который находится из закона Ома для входного контура, равен V_1 / R_1 . В такой конфигурации инвертирующий вход часто называют мнимой землей. Второй закон Кирхгофа утверждает, что сумма всех токов через любой узел равна нулю, то есть $i_1 + i_f + i_{in} = 0$. Из второго свойства идеального ОУ следует, что ток i_{in} равен нулю, поэтому $i_1 + i_f = 0$. Для выходного контура имеем $V_{out} = i_f R_f$.

Эти выражения непосредственно приводят к уравнению передаточной характеристики:

$$V_{out} = - (R_f / R_1) V_{in} . \quad (2-1)$$

Легко показать, что если входной импеданс ОУ равен бесконечности (свойство 4), то входной импеданс инвертирующей схемы равен R_1 .

Пример 2.1: Инвертирующий ОУ

Запустите программу LabVIEW, озаглавленную *Inverting.vi*, которая находится во 2 разделе библиотеки. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы включить инвертирующую схему. Перемещая ползунок во входном контуре, посмотрите особенности работы этой схемы. Поварьируйте также и величины сопротивлений R_1 и R_f .

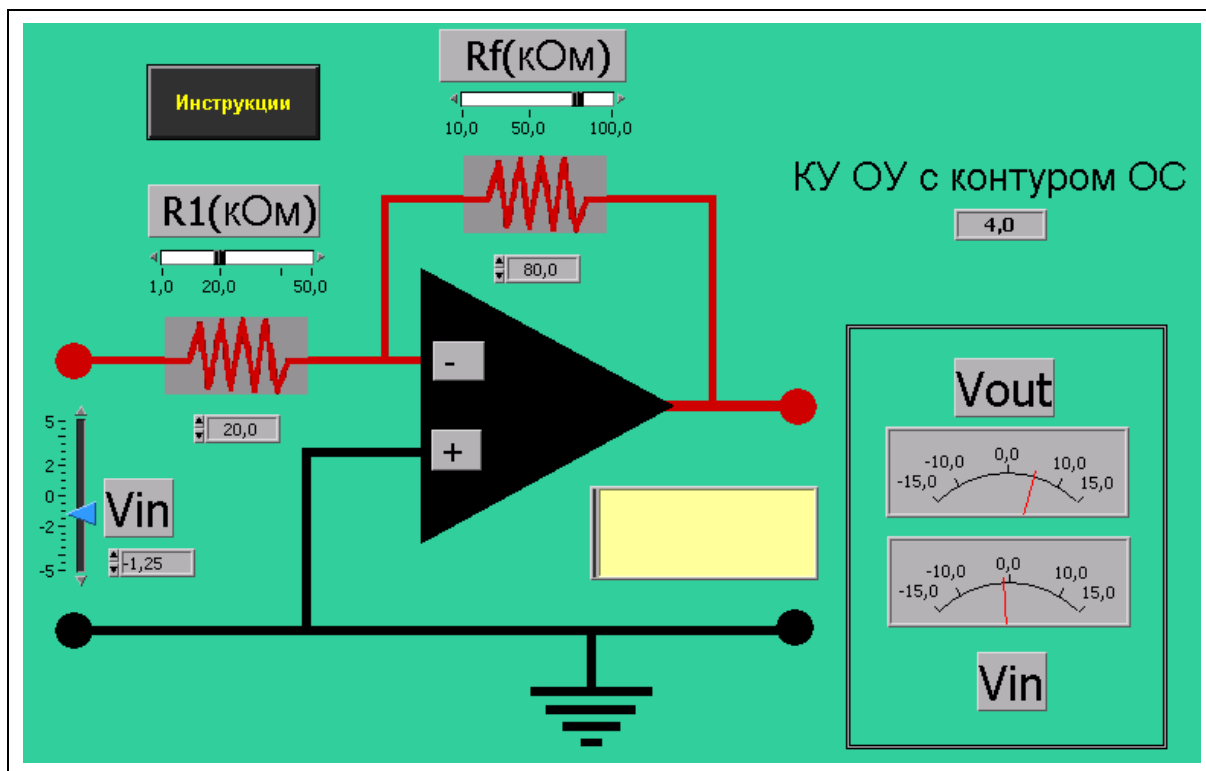


Рисунок 2-2. Моделирование инвертирующей схемы на базе ОУ

Когда $R_f = R_1$, коэффициент усиления ОУ с контуром ОС равен единице, $G = 1$. В этом случае схема выполняет логическую операцию – отрицание. То есть, когда V_{in} – положительное, тогда V_{out} – отрицательное и наоборот.

Неинвертирующая схема на основе ОУ

Неинвертирующая схема на основе ОУ может быть получена из предыдущей схемы заземлением входного сопротивления R_1 . При этом входной сигнал подается на неинвертирующий вход.

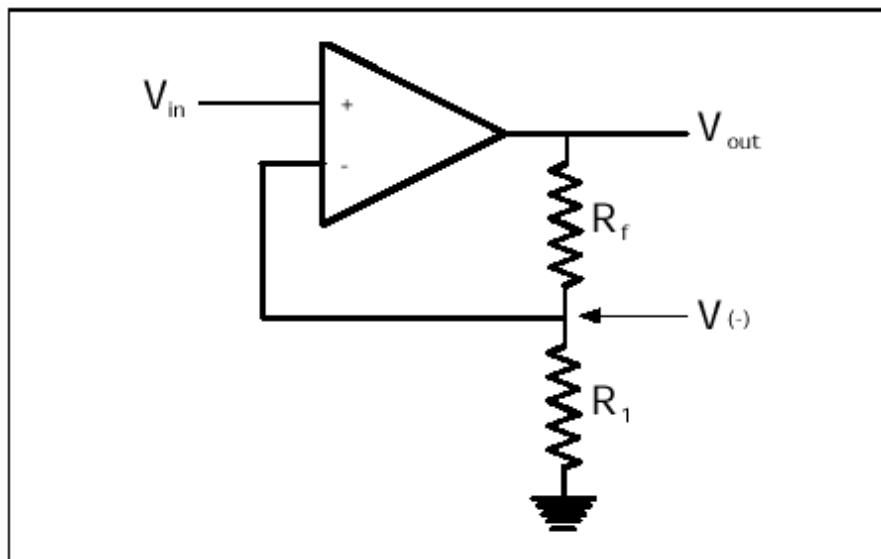


Рисунок 2-3. Принципиальная схема неинвертирующего усилителя

Выходное напряжение снимается с делителя напряжения, который образован резистором ОС R_f и резистором входного контура R_1 .
Напряжение в середине делителя $V_{(-)}$ есть

$$V_{(-)} = [R_1 / (R_1 + R_f)] V_{out} . \quad (2-2)$$

В соответствии со свойством (1) идеального ОУ, входное дифференциальное напряжение ΔV равно нулю, следовательно, $V_{in} = V_{(-)}$. Перепиcывая уравнение (2-2), имеем

$$V_{out} = (1 + R_f / R_1) V_{in} . \quad (2-3)$$

Этим уравнением определяется назначение усилителя – усиливать и при этом не менять знака входного сигнала. Коэффициент усиления с контуром ОС равен $G = (1 + R_f / R_1)$. Можно показать, что входной импеданс такой схемы Z_i очень большой и выражается формулой

$$Z_i \sim Z_{in} [R_1 / (R_1 + R_f)] A , \quad (2-4)$$

где Z_{in} – входной импеданс реального ОУ (порядка 20 МОм). Также легко показать, что выходной импеданс схемы Z_o стремится к нулю, если КУ ОУ с разорванной петлей ОС становится очень большим. Таким образом, операционный усилитель, используемый в неинвертирующей схеме, может являться буфером между схемой на входе и схемой на выходе. При этом КУ – конечен.

Пример 2.2: Неинвертирующий ОУ

Запустите программу LabVIEW, озаглавленную Inverting.vi, которая находится во 2 разделе библиотеки. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы включить неинвертирующую схему. Перемещая ползунок во входном контуре, посмотрите особенности работы этой схемы. Поварьейте также и величины сопротивлений R_1 и R_f .

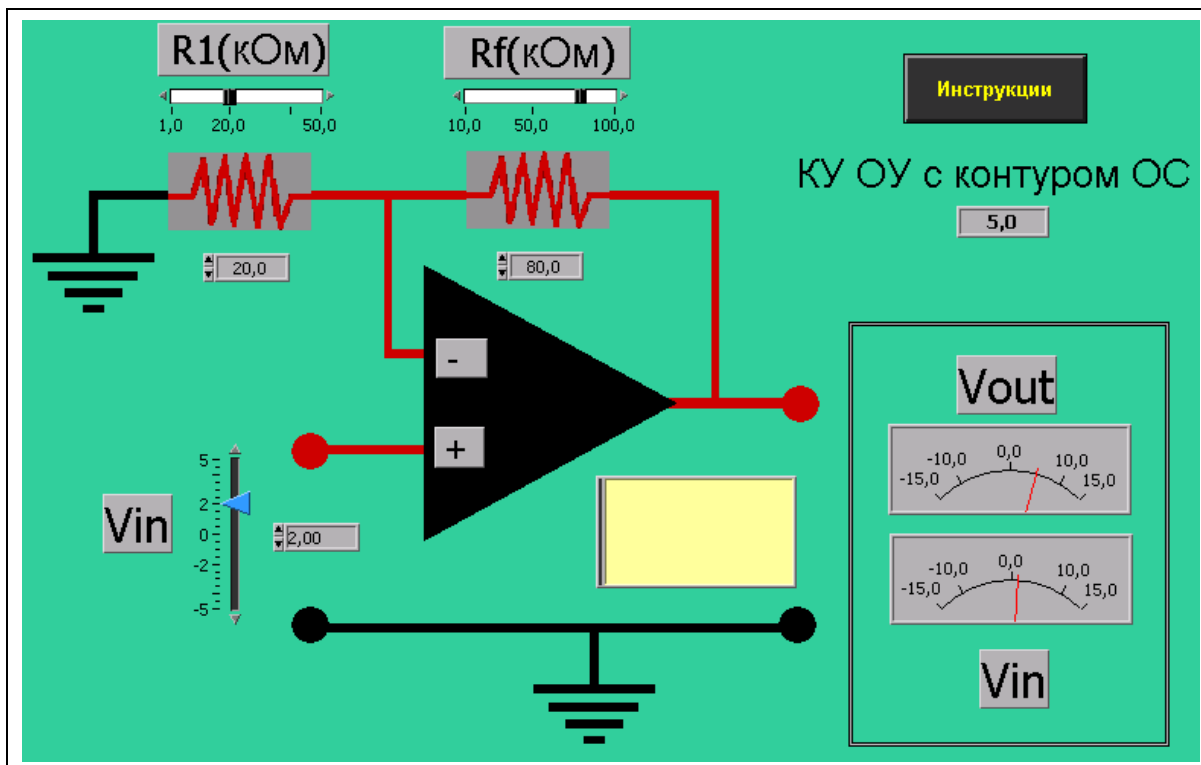


Рисунок 2-4. Моделирование неинвертирующей схемы усилителя

Особенный случай в этой схеме, когда $R_f = 0$ и нет резистора R_1 во входной цепи. В этом случае $V_{out} = V_{in}$, $Z_i = Z_{in}$ и $Z_o = Z_{out} / A$. Такая конфигурация называется буфером или схемой с КУ равным 1. Это нечто похожее на преобразователь импеданса, который не усиливает напряжения, но может иметь большой коэффициент усиления по мощности.

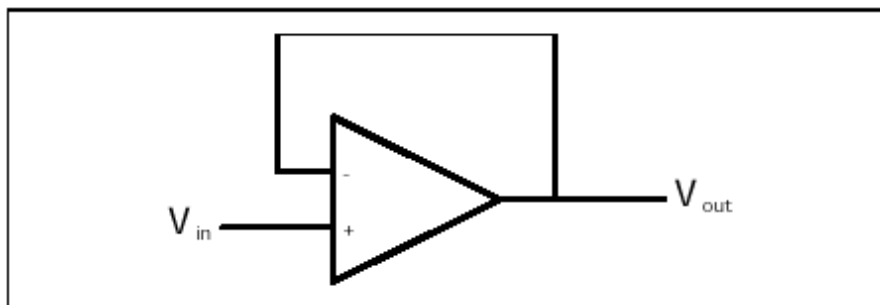


Рисунок 2-5. Схема с единичным коэффициентом усиления на базе ОУ

Дифференциальный усилитель

Дифференциальная схема на основе ОУ усиливает в R_f / R_1 раз сигнал на каждом из дифференциальных входов. В результате выходное напряжение равно разности между двумя входными сигналами, умноженной на константу:

$$V_{out} = (R_f / R_1) (V_2 - V_1) . \quad (2-5)$$

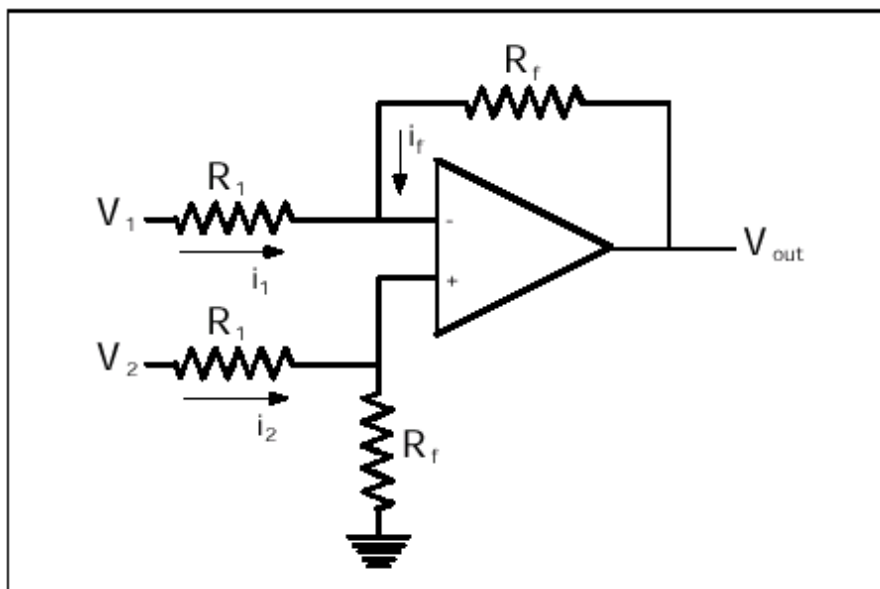


Рисунок 2-6. Принципиальная схема дифференциального усилителя

Используя предположение об идеальности ОУ, можно записать следующее выражение для напряжения на неинвертирующем входе:

$$V_{(+)} = [R_f / (R_1 + R_f)] V_2 . \quad (2-6)$$

Из уравнения для входного контура 1 имеем $i_1 = [V_1 - V_{(+)}] / R_1$. (2-7)

Для выходного контура $i_f = - [V_{out} - V_{(+)}] / R_f$. (2-8)

$$\text{Уравнение для суммирующей точки } i_1 = -i_f. \quad (2-9)$$

Подставляя выражения для токов в уравнение для суммирующей точки и исключая $V_{(+)}$, после преобразования получаем разностное уравнение (2-5).

Пример 2.3: Дифференциальная схема на основе ОУ

Запустите программу LabVIEW, озаглавленную Difference.vi, которая находится во 2 разделе библиотеки. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы включить дифференциальную схему. Исследуйте соотношение между входным и выходным сигналами.

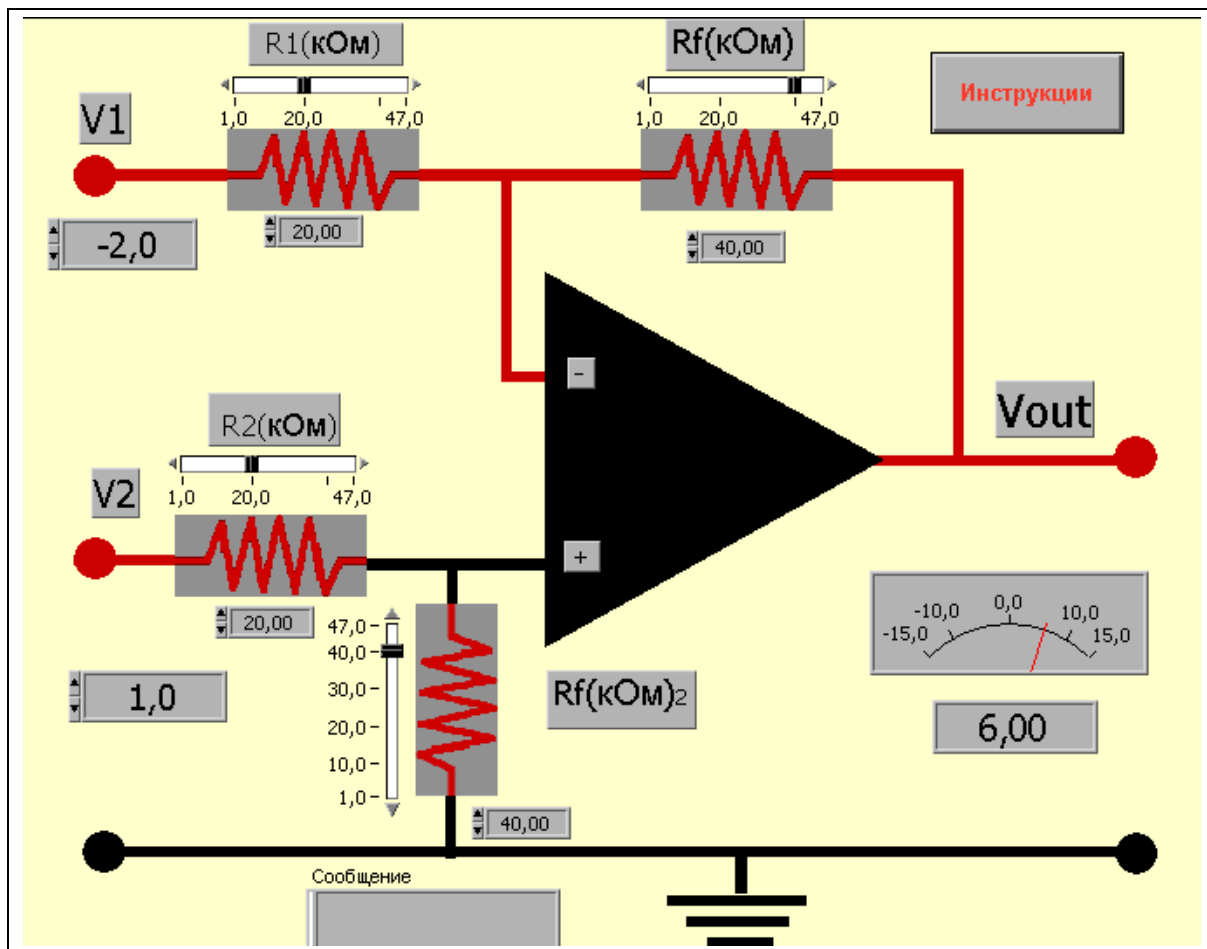


Рисунок 2-7. Моделирование дифференцирующей схемы усилителя

Обратите внимание, что разностное уравнение справедливо, только если равны резисторы входного контура и ОС. Чтобы реальная дифференциальная схема на основе ОУ хорошо работала,

необходимо строго соблюсти условие равенства резисторов. В этом случае, дифференциальная схема выполняет математическую операцию – вычитание.

Схема интегратора на основе ОУ

Схема интегратора на основе ОУ получается из инвертирующей схемы заменой резистора ОС на конденсатор. Конденсатор может сохранять заряд Q . Идеальный конденсатор не имеет потерь и может быть использован для накапливания заряда с течением времени. Входной ток накапливается в конденсаторе ОС C_f . Напряжение на конденсаторе равно V_{out} и определяется соотношением $Q = CV$, т.е. $Q = C_f V_{out}$. Вспомним, что ток $i_f = dQ/dt$. Объединяя эти уравнения, имеем

$$i_f = C_f (dV_{out}/dt). \quad (2-10)$$

Используя предположение об идеальности ОУ, $i_1 = V_{in} / R_1$ и $i_1 = -i_f$, получим

$$V_{in} / R_1 = - C_f (dV_{out} / dt) \quad (2-11)$$

или в интегральной форме:

$$V_{out} = - (1/R_1 C_f) \int V_{in} dt . \quad (2-12)$$

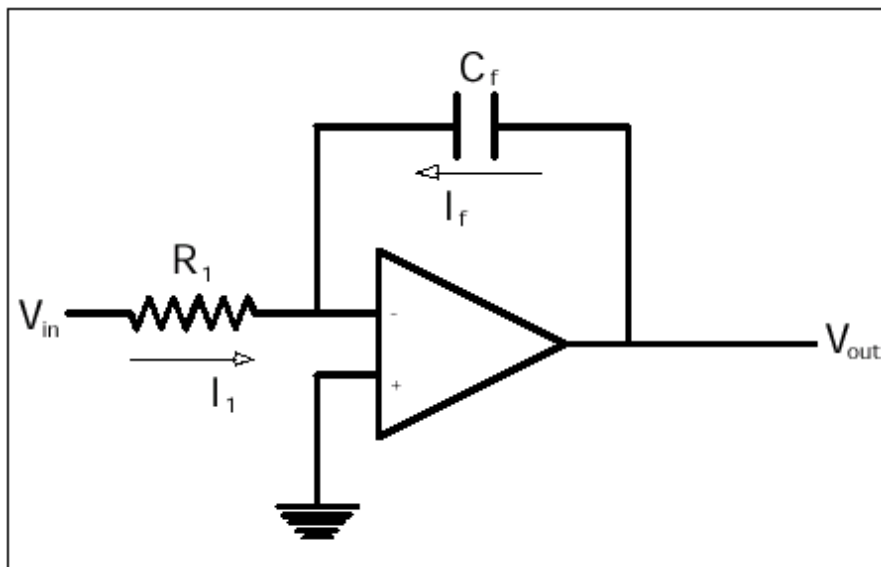


Рисунок 2-8. Принципиальная схема интегратора на базе ОУ

Выходное напряжение – интеграл от входного сигнала, умноженный на масштабную константу $1/R_1 C_f$. Единицы измерения R – омы и C – фарады. Единицы измерения RC – секунды. Например, емкость 1 мкФ

и сопротивление 1МОм дают масштабный фактор 1/секунда. Рассмотрим случай, когда входное напряжение постоянно. Тогда подынтегральное выражение может быть вынесено из-под знака интеграла и уравнение принимает вид:

$$V_{out} = - (V_{in} / R_1 C_f) t + \text{константа}, \quad (2-13)$$

где постоянная интегрирования может быть найдена из начальных условий, таких как $V_{out} = V_o$ при $t = 0$.

Это уравнение описывает линию с наклоном $-(V_{in}/RC)$. Например, при напряжении $V_{in} = -1$ вольт, $C = 1$ мкФ и $R = 1$ МОм наклон будет 1 вольт/сек. Выходное напряжение будет нарастать линейно с указанной скоростью до тех пор, пока ОУ не перейдет в режим насыщения при положительном напряжении ограничения. Постоянную интегрирования можно изменять, устанавливая начальное напряжение на конденсаторе ОС. Это эквивалентно использованию начального условия $V_{out}(0) = V_{constant}$. В начале процесса интегрирования или в момент $t = 0$, начальное напряжение убирают, а выходной сигнал нарастает или убывает, начиная от указанного значения. Обычно принято устанавливать нулевое начальное напряжение. В данной схеме используется выключатель, закорачивающий конденсатор ОС, который необходимо разомкнуть в момент начала интегрирования.

Пример 2.4: Схема интегратора

Запустите программу LabVIEW, озаглавленную Ramp.vi, которая находится во 2 разделе библиотеки. Переключатель может находиться в двух состояниях – замкнутом (устанавливает начальное условие) и разомкнутом (позволяет схеме интегрировать). Нажмите на кнопку **Run**, чтобы включить схему интегратора. Вначале конденсатор закорочен, следовательно выходное напряжение равно нулю. Нажимая на кнопку *Выключатель*, вы можете замыкать и размыкать закорачивающую цепь конденсатора. Нажатием на эту кнопку разомкните цепь и наблюдайте, как линейно нарастает выходное напряжение. Исследуйте выходное напряжение при изменении параметров, определяющих наклон прямой (V_{in} , R_1 и C_f). Если ОУ переходит в режим насыщения, верните схему в исходное состояние, замыкая закорачивающую цепь конденсатора.

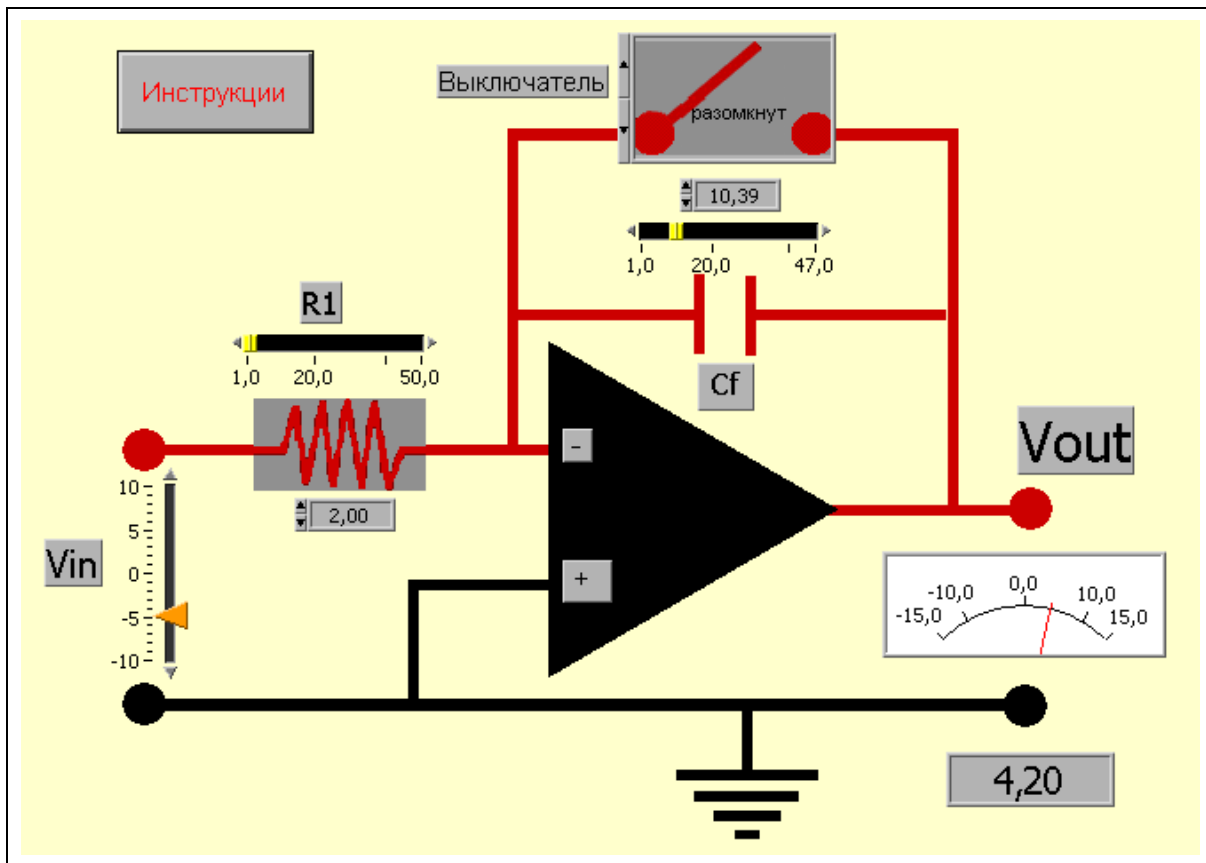


Рисунок 2-9. Моделирование интегратора на базе ОУ

При постоянном входном сигнале эта схема работает как генератор пилообразного напряжения. Если на короткое время закорачивать конденсатор каждый раз, когда выходное напряжение достигнет, например, 10 вольт, то результирующий сигнал будет иметь пилообразный вид. В программе с названием Sawtooth.vi был добавлен графический индикатор и кнопка, возвращающая конденсатор в исходное состояние. Нажимая на эту кнопку через регулярные интервалы времени, вы получите пилообразное напряжение на выходе. Попробуйте. Подскажет ли вам этот пример путь к построению генератора пилообразного напряжения?

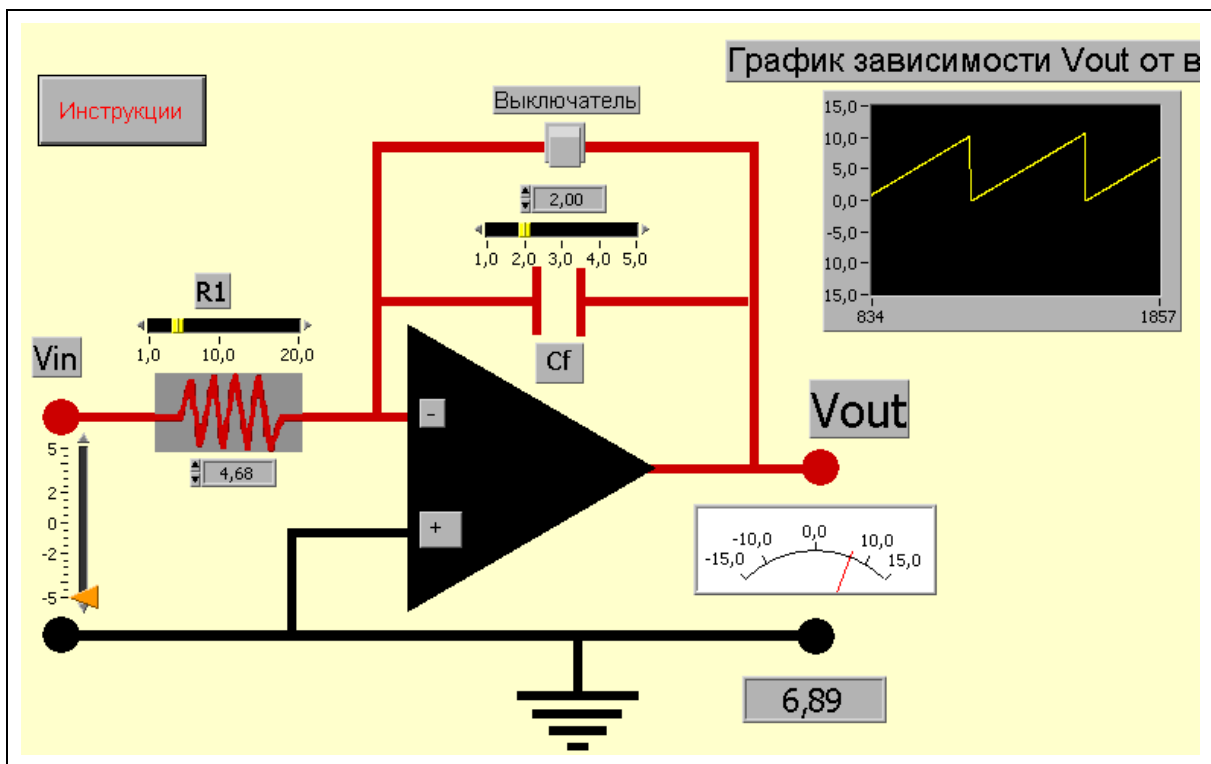


Рисунок 2-10. Интегратор в качестве генератора пилообразного напряжения

Задание повышенной сложности.

Что нужно изменить в схеме генератора, чтобы получить выходное напряжение треугольного вида?

Суммирующая схема на основе ОУ

Суммирующая схема на основе ОУ это модификация инвертирующей схемы для двух или более входных сигналов. Каждое входное напряжение V_i подается на инвертирующий вход через соответствующий резистор R_i . Суммирующая схема работает на основе второго закона Кирхгофа, утверждающего, что сумма всех токов, текущих через узел, равна нулю. В точке $V_{(-)}$ уравнение токов для узла имеет вид $i_1 + i_2 + i_f = 0$. Напомним, что у идеального ОУ нет входного тока (свойство 2) и тока смещения (свойство 3). В такой конфигурации инвертирующий вход часто называют точкой суммирования V_s . По-другому, этот узел можно назвать точкой, где все токи при суммировании дают ноль.

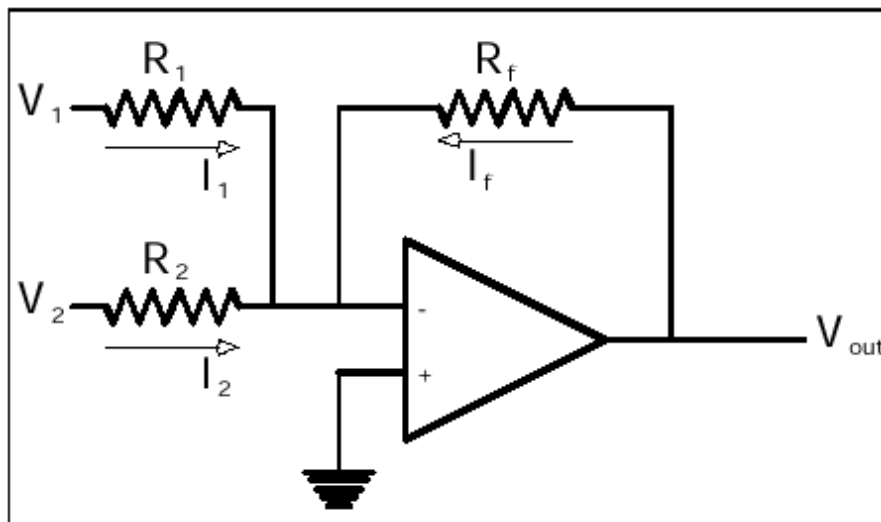


Рисунок 2-11. Принципиальная схема сумматора на базе ОУ

$$\text{Для входного контура 1 имеем} \quad i_1 = V_1 / R_1 . \quad (2-14)$$

$$\text{Для второго входного контура} \quad i_2 = V_2 / R_2 . \quad (2-15)$$

$$\text{Для контура обратной связи} \quad i_f = - (V_{out} / R_f) . \quad (2-16)$$

Применяя полученные уравнения для суммирующей точки, имеем

$$V_{out} = - R_f (V_1 / R_1) - R_f (V_2 / R_2) . \quad (2-17)$$

Если $R_1 = R_2 = R$, то схема имитирует сумматор:

$$V_{out} = - (R_f / R)(V_1 + V_2) . \quad (2-18)$$

В особом случае $(R_f / R) = 1/2$ выходное напряжение равно среднему от двух входных сигналов.

Пример 2.5: Суммирующая схема

Запустите программу LabVIEW, озаглавленную Summer.vi, которая находится во 2 разделе библиотеки. Два входных напряжения V_1 и V_2 могут быть непосредственно просуммированы, когда $R_1 = R_2 = R_f$. В противном случае, напряжения суммируются с соответствующими масштабными факторами R_f / R_1 и R_f / R_2 . Нажмите на кнопку **Run**, чтобы включить схему. Суммирующая схема находит применение в многочисленных сложных приборах.

Лабораторная работа №2

Цель работы.

Целью настоящей лабораторной работы является построение схемы на основе ОУ, которая суммирует два независимых входных сигнала.

Порядок выполнения.

Соберите сумматор по схеме, изображенной на рис. 2-12. Фотография сумматора представлена ниже. Для построения сумматора необходима микросхема К140УД6, несколько резисторов и два источника питания. Установите величину входного напряжения в пределах от -1 до +1 вольт.

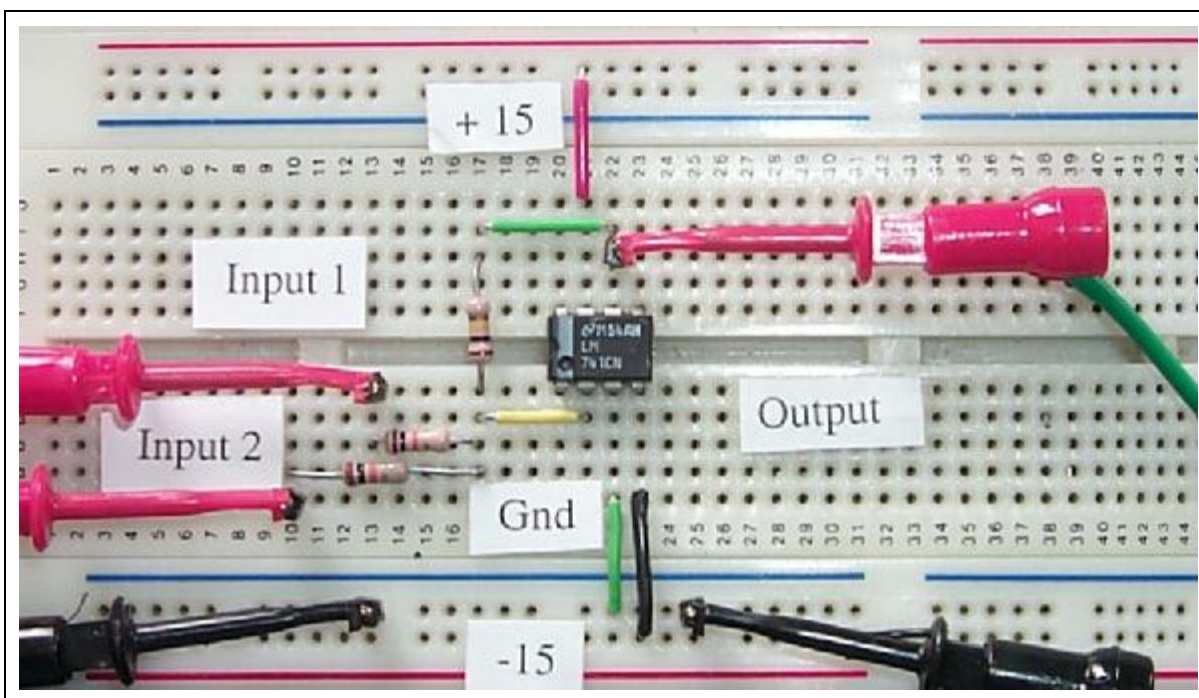


Рисунок 2-12. Расположение компонентов схемы сумматора на базе ОУ

В простейшем случае возьмите $R_1 = R_2 = R_f = 10\text{кОм}$.

Для схемы суммирующего усилителя с КУ 10 возьмите $R_1 = R_2 = 10\text{кОм}$ и $R_f = 100\text{кОм}$.

Для схемы усреднителя $R_1 = R_2 = 10\text{кОм}$ и $R_f = 5\text{кОм}$.

Измерьте входные и выходной сигналы при помощи цифрового вольтметра или многофункциональной платы ввода-вывода, сконфигурированной для выполнения функций вольтметра.

Компьютерная автоматизация 2: Передаточная характеристика ОУ

Графическое представление передаточной характеристики является хорошим средством собрать воедино данные многочисленных измерений, которые проводятся с целью оценить свойства электрических схем. Компьютерная автоматизация позволяет широко варьировать пробные напряжения для измерения, отображения и анализа откликов схемы. В данной работе используются канал вывода ЦАП для генерации постоянного тестового сигнала и канал аналогового ввода АЦП для измерения отклика схемы. Программа отображает отклик ОУ для каждого значения входного сигнала и строит график передаточной характеристики на графическом индикаторе фронтальной панели. Пределы измерения, скорость сканирования и число значений входного сигнала могут варьироваться ручками управления на фронтальной панели. Для сохранения результатов измерения в текстовом формате нажмите кнопку **Сохранить данные**.



Замечание. По умолчанию, многофункциональная плата ввода-вывода считывает сигналы в пределах от -5 до +5 вольт. Если вы используете многофункциональную плату ввода-вывода в этой конфигурации, установите напряжение питания ОУ +5 и -5 вольт.

При использовании схемы сумматора в данной лабораторной работе установите постоянное напряжение на втором входном канале ОУ (обычно устанавливают 0 вольт), при этом напряжение на первом входном канале может изменяться в определенных пределах. После соединения АЦП-ЦАП с вашей схемой переведите положение кнопки **Начать измерение** в состояние **Вкл** и введите пределы изменения тестового сигнала. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы построить передаточную характеристику ОУ. Посмотрите значения напряжений ограничения и определите КУ схемы.

Улучшения пользовательского интерфейса программы

- Добавьте второй выходной канал ЦАП для возможности наблюдения характеристик сумматора.
- Создайте индикатор, фиксирующий моменты, когда ОУ приходит в насыщение.
- Создайте ВП для автоматического измерения КУ ОУ и значений напряжений ограничения.

Решение этих задач можно найти на сайте
`sensor.phys.dal.ca/LabVIEW`

Занятие 3. Полупроводниковые диоды.



P-N переход образуется при соединении двух полупроводниковых материалов. Один из них легирован таким образом, что основным носителем тока в нем – электроны. Это полупроводник n-типа. Второй – полупроводник p-типа. Он легирован так, что основным носителем тока в нем – дырки. Буква n символизирует минус – знак заряда электрона, а буква p символизирует плюс – знак заряда в области с недостатком электронов. Когда два типа материалов соединяются вместе, происходит перегруппировка заряда в области вблизи контакта, что является причиной возникновения потенциального барьера между n и p материалами. Для возникновения проводимости необходимо, чтобы основные носители заряда преодолели этот потенциал. Его величина V_b определяется свойствами беспримесного материала. Для кремния V_b порядка 0.6 вольт.

В реальных схемах для изменения величины потенциального барьера используют внешние источники напряжения. При обратном смещении происходит увеличение пространственного заряда и ширины обедненной области. Эффективный потенциал для каждого типа основных носителей становится выше, еще более затрудняя возникновение проводимости.

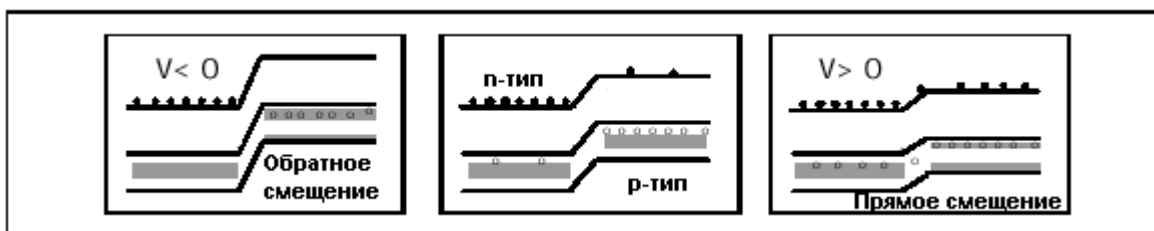


Рисунок 3-1. Энергетическая диаграмма p-n перехода при обратном, нулевом и прямом смещениях.

При прямом смещении все происходит наоборот. Эффективный потенциал уменьшается, и проводимость может возникнуть. Величина

проводимости зависит от вероятности, с которой основные носители могут преодолеть потенциальный барьер. Эту вероятность можно найти из распределения Максвелла-Больцмана, поэтому проводимость экспоненциально зависит от приложенного напряжения.

Ток I , протекающий через р-п переход, может быть приближенно представлен следующим выражением:

$$I = I_0 \{ \exp(eV/\eta kT) - 1 \}, \quad (3-1)$$

где I_0 – ток насыщения при обратном смещении, e – заряд электрона, V – приложенное напряжение, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, η – постоянная, зависящая от свойства полупроводникового материала.

Рассмотрим уравнение (3-1) для трех предельных случаев:

1. Обратное смещение (V – большое и отрицательное)

$$I = - I_0 \quad (3-2)$$

(на практике I_0 – несколько микроампер).

2. Прямое смещение ($V > 0.1$ и положительное)

$$I = I_0 \exp(eV/\eta kT) \quad (3-3)$$

[При комнатной температуре e/kT порядка 40 вольт⁻¹ и $I = I_0 \exp(40 V)$]

3. Нулевое смещение ($V \sim 0$ вольт)

$$I = I_0 (e/\eta kT) V \quad (3-4)$$

[В этом случае экспоненту можно разложить в ряд]

Сравнивая уравнение (3-4) с законом Ома ($V = IR$), видно, что множитель $\eta kT/eI_0$ имеет размерность сопротивления и его величина определяется свойствами диода. По-другому, $\Delta V/\Delta I$ или (крутизна)⁻¹ вольтамперной характеристики называется динамическим сопротивлением.

Пример 3.1: Вольтамперная характеристика (ВАХ) кремниевого диода

Запустите программу Diode IV.vi. Убедитесь, что переключатель питания находится во включенном положении, потом нажмите кнопку **Run**. Исследуйте ВАХ кремниевого диода.

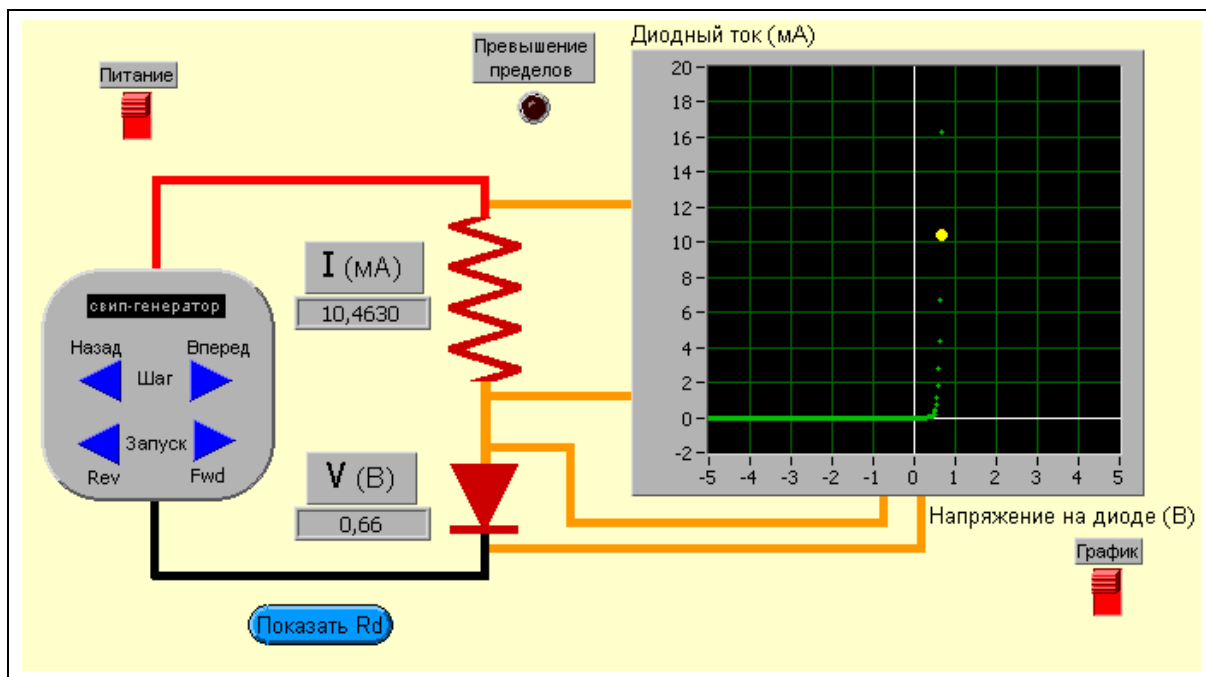


Рисунок 3-2. Моделирование схемы для измерения ВАХ диода

Запустите программу Diode IV.vi. Убедитесь, что переключатель питания находится во включенном положении, потом нажмите кнопку **Run**. Исследуйте ВАХ кремниевого диода.

Напряжение на диод подается нажатием на кнопки управления Свип-генератора. Напряжение перестраивается нажатием на кнопки **Fwd** или **Rev**. Нажатием на кнопки **Вперед** или **Назад** в режиме **Шаг** увеличивают или уменьшают прикладываемое напряжение с шагом 0.02 вольта. Нажимая на переключатель **График**, можно отобразить на графике отдельные значения тока и напряжения.

Динамическое сопротивление R_d ($\Delta V / \Delta I$) определяется как обратный тангенс угла наклона касательной к кривой ВАХ при данном напряжении. В области прямого смещения сопротивление мало, поэтому проводимость возникает легко. В области же обратного смещения сопротивление велико и проводимость затруднена. Переключение полярности приложенного напряжения с + (прямое смещение) на – (обратное смещение) эквивалентно изменению сопротивления резистора с низкого на высокое. Исследуйте динамическое сопротивление кремниевого диода нажимая на кнопку **Показать R_d** и изменяя рабочую точку. Свойство диода изменять свое сопротивление с высокого на низкое раньше использовалось для построения цифровых логических схем. Эти схемы, состоящие из комбинации диодов и резисторов, применялись для создания DRL (диод-резистор логика) устройств.

Чему равно динамическое сопротивление при ± 0.6 вольтах?

Полупроводниковые диоды

Когда контакт создан, часть носителей тока с каждой стороны диффундирует на противоположную. То есть, часть электронов переходит в материал р-типа и одновременно равное число дырок перемещаются в материал n-типа. Этот процесс продолжается до тех пор, пока разделение зарядов создаст дипольный слой вблизи контакта. Этот дипольный слой, в свою очередь, создает электрическое поле внутри контакта. После прекращения переходных процессов, то есть в равновесии, тока нет, но существует разность потенциалов или, по-другому, барьер вблизи границы контакта. Высота потенциального барьера является свойством первичного полупроводникового материала. Чтобы возникла проводимость в области прямого смещения ВАХ диода, необходимо подать напряжение большее величины барьера. Экстраполяцией ВАХ можно получить величину порогового напряжения, которое равно (с точностью 10%) энергетической щели основного материала полупроводника.

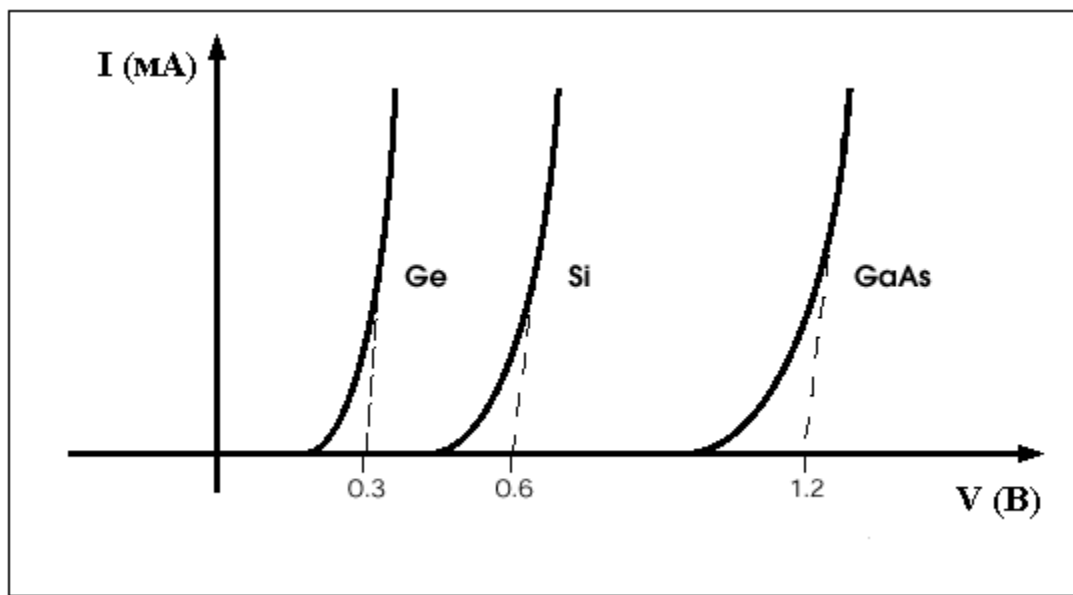


Рисунок 3-3. ВАХ диодов на основе Ge, Si и GaAs

Для германия пороговое напряжение равно 0.3 вольта, для кремния пороговое напряжение — 0.6 вольта и для арсенида галлия — 1.2 вольта.

Пример 3.2: Свойства диода при прямом смещении

Откройте программу Diode2.vi, которая находится в 3 разделе библиотеки. Убедитесь, что напряжение питания включено, после этого нажмите кнопку **Run**. Эта программа моделирует ВАХ диодов при прямом смещении. Моделируются диоды, сделанные на основе наиболее распространенных полупроводниковых материалов – кремния, германия и арсенида галлия. Пользуясь графиком, оцените величину порогового напряжения для каждого из материалов.

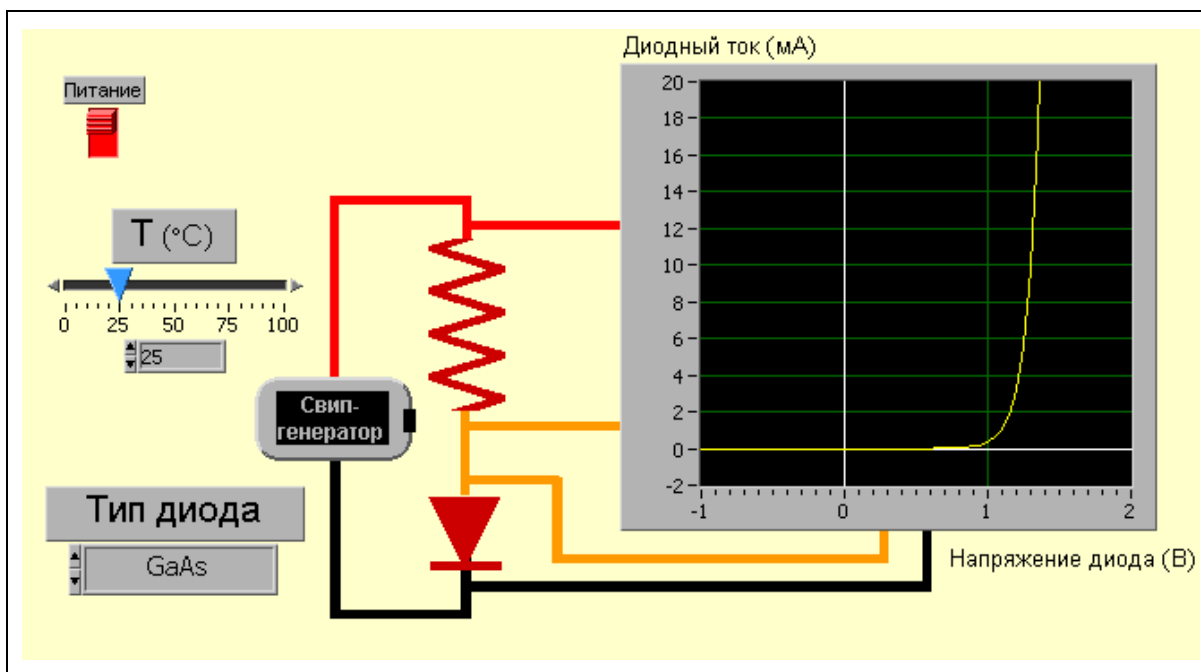


Рисунок 3-4. Моделирование ВАХ диодов на основе Ge, Si и GaAs

Из уравнения ВАХ диода видно, что ток через диод сильно зависит от температуры окружающей среды. В предыдущем примере температуру окружающей среды можно менять, перемещая соответствующий ползунок. Исследуйте температурную зависимость ВАХ диода.

Упражнения.

Используя программу Diode2.vi, постройте график напряжения на кремниевом диоде в зависимости от температуры при постоянном токе 10 мА. Напряжение сильно зависит от температуры. Может ли диод быть хорошим термометром?

Пример 3.3: Свойства диода при обратном смещении

Откройте программу Diode3.vi, которая находится в 3 разделе библиотеки. Убедитесь, что напряжение питания включено, после этого нажмите кнопку **Run**. Эта программа моделирует характеристики стабилитрона и лавинного диода при обратном смещении. Нажатием на стрелочный переключатель можно изменить тип диода.

Стабилитрон – сильно легированный диод, который при определенном напряжении переходит из состояния с большим сопротивлением в состояния с низким сопротивлением. В примере Diode3.vi это напряжение равно –12 В. Стабилитроны используются с целью ограничить максимальное напряжение некоторой заданной величиной.

С любым диодом при большом обратном смещении рано или поздно происходит лавинный пробой. Свободные электроны, ускоренные отрицательно приложенным напряжением до больших скоростей, при столкновении с атомами высвобождают еще больше электронов, которые, в свою очередь, будучи ускоренными, снова сталкиваются с атомами. Со временем ток нарастает экспоненциально, и диод разрушится, если не ограничить ток. В специальных диодах, называемых лавинными фотодиодами, используется лавинное умножение заряда. Эти диоды применяются для создания очень чувствительных датчиков света.

Фотодиод

Все диоды чувствительны к свету. Ток насыщения при обратном смещении зависит от плотности свободных электронов и дырок, и для фотодиодов ток I_0 называется темновым током. Свет, попадающий на диодный контакт, создает дополнительные свободные электрон-дырочные пары. При обратном смещении можно приложить к диоду большое напряжение. Под его действием свободные носители пролетают через контакт. В результате создается ток. Амплитуда тока зависит от интенсивности света, падающего на область контакта. Фотодиоды специально конструируются, чтобы оптимизировать этот эффект.

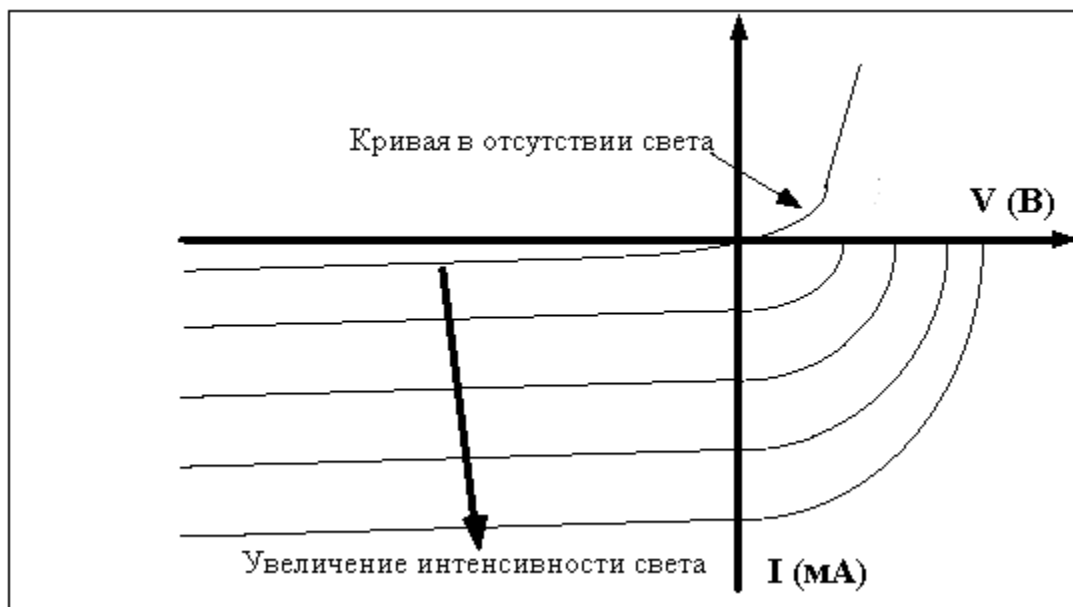


Рисунок 3-5. ВАХ фотодиода

ВАХ фотодиода показывает – на сколько смещается кривая под действием света по сравнению с уровнем темнового тока. Фототок измеряется в микроамперах. Он в тысячи раз меньше, чем ток текущий через диод в режиме прямого смещения. Для точного измерения интенсивности света необходимо вычесть темновой ток из измеренного фототока.

Пример 3.4: Типичная ВАХ фотодиода

Запустите программу PhotoDiode.vi, которая находится в 3 разделе библиотеки. Убедитесь, что напряжение питания включено, после этого нажмите кнопку **Run**. В данном примере моделируется ВАХ диода в зависимости от интенсивности падающего света. Интенсивность можно менять перемещая ползунок *Интенсивность света*. Обратите внимание, что вольтамперная характеристика чувствительна также и к температуре. Для проведения точных измерений необходимо, чтобы фотодиод находился при постоянной температуре.

Простейший измеритель освещенности на основе фотодиода и ОУ.

Фототок i_p прямо пропорционален интенсивности падающего света I_L . Коэффициент пропорциональности **R** называется чувствительностью, его величина зависит от длины волны падающего света и свойств основного материала полупроводника.

$$i_p \text{ (мкА) } = R I_L \text{ (мкВт) } . \quad (3-5).$$

Для кремниевого фотодиода $R = 0.5 \text{ мкА/мкВт}$ на длине волны 680нм.

Напомним уравнение передаточной характеристики инвертирующего ОУ (2-5):

$$V_{\text{out}} = - (R_f / R_1) V_1 . \quad (3-6)$$

Это уравнение может быть записано в виде:

$$V_{\text{out}} = - (V_1 / R_1) R_f = i_1 R_f , \quad (3-7)$$

где i_1 – ток, текущий во входном контуре.

Уравнение (3-7) описывает работу схемы на базе ОУ, которую называют *преобразователем тока в напряжение*. Выходное напряжение представляется в виде произведения тока, входящего в суммирующий узел, и сопротивления ОС. Фотодиод является генератором тока, следовательно, входной ток ОУ это фототок. Поэтому уравнение, связывающее интенсивность и выходное напряжение, есть просто:

$$V_{\text{out}} = - i_p R_f = - R I_L R_f . \quad (3-8)$$

Пример 3.5: Свойства фотометра на базе фотодиода и ОУ

Запустите программу Photometer.vi, которая находится в 3 разделе библиотеки. Убедитесь, что напряжение питания включено, после этого нажмите кнопку **Run**. В данном примере моделируется зависимость отклика фотометра V_{out} от интенсивности падающего света. Последнюю можно изменять вращением ручки управления **Интенсивность света**.

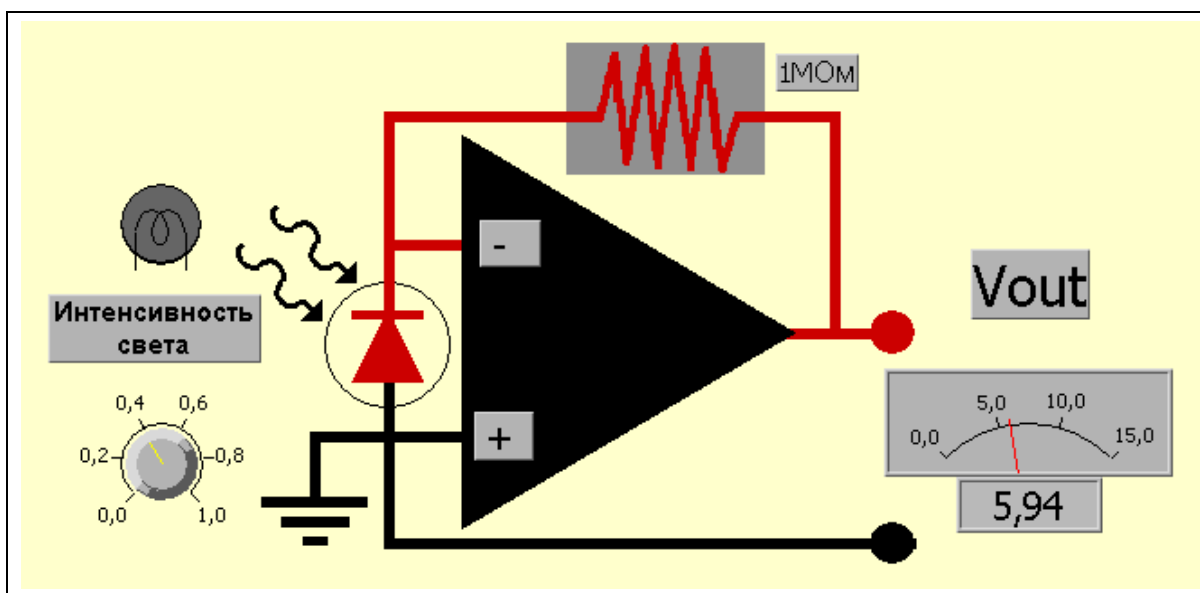


Рисунок 3-6. Моделирование простейшего измерителя освещенности на базе фотодиода и ОУ.

В общем случае характеристическая кривая фотодиода чувствительна к температуре. Для проведения точных измерений необходимо, чтобы фотодиод находился при постоянной температуре.

Задание повышенной сложности.

Придумайте программу, которая бы учитывала зависимость чувствительности R от длины волны в примере 3.5. В видимом световом диапазоне R – приблизительно линейная функция, имеющая величину 0.5 мкА/мкВт в темно красном участке спектра (680 нм), и 0.14 мкА/мкВт в темно фиолетовом (400 нм).

Лабораторная работа №3

Цель работы

Целью данной лабораторной работы является создание схемы для измерения интенсивности света.

Порядок выполнения.

Соберите преобразователь тока в напряжение по схеме, отображенной на рис.3-6. Его фотография приведена ниже. Для этого вам потребуется микросхема 356 FET, резистор, фотодиод и два источника питания. Если у вас нет фотодиода, его можно заменить светодиодом. При прямом смещении светодиод – хороший источник света. При нулевом или обратном смещении его можно использовать как фотодиод.

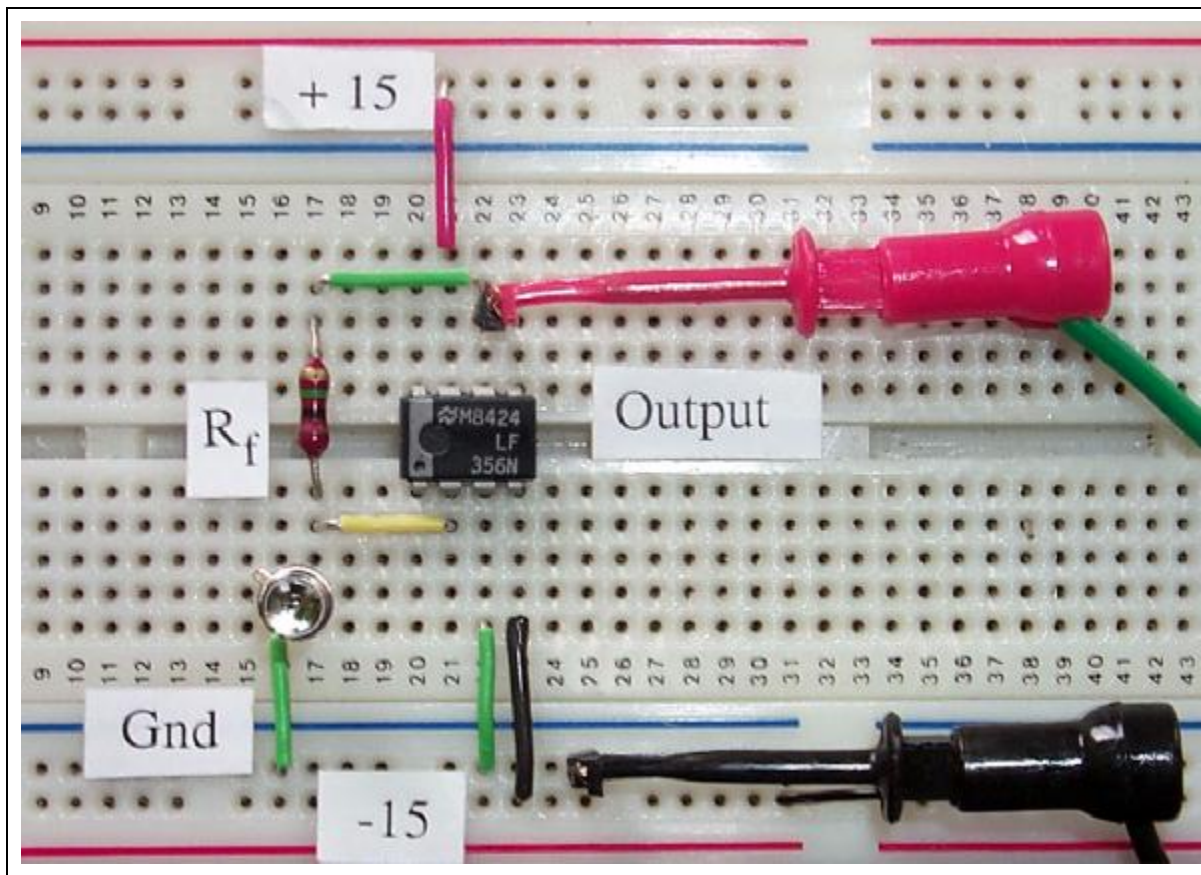


Рисунок 3-7. Расположение компонентов схемы измерителя освещенности на базе ОУ.

Большая часть фотодиодов генерирует ток в несколько микроампер при умеренной яркости светового поля. Если $R_f = 1\text{МОм}$, тогда на выходе измерителя освещенности будет напряжение несколько вольт.

Исследуйте выходное напряжение на рассвете, закате или когда небо закрыто облаками.

Задание повышенной сложности: Ночной измеритель скорости.

Расположите два измерителя освещенности на расстоянии 30 метров друг от друга вдоль оживленной автомобильной дороги. Как только машина проедет мимо детектора, уровень напряжения резко возрастет. Зафиксируйте сигнал от каждого детектора и измерьте время между ними. Разделив расстояние между детекторами на время между сигналами, вы получите скорость проезжающего автомобиля.

Компьютерная автоматизация 3: ВАХ диода

Для оценки характерных свойств таких приборов как диод необходимо графическое представление его ВАХ, так как при различных начальных условиях график ВАХ диода полностью описывает его работу.

Компьютерная автоматизация позволяет менять пробный сигнал в широких пределах при различных внешних условиях с целью получения отклика тестируемого устройства. Этот отклик, также как и начальные условия, можно отобразить и проанализировать. В данной работе мы увидим ВАХ тестируемого диода при изменении одного из параметров окружающей среды (температуры или освещенности).

Запустите программу TestDiode.vi, которая находится в 3 разделе библиотеки. В этой программе используется выходной канал многофункциональной платы ввода-вывода для генерации постоянных сигналов, которые будут использоваться в тестировании диодной схемы, аналогичной изображенной на рис. 3-4. Пределы и скорость сканирования и число значений тестового напряжения можно варьировать ручками управления на фронтальной панели. Для измерения тока и напряжения на фотодиоде в рабочей точке используются два входных канала многофункциональной платы ввода-вывода. Данная программа отображает семейство ВАХ на графическом индикаторе фронтальной панели. Для сохранения результатов измерения в текстовом формате нажмите кнопку **Сохранить данные**.

Присоедините диод и резистор, ограничивающий ток, к выходу многофункциональной платы ввода-вывода. В большинстве случаев вам будет необходимо согласовать выход многофункциональной платы ввода-вывода, чтобы обеспечить требуемый ток при максимальном прямом смещении. Установите величину резистора (<1 кОм) такую, чтобы выходное напряжение было в пределах 1–5 вольт при прямом смещении. Нажмите кнопку **Run** для наблюдения ВАХ.

Задания по улучшению программы

Получите семейство ВАХ при различных значениях рабочей температуры.

Используйте светодиод для освещения фотодиода и получите семейство ВАХ при обратном смещении.

Занятие 4. Характеристики ОУ по переменному току.



На предыдущих занятиях предполагалось, что уровень входного сигнала был постоянен или менялся очень медленно. Большинство аналоговых схем работают при переменном входном сигнале, поэтому отклик ОУ на слабый переменный сигнал является наиболее важной его характеристикой. Наиболее информативное описание отклика ОУ на входной сигнал с некоторой частотой дает график Боде. Кривая Боде – это график, на котором вдоль вертикальной оси отсчитывается коэффициент усиления в логарифмическом масштабе, а вдоль горизонтальной – частота тоже в логарифмическом масштабе. Логарифмический масштаб позволяет отобразить на графике широкий диапазон изменений КУ и частоты. Особый участок графика Боде – прямая линия. В этом случае частотная характеристика имеет степенную зависимость.

Выше мы определили коэффициент усиления ОУ без ОС как отношение изменения выходного напряжения к изменению входного напряжения V_{out}/V_{in} . В пределе малых частот КУ не зависит от частоты и может быть записан как $A(0)$. КУ можно также выразить в децибелах в виде:

$$N(\text{дБ}) = 20 \log_{10} (V_{out}/V_{in}) = 20 \log_{10} (A) . \quad (4-1)$$

Например, типичный КУ ОУ без ОС $A(0) = 100000$ запишется в виде $N(0) = 100$ дБ. Идеальный график Боде для такого ОУ может показывать следующую частотную характеристику:

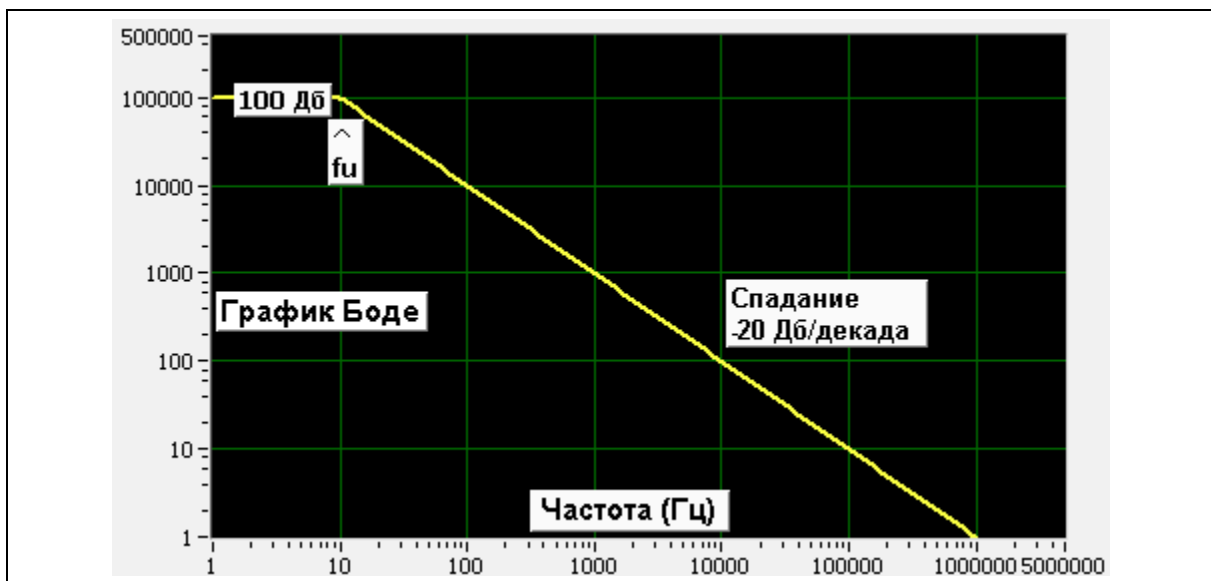


Рисунок 4-1. График Бодe для схемы на базе ОУ без ОС

Кoэффициент усиления ОУ без ОС (100 дБ) постоянен до частот порядка 10 Гц. Выше этой частоты, называемой верхней частотой среза f_u , внутренние компоненты схемы (преимущественно конденсаторы) сильно влияют на частотную характеристику. При этом кривая отклика спадает с наклоном -20 дБ/декада. Это изображено на графике Бодe в виде прямой линии на частотах больших, чем верхняя частота среза. Ниже f_u отклик ОУ не зависит от частоты и может быть характеризован $A(0)$ или $N(0)$, в то время как на больших частотах отклик сильно зависит от частоты.

Ширина полосы пропускания (ПП) ОУ определяется как разность между верхней и нижней частотами среза $ПП = f_u - f_l$. Напомним, что ОУ предназначены в том числе и для работы с постоянными сигналами, следовательно нижняя частота среза равна 0 Гц. Таким образом, ширина полосы пропускания ОУ это просто f_u .

Еще одна характерная частота $f_u(0\text{дБ})$ отвечает случаю, когда график Бодe пересекает прямую, соответствующую КУ 1 или 0 дБ. Этот интервал называют полосой пропускания по уровню усиления 1 – ПП(0дБ). В предыдущем примере пересечение происходит на частоте 1,000,000 Герц. В этом случае полоса пропускания на уровне усиления 1 есть $ПП(0\text{дБ}) = f_u(0\text{дБ}) = 1$ МГц. Интересно отметить, что для этих характерных частот f_u и $f_u(0\text{дБ})$ произведение КУ на полосу пропускания (КУ×ПП) – постоянно:

$$\text{На частоте } f_u \quad (КУ \times ПП) = 100,000 \times 10 \text{ Гц} = 10^6 \quad (4-2)$$

$$\text{На частоте } f_u(0\text{дБ}) \quad (КУ \times ПП) = 1 \times 1,000,000 = 10^6. \quad (4-3)$$

Фактически, частоты, соответствующие пересечениям линий постоянного усиления с графиком Боде, отображают это свойство. Произведение КУ на полосу пропускания постоянно и является характерным свойством каждого ОУ. При включении ООС данное соотношение позволяет легко вычислить верхнюю частоту среза для различных значений КУ.

Пример 4.1: Идеальная кривая частотного отклика (ОУ с разомкнутой цепью ОС)

Запустите программу Bode1.vi из четвертой главы библиотеки. КУ ОУ с разомкнутой цепью ОС был установлен в 100 дБ, а верхняя частота среза – 10 Гц. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы построить график Боде. Исследуйте график, изменяя КУ и частоту среза.

Частота среза на уровне усиления - 3 дБ

Частота, при которой КУ равен половине от $A(0)$, является более точным определением частоты среза. При этом $(V_{out}/V_{in}) = 1/2$. В децибелах для этого равенства получаем:

$$N(\text{дБ}) = 20 \log_{10} (1/2) = -3 \text{ дБ} \quad (4-4)$$

Для ОУ с $N = 100$ дБ верхняя частота среза – это частота, при которой КУ спадает до $(100 - 3) = 97$ дБ. На графике Боде этот предел показан в виде горизонтальной линии при $N = 97$ дБ. В предыдущем пункте эта частота (иногда называемая частотой излома) была найдена как точка пересечения двух прямых - $A(0)$ и линии спадания КУ.

Более точное определение зависимости КУ от частоты имеет вид:

$$A(f) = A(0) / \sqrt{1 + (f^2/f_U^2)} \quad (4-5)$$

Заметим, что кривая Боде (см. рис. 4-2) – имеет гладкий вид вблизи верхней частоты среза.

В децибелах предыдущее выражение запишется в виде:

$$N(f) = 20 \log_{10} (A(0)) - 20 \log_{10} \sqrt{1 + (f^2/f_U^2)} \quad (4-6)$$

На частоте $f = f_u$, $N(f_u) = 20 \log_{10} (A(0)) - 20 \log_{10} \sqrt{2}$ или

$$N(f_u) = N(0) - 3 \text{ дБ} \quad (4-7)$$

Таким образом, верхняя частота среза получается из пересечения прямой линии $N(0) -3$ дБ с графиком зависимости коэффициента усиления ОУ с разомкнутой цепью ОС от частоты $N(f)$.

Пример 4.2: Кривая частотного отклика (ОУ с разомкнутой цепью ОС)

Запустите программу Bode2.vi из четвертой главы библиотеки. КУ ОУ с разомкнутой цепью ОС был установлен в 100 дБ, а верхняя частота среза – 10 Гц. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы построить график Боде. Жирная линия вблизи сглаженной кривой отклика это идеальная аппроксимация, использованная в примере 4.1. Вблизи частоты излома f_u показана более точная сглаженная частотная зависимость. Исследуйте график, изменяя КУ и верхнюю частоту среза. Для лучшего сравнения частоты излома и верхней частоты среза на уровне -3 дБ можно увеличить график в этой области.

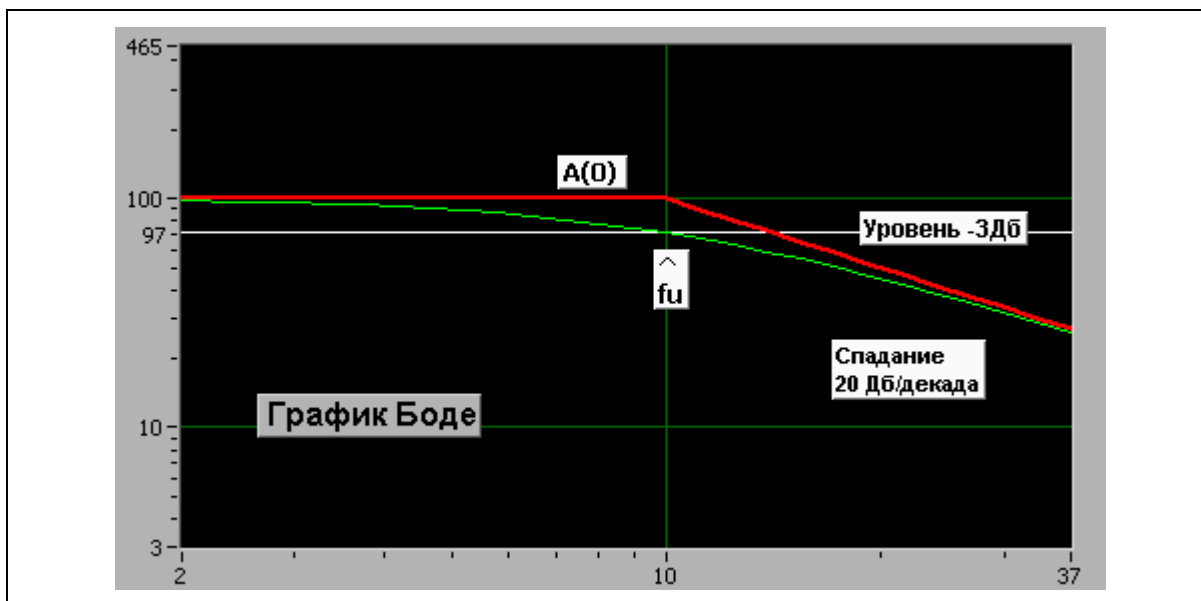


Рисунок 4-2. Графики Боде для идеальной и реальной схем на базе ОУ

Идеальный график Боде с $A(0) = 100,000$ и $f_u = 10$ Гц показан жирной линией. Белая линия ниже $A(0)$ показывает уровень -3 dB от исходного. Более точный график КУ показан кривой линией. Пересечение этой кривой с уровнем -3 dB дает верхнюю частоту среза. Отметим близость этой точки к частоте излома идеальной частотной характеристики ОУ. По этой причине произведение КУ на ширину полосы может использоваться для оценки верхней частоты среза в реальных схемах.

Частотный отклик схем на основе ОУ с контуром ОС

Схемы с ООС имеют гораздо меньший КУ, чем схемы без ОС. ОС увеличивает стабильность схемы, уменьшая при этом усиление. График Бode для такой схемы можно получить, заменяя $A(0)$ в уравнении 4-5 на $G(0)$, после чего имеем

$$G(f) = G(0) / \sqrt{1 + (f^2/f_u'^2)}, \quad (4-8)$$

где f_u' – частота, на которой КУ меньше $G(0)$ на 3дБ. Возьмем для примера типичный ОУ с $A(0) = 100,000$ и $f_u = 10$ Гц. В схеме с контуром обратной связи коэффициент усиления $G(0) = 1000$. Верхнюю частоту среза можно вычислить, используя произведение КУ на ширину полосы пропускания, которое равно 10^6 , что дает 1000 Гц.

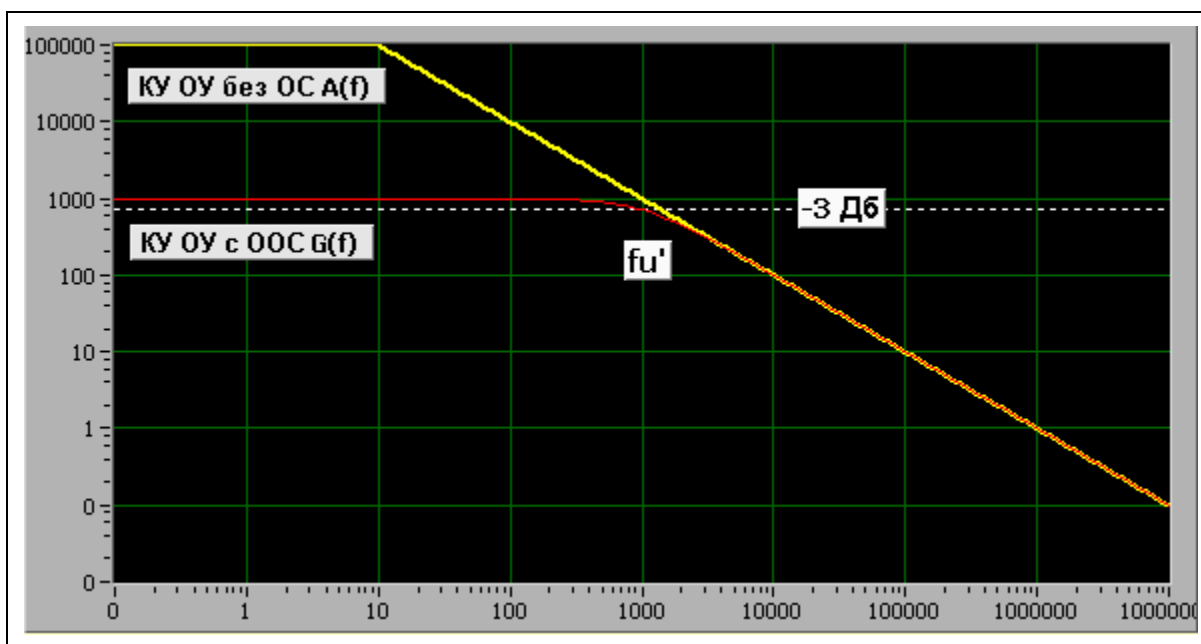


Рисунок 4-3. График Бode для схемы на базе ОУ с контуром ОС и $G = 1000$

Жирная линия – это идеальная частотная характеристика (ЧХ) схемы с разомкнутой цепью ОС, а кривая линия – это ЧХ схемы с контуром ОС. Область между двумя графиками появилась вследствие ослабляющего действия ООС в пользу стабильности. Когда $A(f)$ гораздо больше $G(f)$, схема усилителя работает стабильно. По мере приближения рабочей частоты к верхней частоте среза f_u' схемы с петлей ОС, $G(f)$ приближается к $A(f)$, и две кривые сливаются. Для частот, больших граничной, эти графики неразличимы, поэтому кривая частотного

отклика сильно зависит от частоты – она спадает с наклоном -20 дБ/декада.

Пример 4.3: Динамический частотный отклик схем на основе ОУ с контуром ОС

Запустите программу Bode3.vi из четвертой главы библиотеки. Нажмите кнопку **Run** для активизации схемы. КУ ОУ с ОС можно задать, нажимая и одновременно перемещая ползунок управляющего элемента **Усиление**. Проверьте, что КУ схемы с ОС всегда находится в области внутри графика ЧХ схемы без ОС. Обратите внимание на форму кривой для схемы с ОС вблизи точки единичного усиления.

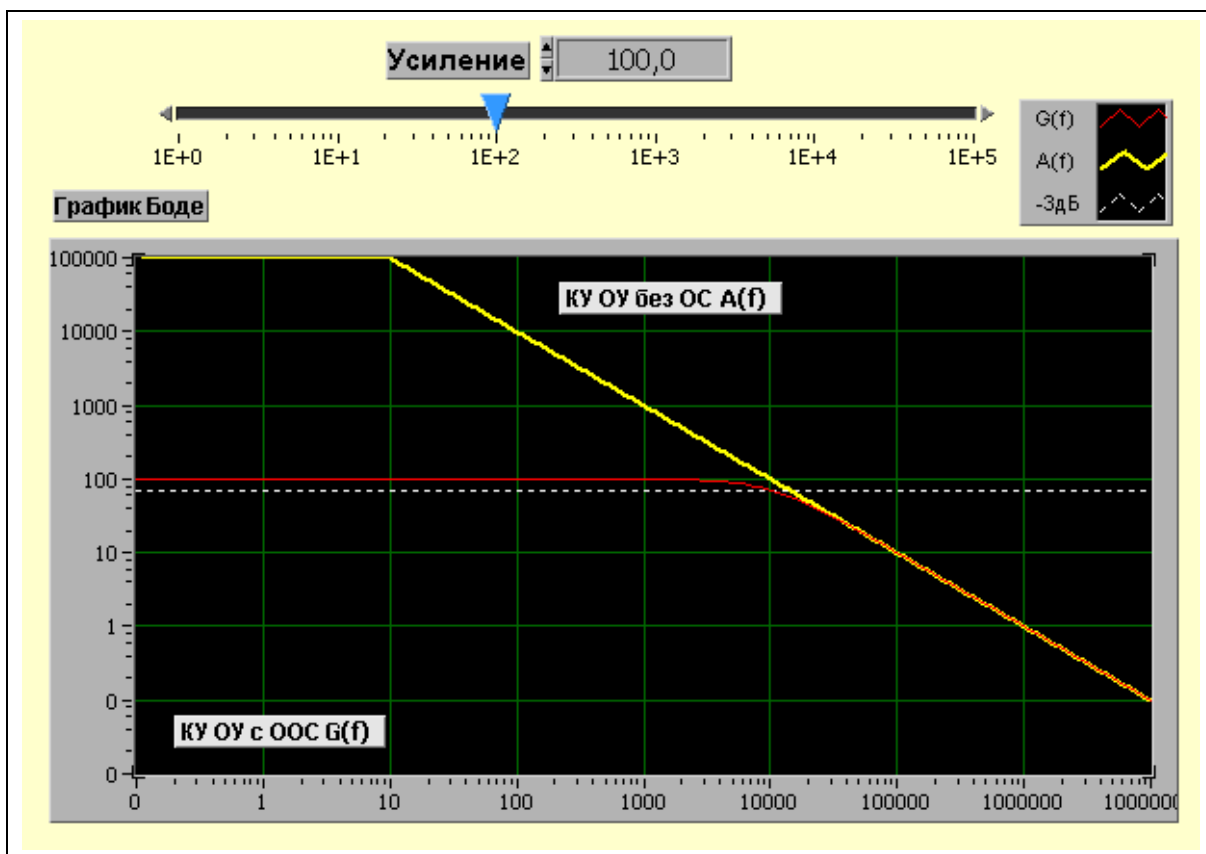


Рисунок 4-4. График Бode для схемы на базе ОУ с контуром ОС и $G = 100$

Как меняется верхняя частота среза f_u' при изменении КУ?

Что вы можете сказать о произведении КУ на ширину полосы пропускания схемы с ОС?

Задание повышенной сложности.

Придумайте программу LabView для вычисления верхней частоты среза, используя произведение КУ на ширину полосы и зная КУ схемы с ОС. Придумайте программу для вычисления верхней частоты среза схемы с ОС, используя данные о резисторе ОС и резисторе входного контура, коэффициенте усиления схемы без ОС и частоте на уровне единичного усиления.

Лабораторная работа №4

Цель работы.

Цель настоящей лабораторной работы – исследование частотного отклика инвертирующей схемы на основе ОУ с КУ от 10 до 1000.

Порядок выполнения.

Соберите инвертирующую схему на основе ОУ, показанную на рис. 4-5. Для этого вам потребуются микросхема К140УД6, три резистора и два источника питания. Если $R_f = 100 \text{ кОм}$ и $R_1 = 1 \text{ кОм}$, тогда КУ схемы на нулевой частоте $G(0) = (R_f / R_1)$ равен 100 или $N(0) = 40 \text{ дБ}$. Для микросхемы К140УД6 ширина полосы на единичном уровне усиления порядка 1.5 МГц, а КУ в схеме без ОС порядка 200000. Из условия неизменности произведения КУ на ширину полосы получаем, что $f_u = 7.5 \text{ Гц}$. В схеме с ОС при КУ 100 верхняя частота среза должна быть порядка 15 кГц. Повторите расчет для случая $R_1 = 10 \text{ кОм}$ в схеме, показанной ниже.

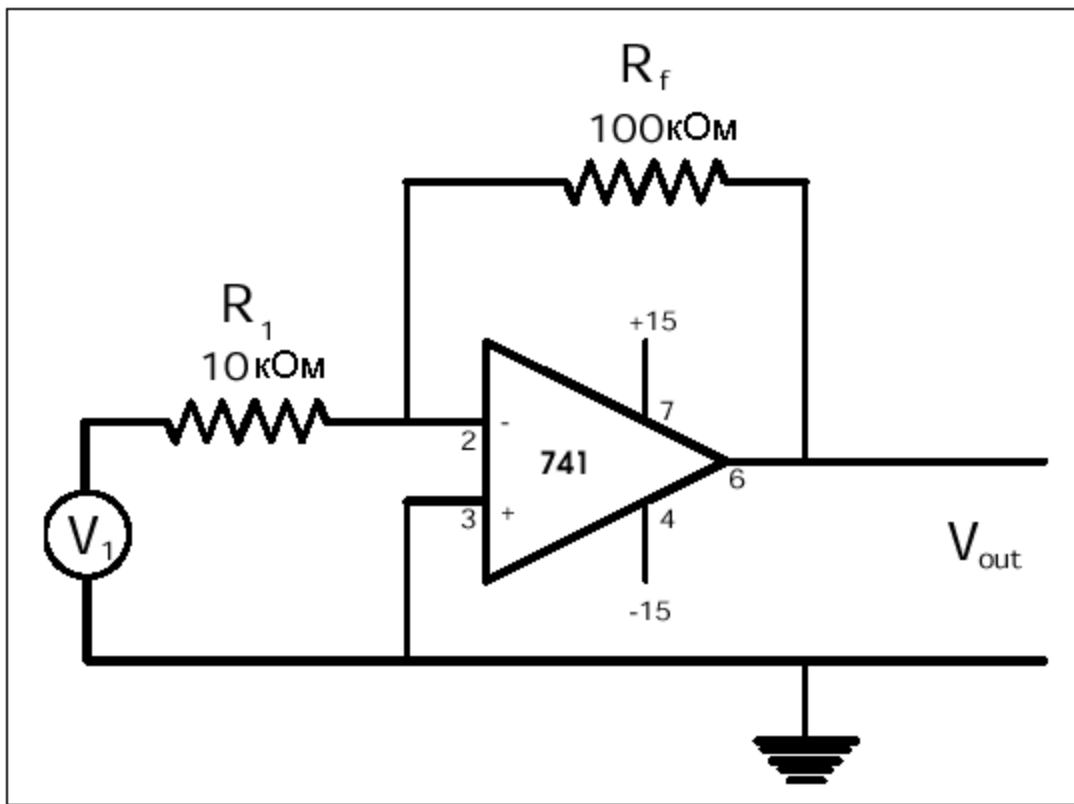


Рисунок 4-5. Принципиальная схема инвертирующего усилителя

Используйте генератор функций для получения синусоидального напряжения с амплитудой 5мВ. Для измерения величины этого сигнала используйте осциллограф или высокоскоростную плату ввода-вывода. В любом случае, важно измерить уровень входного сигнала, чтобы вычислить коэффициент усиления по формуле V_{out}/V_{in} . При изменении рабочих частот выберите десятичный масштаб, затем умножайте его на 1, 2, 4 и 8. В этом случае вы получите примерно однородный ряд точек в логарифмическом масштабе частот. Постройте график Бode, то есть КУ в децибелах как функцию от десятичного логарифма частоты. Сравните измеренную верхнюю частоту среза с предсказанной величиной.

Компьютерная автоматизация 4: Сигналы входного воздействия

Компьютерная автоматизация позволяет использовать целый набор периодических сигналов входного воздействия для тестирования разнообразных устройств или схем. Отклик на такие сигналы можно использовать для характеристики приборов или убедиться, что он удовлетворяет определенным требованиям. Наиболее общее представление периодического сигнала можно записать в следующем виде:

$$V = V_0 + A [F_{\text{сн}}(f, \theta, t)]$$

где V_0 – уровень постоянного напряжения, часто называемый напряжением смещения, f – частота периодического сигнала, θ – фаза сигнала и t – время. При этом форма сигнала $F_{\text{сн}}$ может меняться. Наиболее распространенные формы – синусоидальная, прямоугольная, пилообразная и треугольная. В данной работе мы увидим сигналы входного воздействия, сгенерированные при помощи LabVIEW, на экране осциллографа, присоединенного к каналу аналогового выхода многофункциональной платы ввода-вывода.

Запустите программу FunctionGenerator4.vi из четвертой главы библиотеки. В этой программе используется выходной канал многофункциональной платы ввода-вывода для генерации постоянных и переменных сигналов, предназначенных для автоматизированного тестирования устройств. Пределы сканирования, скорость и число выборок можно менять при помощи управляющих элементов на фронтальной панели. По умолчанию установлены параметры для синусоидального сигнала:

$$V = V_0 + A \sin(2 \pi f t + \theta),$$

где $V_0 = 0$ вольт, $A = 2$ вольт, $f = 20$ Гц и $\theta = 0$.

Присоедините осциллограф к контактам устройство 1/канал 0 многофункциональной платы ввода-вывода. Для запуска генерации нажмите кнопку **Run**. Наблюдайте сигнал на экране осциллографа и поварьейте напряжение смещения, амплитуду, частоту и фазу. Попробуйте другие формы сигнала – треугольную, прямоугольную и пилообразную.



Замечание. Максимальная частота сигнала на выходе платы определяется типом и особенностями последней.

Техника программирования на LabVIEW

Чтобы увидеть, как происходит генерация различной формы сигналов, на диаграммной панели основной программы Function Generator4.vi откройте подпрограмму Compute waveform.vi. Программа Function Generator4.vi является видоизменением другой программы – Function Generator.vi, которую можно найти в библиотеке файлов по адресу: LabVIEW/Examples/daq/anlogout/anlogout.llb.

Занятие 5. Фильтры на основе ОУ.



На предыдущем занятии мы узнали, что частотный отклик схем на основе ОУ и резистивных элементов определяется характерной частотной зависимостью самого ОУ. В данной работе добавятся емкостные и индуктивные элементы во входную цепь и контур ОС. Эти элементы имеют собственные частотные характеристики, и именно они будут определять частотный отклик усиливающей схемы. Во многих случаях схему с определенным откликом приспособляют для выполнения специализированных функций, таких как фильтрация, интегрирование и дифференцирование. Фильтры конструируются для пропускания сигналов в определенной полосе частот, интеграторы используются в схемах пропорционального управления, дифференциаторы применяются в схемах подавления шума и генерации сигналов.

Импеданс

Все множество резисторов, конденсаторов и/или катушек индуктивности может быть представлено обобщенным выражением импеданса

$$Z = R + jX, \quad (5-1)$$

где **R** – активная компонента, **X** – индуктивная/емкостная компонента, называемая реактивным сопротивлением. Символ комплексной единицы *j* свидетельствует о том, что реактивная компонента сдвинута по фазе на угол 90° относительно активной части. Комплексная форма записи будет использоваться в течении всего настоящего занятия для анализа схем на основе ОУ. Напряжение **V** и ток **I** – это вектора или фазоры с действительной и мнимой частями.

Закон Ома говорит о прямом соотношении между напряжением на резисторе и током, текущим через него. Полагая, что переменный ток имеет вид $i = i_0 \sin(\omega t)$, для приложенного напряжения имеем

$$V_R = i R = i_0 \sin(\omega t) R, \quad (5-2)$$

где $\omega = 2\pi f$, а f – частота, измеряемая в циклах в секунду или герцах. Амплитуда напряжения V_R есть просто $i_0 R$. Сопротивление действительно и всегда положительно. В представлении комплексных чисел напряжение на резисторе есть:

$$V_R = i_0 R \exp(j t). \quad (5-3)$$

В случае катушки индуктивности величина реактивного сопротивления или эквивалентное сопротивление X_L есть ωL . Закон Ленца утверждает, что напряжение на катушке пропорционально производной от тока. Предполагая, что ток имеет вид $i = i_0 \sin(\omega t)$, получаем для напряжения

$$V_L = L (di/dt) = L \omega i_0 \cos(\omega t). \quad (5-4)$$

Вспоминая, что $\cos(x) = \sin(x+90^\circ)$, перепишем уравнение (5-4) в виде:

$$V_L = L \omega i_0 \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (5-5)$$

Это выражение выглядит как закон Ома – уравнение (5-2), где ωL – эквивалентное сопротивление, но с фазовым сдвигом 90° . Эквивалентное комплексное сопротивление называется реактивностью $X_L = j\omega L$, а сдвиг по фазе представлен мнимой единицей. В комплексном виде имеем:

$$V_L = (j\omega L) i_0 \exp(j\omega t). \quad (5-6)$$

В случае конденсатора величина реактивного сопротивления или эквивалентное сопротивление X_C есть $1/\omega C$. Заряд конденсатора Q прямо пропорционален напряжению на нем ($Q = CV$). Вспоминая определение тока $i = dQ/dt$, запишем это соотношение в виде:

$$i = C (dV/dt). \quad (5-7)$$

Разрешая уравнение (5-7) относительно напряжения V и интегрируя, получим

$$V_C = (1/C) \int i_0 \sin(\omega t) dt = (1/\omega C) i_0 (-\cos \omega t). \quad (5-8)$$

Применим тождество $-\cos(x) = \sin(x - 90^\circ)$:

$$V_C = (1/\omega C) i_o \sin (\omega t - 90^\circ) . \quad (5-9)$$

Это выражение выглядит как закон Ома – уравнение (5-2), где $1/\omega C$ – эквивалентное сопротивление, но с фазовым сдвигом -90° . Эквивалентное комплексное сопротивление называется реактивностью $X_C = 1/j\omega C$, а сдвиг по фазе представлен мнимой единицей j . В комплексном виде запишем:

$$V_C = (1/j\omega C) i_o \exp(j t) . \quad (5-10)$$

В итоге имеем:

- Активное сопротивление (R) – действительное и его величина равна R .
- Реактивное сопротивление для катушки индуктивности ($X_L = j\omega L$) – мнимое и его величина равна ωL .
- Реактивное сопротивление для конденсатора ($X_C = 1/j\omega C$) – мнимое и его величина равна $1/\omega C$.

Фильтр нижних частот (ФНЧ)

Простейший низкочастотный фильтр можно создать добавляя конденсатор C_f параллельно резистору ОС в инвертирующей схеме на основе ОУ.

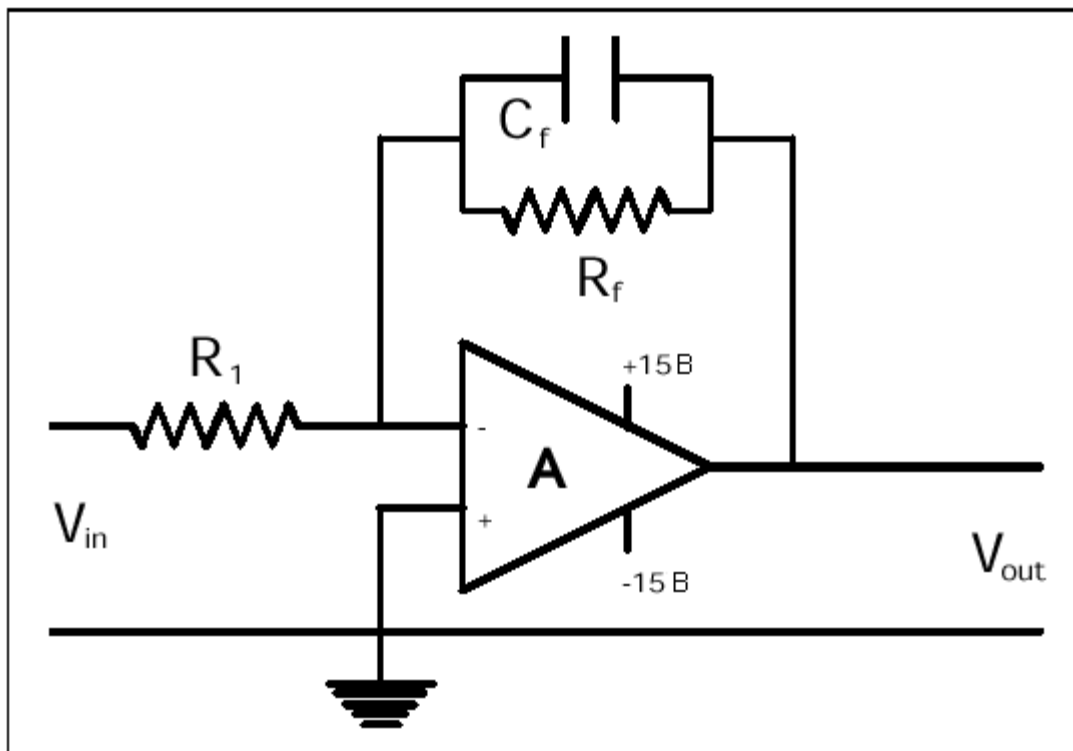


Рисунок 5-1. Принципиальная схема ФНЧ на базе ОУ

Вспомним, что при параллельном соединении «резисторы» складываются как обратные величины. Поэтому все компоненты цепи обратной связи можно заменить одним элементом с импедансом Z_f , где

$$1/Z_f = 1/R_f + 1/X_c. \quad (5-11)$$

Упрощая это выражение, получим

$$Z_f = (R_f - j\omega C_f R_f) / (R_f + \omega^2 C_f^2 R_f^2). \quad (5-12)$$

Импеданс ОС имеет действительную и мнимую части, которые зависят от частоты. В этом случае уравнение для передаточной характеристики может быть записано в виде:

$$V_{out} = (Z_f / R_1) V_{in}. \quad (5-13)$$

Из него получаем простое уравнение для КУ V_{out} / V_{in} :

$$G(f) = G(0) / \sqrt{1 + (f^2 / f_U^2)}. \quad (5-14)$$

где $G(0) = (R_f / R_1)$ – КУ ОУ с контуром ОС, в котором нет конденсатора. Это выражение выглядит подозрительно похоже на зависимость от

частоты, характерную для самого ОУ, – уравнение 4-5. А это так и есть, за исключением того, что теперь верхняя частота среза обусловлена контуром ОС и определяется выражением:

$$2\pi f_u = 1/R_f C_f. \quad (5-15)$$

Частота среза схемы с ОС всегда меньше, чем частота среза схемы с разомкнутой цепью ОС. Заметим, что КУ уменьшается в два раза или на 3 дБ на частоте f_u , поэтому полоса пропускания фильтра есть просто f_u .

Пример 5.1: Простейший фильтр нижних частот

Запустите программу LowPass.vi из пятой главы библиотеки. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы построить график Бode. Исследуйте значение верхней частоты среза при изменении емкости конденсатора или величины резистора ОС. Отметьте также изменение графика при изменении КУ $G(0)$ вследствие варьирования R_1 или R_f . Для удобства на графике показана частотная характеристика усилителя без ОС с $A(0) = 100$ дБ и верхней частотой среза 10 Гц.

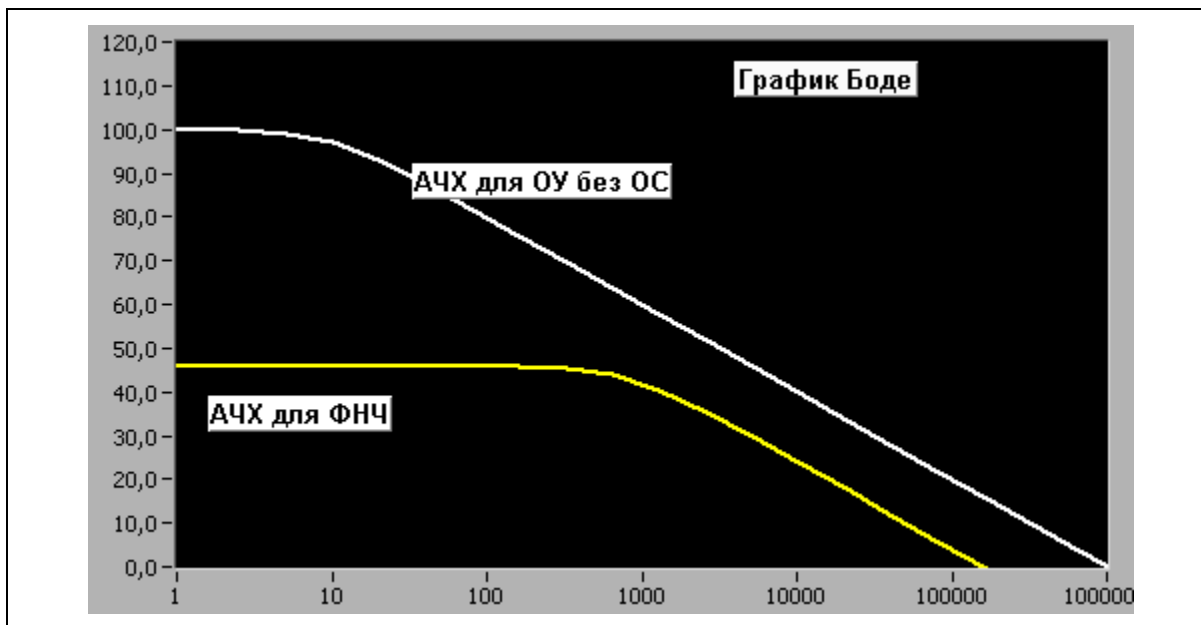


Рисунок 5-2. График Бode для ФНЧ на базе ОУ

Для всех частот, меньших f_u КУ постоянен, в то время как частоты большие f_u подавляются. Фильтр с такими свойствами называется низкочастотным фильтром. В области высоких частот кривая отклика спадает со скоростью 20 дБ/декада, как отклик схемы с открытой цепью ОС. Что происходит с сигналом в этой области?

Исследуйте импеданс цепи ОС в предельных случаях $f < f_u$ и $f > f_u$. Вычисляя Z_f или используя векторный калькулятор LabVIEW, покажите, что в пределе

$$\text{низких частот } (f < f_u) \quad Z_f \rightarrow R_f \quad (5-16)$$

$$\text{высоких частот } (f > f_u) \quad Z_f \rightarrow 1/j2\pi f C_f. \quad (5-17)$$

На низких частотах реактивное сопротивление конденсатора настолько велико, что весь ток течет через R_f и КУ есть просто R_f/R_1 . На высоких частотах реактанс конденсатора мал, и току легче течь через конденсатор, чем через резистор. В этом случае КУ есть $1/j2\pi f R_1 C_f$ и спадает обратно пропорционально частоте. На графике Боде это область прямой линии с отрицательным наклоном в 20 дБ/декада.

Как вы думаете, какой сигнал мы получим на выходе, если на вход подается прямоугольный сигнал? Правильно, треугольный! Также как и на втором занятии в схеме интегратора, конденсатор ОС C_f позволяет заряду накапливаться в нем при частотах сигнала $f > f_u$.

Низкочастотный фильтр в этом диапазоне интегрирует сигнал, так что входное напряжение прямоугольного вида становится треугольным на выходе. Интеграторы по переменному току находят широкое применение в схемах аналоговых вычислений.

Фильтр верхних частот

Простейший высокочастотный фильтр можно создать, добавляя конденсатор C_1 последовательно с резистором R_1 входного контура инвертирующей схемы на базе ОУ.

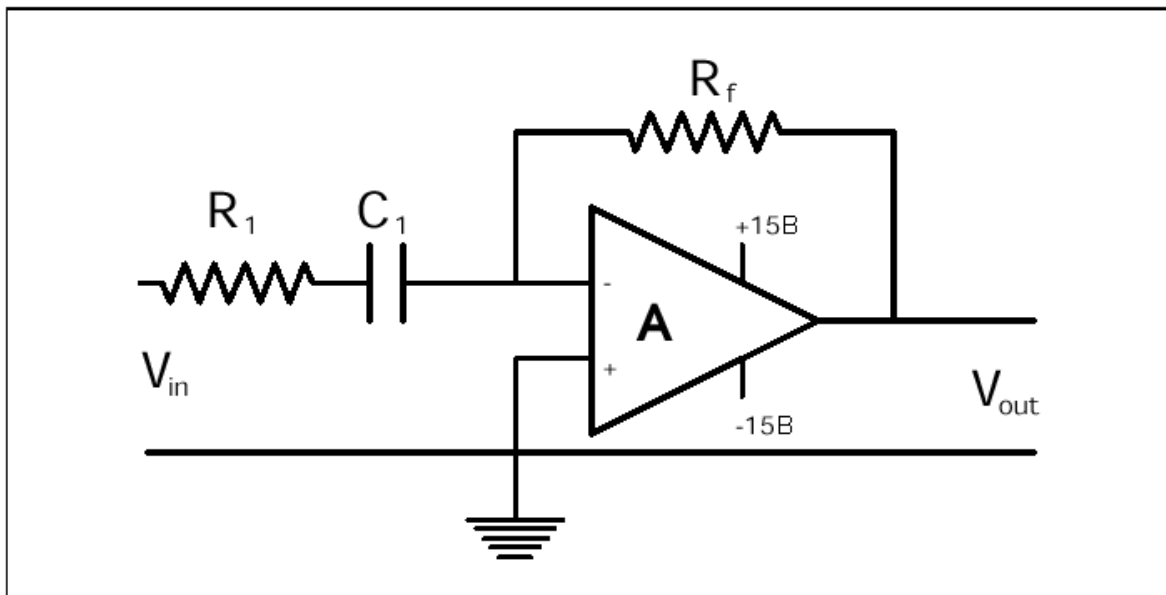


Рисунок 5-3. Принципиальная схема ФВЧ на базе ОУ

Вспомним, что сопротивления резисторов при последовательном включении складываются. Поэтому входная многокомпонентная цепь может быть представлена единственным элементом с импедансом Z_1 , где

$$Z_1 = R_1 + X_c. \quad (5-18)$$

Подставляя в (5-18) определение реактивного сопротивления для конденсатора, имеем:

$$Z_1 = (R_1 - 1/j\omega C_1). \quad (5-19)$$

В этом случае комплексное уравнение передаточной характеристики можно записать в виде:

$$V_{out} = (R_f / Z_1) V_{in}. \quad (5-20)$$

Выражая из него КУ V_{out} / V_{in} , получим

$$G(f) = G(0) / \sqrt{1 + (f_1^2 / f^2)}, \quad (5-21)$$

где $G(0) = R_f / R_1$. По форме это выражение похоже на предыдущее 5-13, за исключением того, что отношение частот инвертировано. Здесь f_1 – нижняя частота среза, определяемая параметрами входного контура R_1, C_1 , имеет вид

$$2\pi f_1 = 1/R_1 C_1. \quad (5-22)$$

В такой конфигурации схема на основе ОУ работает только для переменных сигналов. Постоянные сигналы через нее не проходят. Полностью усиливаются только сигналы с частотой большей, чем нижняя частота среза. Заметим, что при $f = f_1$ коэффициент усиления меньше в два раза или на 3дБ. Поэтому ширина полосы пропускания фильтра равна $(f_u - f_1)$, где f_u – верхняя частота среза схемы с контуром ОС.

Пример 5.2: Простейший фильтр верхних частот

Запустите программу HighPass.vi из пятой главы библиотеки. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы построить график Боде. Исследуйте значение нижней частоты среза при изменении емкости конденсатора или величины резистора входной цепи. Отметьте также изменение графика при изменении КУ $G(0)$ вследствие варьирования R_1 или R_f . Для удобства на графике показана частотная характеристика усилителя без ОС с $A(0) = 100$ дБ и верхней частотой среза 10 Гц.

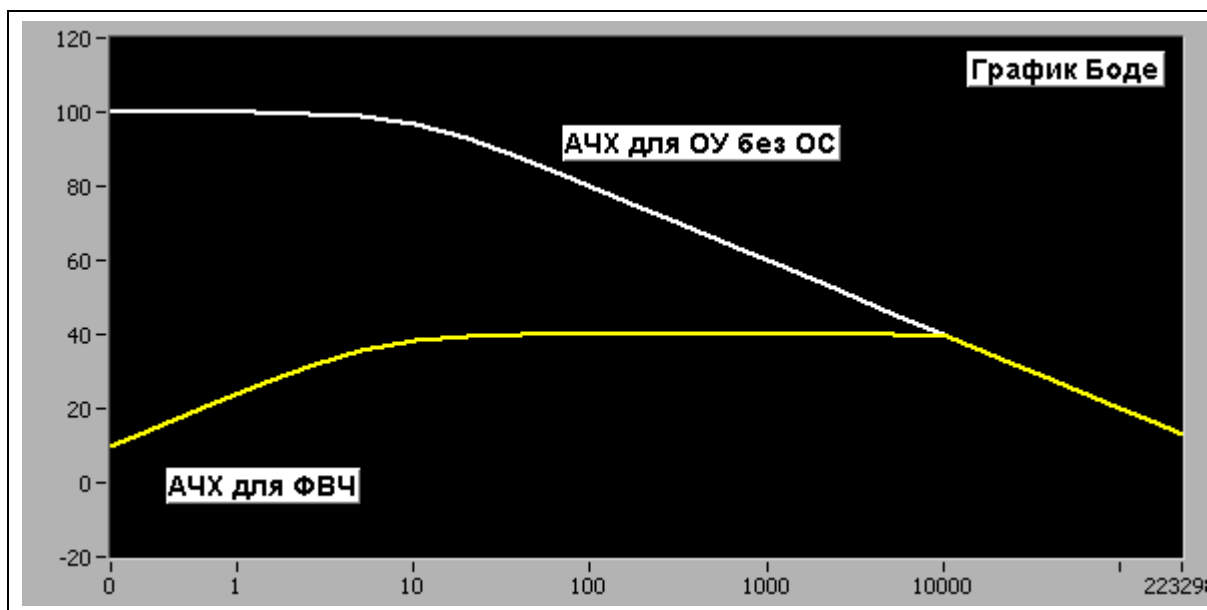


Рисунок 5-4. График Боде для ФВЧ на базе ОУ

Для всех частот, больших f_1 КУ постоянен (вплоть до верхней частоты среза схемы без ОС), в то время как частоты меньшие f_1 подавляются. Фильтр с такими свойствами называется высокочастотным фильтром. В области низких частот кривая отклика спадает со скоростью 20 дБ/декада. Что происходит с сигналом в этой области?

Исследуйте импеданс входной цепи в предельных случаях $f < f_1$ и $f > f_1$. Вычисляя Z_1 или используя векторный калькулятор LabVIEW покажите, что в пределе

$$\text{низких частот (} f < f_1 \text{)} \quad Z_1 \rightarrow 1/j2\pi f C_1 \quad (5-23)$$

$$\text{высоких частот (} f > f_1 \text{)} \quad Z_1 \rightarrow R_1 . \quad (5-24)$$

На низких частотах реактивное сопротивление конденсатора настолько велико, что ток сильно ослабляется и КУ ($j 2\pi f R_f C_f$) нарастает линейно с частотой вплоть до f_1 . На графике Боде это область прямой линии с положительной крутизной 20 дБ/декада. На высоких частотах реактанс конденсатора уменьшается, и ток течет через него свободно. В этом случае КУ такой, как если бы вообще не было конденсатора во входной цепи. Поэтому КУ постоянен (R_f / R_1) вплоть до кривой Боде для схемы с разомкнутой цепью ОС.

Что произойдет, если мы подадим на вход схемы сигнал треугольной формы. Причем частота сигнала лежит в области, где КУ зависит от частоты? Правильно, на выходе будет прямоугольный сигнал. Гармонические составляющие входного сигнала сильно трансформируются, так что в результате последний дифференцируется. Дифференциаторы переменного тока находят широкое применение в схемах аналоговых вычислений и подавления шумов.

Полосовой фильтр

Полосовой фильтр пропускает сигналы с частотами, лежащими в интервале между двумя частотами среза – верхней и нижней. Частотная характеристика идеального полосового фильтра должна иметь прямоугольную характеристику – резкую границу на частотах среза и плато между ними. Реальные полосовые фильтры, такие как фильтры Чебышева, Баттерворта и эллиптические фильтры, приближаются по характеристике к идеальной, но совершенно достигнуть ее не могут. Простейший полосовой фильтр можно создать комбинируя высокочастотный и низкочастотный фильтры, которые мы рассмотрели в предыдущих разделах.

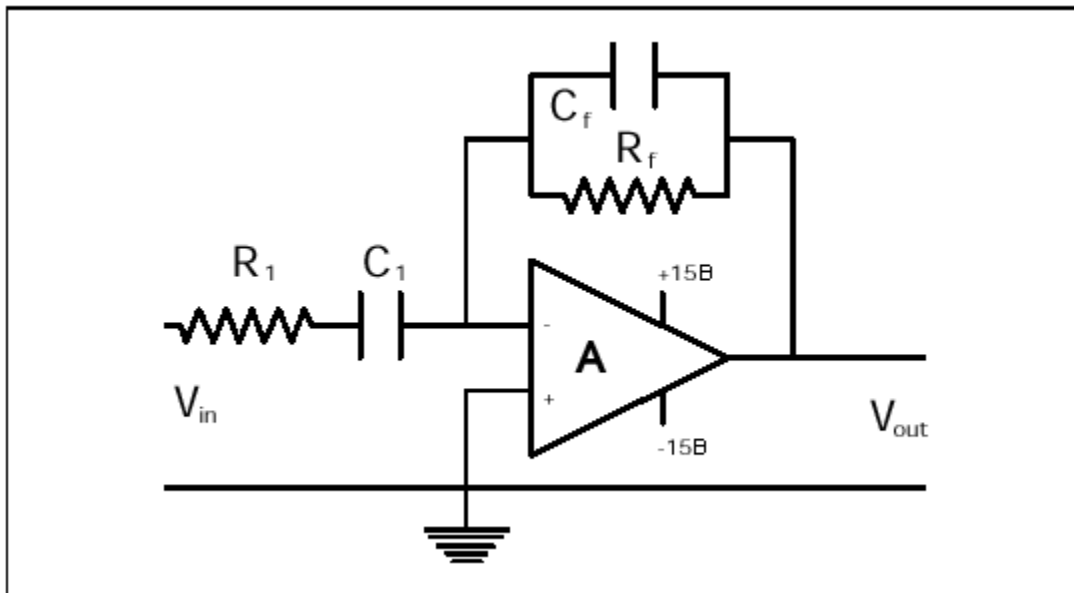


Рисунок 5-5. Принципиальная схема ПФ на базе ОУ

Теперь входной импеданс и импеданс ОС – комплексные. Поэтому КУ имеет следующий вид:

$$G(f) = |Z_f / Z_1| . \quad (5-25)$$

Решая это уравнение, получаем частотную зависимость КУ

$$G(f) = G(0) / \sqrt{[1 + (f_1^2 / f^2)]} \sqrt{[1 + (f^2 / f_u^2)]} \quad (5-26)$$

с нижней частотой среза f_1 (уравнение 5-22) и верхней частотой среза f_u (уравнение 5-15). Ширину полосы пропускания такого фильтра можно найти из пересечения линии -3 дБ с функцией $G(f)$ или просто из равенства $ПП = f_u - f_1$.

Пример 5.3: Простейший полосовой фильтр

Запустите программу BandPass.vi из пятой главы библиотеки. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы построить график Боде. Исследуйте форму кривой отклика полосового фильтра при изменении ключевых компонент схемы – R_1 , C_1 , R_f , C_f . Для удобства на графике показана частотная характеристика усилителя без ОС с $A(0) = 100$ дБ и верхней частотой среза 10 Гц.

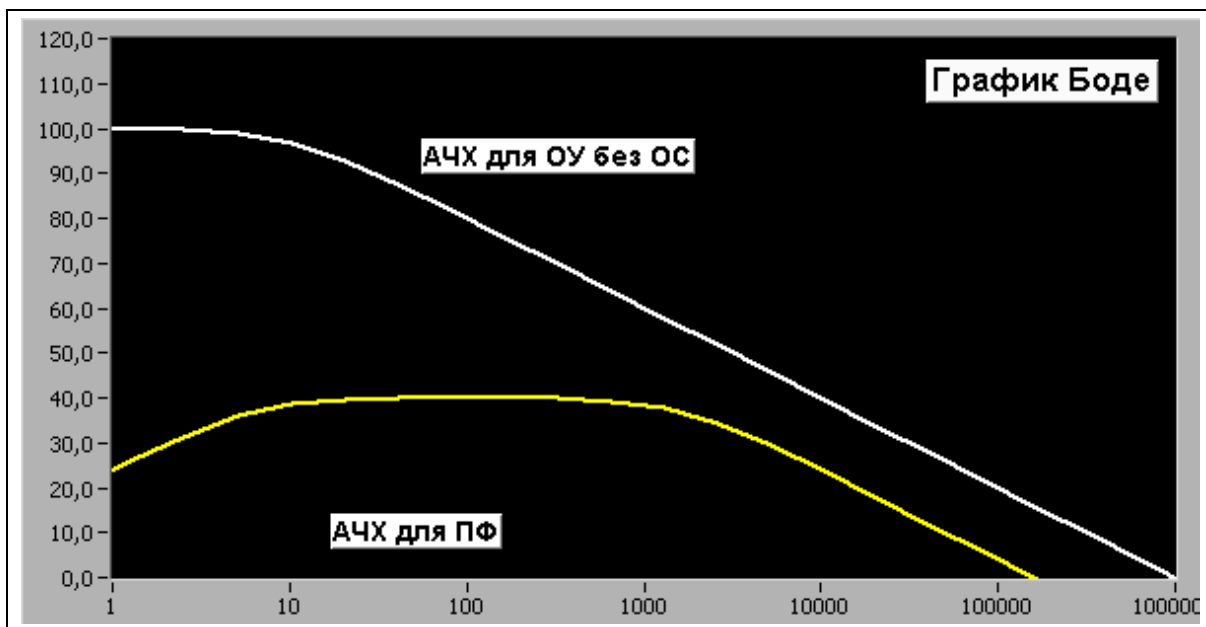


Рисунок 5-6. График Бодэ для ПФ на базе ОУ

Какой формы будет отклик полосового фильтра в случае $f_u = f_1$?

Такая частотная характеристика выбирает одну частоту среди всех других.

Задания повышенной сложности.

Что произойдет, когда на вход ФНЧ будет подан сигнал прямоугольной формы?

Прямоугольный сигнал можно представить в виде набора синусоидальных сигналов – основной гармоники с частотой f и нечетных гармоник с частотами $3f$, $5f$, $7f$ и т.д. Амплитуда каждой гармоники равна 1 , $1/3$, $1/5$, $1/7$ и т.д. Когда прямоугольное напряжение подается на фильтр, то в области, где его отклик зависит от частоты, гармоники быстро подавляются, так что выходное напряжение модифицируется или фильтруется, приобретая треугольный вид.

Придумайте программу LabVIEW, которая бы складывала основную и три следующие гармоники прямоугольного сигнала и отображала бы получившийся сигнал для одного полного цикла. Подайте такое напряжение на ОУ с КУ 1000 и верхней частотой среза, равной основной частоте сигнала. Какова будет амплитуда каждой компоненты? Сложите все эти компоненты и вы увидите приблизительно треугольный сигнал.

Лабораторная работа №5

Цель работы

Целью работы является изучение частотного отклика полосового фильтра и его зависимости от последовательно включенного конденсатора входной цепи и параллельно включенного конденсатора контура ОС.

Порядок выполнения.

Соберите полосовой фильтр по схеме, показанной ниже. Используя генератор функций в качестве источника синусоидального напряжения, измерьте частотные характеристики схемы и постройте график Боде.

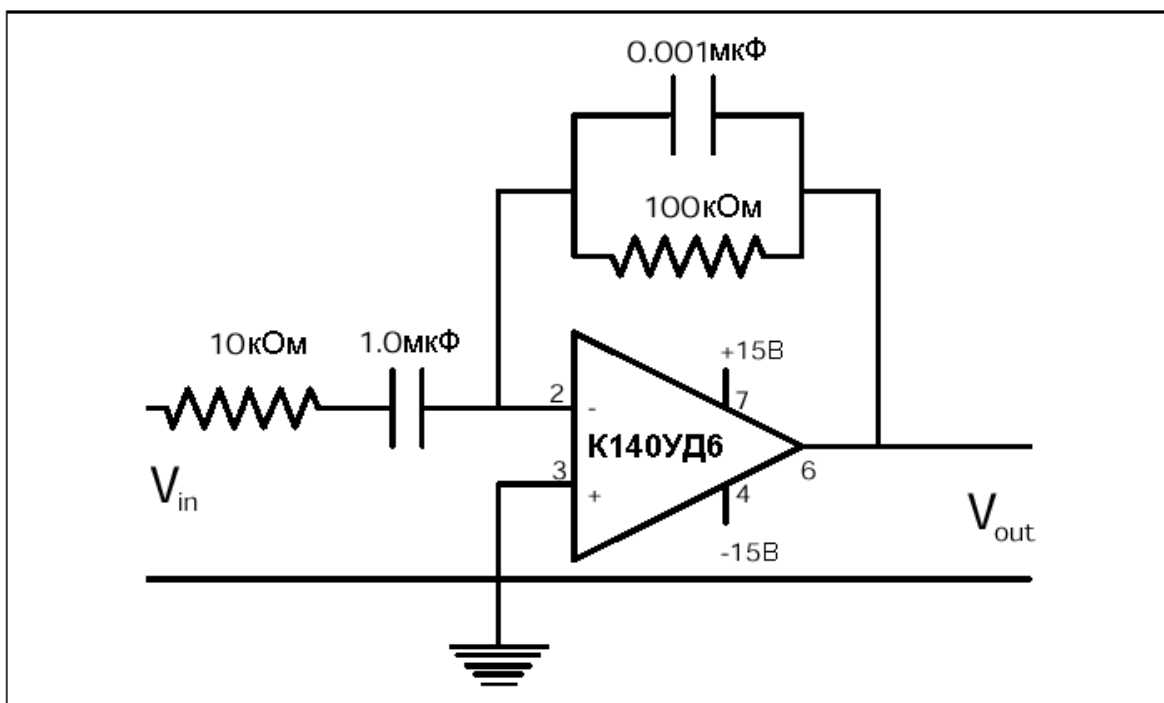


Рисунок 5-7. Принципиальная схема ПФ

Для этого вам понадобится микросхема K140UD6, два резистора, два конденсатора и два источника питания. Значения $R_f = 100\text{ кОм}$ и $R_1 = 10\text{ кОм}$ приводят к КУ 10 или 20 дБ в полосе частот усиления. Возьмите $C_1 = 1\text{ мкФ}$ и $C_f = 0.001\text{ мкФ}$. С помощью генератора функций подайте на вход схемы синусоидальное напряжение амплитудой 50 мВ. Фотография прибора представлена ниже.

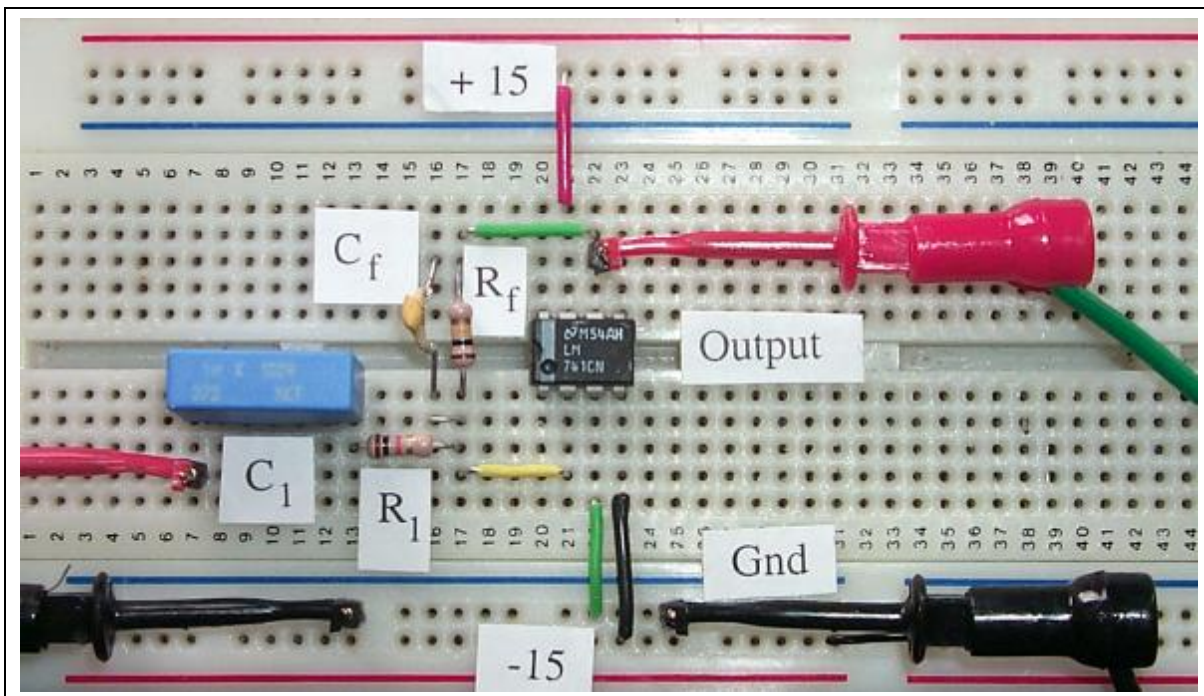


Рисунок 5-8. Расположение компонентов схемы ПФ на базе ОУ

Используйте осциллограф или высокоскоростную плату ввода-вывода для измерения уровня выходного сигнала. В любом случае, важно измерить уровень входного сигнала, чтобы вычислить КУ по формуле V_{out}/V_{in} . При изменении рабочих частот выберите десятичный масштаб, затем умножайте его на 1, 2, 4 и 8. В этом случае вы получите примерно однородный ряд точек в логарифмическом масштабе частот. Постройте график Бode, то есть КУ в децибелах как функцию от десятичного логарифма частоты.

Зная величины R_1 , C_1 , R_f , C_f , вычислите верхнюю и нижнюю частоты среза. Насколько эти значения согласуются с действительно измеренными по графику Бode на уровне -3дБ ?

Компьютерная автоматизация 5: Отклик на сигналы входного воздействия.

Компьютерная автоматизация обеспечивает максимум возможностей при автоматическом измерении, анализе и представлении откликов тестируемых устройств или систем. При использовании переменных сигналов входного воздействия отклик может иметь амплитудную, частотную или фазовую составляющие. В любом случае, представление выборки сигнала в матричной форме наиболее удобно для анализа. Программа LabVIEW обладает целым набором виртуальных приборов (ВП) для работы с матрицами. Они могут быть использованы для измерения амплитуды сигнала в единицах

максимального уровня, разности между максимальным и минимальным уровнями, среднего и среднеквадратичного уровней. Частоту синусоидального сигнала можно весьма легко измерить, используя счетчики или ВП частоты и периода. Гармонические составляющие более сложных сигналов входного воздействия можно проанализировать при помощи ВП быстрого преобразования Фурье или спектра мощности. Измерения фазы требуют синхронизирующего сигнала, поэтому сохранение синхронизирующего сигнала и отклика в матричном виде оказывается наилучшим. В настоящей лабораторной работе мы подадим синусоидальный сигнал на вход полосового фильтра и увидим его отклик на графическом индикаторе лицевой панели программы LabVIEW.

Запустите программу Response 5.vi из пятой главы библиотеки. В этой программе используется входной канал платы ввода-вывода для измерения отклика схемы. Присоедините генератор синусоидального напряжения (с максимальным уровнем сигнала 1 вольт) к входу (контакт 3) полосового фильтра (Лабораторная работа №4). Подберите компоненты фильтра так, чтобы нижняя частота среза была порядка 50 Гц. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы начать сбор данных, изменяя при этом частоту тестового сигнала от 1 до 100 Гц. Подстраивайте частоту до тех пор, пока величина измеренного отклика не будет меньше начального на 3дБ. Эта частота и есть нижняя частота среза. Насколько она совпадает с теоретически вычисленной по формуле 5-21?

Задания по улучшению программы

Придумайте ВП для определения максимальной амплитуды сигнала, разности между максимальным и минимальным уровнями, среднеквадратичного уровня сигнала.

Замените генератор функций на генератор LabVIEW.

Придумайте ВП для автоматической перестройки частоты входного сигнала и определения нижней частоты среза.

Занятие 6.

Автоколебательная схема на основе интегрального таймера КР1006ВИ1.



Введение

Интегральная схема КР1006ВИ1 уникальна благодаря ее простоте, дешевизне и точности работы. Она часто используется в качестве несинхронизированного мультивибратора, генератора прямоугольного напряжения или просто источника сигнала. Также она находит применение в импульсном генераторе и может служить для решения многих специальных задач. Для работы этой интегральной схемы подойдет любой источник питания с напряжением от 5 до 18 вольт, поэтому ее можно использовать во многих аналоговых схемах. Если запитать схему напряжением 5 вольт, то она становится непосредственно совместимой с ТТЛ или КМОП цифровыми устройствами. Интегральный таймер на основе КР1006ВИ1 может использоваться во многих устройствах. Среди них – моностабильный мультивибратор, несинхронизированный мультивибратор, генератор линейного пилообразного напряжения, импульсный детектор, модулятор длительности импульса и т.д.

Тактируемые цифровые логические устройства синхронизируются с помощью внутренних часов, которые могут быть различного типа. В часах компьютеров и устройств реального времени в качестве внутренних стандартов частоты используются генераторы, стабилизируемые кварцевыми кристаллами. В более медленно работающих устройствах, таких как цифровые авометры и устройства бытового назначения, часто используются генераторы, чье тактирование определяется процессами зарядки и разрядки простейшей RC цепочки. На данном занятии мы увидим такое устройство – интегральный таймер КР1006ВИ1 в качестве несинхронизированного генератора.

Интегральный таймер КР1006ВИ1

В автоколебательной конфигурации схемы КР1006ВИ1, показанной ниже, используются два резистора и конденсатор для задания частоты генерации. Напряжение через внешний конденсатор подается на триггерный и пороговый входы (контакты 2 и 6 соответственно). В зависимости от амплитуды этого напряжения внутренний триггер с отдельными входами может быть либо в нулевом, либо в единичном состояниях. Выходной сигнал триггера переводит схему в цикл зарядки или разрядки. В цикле зарядки напряжение конденсатора возрастает до $2/3 V_{cc}$, в цикле разрядки напряжение падает до $1/3 V_{cc}$. При верхнем уровне напряжения с порогового входа на внутренний триггер приходит сигнал установки в нуль, а при нижнем уровне с триггерного входа приходит сигнал установки триггера в единицу. Выходное напряжение схемы (контакт 3) является буферизированной копией выходного напряжения триггера и, следовательно, цифровым сигналом. Результирующий импульсный сигнал определяет выходное напряжение генератора на базе интегральной схемы КР1006ВИ1.

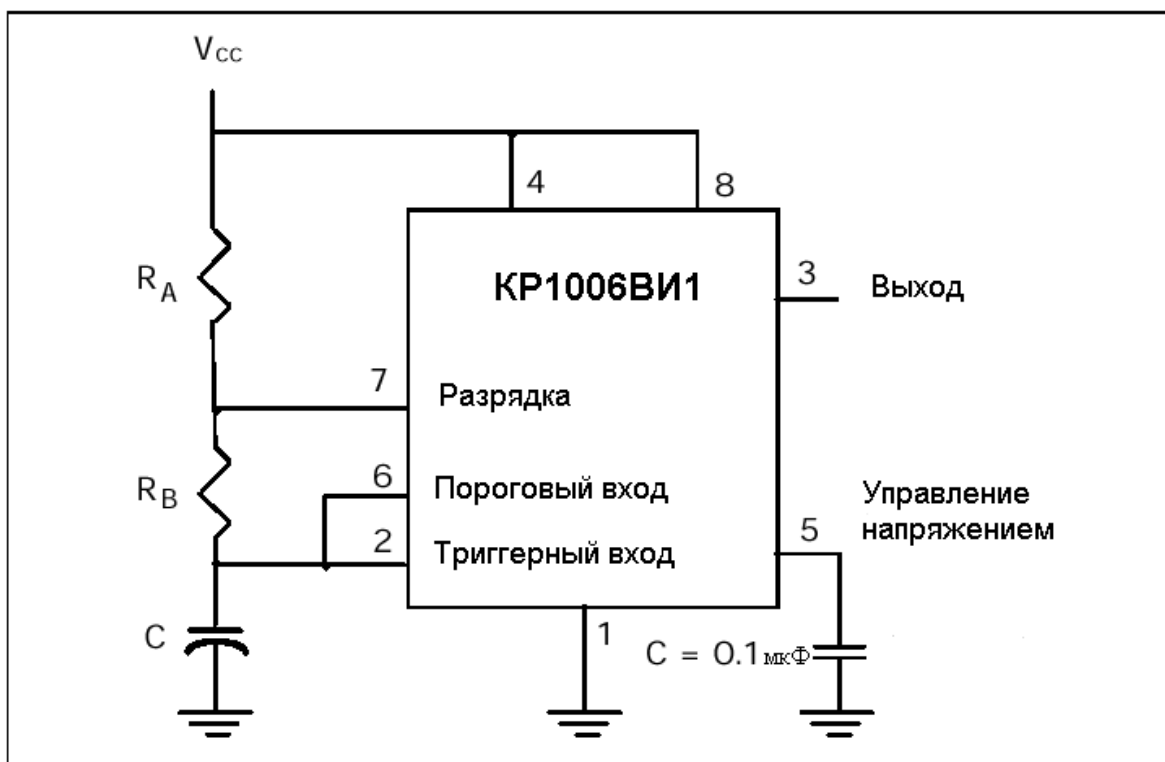


Рисунок 6-1. Наиболее распространенная схема мультивибратора на базе КР1006ВИ1.

Частота генерации зависит только от параметров RC цепочки (R_A, R_B, C) и не зависит от напряжения питания V_{cc} . В процессе зарядки внешний конденсатор C заряжается через резисторы R_A и R_B . Время зарядки t_1 определяется выражением:

$$t_1 = 0.693 (R_A + R_B) C. \quad (6-1)$$

Эта часть цикла определяет высокий уровень выходного сигнала (контакт 3).

В процессе разрядки внешний конденсатор C разряжается через резистор R_B и контакт 7, который в данном случае заземлен внутри схемы. Время разрядки определяется выражением:

$$t_2 = 0.695 R_B C \quad (6-2)$$

и эта часть цикла определяет низкий уровень напряжения на выходе. Полное время одного колебания (период T) равно сумме этих двух времен:

$$T = 0.695 (R_A + 2R_B) C. \quad (6-3)$$

Частота F равна обратному периоду или

$$F = 1.44 / (R_A + 2R_B) C. \quad (6-4)$$

При надлежащем выборе внешних компонентов, определяющих такт, период колебаний может меняться от микросекунд до часов.

Коэффициент заполнения ($KЗ$) – это отношение времени сигнала с низким уровнем к периоду сигнала.

$$KЗ = R_B / (R_A + 2R_B). \quad (6-5)$$

Коэффициент заполнения всегда меньше 50% или, другими словами, длительность низкого уровня сигнала всегда меньше длительности высокого уровня сигнала. Таким образом, выходной сигнал автоколебательной схемы на основе КР1006ВИ1 асимметричен. При увеличении R_B по сравнению с R_A , вид сигнала становится более симметричным, и на выходе схемы получим приближенно прямоугольное напряжение.

Пример 6.1: Схема мультивибратора на основе КР1006ВИ1

Запустите программу 555Astable1.vi из шестого раздела библиотеки. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы активизировать автоколебательную схему. На выходе (контакт 3) имеем цифровой сигнал, то есть сигнал, содержащий высокий и низкий уровни.

Исследуйте форму сигнала при различных значениях R_A , R_B или C .

Посмотрите выходное напряжение и коэффициент заполнения в следующих случаях:

- $R_A > R_B$
- $R_A < R_B$
- $R_A = R_B$

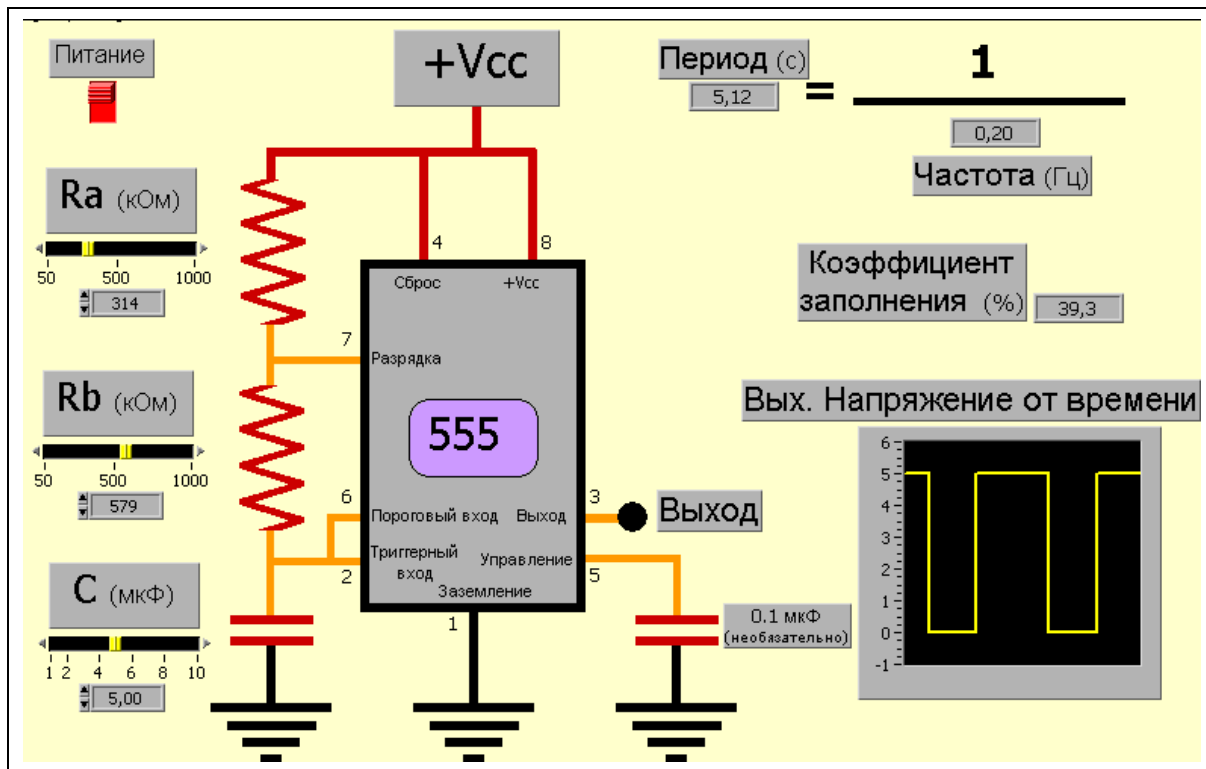


Рисунок 6-2. Моделирование схемы мультивибратора

Частоту колебаний можно варьировать по-разному. Можно изменять величину емкости конденсатора, значения которой отличаются друг от друга на порядок (в 10 раз), или менять сопротивление для более тонкой подстройки частоты. На практике, R_A и R_B имеют сопротивление от 1 кОм до 10 МОм, а конденсатор имеет емкость от 0.001 до 100 мкФ. Различные комбинации этих параметров позволяют схеме на основе КР1006ВИ1 генерировать сигналы в большом диапазоне частот.

Как работает схема

Работа таймера КР1006ВИ1 основана на последовательной зарядке и разрядке внешнего конденсатора. Два внутренних ОУ, которые работают как компараторы, устанавливают верхний и нижний пределы напряжения в $\frac{1}{3} V_{CC}$ и $\frac{2}{3} V_{CC}$. Напряжение на конденсаторе в любое время можно найти из выражения:

$$V(t) = V(0) \exp(-t/RC), \quad (6-6)$$

где $V(0)$ – начальное напряжение, а RC – время зарядки/разрядки.

Пример 6.2: Временная диаграмма работы мультивибратора на основе КР1006ВИ1

Запустите программу 555Astable2.vi из шестого раздела библиотеки. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы активизировать автоколебательную схему. По сравнению с предыдущим примером на графическом индикаторе фронтальной панели были добавлены графики выходного напряжения (контакт 3) и напряжение на конденсаторе (контакты 2 и 6).

В момент времени, когда уровень выходного напряжения большой (контакт 3), источник питания (на нем установлено напряжение +5 вольт) заряжает конденсатор через резисторы R_A и R_B , и напряжение на конденсаторе растет экспоненциально. Когда напряжение на нем достигает относительной величины $2/3 V_{cc}$ (3.33 вольта), пороговый компаратор (на контакте 6) переводит внутренний триггер в ноль, что обуславливает низкое выходное напряжение (контакт 3) и начало цикла разрядки. Напряжение в верхнем пределе равно

$$3.33 = 1.67 \exp(-t_1 / [R_A + R_B]C) \quad (6-7)$$

Решая это уравнение относительно t_1 , найдем время зарядки конденсатора. На временной диаграмме процессу зарядки конденсатора (зеленая линия – напряжение на нем) отвечает линейно возрастающая прямая (красная линия – выходное напряжение на контакте 3), когда выходное напряжение схемы находится на большом уровне. Оба предельных значения напряжения компараторов $1/3 V_{cc}$ и $2/3 V_{cc}$ изображены на графике в виде горизонтальных линий белого цвета.

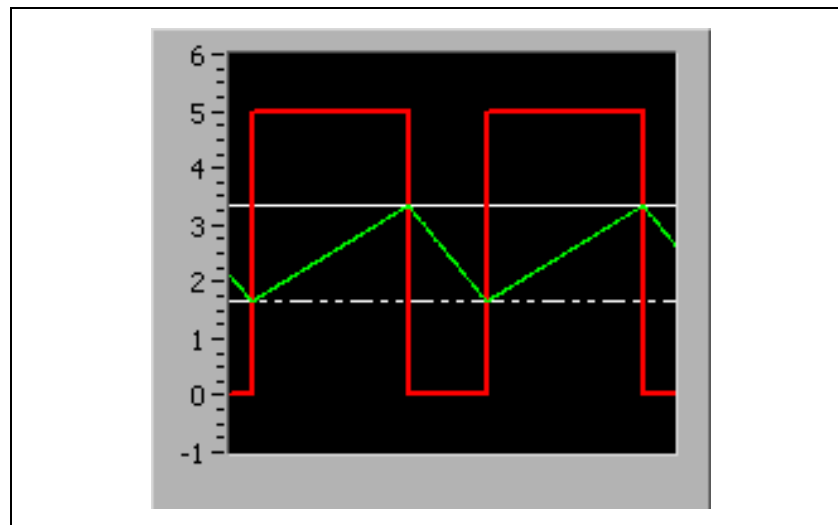


Рисунок 6-3. Графическое представление циклов зарядки и разрядки в схеме мультивибратора.

Когда напряжение на конденсаторе достигает верхнего относительного предела, источник питания можно мысленно убрать из цепи конденсатора, и контакт 7 становится заземленным внутри схемы. Конденсатор может разряжаться только через резистор R_B . Нижнее предельное напряжение разрядки конденсатора определяется формулой:

$$1.67 = 3.33 \exp(-t_2 / R_B C), \quad (6-8)$$

где t_2 – время разрядки. В процессе разрядки напряжение на конденсаторе падает линейно до величины нижнего предельного напряжения ($1/3 V_{cc}$). В этой точке компаратор (контакт 2) устанавливает внутренний триггер в верхнее состояние, и цикл повторяется.

Импульсная работа светодиода

При помощи автоколебательной схемы на основе КР1006ВИ1, управляющей светодиодом, можно сгенерировать мигающий сигнал тревоги. Выход схемы (контакт 3) может являться источником тока в несколько миллиампер или кратковременно до 200 миллиампер. Этого более чем достаточно для генерации света любым светодиодом.

Пример 6.3: Импульсная работа светодиода в схеме с таймером КР1006ВИ1

Запустите программу 555Flasher.vi из шестого раздела библиотеки. В данной программе светодиод был присоединен к контакту 3, и к нему

приложено напряжение V_{cc} через последовательный резистор. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы наблюдать вспышки светодиода. Также к контакту 3 был добавлен логический щуп. Всякий раз, когда выходной сигнал большого уровня, щуп становится красного цвета, а когда выходной сигнал низкий, щуп черный. По сравнению с ним, светодиод находится в противоположных состояниях. Всякий раз, когда выходной сигнал большой, светодиод серого цвета (не излучает), а когда выходной сигнал низкий, светодиод желтый (излучает). Также в этой программе есть временная развертка выходного сигнала и счетчик частоты.

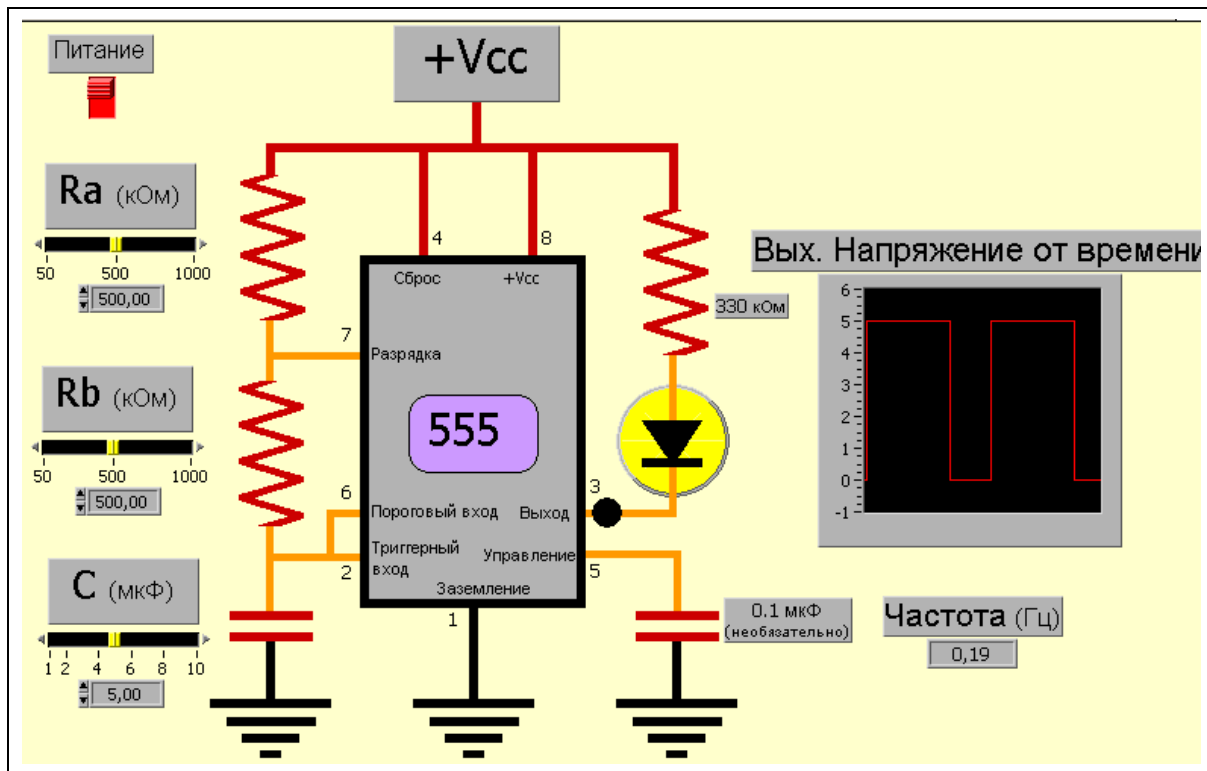


Рисунок 6-4. Моделирование импульсной работы светодиода

Когда выходное напряжение (контакт 3) большое, падения напряжения на резисторе и светодиоде не достаточно, чтобы зажечь светодиод. Однако, когда выходной сигнал низкого уровня, ток может течь через светодиод (к которому теперь приложено прямое смещение) к выходному контакту 3 и далее в землю (контакт 1). Резистор нужен для ограничения или установки тока, когда светодиод включен. Этот резистор определяет яркость света, излучаемого светодиодом. Так как у кремниевого светодиода напряжение прямого смещения равно 0.6 вольт, то при напряжении питания схемы 5 вольт, падение напряжения на резисторе будет $(5 - 0.6) = 4.4$ вольт. Ток через диод при прямом смещении равен 13.3 миллиампера (излучение красного цвета), поэтому сопротивление резистора должно быть порядка 330 Ом.

Температурный преобразователь

Преобразователь – это электронная схема, преобразующая физический параметр, такой как температура, в электрический сигнал, который может быть измерен стандартным образом. В данном виртуальном эксперименте для преобразования температуры в электрический сигнал используется термистор. Время, в течение которого уровень сигнала низкий, прямо пропорционально температуре.

Термистор – это устройство, чье сопротивление зависит от температуры. Термисторы изготавливаются из полупроводниковых материалов, из-за особых свойств проводимости последних.

Термисторы имеют три уникальных свойства:

- Большая чувствительность (изменение сопротивления при изменении температуры на 1 градус Цельсия).
- Сопротивление уменьшается с увеличением температуры (отрицательный температурный коэффициент).
- Сопротивление имеет нелинейную экспоненциальную кривую отклика (часто в диапазоне шести порядков).

Пример 6.4: Преобразователь температуры

Запустите программу Thermometer.vi из шестой библиотеки программы. Термистор, помеченный как R_b , помещен в емкость с водой. Газовая горелка, управляемая вентилем, позволяет нагревать воду до известной температуры. Для ее измерения в емкость был опущен термометр, который можно использовать для калибровки термистора. В автоколебательной схеме резистор R_b был заменен на термистор. Если включить программу, то на графическом индикаторе получим график зависимости выходного напряжения от времени. Перемещая курсоры, вы можете расположить их определенным образом для измерения временного интервала $t = t_1 - t_2$. Вы можете измерить времена, когда есть напряжение, когда его нет, или период. Активизируйте эксперимент, нажав на кнопку **Run**. Наблюдайте изменение формы сигнала при нагревании или охлаждении жидкости под действием горелки при различной скорости подачи газа.

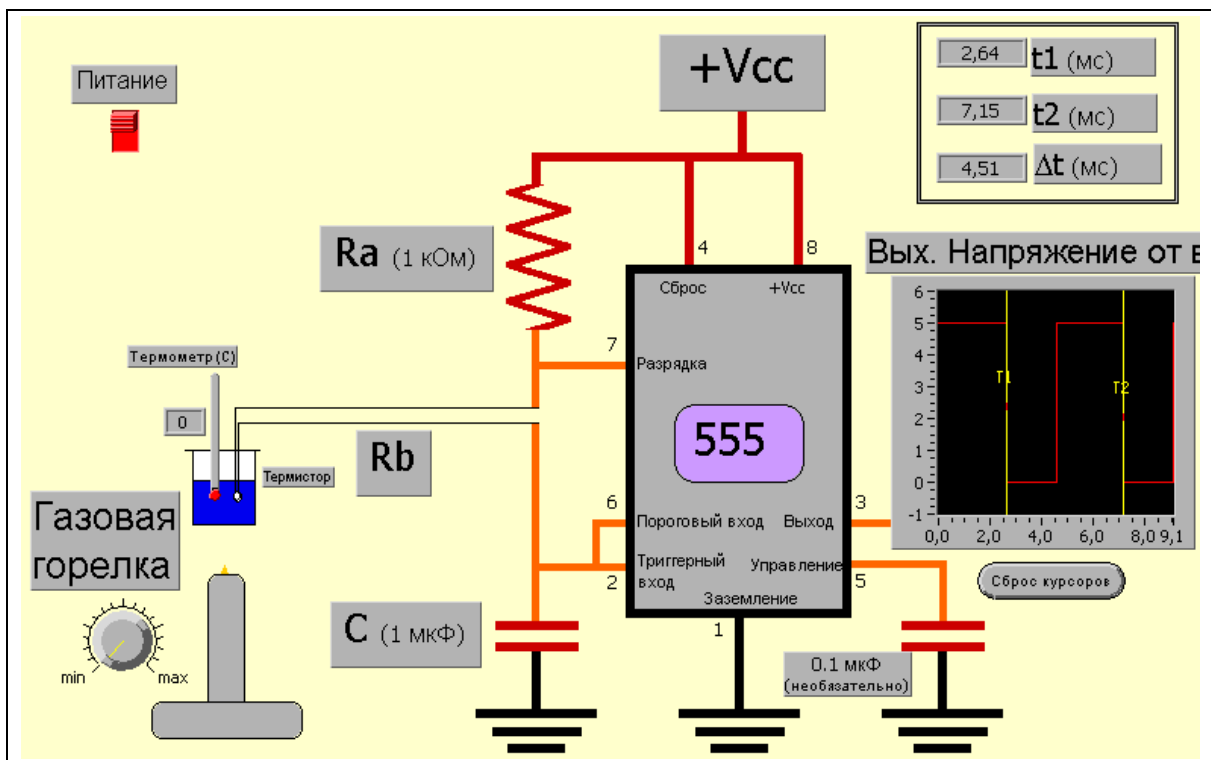


Рисунок 6-5. Модель для измерения кривой нагрева или охлаждения воды

Чтобы измерить время, когда сигнал нулевой, перемещайте курсор T1 до спадающего фронта, а курсор T2 до соседнего нарастающего фронта так, чтобы было $T2 > T1$. На индикаторе Δt вы получите искомое время.

Постройте график зависимости времени нулевого выходного сигнала схемы с термистором от температуры, измеренной термометром. Какой получился график – линейный или нелинейный? Используя уравнение 6-2 и значения других компонентов схемы (которые показаны на диаграмме выше), вычислите сопротивление термистора для каждого значения измеренной температуры.

Упражнение LabVIEW

Чтобы показать уникальные свойства термистора, постройте график зависимости сопротивления термистора от температуры для данного сенсора.

Лабораторная работа №6

Цель работы.

Цель настоящей лабораторной работы заключается в изучении автоколебательной схемы на основе КР1006ВИ1, а также зависимости

частоты, периода и коэффициента заполнения генерируемых колебаний от параметров внешней цепи – сопротивления резисторов и емкости конденсатора.

Порядок выполнения.

Соберите схему для импульсной работы светодиода, показанную на рис. 6-1. Присоедините резистор сопротивлением 330 Ом и красный светодиод к выходу схемы (контакт 3). Установите $R_A = 3.3$ кОм, $R_B = 33$ кОм и $C = 0.1$ мкФ. Выходной контакт микросхемы и компоненты схемы можно также увидеть на лицевой панели программы 555Flasher.vi, рис. 6-4. Фотография схемы приведена ниже:

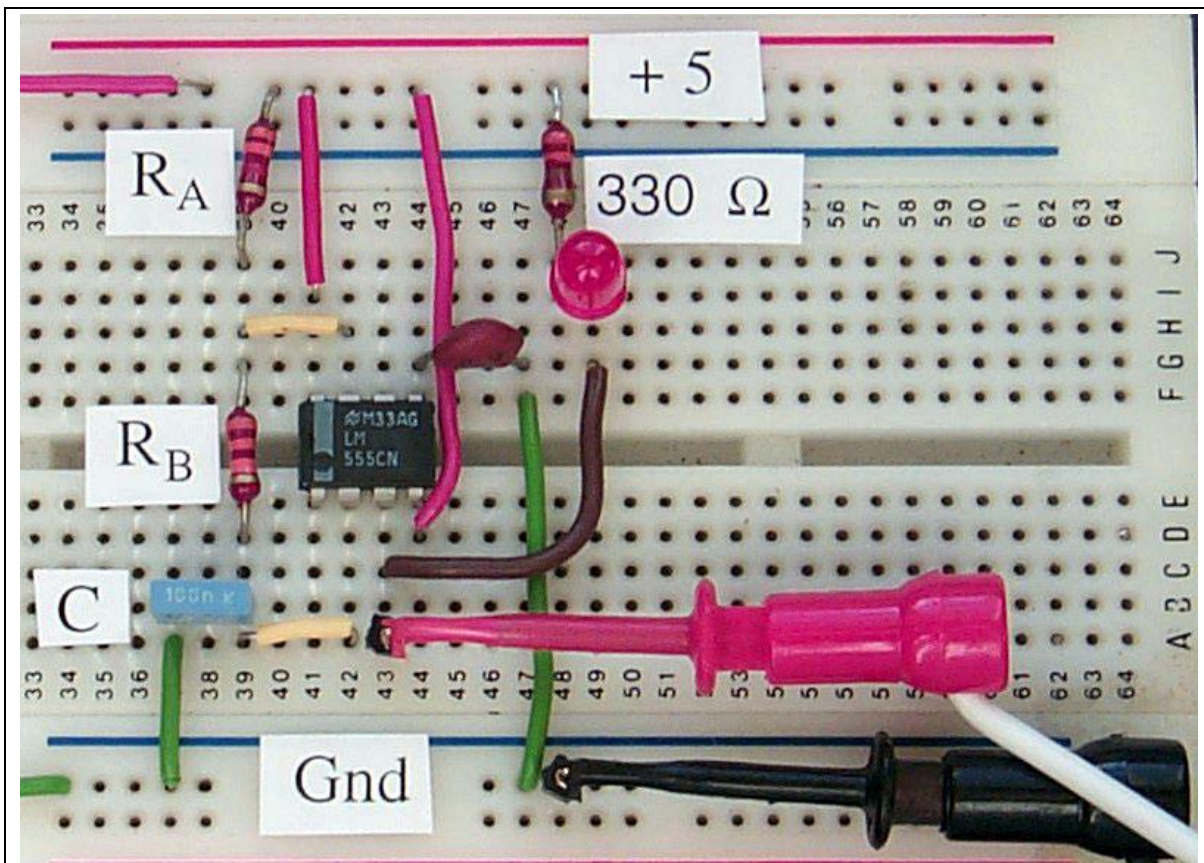


Рисунок 6-6. Расположение элементов схемы импульсной работы светодиода

Перед тем, как присоединить к схеме элементы R_A , R_B и C , измерьте их величины. Используйте уравнения (6-3) – (6-5), чтобы теоретически предсказать период, частоту и коэффициент заполнения генерируемого сигнала. Измерьте эти величины на выходе микросхемы (контакт 3). Насколько близки измеренные параметры к вычисленным теоретически?

Опишите поведение светодиода.

Замените конденсатор емкостью 0.1 мкФ на конденсатор с емкостью 1 мкФ, и в этом случае опишите поведение светодиода.

Компьютерная автоматизация 6: Цифровые сигналы

Цифровые сигналы имеют постоянную амплитуду, поэтому вся информация переносится во временном отклике, будь это частота, период или коэффициент заполнения. В данной лабораторной работе мы измерим частоту цифрового сигнала, сгенерированного интегральным таймером КР1006ВИ1, напряжение питания которого +5 вольт. В качестве исходной используйте схему лабораторной работы №6. Так же как в ней, выберите $R_A = 3.3 \text{ кОм}$, $R_B = 33 \text{ кОм}$ и $C = 0.1 \text{ мкФ}$. Уберите светодиод из схемы.

Запустите программу LabVIEW под названием FrequencyLow.vi из шестой главы библиотеки. В данной программе используются три внутренних счетчика на плате ввода-вывода для измерения ТТЛ цифровых сигналов в частотном диапазоне $f < 1 \text{ кГц}$. Убедитесь, что счетчики присоединены снаружи, как показано на диаграмме лицевой панели.



Замечание. Дополнительно вам потребуется сборка из шести инверторов – микросхема 7404.

Присоедините выход микросхемы (контакт 3) к входу второго счетчика на плате ввода-вывода. Нажмите кнопку **Run** чтобы начать измерение частоты. Проверьте, что измеренная частота совпадает с теоретически вычисленной при известных величинах R_A , R_B и C .

Задания по улучшению схемы

Замените резистор на реостат с диапазоном 10 – 100 кОм, исследуйте изменения частоты при изменении сопротивления реостата. Замените резистор на термистор или фоторезистор и исследуйте изменения частоты в зависимости от температуры или освещенности.

Задания по улучшению программы

Для частот, больших 1 кГц, используйте другие виртуальные приборы.

Проверьте библиотеку из папки LabVIEW/examples/daq/counter на наличие виртуальных приборов Measure Frequency >1kHz.vi.

Обратите внимание, что в различных многофункциональных платах ввода-вывода могут применяться различные таймеры. Убедитесь, что вы используете нужную библиотеку: 8253.llb или AMD9513.llb или DAQ-STC.llb.

Занятие 7.

Схема одновибратора на базе интегрального таймера КР1006ВИ1.



Интегральный таймер, рассмотренный на предыдущем занятии, был сконфигурирован как несинхронизированный мультивибратор (генератор). Есть и другая схема, позволяющая использовать таймер КР1006ВИ1 как одновибратор (генератор отдельного импульса). В такой схеме таймер ждет пускового импульса, который является инициатором изменения выходного напряжения схемы в течение фиксированного промежутка времени, определяемого внешними конденсатором и резистором. Затем схема снова возвращается в исходное состояние. Из-за того, что одновибратор может генерировать отдельный импульс определенной длительности, его иногда называют «стреляющим» элементом схемы. Очень часто в цифровой электронике встречаются задачи, решение которых легко найти при использовании одновибратора на базе КР1006ВИ1. Среди них – точная задержка событий для их последующего измерения, отображение данных со специфическим периодом, фиксирование тактовых импульсов для синхронизации событий с сигналом часов.

Одновибраторы – это схемы, которые генерируют импульс фиксированной длительности, после того как получают на вход определенный пусковой сигнал. Длительность импульса в основном определяется процессом зарядки конденсатора через внешний резистор. Пусковой сигнал устанавливает высокое выходное напряжение («Включение») и инициирует цикл зарядки конденсатора. Когда напряжение на конденсаторе достигает верхнего порогового уровня в две третьих от напряжения питания, выходное напряжение становится низким, а напряжение конденсатора быстро возвращается к начальному уровню – нулю. Теперь схема готова принять следующий пусковой импульс.

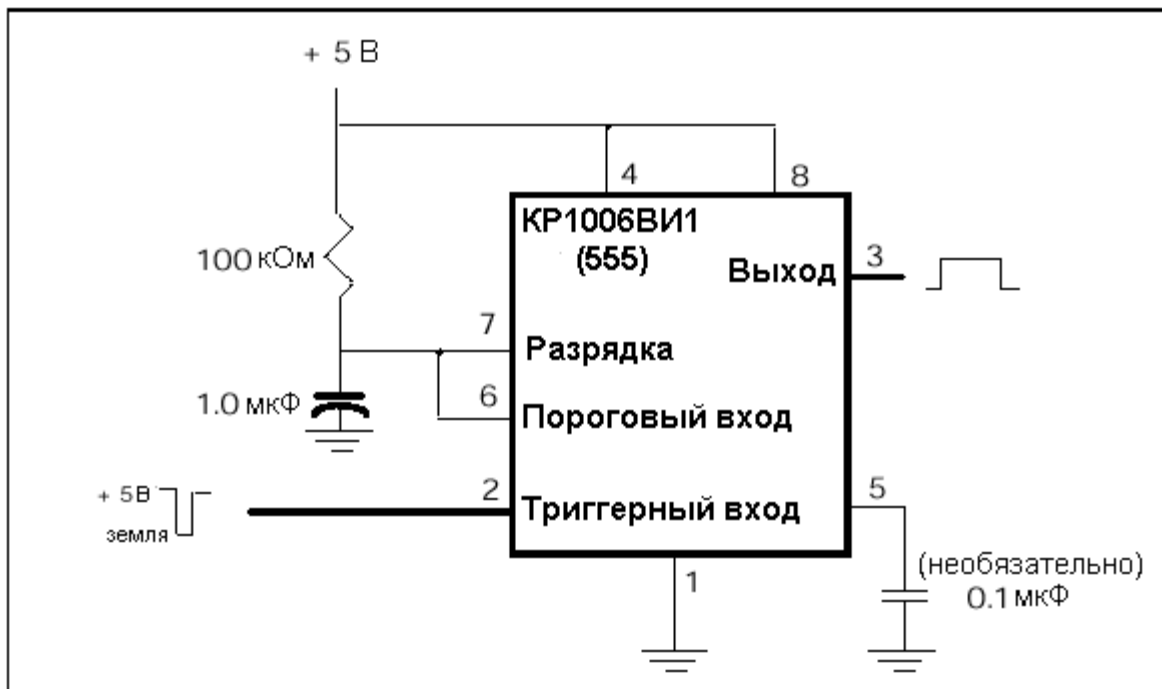


Рисунок 7-1. Схема одновибратора на базе интегрального таймера КР1006ВИ1.

Кроме интегрального таймера, для создания одновибратора требуются только один резистор и конденсатор. Напряжение на конденсаторе прикладывается к контактам 6 и 7. Отрицательный пусковой импульс на контакте 2 устанавливает высокое выходное напряжение (контакт 3) на время, определяемое цепью конденсатора и резистора. Когда напряжение конденсатора достигает порогового ($2/3 V_{cc}$), выходное напряжение падает до нижнего уровня. Длительность выходного высокого напряжения (время включения) определяется формулой:

$$T_{on} = 1.1 R C. \quad (7-1)$$

Моделирование LabVIEW: Работа схемы одновибратора на основе таймера КР1006ВИ1

Запустите программу Monostable1.vi из седьмой главы библиотеки. Активизируйте схему нажатием на кнопку **Run**. Нажмите на пусковой переключатель, чтобы запустить одновибратор. Исследуйте продолжительность высокого уровня сигнала (времени включения) при изменении величин сопротивления внешнего резистора и емкости конденсатора.

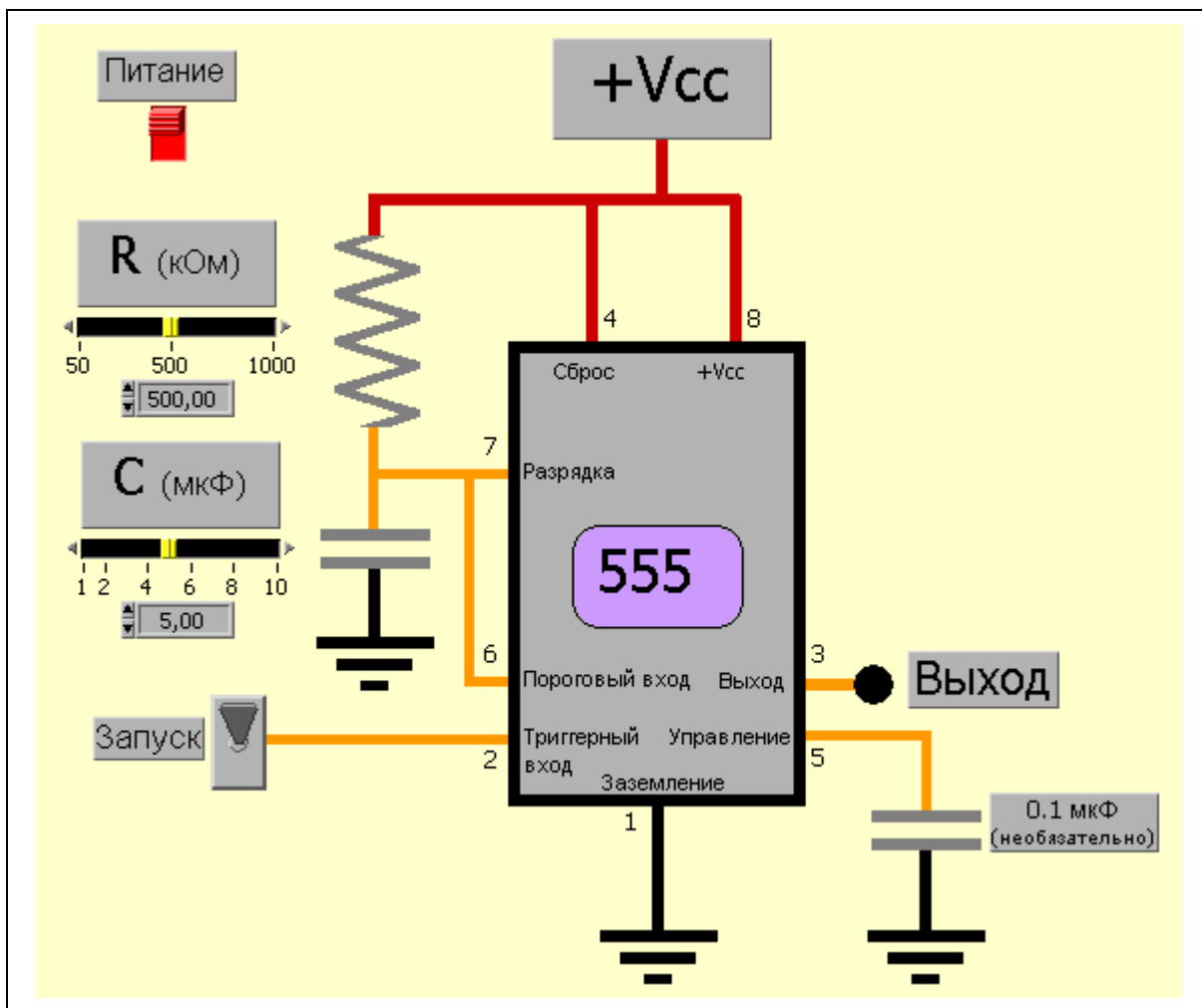


Рисунок 7-2. Моделирование схемы одновибратора на базе КР1006ВИ1

В общем случае, величина сопротивления может меняться в пределах от 1кОм до 3.3МОм, а емкость конденсатора от 500 пФ до 10мкФ. Следовательно, время включения сигнала может меняться от микросекунд до часов.

Триггерный вход обычно поддерживается на высоком уровне напряжения. При мгновенном понижении уровня напряжения на этом входе происходит генерация сигнала триггером. Важно помнить, что после того, как напряжение на триггерном входе упало, необходимо снова поднять его до верхнего уровня. Импульс запуска для таймера КР1006ВИ1 должен быть отрицательным, и его длительность должна быть меньше длительности T_{on} . Для хорошей работы схемы необходимо обеспечить длительность импульса запуска порядка $\frac{1}{4} T_{on}$, но и при более коротком импульсе схема работает нормально.

График зависимости выходного сигнала от времени, показанный на рисунке 7-3, более наглядно отображает работу одновибратора. По приходе импульса запуска, выходное напряжение (показано красной

линией) подпрыгивает до верхнего (положительного) состояния. При этом внутренний транзисторный переключатель открывается, позволяя конденсатору заряжаться. Источник питания заряжает конденсатор через внешний резистор. Напряжение на конденсаторе (зеленая линия) возрастает «линейно» от 0 до $2/3 V_{cc}$ (желтая линия). В этой точке пороговый компаратор обращает состояние, и внутренний транзисторный переключатель закрывается, заставляя конденсатор разряжаться. При этом выходное напряжение немедленно возвращается до величины ноль вольт.

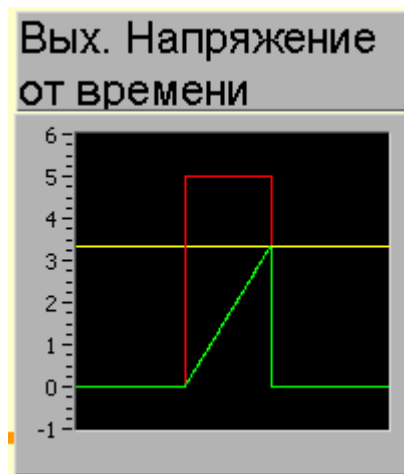


Рисунок 7-3. Графики зависимости напряжений от времени на графическом индикаторе программы LabView

В процессе моделирования было выбрано напряжение питания 5 вольт, так что выход схемы совместим со стандартными ТТЛ цифровыми микросхемами. Однако схема может работать при напряжении питания от 5 до 18 вольт.

Моделирование LabVIEW: Управляемый светодиодный сигнал тревоги

Запустите программу Alarm.vi из седьмой главы библиотеки. На выход схемы одновибратора был присоединен светодиод. Наблюдайте включение и выключение светодиода при нажатии на переключатель запуска. Проследите изменение выходного напряжения и измерьте продолжительность высокого уровня сигнала. Активируйте схему нажатием на кнопку **Run**, после чего нажмите на пусковой переключатель для генерации единичного импульса.

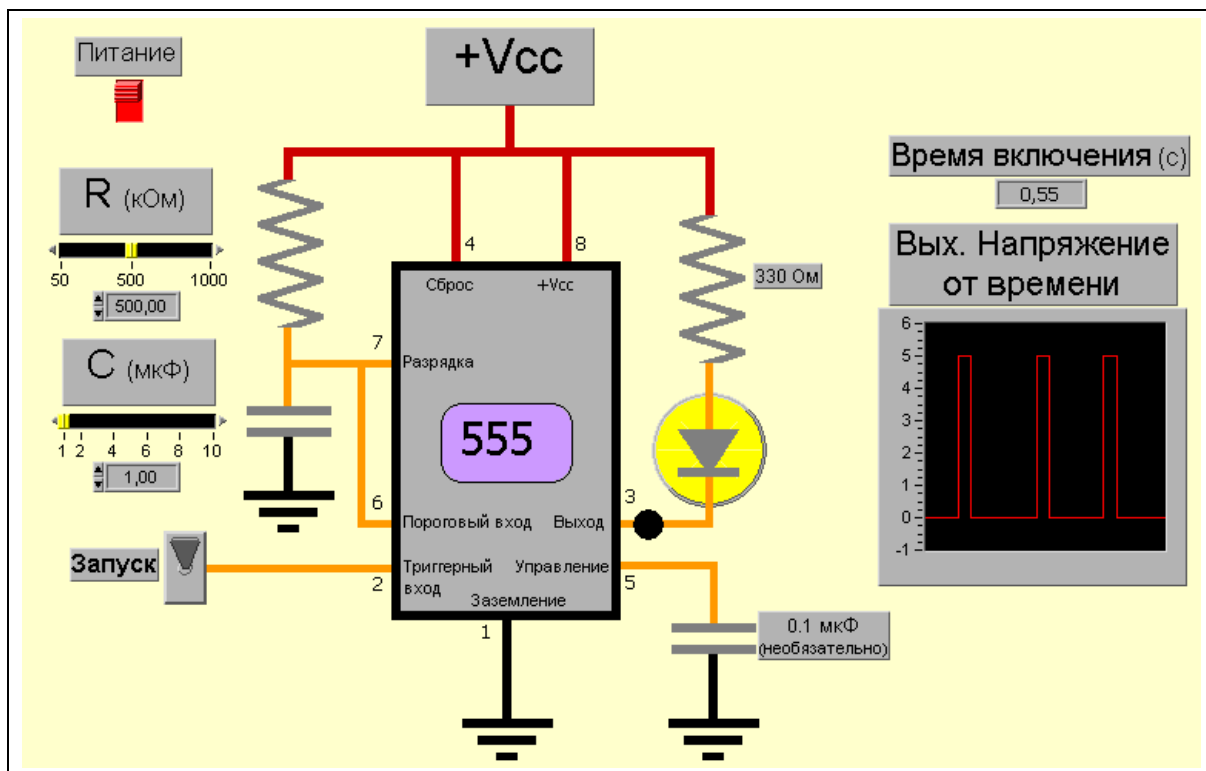


Рисунок 7-4. Моделирование одновибратора со светодиодным индикатором на выходе

Светодиод присоединен к источнику питания через резистор с сопротивлением 330 Ом. Его величина была подобрана из соображения ограничения тока, текущего через светодиод. В нормальном состоянии выходное напряжение (контакт 3) небольшое, и ток может свободно течь через диод, при этом диод «горит». Когда выходное напряжение большое, диод гаснет. Логический щуп на контакте 3 демонстрирует эту инверсию напряжения питания светодиода.

Датчик на базе фоторезистора

Сопротивление некоторых полупроводников сильно зависит от силы света, падающего на материал. Для таких полупроводников энергетическая щель настолько узка, что фотон может перебросить свободные носители через щель. В результате ток, текущий через такой датчик, может сильно видоизмениться. При большом изменении освещенности сопротивление типичного фоторезистора может меняться на шесть порядков (1:1,000,000). Сопротивление в отсутствии света, или так называемое темновое сопротивление, часто порядка 1 МОм. При увеличении интенсивности света сопротивление падает экспоненциально. При ярком свете сопротивление мало – несколько кОм или меньше. График зависимости сопротивления устройства от

интенсивности света имеет вид степенной функции. Если построить график зависимости сопротивления фоторезистора от логарифма интенсивности света, то получим линейную характеристику. В логарифмическом масштабе интенсивность света измеряется в люксах. Ноль люкс соответствует отсутствию света, а 10 люкс – яркому световому пучку от лампы-вспышки. Такой материал для фоторезисторов как селенит кадмия имеет относительную спектральную чувствительность близкую к чувствительности человеческого глаза. Этот материал может являться хорошей основой для фотометров, применяемых в фотографии.

Моделирование LabVIEW: Фотометр

Запустите программу Photometer.vi из седьмой главы библиотеки. В данном примере используется схема одновибратора на основе КР1006ВИ1 в качестве преобразователя света (интенсивность света преобразуется во временной интервал). Вспомним, что длительность высокого уровня сигнала прямо пропорциональна величинам внешнего резистора и конденсатора. В данной схеме резистор в цепи зарядки заменен на фоторезистор. В этом случае длительность высокого уровня сигнала измеряет интенсивность света. В данной демонстрации интенсивность может меняться от 0 до 10 люкс. Исследуйте соотношение между интенсивностью и временем T_{on} , перемещая вертикальный ползунок **Интенсивность света**. Чтобы произвести измерение нажмите на переключатель **Запуск**.

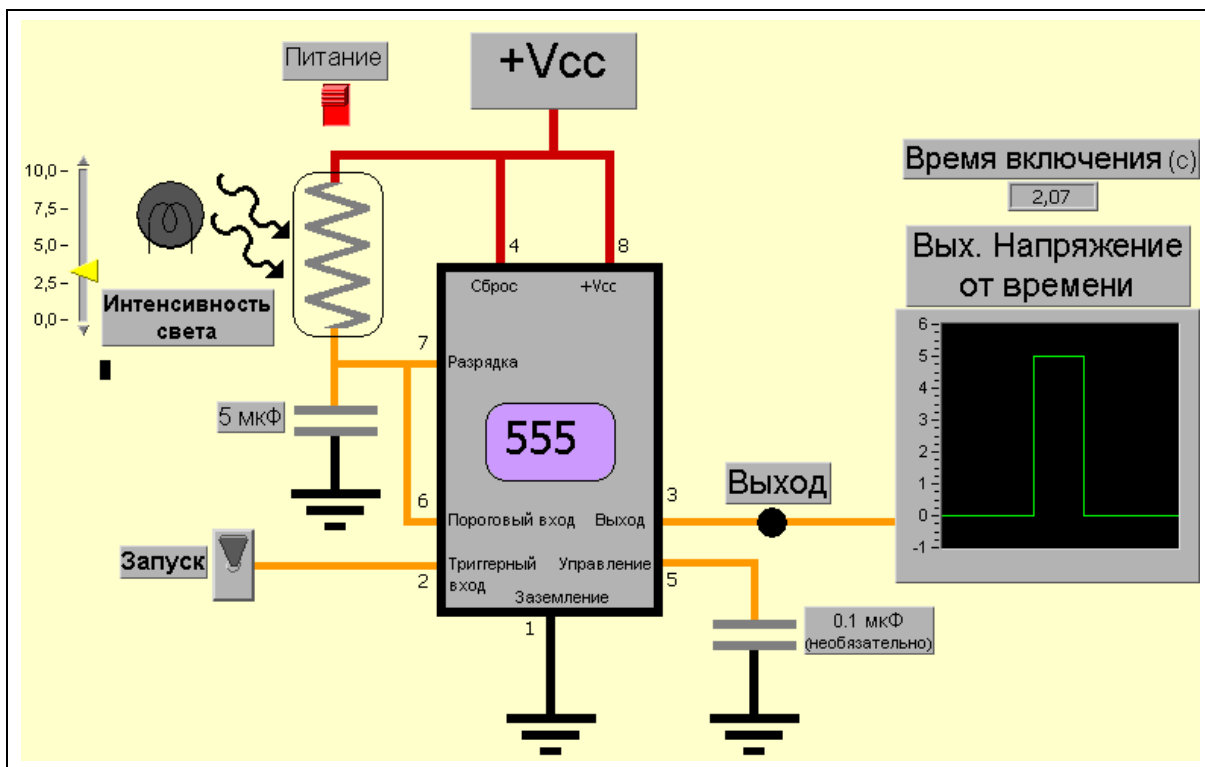


Рисунок 7-5. Модель: применение схемы одновибратора для измерения интенсивности света

Упражнение LabVIEW

Постройте график зависимости фотосопротивления, которое можно найти, зная время T_{on} , от интенсивности света в линейном масштабе.

Указание: переведите единицы Люкс в линейные единицы интенсивности.

Моделирование LabVIEW: Преобразователь углового смещения

На ранних этапах развития бытовой электроники для считывания углового положения пульта ручного управления (электронной игрой) использовался интегральный таймер КР1006ВИ1 в микрокомпьютерах Apple II. В тот момент, когда выполнялась программная инструкция INP(0) или INP(1), на вход 0 или 1 интегрального таймера поступал управляющий сигнал. Для считывания углового положения ручки управления использовались внутренний конденсатор и внешний потенциометр. Когда ручка поворачивалась, устанавливалось новое значение сопротивления. Подсчитывая число командных циклов от начала пускового импульса до перехода одновибратора в исходное состояние, вычислялась длительность высокого уровня выходного напряжения схемы. Весь временной диапазон разбивался от нуля до

255. При этом угловое разрешение было примерно один градус на отсчет. Такой алгоритм применялся во многих компьютерных играх. Используя по одной ручке на каждый вход, двумя ручками можно было играть в игры. Также одновременное использование двух ручек позволяло построить график на плоскости XY.

Моделирование LabVIEW: X-Y -джойстик

Запустите программу XYJoystick.vi из седьмой главы библиотеки. Две игровые ручки управления моделируются при помощи двух ползунковых переключателей. Движение ползунков моделирует изменение сопротивления. При постоянной емкости конденсаторов длительность высоко уровня сигнала прямо пропорциональна сопротивлению или повороту виртуальной ручки. При помощи двух одинаковых схем происходит управление положением курсора по осям X и Y. Обратите внимание, что при движении ползунков изменяется время T_{on} для соответствующего канала. Временной интервал масштабирован таким образом, чтобы получать длительность высокого уровня сигнала в виде чисел от 0 до 255.

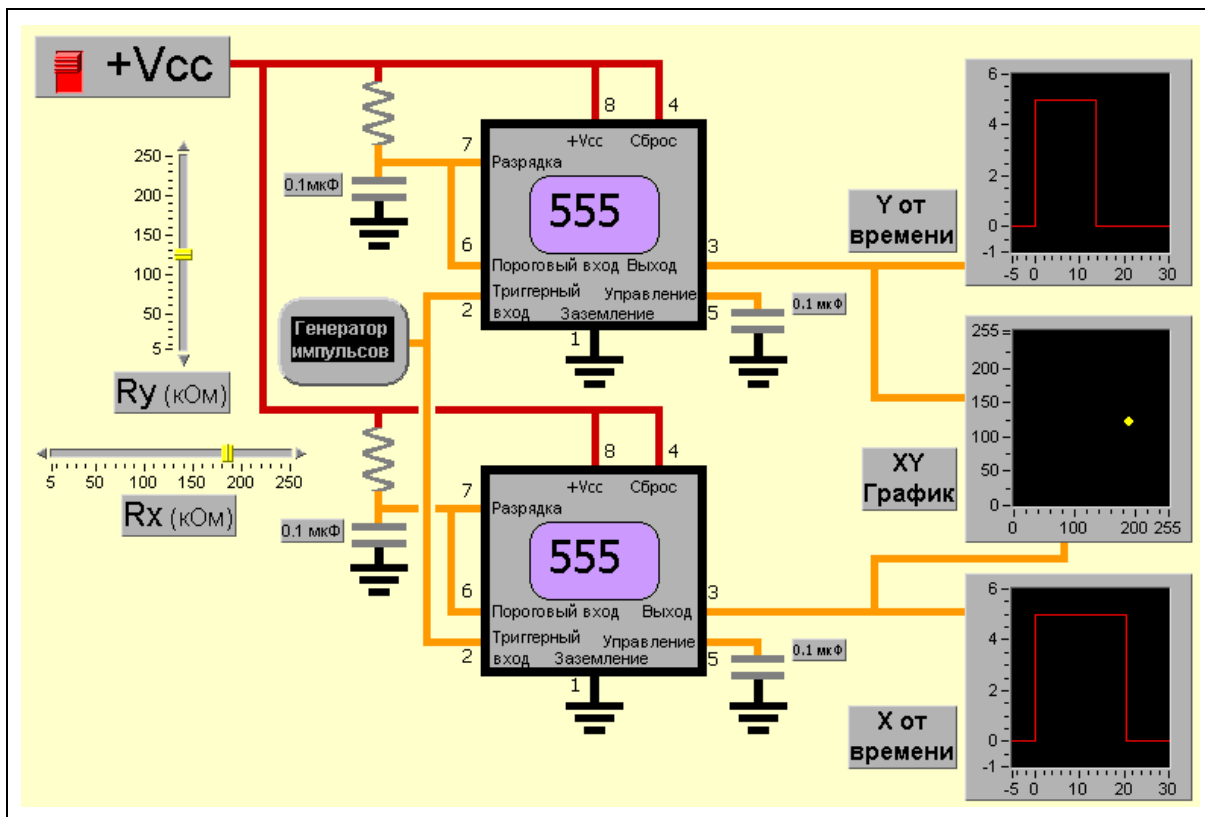


Рисунок 7-6. Модель: применение схемы одновибратора для реализации функции джойстика

Задание повышенной сложности: Измеритель емкости

При помощи LabVIEW придумайте виртуальный прибор, демонстрирующий измерение емкости конденсатора при помощи интегрального таймера КР1006ВИ1.

Указание: Емкость конденсатора неизвестна и может изменяться в десятки раз. Подберите набор резисторов с одинаковой мантисой, но разными множителями. Например: 1 кОм, 10 кОм, 100 кОм и т.д.

Лабораторная работа №7

Цель работы.

Целью настоящей работы является изучение применения интегрального таймера КР1006ВИ1 в схеме с управляемым сигналом тревоги.

Порядок выполнения.

Соберите схему одновибратора по аналогии с рис. 7-4 лицевой панели виртуального прибора Alarm.vi. Соедините резистор величиной 330 Ом и красный светодиод к выходу схемы (контакт 3). Выберите $R = 5 \text{ МОм}$ и $C = 1 \text{ мкФ}$. В качестве пускового устройства используйте кнопку. Каждый раз, когда она нажата, уровень выходного сигнала становится низким в течение определенного периода времени. Для инвертирования выхода схемы необходимо добавить буферную микросхему ТТЛ 7406. Ее выходное напряжение (контакт 4) становится высоким, когда кнопка нажата, и остается таким в течение времени, установленного одновибратором. Расположение компонентов схемы показано ниже.

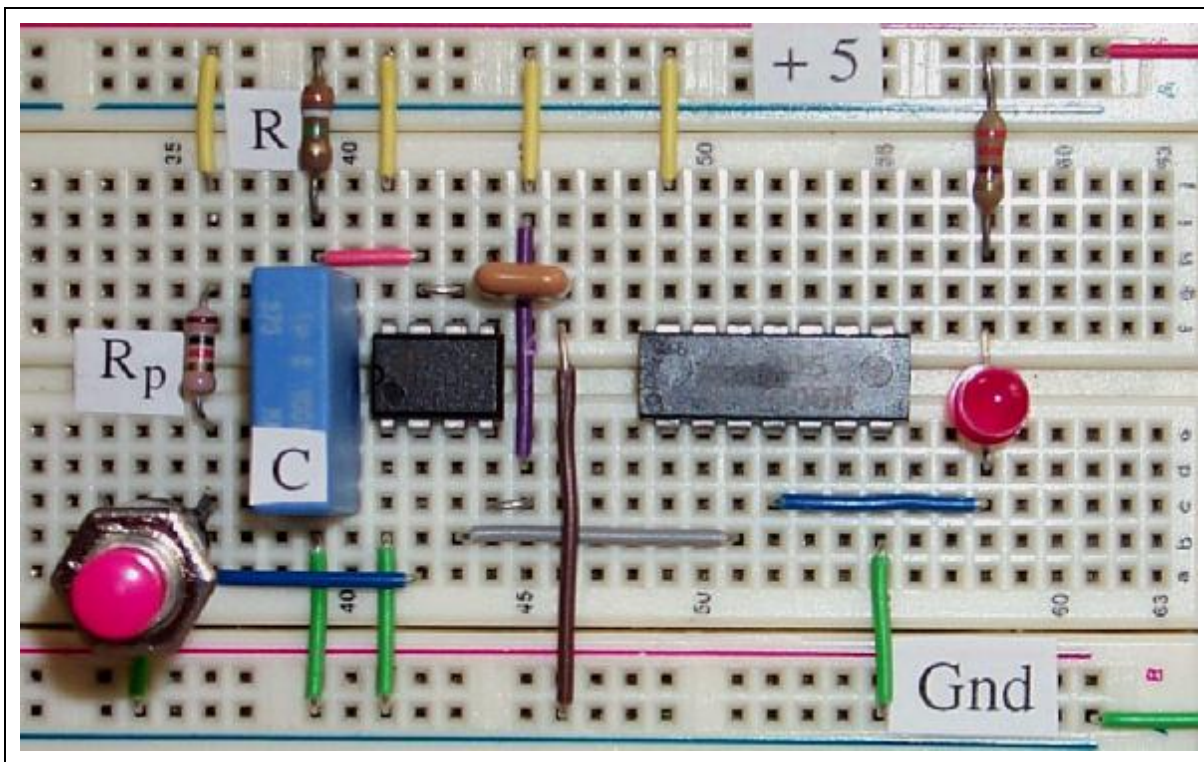


Рисунок 7-7. Расположение компонентов для схемы управляемого светодиодного сигнала тревоги



Замечание: 7406 – это ТТЛ буфер из шести инверторов, вход второго инвертора – контакт 3, выход второго инвертора – контакт 4, напряжение питания +5 вольт подается через контакт 14, земля – это контакт 7.

Компьютерная автоматизация 7: Измерение временного интервала

Схема одновибратора в лабораторной работе №7 генерировала импульс определенной длины всякий раз, когда на вход интегрального таймера КР1006ВИ1 поступал сигнал запуска. Вся информация о схеме содержится в длине импульса. В настоящем практикуме по компьютерной автоматизации для измерения длительности импульса используется счетчик временного интервала.

Запустите программу Pulse Width.vi из седьмой главы библиотеки. Обратите внимание, что некоторые соединения необходимо подключить к выходу многофункциональной платы ввода-вывода. Присоедините выход счетчика 0 к синхронизирующему входу счетчика 1. Присоедините также выход таймера КР1006ВИ1 (контакт 3) к входу разрешения счетчика 1.



Замечание. Если вы используете многофункциональную карту ввода-вывода с микросхемой счетчика/таймера AMD9513 или STC,

используйте виртуальный прибор Measure Long Pulse Width.vi из библиотеки AMD9513.lib или DAQ-STC.lib.

Виртуальный прибор Pulse Width.vi имеет ограничение на продолжительность тестирования. Если в течение этого времени импульс детектируется, то его длительность измеряется, после этого прибор завершает свою работу. Если импульс не был зафиксирован, виртуальный прибор завершает свою работу по истечении времени тестирования, при этом загорается логический светодиодный индикатор. Установите предельное время, по крайней мере, в 10 секунд.

Активизируйте программу нажатием на кнопку **Run**. После этого сгенерируйте импульс запуска быстрым нажатием на кнопку, так же как и в лабораторной работе №7. Виртуальный прибор покажет на индикаторе лицевой панели длительность импульса, сгенерированного одновибратором. Проследите, как точность измерения зависит от частоты развертки.

Задания по улучшению схемы

Замените резистор на реостат с пределами изменения сопротивления от 10 до 100 кОм, и исследуйте изменение длительности импульса при варьировании сопротивления.

Замените конденсатор с постоянной емкостью на переменный с пределами изменения емкости 0.05–1 мкФ, и исследуйте изменение длительности импульса при варьировании емкости.

Задания по улучшению программы

Придумайте виртуальный прибор, который бы непрерывно отслеживал работу схемы одновибратора на базе КР1006ВИ1 и показывал длительность для каждого импульса, инициированного сигналом запуска.

Занятие 8. Преобразователь напряжения в частоту.



Исторически, преобразователи напряжения в частоту (ПНЧ) использовались как входной каскад для цифровых записывающих устройств. Медленноменяющиеся аналоговые сигналы сначала преобразовывались в частоту, затем записывались на подходящий магнитный носитель. Такое сочетание обеспечивало высокую точность работы устройств регистрации аналоговых сигналов, на вход которых поступала частота цифрового сигнала. Позднее, ПНЧ нашли применение в устройстве предварительной обработки недорогих цифровых вольтметров, а также других дешевых аналогово-цифровых схемах. Интегральный таймер КР1006ВИ1, который изучался на седьмом занятии, является представителем ПНЧ.

Базой ПНЧ является интегрирующая схема на основе ОУ. Входное напряжение подается на интегратор, который линейно увеличивает его до заданного уровня. По достижении этого уровня, входное напряжение заменяется на опорное с противоположной полярностью, которое интегрируется до нижнего заданного уровня. В этой точке опорный сигнал заменяется на входной. Периодический процесс повторяется. Выходное напряжение представляет собой логический ноль во время интегрирования входного сигнала, и логическую единицу во время интегрирования опорного сигнала. В результате высокий уровень выходного сигнала имеет постоянную длительность, а длительность низкого уровня сигнала пропорциональна амплитуде входного сигнала. Частота сигнала на выходе пропорциональна уровню входного сигнала.

ПНЧ состоит из четырех блоков, построенных на основе ОУ: электронного ключа, интегратора, компаратора и одновибратора.

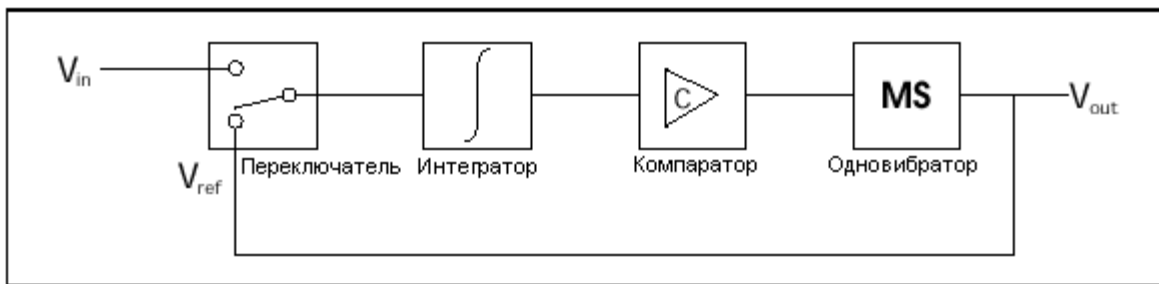


Рисунок 8-1. Составные части преобразователя напряжения в частоту

Входное напряжение V_{in} (обычно отрицательное) линейно увеличивается схемой интегратора. В следующем примере выходное напряжение возрастает от -10 вольт до 0 вольт. опорное напряжение компаратора – 0 вольт. При данном напряжении (верхний предел) компаратор переключается из состояния с высоким уровнем напряжения в состояние с низким, создавая при этом импульс отрицательной полярности. Этот импульс используется как пусковой на следующей стадии – в схеме одновибратора на базе КР1006ВИ1. Как только одновибратор запущен, его выходное напряжение (положительной полярности) замещает сигнал, входящий в схему. На время длительности импульса одновибратора, напряжение интегратора линейно спадает. Когда импульс заканчивается, напряжение одновибратора замещается на входное, и цикл повторяется.

На следующей диаграмме показана ситуация, когда входное напряжение равно 5 вольт. Верхняя величина опорного напряжения – 0 вольт, а нижняя задается импульсом одновибратора. Напряжение на конденсаторе показано жирной (красной) линией. Выходное напряжение одновибратора меняется от 0 до 5 вольт (желтая линия). Выход компаратора, показанный тонкой линией (зеленого цвета), меняется от $+15$ до -15 и снова возвращается до $+15$ вольт.

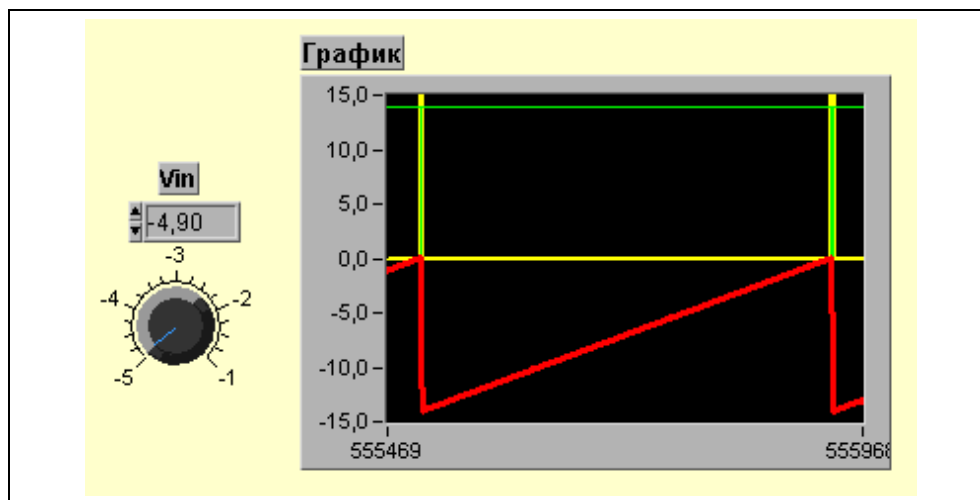


Рисунок 8-2. Временная диаграмма напряжений ПНЧ на графическом индикаторе программы LabView

Уменьшение уровня входного сигнала приводит к уменьшению скорости заряда (наклон жирной линии), увеличивая период и сокращая частоту.

Блок 1: Интегратор на основе ОУ

Если в традиционной инвертирующей схеме на основе ОУ поместить в контур ОС конденсатор, то в нем будет накапливаться полный ток. Таким образом, выходное напряжение становится суммой всех входящих зарядов.

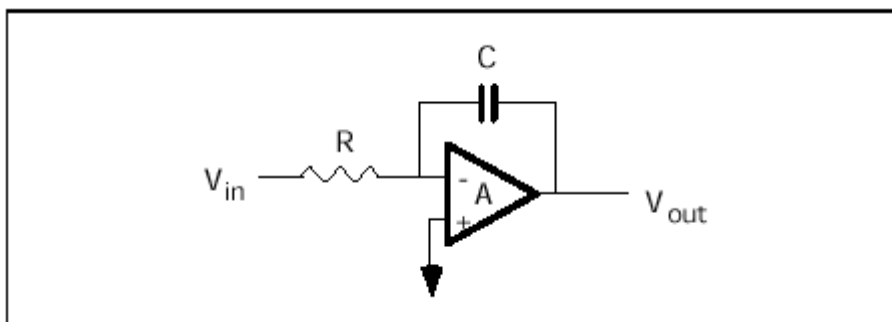


Рисунок 8-3. Принципиальная схема интегратора на базе ОУ

Вы помните со второго занятия, что выходное напряжение интегратора представляет из себя интеграл от входного сигнала, умноженный на постоянную заряда RC.

$$V_{out} = -1/RC \int V_{in} dt . \quad (8-1)$$

Если входное напряжение постоянно и отрицательно, то выходное напряжение нарастает линейно до величины верхнего положительного напряжения ограничения. Если вы смените полярность входного сигнала, то выходное напряжение ОУ будет спадать линейно, пока не достигнет отрицательного напряжения ограничения. Выходное линейно меняющееся напряжение есть просто

$$V_{out} = - V_{in} / RC t . \quad (8-2)$$

Для моделирования работы ПНЧ весь период времени делится на интервалы. Для вычисления выходного напряжения V'_{out} в конце каждого временного интервала используется разностная форма уравнения, приведенного выше:

$$V'_{out} = V_{out} - (V_{in}/RC) \Delta t , \quad (8-3)$$

где V_{out} – это напряжение в начале соответствующего временного интервала, а Δt – длительность интервала.

Пример 8.1: Работа схемы интегратора на основе ОУ

Запустите программу Integrator1.vi из восьмой главы библиотеки. Эта программа моделирует динамику работы ОУ, используя уравнение 8-3. Каждый раз, когда вы нажимаете на кнопку **Run**, программа вычисляет выходное напряжение и показывает его на графике (напряжение на конденсаторе в зависимости от времени). Начальное выходное напряжение установлено в -3 вольт. При $V_{in} = -5$ вольт, $R = 150$ кОм и $C = 0.1$ мкФ приращение напряжения на миллисекундном интервале будет 0.333 вольт. Нажмите несколько раз подряд кнопку **Run**, и вы увидите линейно возрастающее напряжение. В любое время, изменив V_{in} , R или C , вы измените скорость нарастания напряжения (наклон прямой линии). Если вы измените знак входного сигнала, выходное напряжение будет линейно убывать.

Нажмите кнопку **Run** 10 раз. После этого измените знак входного напряжения. Снова нажмите на кнопку **Run** 10 раз. Какого типа сигнал вы только что сгенерировали?

Лабораторная работа: Реальный интегратор на основе ОУ

Используйте ОУ К140УД6, чтобы построить схему интегратора, показанную ниже.

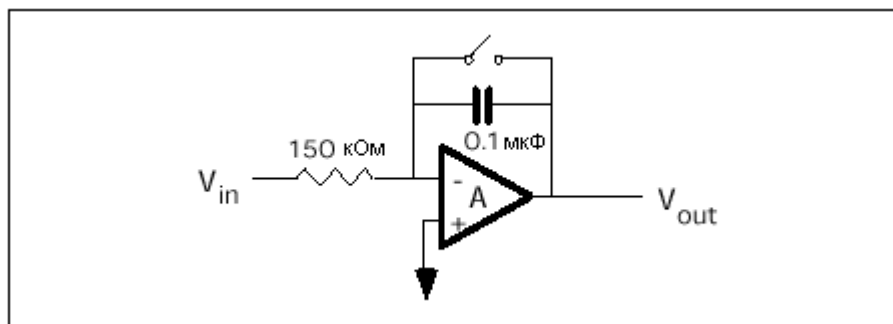


Рисунок 8-4. Принципиальная схема интегратора с ручным запуском

Подайте на вход прямоугольный сигнал с амплитудой 2 вольт и частотой 100 кГц. Наблюдайте одновременно входное и выходное напряжения при помощи двухканального осциллографа или многофункциональной платы ввода-вывода.

Посмотрите, что произойдет, когда амплитуда сигнала станет слишком большой.

Что произойдет, когда частота сигнала станет очень низкой при постоянной амплитуде?

Как вы думаете, что произойдет, если входной сигнал будет иметь треугольную форму? Попробуйте!

Блок 2: Компаратор

В схеме без входного резистора и резистора ОС операционный усилитель становится компаратором. Если сигнал в суммирующей точке (-) больше сигнала на неинвертирующем входе (+), тогда выходное напряжение мгновенно переходит на максимальный отрицательный уровень. Если сигнал в суммирующей точке (-) меньше сигнала на неинвертирующем входе (+), тогда выходное напряжение мгновенно переходит на максимальный положительный уровень. Скорость изменения напряжения от одного предела к другому определяется КУ ОУ с разомкнутой цепью ОС и называется скоростью нарастания выходного напряжения. Если подать опорное напряжение (V_{ref}) на один из входов, уровень срабатывания компаратора будет определяться V_{ref} , и отрицательное выходное напряжение будет сигнализировать о том, что входное напряжение больше опорного.

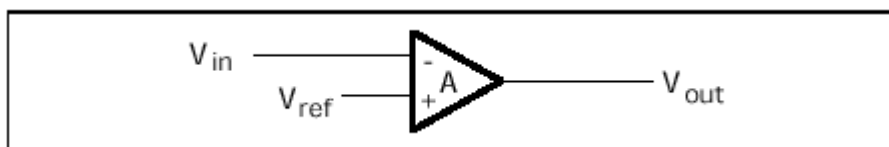


Рисунок 8-5. Принципиальная схема компаратора на базе ОУ

Пример 8.2: Компаратор на основе ОУ в действии

Запустите программу Integrator1.vi из восьмой главы библиотеки. Нажмите на кнопку **Run**. Обратите внимание, что на выходе компаратора могут быть только два значения напряжения – верхнее и нижнее напряжения ограничения. В схеме ПНЧ опорное напряжение будет 0 вольт. Измените в данной программе опорное напряжение до этой величины и снова запустите виртуальный прибор.

Пример 8.3: Последовательное соединение интегратора и компаратора

Запустите программу Integrator2.vi из восьмой главы библиотеки. Каждый раз, когда вы нажимаете на кнопку **Run**, программа вычисляет новое значение выходного напряжения. В начале выходное напряжение интегратора установлено в – 3 вольта. Как и раньше, при $V_{in} = -5$ вольт, $R = 150$ кОм и $C = 0.1$ мкФ приращение напряжения за временной интервал 1 миллисекунда равно 0.333 вольта. Наблюдайте, каково будет выходное напряжение компаратора, когда выходное напряжение интегратора достигнет величины опорного напряжения

компаратора в 0 вольт. Нажимайте на кнопку **Run** до тех пор, пока на выходе интегратора будет +3 вольта. Теперь поменяйте полярность входного сигнала. Прямая интегрирования спадает, проходя через значение опорного напряжения, до тех пор, пока выходное напряжение интегратора достигнет – 3 вольта. Повторите цикл ($V_{in} = -5$ В, 10 нажатий на кнопку **Run**, $V_{in} = +5$ В, 10 нажатий на кнопку **Run**) еще раз. Знак выходного напряжения компаратора сигнализирует, когда входное напряжение схемы становится положительным или отрицательным. Отметим, что компаратор изменит свое состояние (или переключится) всякий раз, когда напряжение на выходе интегратора проходит через 0. В таком режиме компаратор выполняет функцию детектора пересечения нулевого уровня. Обратите внимание на форму сигналов, полученных на выходе интегратора и компаратора.

В схеме ПНЧ величина опорного напряжения будет 0 вольт (верхний предел), а величина нижнего предельного уровня (начальное напряжение) будет установлена в некоторое отрицательное значение.

Блок 3: Одновибратор

Вспомним из занятия 7, что когда одновибратор запущен, время генерации сигнала высокого уровня определяется внешним резистором и конденсатором. Длительность положительного импульса равна $1.1 RC$. Полагая $R = 36$ кОм и $C = 0.1$ мкФ, получим длительность 3.96 мс. Чтобы запустить схему, для одновибратора необходим спадающий фронт, сопровождаемый возрастающим фронтом входного сигнала. Такое условие выполняется в реальном ПНЧ, где используется цепь резистор-диод, состоящая из резистора с сопротивлением 1.5 кОм и двух диодов 1N914. Диоды используются для того, чтобы удержать напряжение запуска в пределах, разрешенных для таймера КР1006ВИ1.

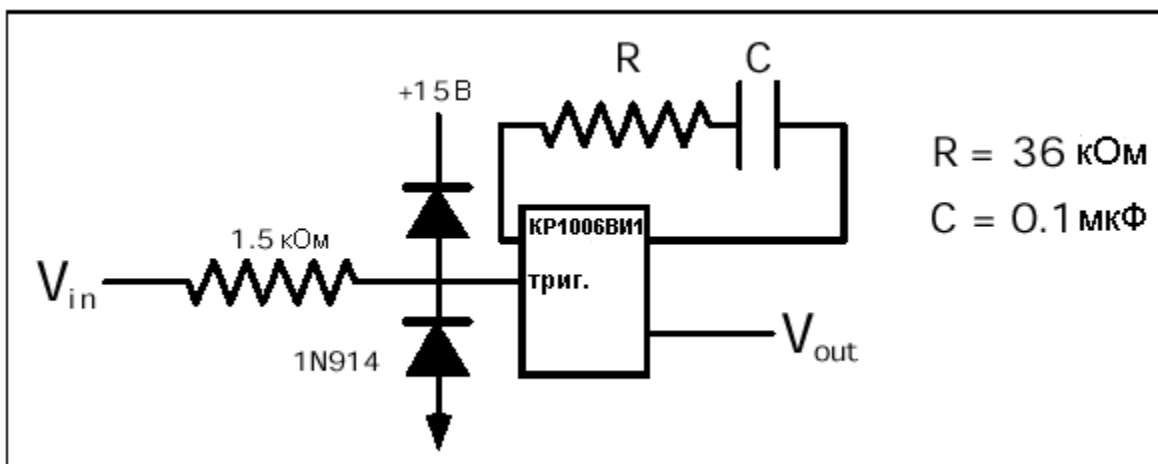


Рисунок 8-6. Принципиальная схема одновибратора на базе интегрального таймера КР1006ВИ1

Выходное напряжение при генерации одновибратора будет близким к положительному напряжению питания и будет использоваться в качестве прямого смещения для третьего кремниевого диода 1N914, который показан в следующем разделе. Высокое выходное напряжение позволяет току уйти в землю через выходной резистор с сопротивлением 0.5 кОм. Из закона Ома следует, что этот ток будет равен: $(15.0 \text{ В} - 0.6 \text{ В})/0.5 \text{ кОм} = 28.8 \text{ мА}$.

Пример 8.4: Работа одновибратора

Запустите программу Monostable.vi из восьмой главы библиотеки. Нажмите на кнопку **Run** для активизации схемы. После этого нажмите на кнопку запуска, чтобы одновибратор сгенерировал импульс.

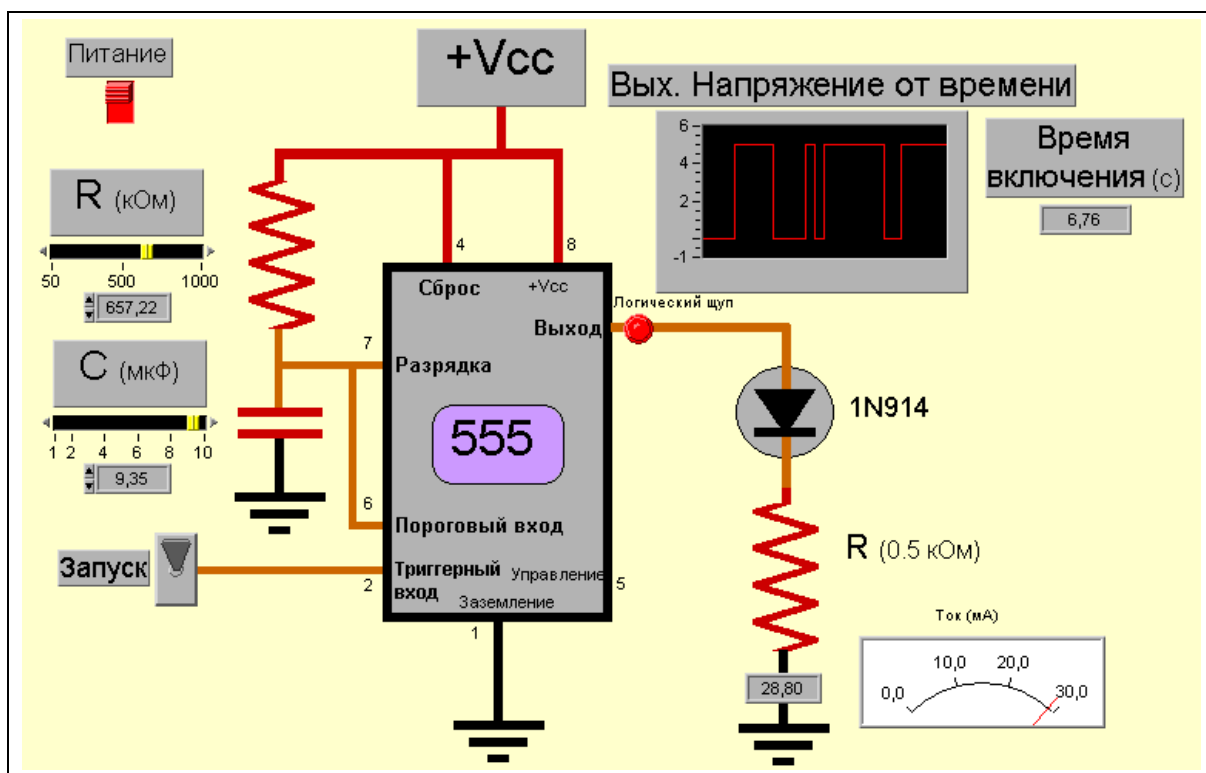


Рисунок 8-7. Модель: применение схемы одновибратора для управления током

Заметим, что ток течет через резистор только тогда, когда одновибратор запущен. Амплитуду тока можно изменять подбором величины сопротивления резистора.

Вопрос: Предположим, что ток, приведенный выше, используется в качестве входного в схему интегратора. Сколько времени потребуется, чтобы напряжение интегратора достигло величины –10 вольт, полагая, что выходное напряжение в начале было равно 0 вольт? Ответ содержится в выражении 8-3:

$$V'_{out} = V_{out} - (i_{in} / C) \Delta t \text{ или } -10 = 0 - (28.8 \text{ мА}/0.1 \text{ мкФ}) \Delta t, \quad (8-4)$$

$$\Delta t = 34.7 \text{ мкс}. \quad (8-5)$$

Часть 4: Реальный ПНЧ

В схеме реального ПНЧ используется одновибратор, чтобы сгенерировать ток возврата интегратора в исходное состояние. Когда к диоду прикладывается прямое смещение от одновибратора, возвращающий ток поступает на суммирующую точку интегратора. Так как ток на выходе одновибратора гораздо больше тока, входящего в схему, то суммирующая точка становится ключом, и напряжение на выходе интегратора линейно спадает в течение времени, определяемого выражением $1.1 RC$. Когда импульс одновибратора заканчивается, входной ток становится доминирующим, и выходное напряжение интегратора линейно растет до 0 вольт. Здесь одновибратор переходит в верхнее состояние, и цикл повторяется снова. Период сигнала на выходе одновибратора связан с уровнем входного сигнала. Когда длительность положительного импульса одновибратора мала, частота выходного сигнала прямо пропорциональна входному напряжению. То есть это действительно ПНЧ.

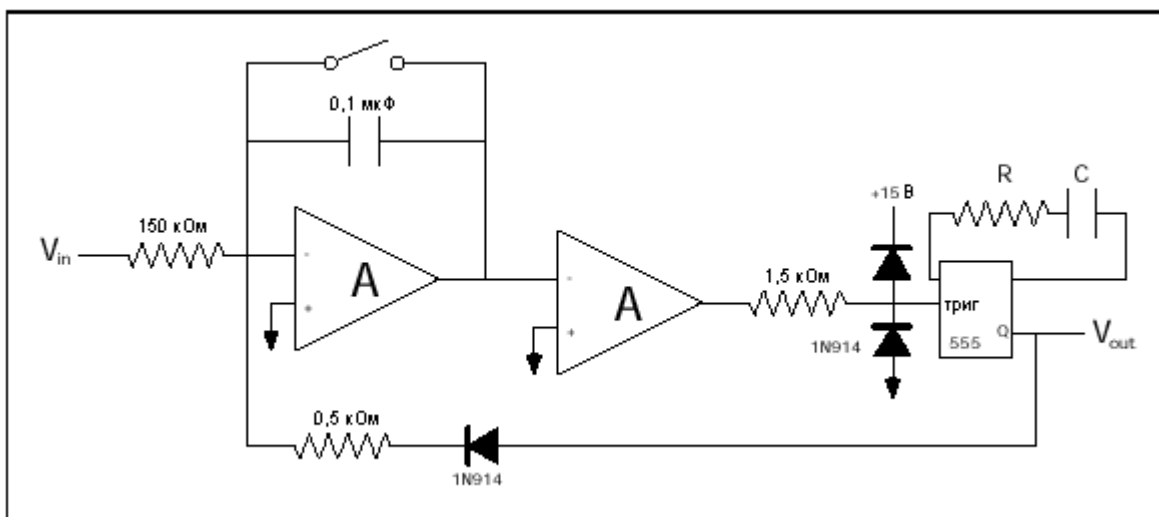


Рисунок 8-8. Принципиальная схема реального ПНЧ

Пример 8.5: Работа ПНЧ

Запустите программу VF.vi из восьмой главы библиотеки, VF.IIb. Нажмите на кнопку **Run** и исследуйте зависимость периода выходного напряжения от уровня входного сигнала. Когда работа будет остановлена, можно использовать инструмент увеличения графика, чтобы растянуть масштаб времени для более тщательного исследования такта сигнала на графике.

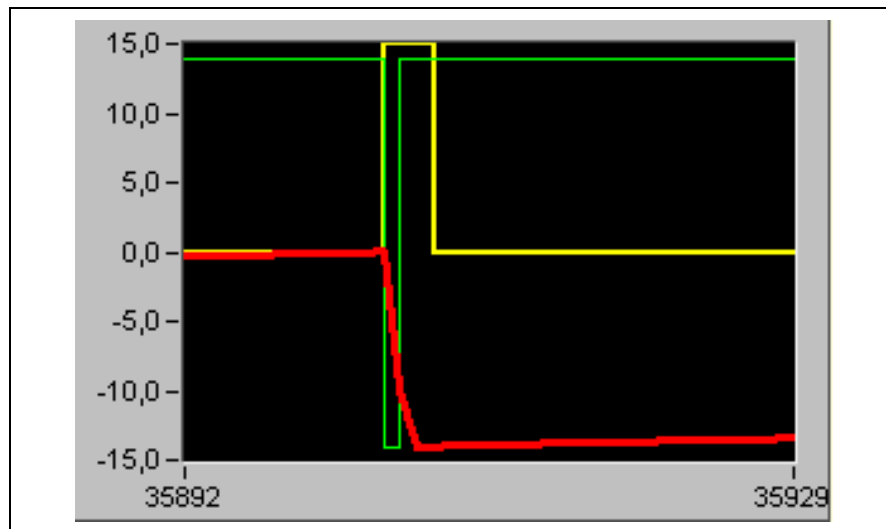


Рисунок 8-9. Временная диаграмма напряжений ПНЧ

Когда одновибратор находится в нижнем состоянии, входной сигнал, пройдя через интегратор (красная линия), линейно возрастает до тех пор, пока напряжение на выходе интегратора достигнет уровня срабатывания компаратора, равного 0 вольт. При этом компаратор (зеленая линия) меняет свое состояние, имея на выходе противоположное значение напряжения ограничения и генерируя при этом сигнал запуска для одновибратора. Одновибратор, в свою очередь, генерирует (желтая линия) ток для возврата интегратора в исходное состояние, гораздо больший входного тока и противоположный ему по знаку. Напряжение интегратора линейно спадает в область отрицательных значений. Как только оно достигает 0 вольт, компаратор снова меняет свое состояние, возвращаясь в начальное (+15 вольт). С окончанием положительного импульса одновибратора, выключающий ток прекращается, и напряжение интегратора снова начинает линейно расти, управляемое уровнем входного сигнала.

Упражнение LabVIEW

Постройте график зависимости частоты выходного сигнала от амплитуды входного напряжения.

Лабораторная работа №8

Цель работы.

Целью настоящего проекта является изучение работы схемы ПНЧ, построенной на базе основных аналоговых микросхем – ОУ и таймера КР1006ВИ1.

Порядок выполнения

Соберите преобразователь напряжения в частоту, используя принципиальную схему, отображенную на рис. 8-8. Для этого вам потребуются четыре резистора, два конденсатора, три кремниевых диода, два ОУ и интегральный таймер КР1006ВИ1. Назначение выходных контактов микросхем можно найти в лабораторной работе №1 на рис. 1-5 и в лабораторной работе №6 на рис. 6-1. Микросхемы ОУ и таймера запитаны от источников питания с напряжением +15 и –15 вольт. Для правильной работы ОУ требуется, чтобы интегратор находился в известном состоянии (отрицательное или нулевое напряжение на входе). Это легко можно сделать, быстро закорачивая конденсатор интегратора. После запуска схема будет работать до тех пор, пока не выключено напряжение питания. Расположение компонентов схемы показано ниже.

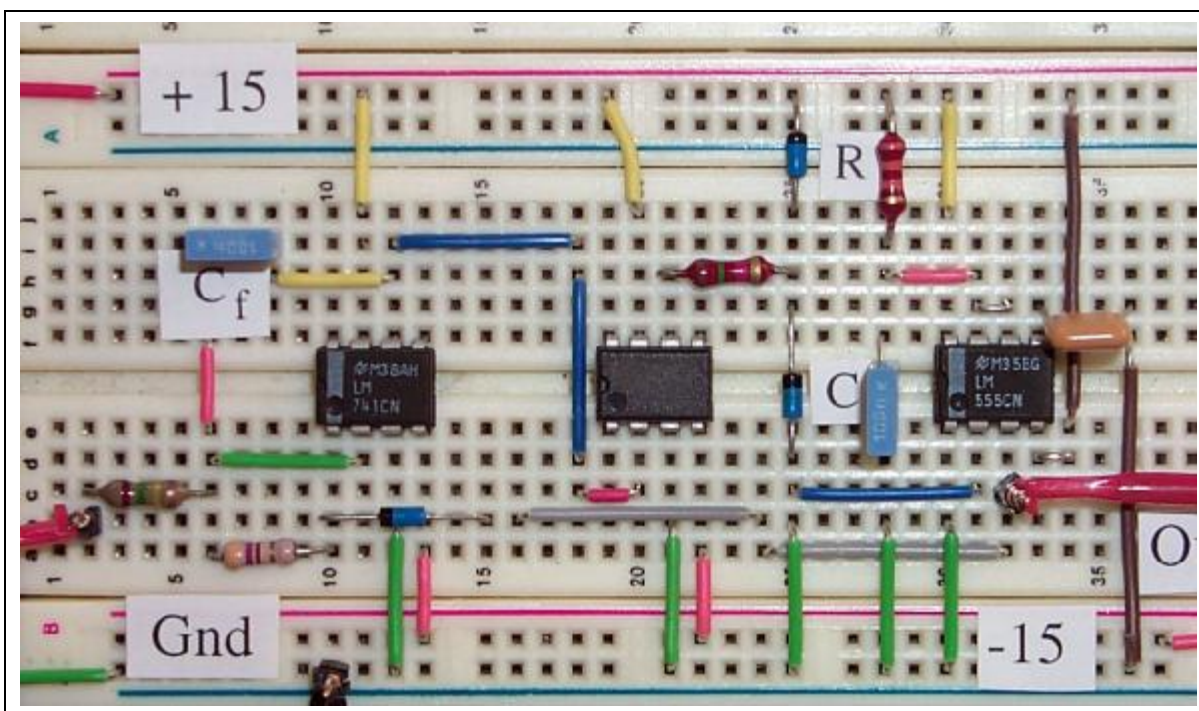


Рисунок 8-10. Расположение компонентов схемы ПНЧ

Постройте график зависимости частоты напряжения на выходе ПНЧ от амплитуды входного сигнала, при изменении последней от -5 до -0.5 вольт.

Компьютерная автоматизация 8: Калибровочная кривая ПНЧ

Компьютерная автоматизация подразумевает повторяющееся измерение параметров схемы, а также анализ и представление полученных данных. В данной работе представлен метод тестирования для схемы ПНЧ, используемой в лабораторной работе №8. Оператор будет иметь возможность установить границы изменения тестового

входного сигнала и число циклов тестирования. В процессе работы тестовое напряжение снимается с одного из выходных контактов многофункциональной платы ввода-вывода. Этот контакт присоединяется к входу схемы ПНЧ. Выход ПНЧ присоединен к входному контакту счетчика многофункциональной платы ввода-вывода. При помощи виртуального прибора Frequency.vi, представленного в работе по компьютерной автоматизации №6, измеряется частота выходного сигнала схемы ПНЧ. После того, как все данные собраны, на лицевой панели отображается калибровочная кривая ПНЧ.

Программирование на LabVIEW

Исходный шаблон для программы LabView, называемый V-F Scan.vi, находится в библиотеке. Запустите эту программу и откройте панель диаграмм. Обратите внимание на то, что здесь используются две подпрограммы: Write1pt.vi и Frequency.vi. Подпрограмма Write1pt.vi использовалась ранее для генерации тестового напряжения на аналоговом выходном контакте [устройство 1/канал 0]. Присоедините этот контакт к входу схемы ПНЧ лабораторной работы №8. Подпрограмма Frequency.vi похожа на виртуальный прибор FrequencyLow.vi, представленный в работе по компьютерной автоматизации №6, который здесь изменен для работы в качестве подпрограммы. Присоедините выход схемы ПНЧ к синхронизирующему входу счетчика 2 вашей многофункциональной платы ввода-вывода. Выберите начальное и конечное значения тестового напряжения и число точек для построения калибровочной кривой. Когда все элементы схемы будут соединены и ПНЧ заработает, нажмите кнопку **Run**. Как только будут измерены какие-либо значения входного напряжения и частоты, они будут отображены на лицевой панели. Когда будут получены данные для всех n тестовых точек, калибровочная кривая появится на графическом индикаторе.

Задания по улучшению программы

Придумайте программу, которая бы аппроксимировала полиномиальной кривой измеренную калибровочную кривую и отображала бы полиномиальные коэффициенты.

Занятие 9. Нелинейные схемы: Логарифмические усилители



В те времена, когда еще не было логарифмических линеек, калькуляторов и компьютеров, сложные математические процедуры, такие как деление, извлечение квадратного корня и возведение в степень производились при помощи логарифмических таблиц. Два наиболее общих свойства логарифма позволяют свести умножение и деление к сложению и вычитанию. Вот эти свойства:

$$\text{Log}(AB) = \text{Log}(A) + \text{Log}(B) ,$$

$$\text{Log}(A/B) = \text{Log}(A) - \text{Log}(B) .$$

На втором занятии мы уже видели как суммирующая и дифференцирующая схемы могут прибавлять и вычитать. При наличии схемы логарифмического усилителя, верхние соотношения можно использовать для создания схем умножения и деления.

Диод, с работой которого мы ознакомились на занятии №3, имеет нелинейную ВАХ. При прямом смещении ток через диод экспоненциально связан с приложенным напряжением.

$$I_d = \exp(V_d / a) , \quad (9-1)$$

где i_o – ток (постоянный) при обратном смещении и $a = kT/e$. Выражая из этого уравнения V , получаем логарифмическое соотношение между напряжением, приложенным к диоду, и током, текущим через него.

$$V_d = a \log_e (I_d / i_o) \quad (9-2)$$

Схема логарифмического усилителя

Схему логарифмического усилителя можно построить, заменяя диодом резистор ОС в инвертирующем усилителе.

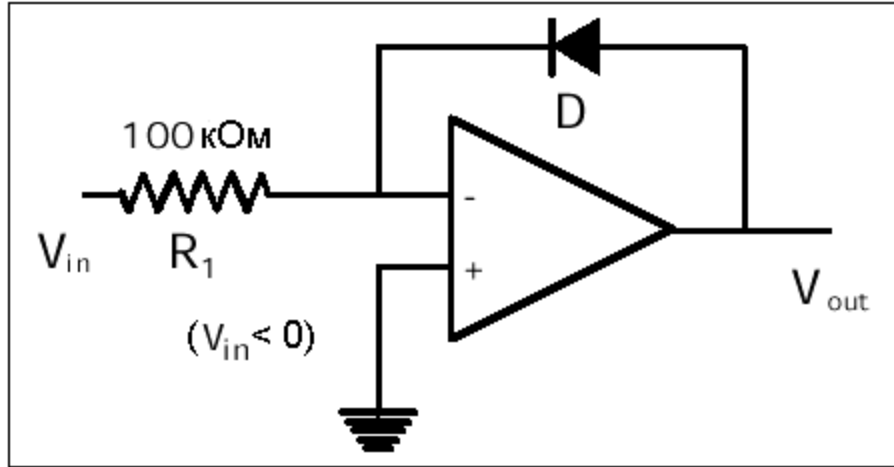


Рисунок 9-1. Принципиальная схема логарифмического усилителя

$$\text{Ток во входном контуре ток равен} \quad i_1 = V_{in}/R_1 . \quad (9-3)$$

$$\text{Для петли ОС ток это ток через диод } I_d \text{ и } V_{out} \text{ это } V_d . \quad (9-4)$$

$$\text{В суммирующей точке получаем} \quad i_1 = - i_f . \quad (9-5)$$

Вместе эти уравнения дают

$$i_1 = V_{in}/R_1 = - i_f = - I_d = - i_o \exp(V_{out} /a) . \quad (9-6)$$

Решая его относительно V_{out} , получим

$$V_{out} = a \log_e (V_{in}/i_o R_1) . \quad (9-7)$$

При оптимальном выборе диода это выражение остается действительным в интервале 5-6 порядков по напряжению. Хорошо работают схемы на основе таких диодов как 1N914 и некоторых широко распространенных транзисторов (2N3900A) с соединенными контактами базы и коллектора. Постоянная “а” порядка 0.059 вольт при комнатной температуре, а i_o обычно 10^{-11} ампер.

Пример 9.1: Схема логарифмического усилителя

Запустите программу LogOpAmp.vi из девятой главы библиотеки. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы активизировать схему. Исследуйте выходное напряжение при изменении входного на протяжении пяти порядков.

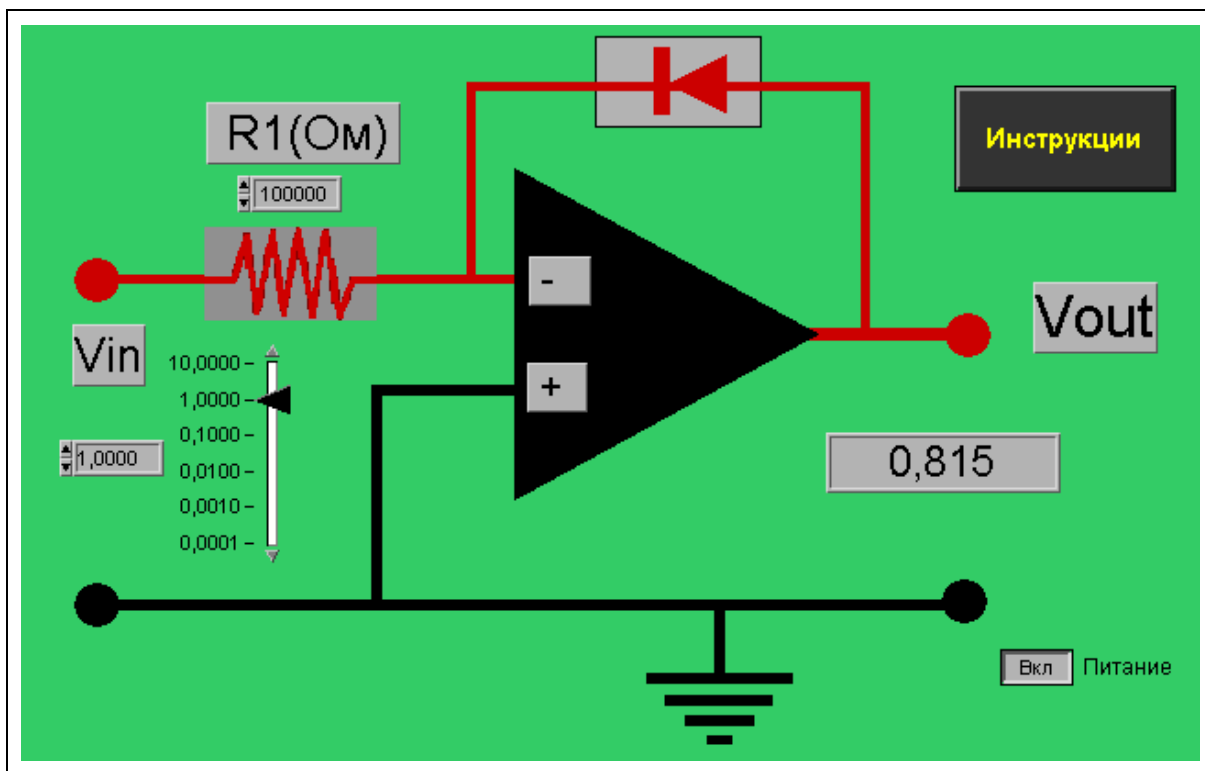


Рисунок 9-2. Моделирование схемы логарифмического усилителя

Этот виртуальный прибор – точное моделирование уравнения 9-7, при использовании типичных значений для величин a и i_0 . Для преобразования входного напряжения (1 вольт) в натуральный логарифм от единицы, необходимо масштабировать выход таким образом, чтобы $\log_e(1V)$ фактически давал числовую величину $\ln(1) = 0.000$. Вторая программа под названием Ln.vi масштабирует выход LogOpAmp.vi для получения правильной величины натурального логарифма. Для преобразования натурального логарифма по основанию (e) в обычный логарифм по основанию 10 требуется дальнейшее масштабирование. Это проделывает третья программа LogN.vi , масштабируя выходное напряжение LogOpAmp.vi для демонстрации преобразования входного сигнала в десятичный логарифм. Масштабный коэффициент и коэффициент преобразования вычисляются в подпрограмме с названием Scaling.vi . В ней используются схемы на основе ОУ для вычитания и умножения на постоянную константу, которые изучались на втором занятии.

Аналоговый преобразователь в децибелы

Для проведения многих аналоговых измерений необходимо, чтобы входной сигнал был измерен в децибелах. Напомним из занятия 4, что децибел определяется как $N(\text{дБ}) = 20 \log(V_{\text{out}}/V_0)$, где V_0 – это эталонное напряжение. Чтобы построить аналоговый преобразователь

в децибелы, можно использовать два логарифмических усилителя и дифференциальную схему, изученную на занятии 2.

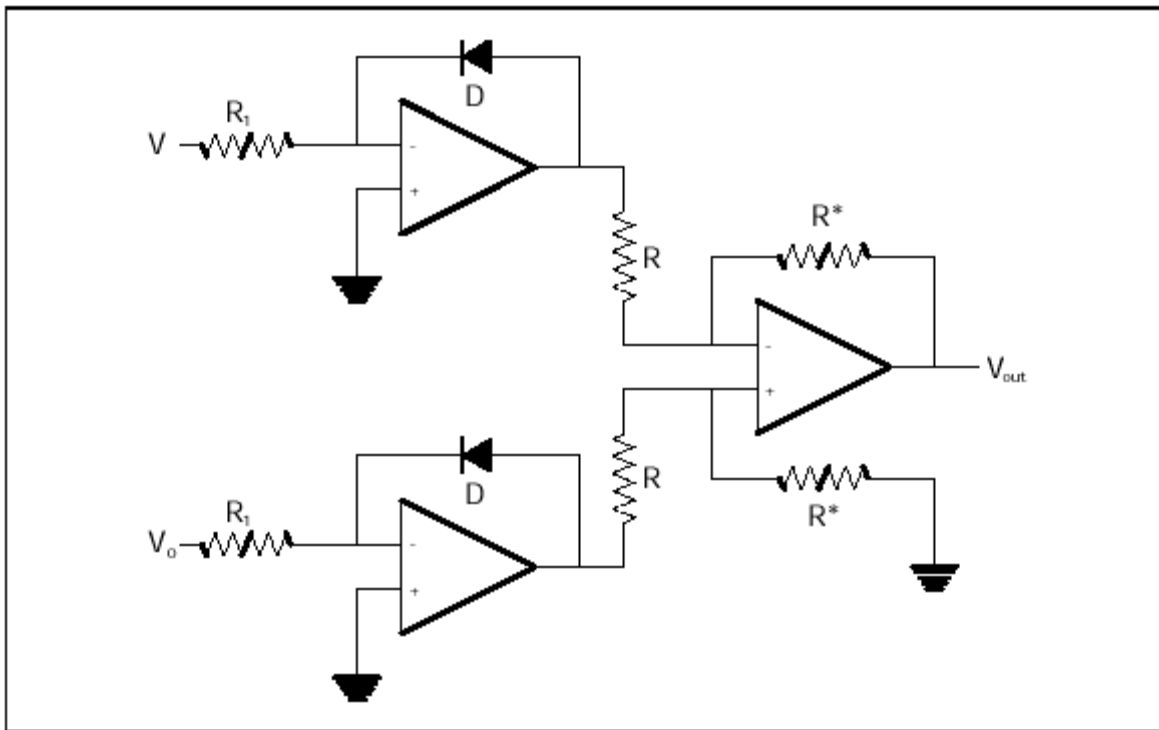


Рисунок 9-3. Принципиальная схема аналогового вычислителя децибелов

Схема на основе ОУ, показанная выше, вычисляет логарифм отношения $\log(V/V_0)$. Этот вычислитель находит много применений, особенно в фотометрии. Если заменить резистор R^* на $20 R$, то схема будет вычислять децибелы. При эквивалентном моделировании преобразователя при помощи LabVIEW используются два логарифмических усилителя, разностная функция и умножение на 20. Следующий рисунок показывает строгое соответствие модели (смотри панель диаграмм) со схемой (рис. 9-3) преобразователя в децибелы на основе ОУ.

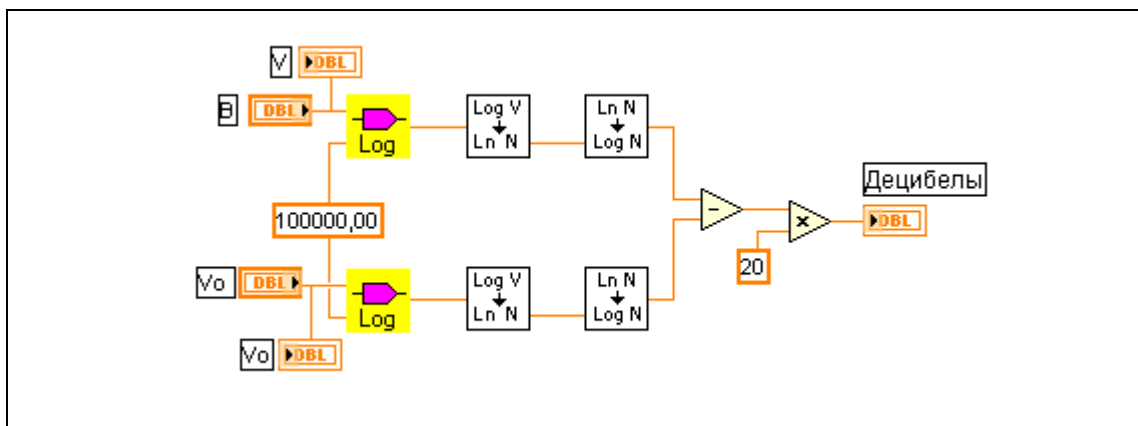


Рисунок 9-4. Диаграммная панель программы LabView, моделирующей вычислитель децибелов

Пример 9.2: Вычислитель децибелов

Запустите программу Decibel.vi из девятой главы библиотеки. Введите значение выходного и эталонного напряжений. Нажмите на кнопку **Run**, чтобы произвести вычисление. Если V – выходное напряжение и V_0 – эталонное напряжение, то калькулятор выдает КУ в децибелах.

Схема экспоненциального усилителя

В процессе изучения курса вы, возможно, заметили симметрию при перестановке главных компонент входного контура и петли ОС. Например, наличие конденсатора в контуре ОС приводит к схеме интегратора, в то время как, используя конденсатор во входной цепи, получим схему дифференциатора. Диоды также имеют подобное свойство симметрии. Диод в контуре ОС приводит к схеме логарифмического усилителя, а диод во входном контуре приводит к схеме экспоненциального усилителя.

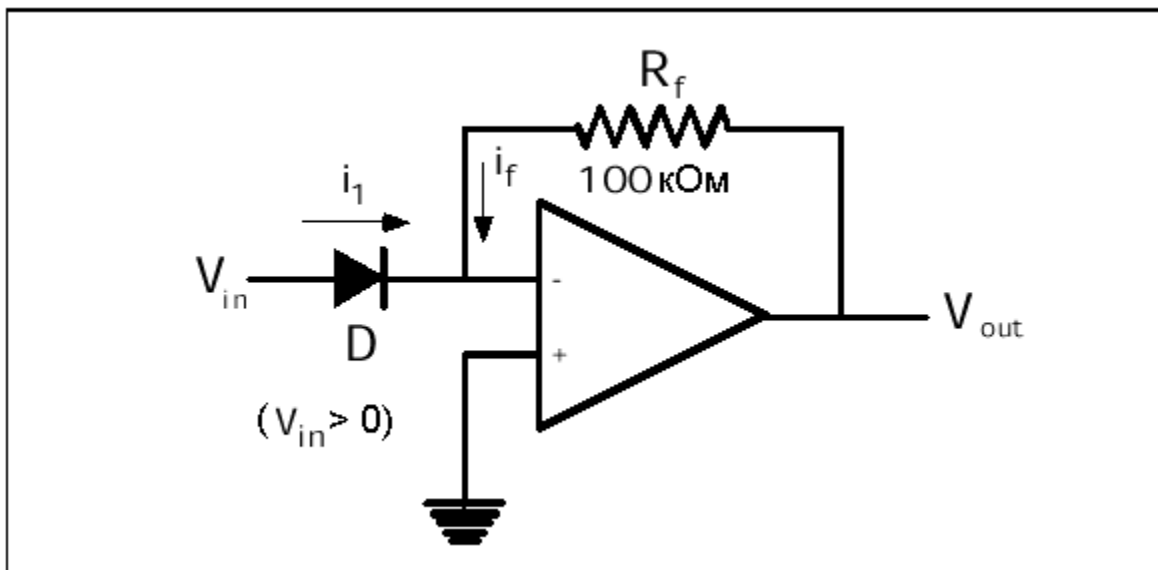


Рисунок 9-5. Принципиальная схема экспоненциального усилителя

$$\text{Ток во входном контуре ток равен } i_1 = i_o \exp(V_{in}/a) . \quad (9-8)$$

$$\text{Для петли ОС ток определяется выражением } V_{out} = i_f R_f . \quad (9-9)$$

$$\text{В суммирующей точке получаем } i_1 = - i_f . \quad (9-10)$$

$$\text{Вместе эти уравнения дают } i_o \exp(V_{in}/a) = i_1 = - i_f = V_{out}/R_f \quad (9-11)$$

$$V_{out} = i_o R_f \exp(V_{in}/a) . \quad (9-12)$$

Такая схема выполняет функцию антилогарифма или экспоненциальную функцию, которую можно использовать для преобразования суммы или разности логарифмов в простые числа:

$$\text{AntiLog} \{ \text{Log}(AB) \} = A B , \quad (9-13)$$

$$\text{AntiLog} \{ \text{Log}(A/B) \} = A/B . \quad (9-14)$$

Отметим, что если предыдущую схему использовать вместе с экспоненциальной схемой, то она будет выполнять функцию умножения или деления.

Аналоговое умножение двух переменных

Умножение двух переменных сигналов X и Y можно выполнить при помощи уравнения 9-13. В расширенном виде его можно записать как

$$\text{AntiLog} \{ \text{Log}(X) + \text{Log}(Y) \} = \text{AntiLog} \{ \text{Log}(XY) \} = XY . \quad (9-15)$$

При помощи схемы логарифмического усилителя сначала вычисляются $\text{Log}(X)$ и $\text{Log}(Y)$. Затем результаты складываются вместе при помощи суммирующей схемы занятия 2. В конце от полученного напряжения вычисляется экспонента при помощи схемы экспоненциального усилителя. Для уменьшения шума выходное напряжение часто сокращают в 10 раз. Ниже представлена принципиальная схема для такого устройства.

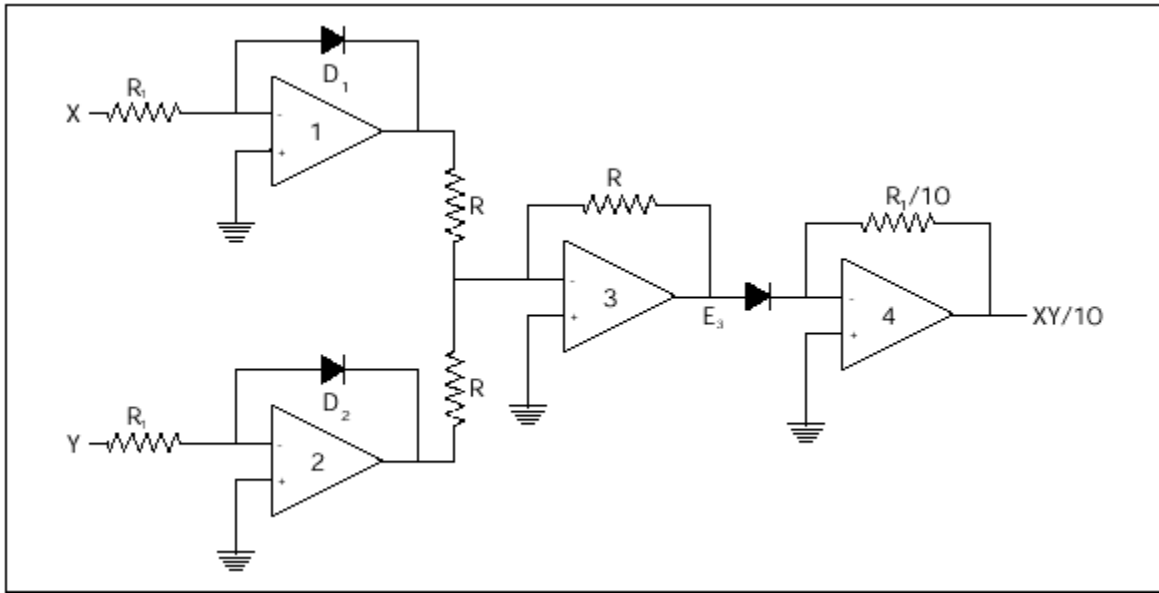


Рисунок 9-6. Принципиальная схема перемножителя двух сигналов

Задание повышенной сложности

Придумайте программу, которая бы моделировала схему аналогового умножения, показанную выше. Воспользуйтесь библиотекой программ занятия 9 и находящимися там подпрограммами для создания компактной программы.

Возведение входного сигнала в степень

Многие физические законы выражены простой степенной зависимостью. Поэтому схемы, которые могут возводить входной сигнал в определенную степень (возможно дробную), находят многочисленные применения. В схемах на основе ОУ пользуются определенным свойством логарифма для возведения аналогового входного сигнала X в постоянную степень y .

$$\text{AntiLog} \{y \text{ Log}(X)\} = \text{AntiLog} \{\text{Log}(X^y)\} = X^y \quad (9-16)$$

Сначала вычисляется $\text{Log}(X)$, используя схему логарифмического усилителя. Ее выходной сигнал умножается на постоянную (y) при помощи инвертирующей схемы из занятия 2. В конце от полученного напряжения вычисляется экспонента при помощи схемы экспоненциального усилителя, что дает конечный результат X^y . Ниже представлена принципиальная схема для возведения в степень.

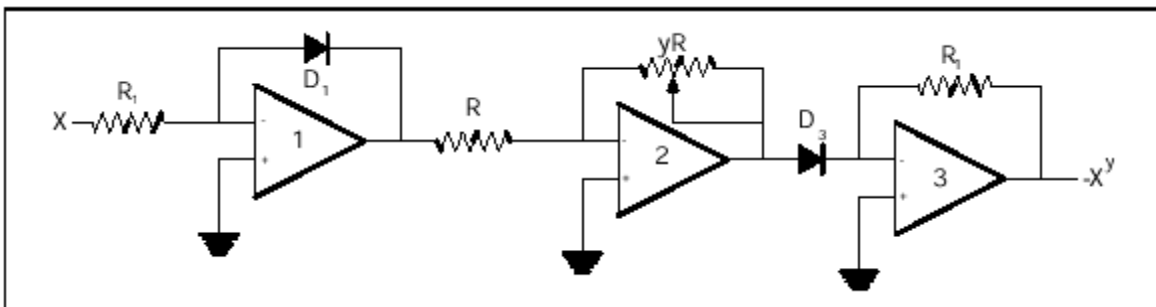


Рисунок 9-7. Принципиальная схема для возведения сигнала в степень

Заметим, что реостат используется для установки КУ второго усилителя ($G = y R/R$) в значение y . Число y может быть целым, полнцелым или принимать любое дробное значение.

Задание повышенной сложности

Придумайте программу, моделирующую возведение в степень схемой на основе ОУ, показанной выше. Воспользуйтесь библиотекой программ занятия 9 и находящимися там подпрограммами для создания компактной программы.

Лабораторная работа №9

Цель работы

Целью настоящего проекта является изучение работы схемы логарифмического усилителя.

Порядок выполнения

Соберите логарифмический усилитель, используя принципиальную схему на рис. 9-1. Для этого вам потребуется резистор, кремниевый диод и ОУ К140УД6. Если у вас нет импульсного кремниевого диода, можно использовать транзистор 2N3900A, с соединенными контактами базы и эмиттера. Для подавления шума параллельно диоду присоединяется конденсатор с малой емкостью 0.001 мкФ. Напряжение питания ОУ +15 и -15 вольт подается от источника питания. Расположение компонентов схемы показано ниже.

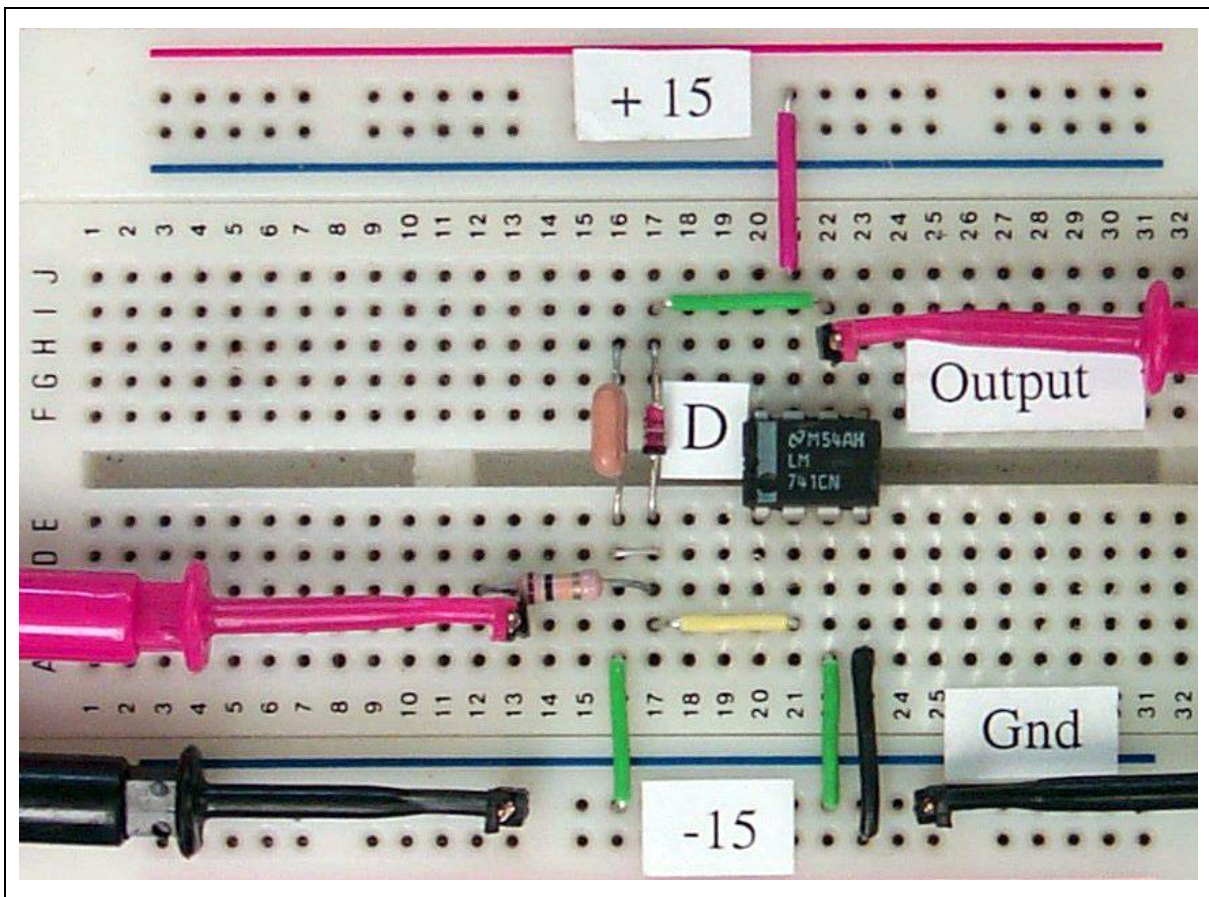


Рисунок 9-8. Расположение компонентов схемы логарифмического усилителя

Исследуйте работу логарифмического усилителя, прикладывая различное постоянное напряжение ко второму входному контакту. Постройте график зависимости выходного напряжения от уровня входного сигнала, как в линейном, так и логарифмическом масштабе. Насколько хорошо работает схема для сигналов с переменной амплитудой?