МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Методические рекомендации к практическим работам для студентов направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» дневной формы обучения

Могилев 2022

УДК 621.37
ББК 34.844
С92

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «13» января 2022 г., протокол № 5

Составитель канд. техн. наук, доц. А. А. Афанасьев

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях рассмотрены вопросы проектирования аналоговых и цифровых электронных устройств, принципы их работы, приведены примеры решения типовых задач, задачи для самостоятельной работы. Составлены в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Схемотехника электронных устройств» для студентов направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» дневной формы обучения.

Учебно-методическое издание

СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 31 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

1 Датчики аналоговых измерительных сигналов: устройство, принцип действия, электрические параметры, схемы включения 4
2 Датчики дискретных измерительных сигналов: устройство, принцип действия, электрические параметры, схемы включения 7
3 Преобразователи электрических измерительных сигналов на основе операционных усилителей: усилители, прецизионные выпрямители, фильтры, сумматоры, вычитающие устройства 8
4 Преобразователи электрических измерительных сигналов на основе операционных усилителей: источники тока, преобразователи сопротивления в напряжение, тока в напряжение, генераторы сигналов различной формы 15
5 Преобразователи электрических измерительных сигналов: АЦП и ЦАП, параметры и схемы подключения к микроконтроллерам 18
6 Схемотехника подключения к микроконтроллерам аналоговых и дискретных электронных устройств 23
7 Автономные источники питания: виды, параметры. Схемотехника зарядных устройств для аккумуляторов. Источники вторичного электропитания. Преобразователи переменного напряжения в постоянное. Стабилизаторы напряжения и тока 31
8 Разработка структурных и принципиальных схем электронных устройств приборов на современной элементной базе. Автоматизация проектных работ при разработке нового электронного оборудования с использованием ЭВМ и специального программного обеспечения 36
Список литературы 41
Приложение А 42
Приложение Б 43
Приложение В 47

1 Датчики аналоговых измерительных сигналов: устройство, принцип действия, электрические параметры, схемы включения

Датчиками называют устройства, преобразующие входное воздействие любой физической величины (температуры, давления, частоты, силы света, электрического напряжения, тока и т. д.) в сигнал, удобный для измерения, передачи, хранения, обработки, регистрации, а иногда и для воздействия на управляемые процессы.

В зависимости от вида входной (измеряемой) величины различают датчики механических перемещений (линейных и угловых), пневматические, электрические, расходомеры, скорости, ускорения, усилия, температуры, давления и др.

По виду выходной величины, в которую преобразуется входная величина, различают неэлектрические и электрические: датчики постоянного тока (ЭДС или напряжения), датчики амплитуды переменного тока (ЭДС или напряжения), датчики частоты переменного тока (ЭДС или напряжения), датчики сопротивления (активного, индуктивного или емкостного) и др.

К аналоговым относятся датчики, вырабатывающие сигналы, пропорциональные изменению входной величины. Аналоговые сигналы теоретически могут иметь бесконечное число значений в пределах некоторого диапазона.

По принципу действия датчики делятся на параметрические и генераторные. Генераторные датчики осуществляют непосредственное преобразование входной величины в электрический сигнал. Параметрические датчики входную величину преобразуют в изменение какого-либо электрического параметра (R, L или C). Передать на расстояние изменение перечисленных параметров без энергонесущего сигнала (напряжения или тока) невозможно. Выявить изменение соответствующего параметра можно только по влиянию датчика на ток или напряжение. Поэтому параметрические датчики требуют применения специальных измерительных цепей с питанием постоянным или переменным током.

Примером аналогового параметрического датчика является датчик потенциометрического типа. Если потенциометр подключить к источнику питания (ИП), то он будет выполнять роль делителя напряжения и с его помощью можно изменять напряжение $U_{ВЫХ}$ от 0 до $U_П$ (рисунок 1.1).

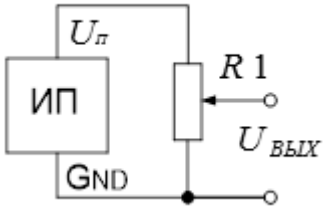

Рисунок 1.1 – Схема подключения потенциометра к источнику питания

Задача 1. К источнику питания с постоянной ЭДС E = 9 В подключен потенциометр − резистивный преобразователь (РП) линейного перемещения, сопротивление которого $R_П$ = 150 Ом (рисунок 1.2). Сопротивление резистора $R1$ = 300 Ом. В каком диапазоне будет изменяться $U_{ВЫХ}$ при перемещении подвижного элемента РП?

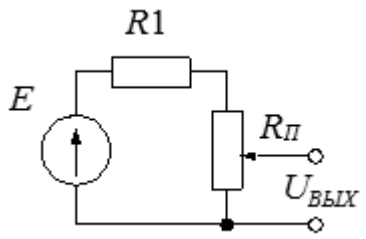

Рисунок 1.2 – Схема подключения резистивного преобразователя линейного перемещения к источнику питания

Пример решения задачи 1 – Определим ток, протекающий через резистор $R1$ и потенциометр $R_П$:

$$I = \frac{E}{R1 + R_П} = \frac{9}{450} = 20 \text{ мА}. \qquad (1.1)$$

Найдем $U_{ВЫХ}$ при крайнем верхнем положении подвижного элемента $R_П$:

$$U_{ВЫХ.\max} = I \cdot R_П = 0{,}02 \cdot 150 = 3 \text{ В}. \qquad (1.2)$$

При крайнем нижнем положении подвижного элемента $R_П$ $U_{ВЫХ}$ = 0 В. Следовательно, $U_{ВЫХ}$ будет изменяться от 0 до 3 В.

Задача 2. К источнику с постоянной ЭДС E = 12 В последовательно подключены постоянный резистор с сопротивлением $R1$ = 300 Ом и резистивный преобразователь углового перемещения (потенциометр), сопротивление которого $R_П$ = 300 Ом. В каком диапазоне будет изменяться $U_{ВЫХ}$ при перемещении подвижного элемента $R_П$? Нарисуйте схему соединений указанных элементов.

Задача 3. К источнику с постоянной ЭДС E = 6 В подключен терморезистор R_t, сопротивление которого под воздействием температуры, изменяющейся от –50 °С до +100 °С, изменяется от 2700 до 920 Ом (рисунок 1.3).

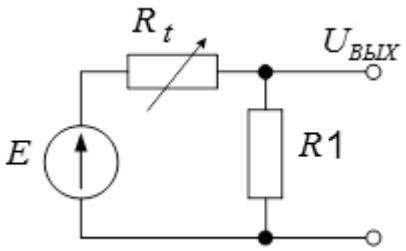

Рисунок 1.3 – Схема к задаче 3

Сопротивление резистора $R1$ = 300 Ом. В каком диапазоне будет изменяться $U_{ВЫХ}$ при изменении температуры в указанном диапазоне?

Задача 4. В схеме измерительного моста (рисунок 1.4) $R2 = R3 = R4 =$ = 300 Ом, ЭДС источника питания E = 6 В, R_t − терморезистор, сопротивление которого при изменении температуры от –20 °С до +80 °С изменяется от 300 до 200 Ом. Найдите диапазон изменения напряжения $U_{аб} = (U_а - U_б)$ при крайних значениях указанного температурного диапазона.

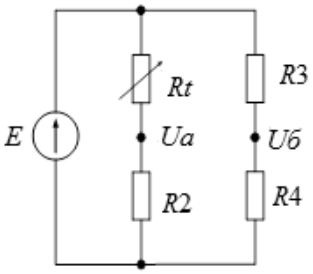

Рисунок 1.4 – Схема к задаче 4

Задача 5. Используйте исходные данные к задаче 4, разработайте схему измерительного моста, которая позволит устанавливать $U_{аб}$ = 0 В при нулевой температуре. Зависимость сопротивления R_t от температуры считайте линейной.

Задача 6. К источнику с постоянной ЭДС E = 9 В подключен фотодиод, работающий в фотодиодном режиме (рисунок 1.5).

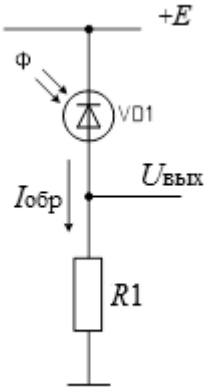

Рисунок 1.5 – Схема подключения фотодиода в качестве аналогового датчика

Последовательно с фотодиодом $VD1$ включен резистор нагрузки $R1$ = 24 кОм. Через фотодиод $VD1$ и резистор $R1$ протекает обратный ток $I_{ОБР}$, величина которого изменяется при изменении потока излучения Φ, падающего на светочувствительный слой фотодиода. Изменение потока излучения Φ происходит под воздействием измеряемой величины X. При изменении потока от Φ_{max} до Φ_{min} обратный ток изменяется от $I_{ОБР\ max}$ = 230 мкА до $I_{ОБР\ min}$ = 110 мкА. Определите, в каком диапазоне будет изменяться $U_{ВЫХ}$.

2 Датчики дискретных измерительных сигналов: устройство, принцип действия, электрические параметры, схемы включения

К дискретным относятся датчики, вырабатывающие либо сигналы двух уровней: высокого (HIGH) или низкого (LOW) (иначе говоря, 0 или 1), либо генерирующие последовательность импульсов, пачки импульсов или одиночные импульсы.

На рисунке 2.1 приведена схема подключения к источнику питания с ЭДС $E = +5$ В клавиши *SA*1, используемой в качестве дискретного датчика.

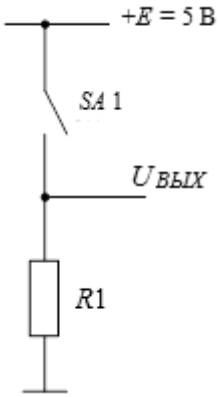

Рисунок 2.1 – Схема подключения дискретного датчика к источнику питания

Когда клавиша не нажата, нет никакой связи между двумя ее выводами, так что нижний её вывод подключен к общей шине *GND* через резистор *R*1 и $U_{ВЫХ} = 0$ В. Это сигнал низкого уровня, или логический нуль. При нажатии на клавишу устанавливается соединение между двумя её выводами и $U_{ВЫХ} = +5$ В. Это сигнал высокого уровня, соответствующий логической единице.

На рисунке 2.2 приведена схема дискретного датчика (клавиша *SA*1), вырабатывающего в цикле нажата/отжата совместно с асинхронным *RS*-триггером на логических элементах *DD*1*A* и *DD*1*B* одиночные импульсы $U_{ВЫХ}$. С помощью такого датчика можно получать информацию не только о состоянии клавиши, но и о количестве её нажатий.

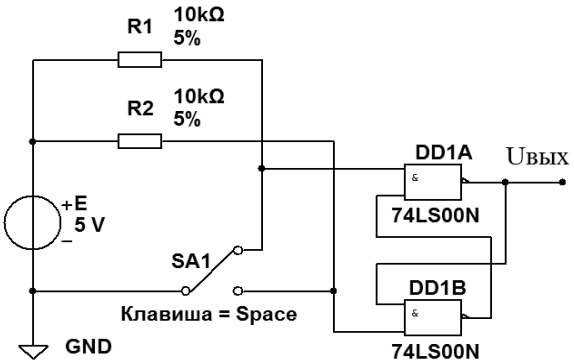

Рисунок 2.2 – Схема дискретного датчика − генератора одиночных импульсов

На рисунке 2.3 приведена схема дискретного датчика (клавиша *SA*1), при нажатии которой генератором на *DD*1 вырабатывается последовательность

прямоугольных импульсов $U_{ВЫХ}$. Частота следования импульсов задаётся элементами $R1$, $R2$, $C1$. При отжатом состоянии клавиши $SA1$ импульсы на выходе генератора отсутствуют.

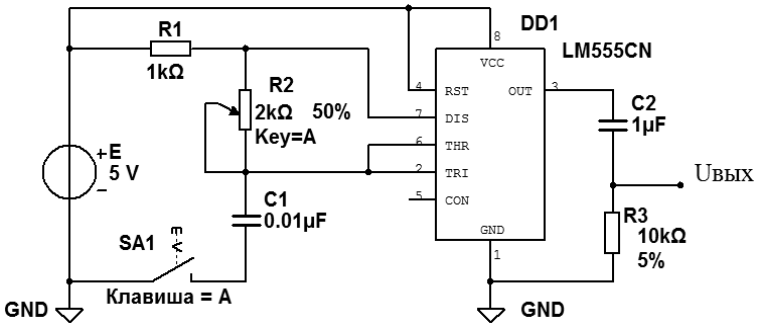

Рисунок 2.3 – Схема дискретного датчика − автогенератора прямоугольных импульсов

Задача 1. Разработайте электрическую принципиальную схему двух дискретных датчиков − генераторов одиночных импульсов, подключенных к одному источнику питания E с использованием одной микросхемы из серии К555, содержащей четыре логических элемента 2И-НЕ.

Задача 2. Составьте схему, приведенную на рисунке 2.2, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к выходу RS-триггера осциллограф и световой индикатор.

Задача 3. Рассчитайте, в каком диапазоне будет изменяться частота генератора (см. рисунок 2.3) при изменении $R2$ от 0 до 2 кОм, используя выражение

$$F_Г = \frac{0,7}{(2 \cdot R1 + R2) \cdot C1}. \qquad (2.1)$$

Задача 4. Составьте схему, приведенную на рисунке 2.3, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к выходу генератора осциллограф и частотомер. Сравните результаты моделирования с расчетными, полученными в задаче 3.

3 Преобразователи электрических измерительных сигналов на основе операционных усилителей: усилители, прецизионные выпрямители, фильтры, сумматоры, вычитающие устройства

Для усиления и преобразования выходных сигналов датчиков широко используются устройства на основе операционных усилителей (ОУ).

Схема усилителя с инвертирующим входом изображена на рисунке 3.1.

Коэффициент усиления по напряжению усилителя с инвертирующим входом

$$K_{УИ} = -\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = -\frac{R2}{R1}. \qquad (3.1)$$

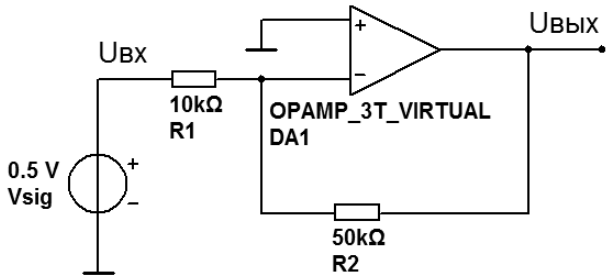

Рисунок 3.1 − Усилитель с инвертирующим входом на ОУ

Знак «минус» показывает, что знак $U_{ВЫХ}$ по отношению к $U_{ВХ}$ меняется на противоположный.

Схема усилителя с неинвертирующим входом изображена на рисунке 3.2.

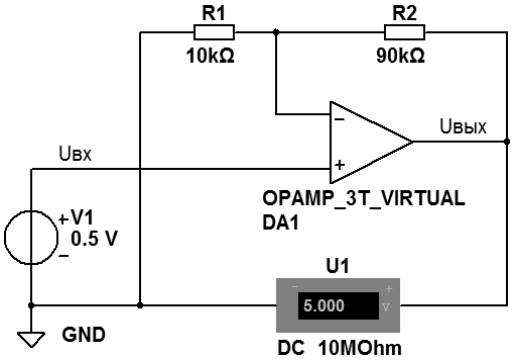

Рисунок 3.2 − Усилитель с неинвертирующим входом на ОУ

Коэффициент усиления по напряжению усилителя с неинвертирующим входом

$$K_{УН} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{R1 + R2}{R1}. \qquad (3.2)$$

Усилитель на основе ОУ с дискретным управлением коэффициентом усиления представлен на рисунке 3.3.

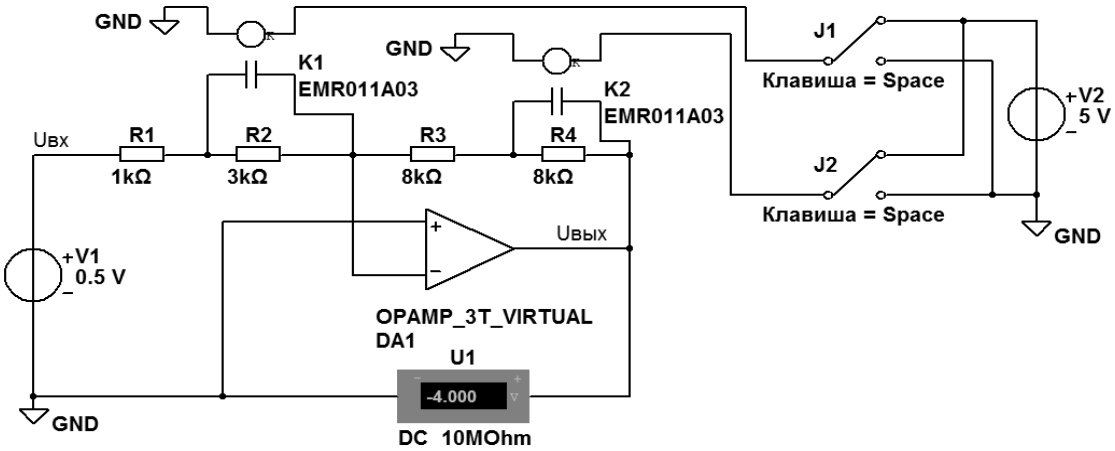

Рисунок 3.3 − Схема усилителя на ОУ с дискретным управлением коэффициентом усиления

Коэффициент усиления

$$K_{y1} = -\frac{(R3 + R4)}{(R1 + R2)}. \quad (3.3)$$

Если резисторы $R2$ и $R4$ поочередно или одновременно шунтировать, например, с помощью электромагнитных реле $K1$ и $K2$, управляемых клавишами $J1$ и $J2$, то можно получить коэффициенты усиления

$$K_{y2} = -\frac{(R3 + R4)}{R1}; \quad (3.4)$$

$$K_{y3} = -\frac{R3}{(R1 + R2)}; \quad (3.5)$$

$$K_{y4} = -\frac{R3}{R1}. \quad (3.6)$$

Для преобразования переменных измерительных сигналов в постоянные применяются выпрямители. На рисунке 3.4 показан прецизионный выпрямитель с амплитудным детектором на операционном усилителе $DA1$.

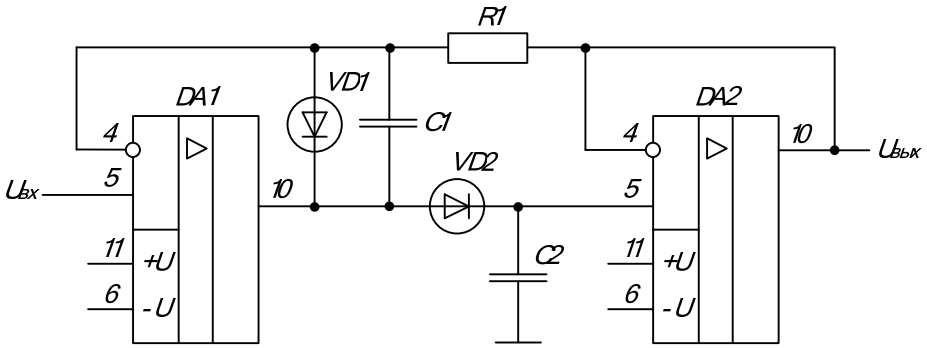

Рисунок 3.4 – Схема амплитудного детектора и повторителя напряжения на ОУ

Преобразование знакопеременного напряжение в напряжение одного знака осуществляется с помощью диодов $VD1$ и $VD2$. Конденсатор $C2$ заряжается до амплитудного значения выходным напряжением операционного усилителя $DA1$. Для сглаживания пульсаций напряжения, формируемого на конденсаторе $C2$, используется конденсатор $C1$. На операционном усилителе $DA2$ реализован повторитель напряжения. Он выполняет функцию согласования амплитудного детектора и нагрузки, так как обладает высоким входным сопротивлением.

Для выделения полезного измерительного сигнала на фоне помех и ослабления амплитуд неинформативных сигналов используются электрические фильтры. Для их построения широко используются ОУ. На рисунке 3.5

приведена схема однозвенного полосового фильтра (ПФ). ПФ реализован на четырёх операционных усилителях *DA*1–*DA*4.

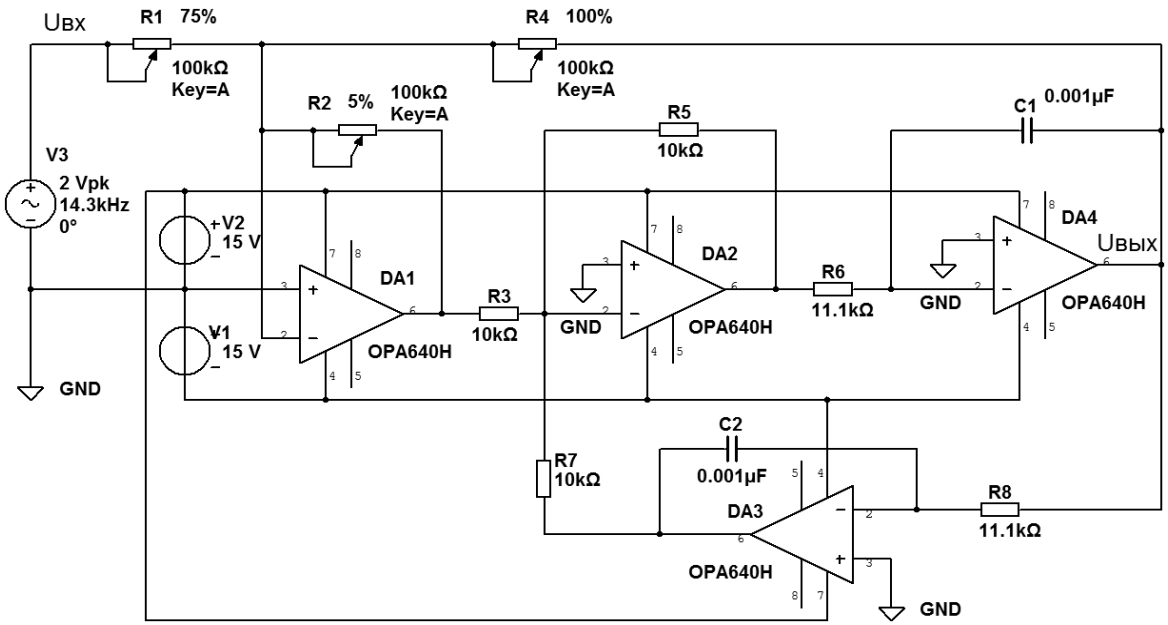

Рисунок 3.5 – Схема полосового фильтра на ОУ

Расчет и выбор элементов для ПФ осуществляется в соответствии с частотой полезного измерительного сигнала $f_Г$ и заданной полосой пропускания ПФ $\Delta f_{ПФ} = (f_{C2} - f_{C1})$ (рисунок 3.6).

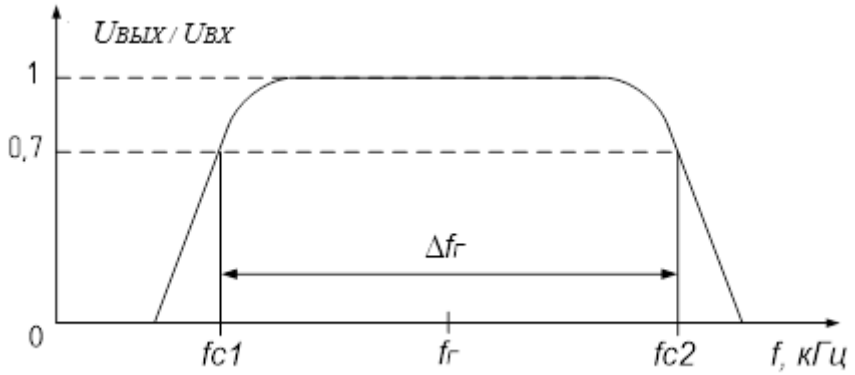

Рисунок 3.6 – Амплитудно-частотная характеристика ПФ

На частоте $f_Г$ работа ПФ описывается следующим выражением:

$$R_Ф \cdot C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_Г}, \tag{3.7}$$

где $R_Ф = R6 = R8$.

Емкости конденсаторов обычно берут равными:

$$C2 = C3 = C. \tag{3.8}$$

Тогда

$$R_{Ф} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{Г} \cdot C}. \tag{3.9}$$

Значения сопротивлений резисторов $R3 = R5 = R7 = R$ некритичны.

Добротность рассматриваемого полосового фильтра Q (рассчитывается как отношение частоты $f_Г$ к полосе пропускания $\Delta f_{ПФ}$) описывается выражением

$$Q = \frac{f_{Г}}{\Delta f_{ПФ}}. \tag{3.10}$$

Добротность задаётся резисторами $R4$ и $R2$.

$$Q = \frac{R4}{R2}. \tag{3.11}$$

Коэффициент усиления рассматриваемого полосового фильтра $K_У$ описывается выражением

$$K_{У} = \frac{R4}{R1}. \tag{3.12}$$

При $K_У = 1$ имеем $R1 = R4$.

На основе ОУ может быть создан сумматор аналоговых сигналов (как постоянных, так и переменных напряжений) (рисунок 3.7).

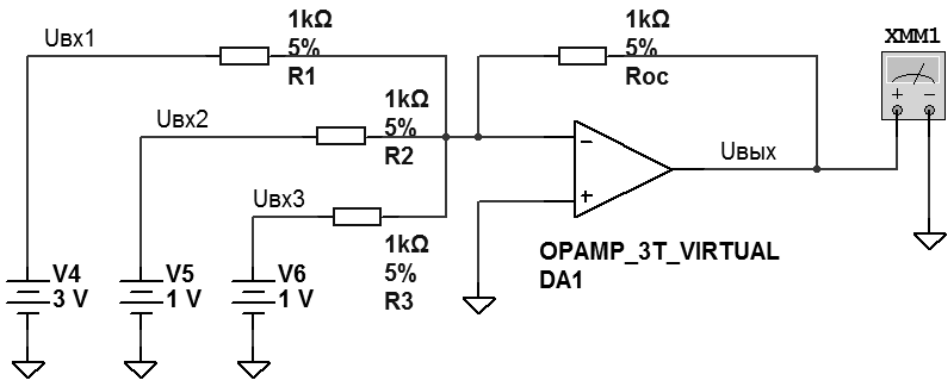

Рисунок 3.7 – Схема инвертирующего сумматора постоянных напряжений на ОУ в Multisim

Выходное напряжение сумматора

$$U_{ВЫХ} = -R_{OC} \cdot \left(\frac{U_{BX1}}{R1} + \frac{U_{BX2}}{R2} + \frac{U_{BX3}}{R3} \right). \qquad (3.13)$$

Для усиления разностного сигнала используется схема на трёх операционных усилителях (вычитающее устройство) (рисунок 3.8).

Выходной сигнал такого усилителя

$$U_{ВЫХ} = \left(U_{BX2} - U_{BX1} \right) \cdot \left(\frac{R2 + R3}{R1} + 1 \right). \qquad (3.14)$$

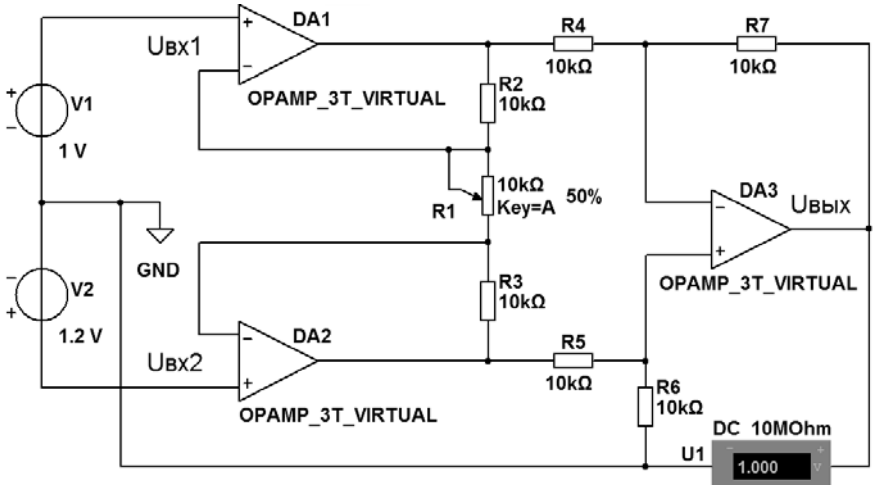

Рисунок 3.8 − Дифференциальный усилитель на трех ОУ

Выражение во второй скобке определяет коэффициент усиления

$$K_У = \frac{R2 + R3}{R1} + 1. \qquad (3.15)$$

Задача 1. Выполните расчет коэффициента усиления $K_{УИ}$ инвертирующего усилителя по указанным на рисунке 3.1 параметрам элементов. Каким будет выходной сигнал, если на вход усилителя подать сигнал U_{BX}= 300 мВ?

Задача 2. Составьте схему, приведенную на рисунке 3.1, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к выходу усилителя мультиметр.

Задача 3. В составленной по рисунке 3.1 в Multisim схеме замените источник Vsig с постоянной ЭДС на источник с переменной ЭДС. Подключите к выходу усилителя осциллограф и получите на его экране изображение U_{BX} и $U_{ВЫХ}$. Определите их амплитуды и рассчитайте коэффициент усиления $K_{УИ}$.

Задача 4. Выполните расчет коэффициента усиления $K_{УН}$ неинвертирующего усилителя по указанным на рисунке 3.2 параметрам элементов. Каким будет выходной сигнал, если на вход усилителя подать сигнал U_{BX} = 600 мВ?

Задача 5. Составьте схему, приведенную на рисунке 3.2, в Multisim и исследуйте её работу по показаниям мультиметра *U*1.

Задача 6. В составленной по рисунку 3.2 в Multisim схеме замените источник *V*1 с постоянной ЭДС на источник с переменной ЭДС. Подключите к выходу усилителя осциллограф и получите на его экране изображение U_{BX} и $U_{BЫX}$. Определите их амплитуды и рассчитайте коэффициент усиления $K_{УН}$.

Задача 7. По формуле (3.15) выполните расчет коэффициента усиления $K_У$ дифференциального усилителя по указанным на рисунке 3.8 параметрам элементов. Какими будут показания мультиметра *U*1, если сопротивление резистора *R*1 выставить равным 10, 5 и 2 кОм?

Задача 8. Составьте схему, приведенную на рисунке 3.8, в Multisim и исследуйте её работу по показаниям мультиметра *U*1, регулируя сопротивление резистора *R*1. Сравните результаты моделирования с расчетными, полученными при решении задачи 7.

Задача 9. В составленной по рисунку 3.8 в Multisim схеме замените источники *V*1 и *V*2 с постоянной ЭДС на источники с переменной ЭДС. Подключите к выходу усилителя осциллограф и получите на его экране изображение $U_{BЫX}$. По осциллограмме определите его амплитуду при *R*1 10, 5 и 2 кОм. Рассчитайте коэффициенты усиления $K_У$ при этих значениях *R*1 по полученным значениям $U_{BЫX}$ и $\Delta U_{BX} = U_{BX2} - U_{BX1}$.

Задача 10. Выполните расчет коэффициентов усиления $K_{У1}$, $K_{У2}$, $K_{У3}$, $K_{У4}$, инвертирующего усилителя по указанным на рисунке 3.3 параметрам элементов, используя формулы (3.3)–(3.6). Какими будут выходные сигналы, если на вход усилителя подать сигнал U_{BX} = 500 мВ?

Задача 11. Составьте схему, приведенную на рисунке 3.3, в Multisim и исследуйте её работу, используя показания мультиметра. Изменения в схеме делайте с помощью реле *K*1 и *K*2 и клавиш *J*1 и *J*2. Сравните результаты моделирования с расчетными, полученными при решении задачи 3.10.

Задача 12. Составьте схему, приведенную на рисунке 3.5, в Multisim и подключите к выходу полосового фильтра осциллограф. Исследуйте его работу, изменяя частоту входного сигнала в диапазоне от 10 до 20 кГц через 0,5 кГц. По данным, полученным с помощью осциллографа, постройте амплитудно-частотную характеристику исследуемого фильтра.

Задача 13. Выполните расчет $U_{BЫX}$ сумматора по указанным на рисунке 3.7 параметрам его элементов. Составьте эту схему в Multisim и исследуйте её работу. Сравните показания мультиметра *XMM*1 с данными, полученными в результате расчета.

4 Преобразователи электрических измерительных сигналов на основе операционных усилителей: источники тока, преобразователи сопротивления в напряжение, тока в напряжение, генераторы сигналов различной формы

На рисунке 4.1 приведена схема источника тока на ОУ с заземлённой нагрузкой. Нагрузкой в этом источнике тока является светодиод HL1. Выходной ток, протекающий через светодиод, практически равен току, протекающему через резистор $R1$: $I_H \approx (E_П - U_{BX}) / R1$.

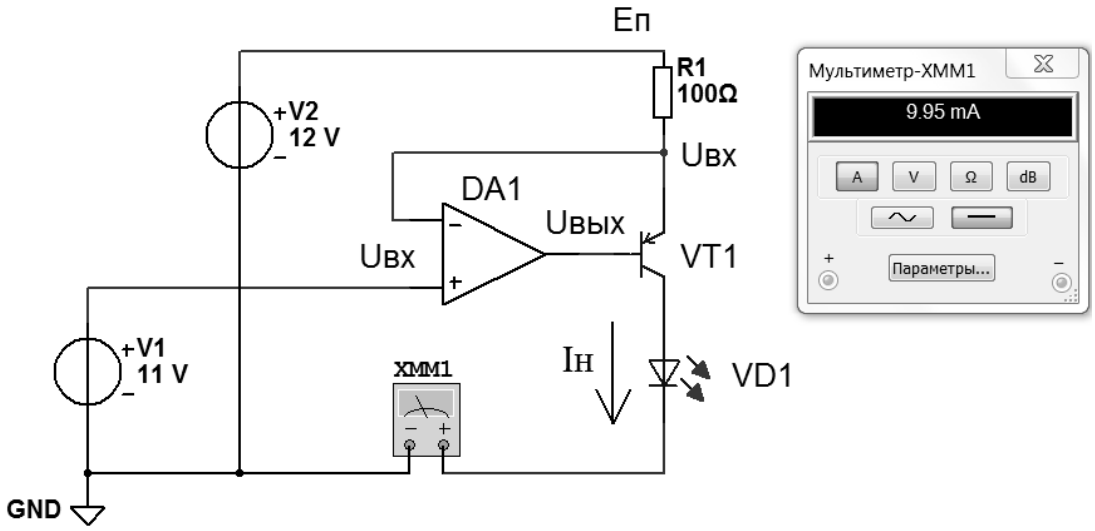

Рисунок 4.1 – Схема источника тока на ОУ с заземлённой нагрузкой на ОУ

Необходимость преобразования сопротивления в напряжение возникает в случае использования в качестве датчика измеряемой физической величины резистивного преобразователя. На рисунке 4.2 показана схема преобразователя сопротивления в напряжение на ОУ.

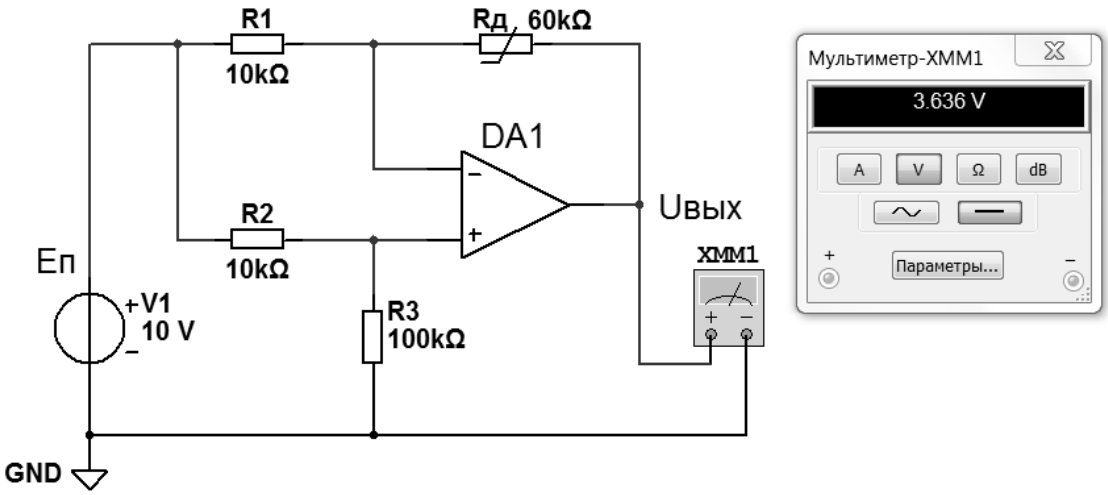

Рисунок 4.2 – Схема преобразователя сопротивления в напряжение на ОУ

В приведенной схеме датчиком является резистор $R_Д$. Сопротивления резисторов $R1$ и $R2$ выбираются одинаковыми, а сопротивление $R3$ подбирается равным сопротивлению датчика (он включен в цепь обратной связи ОУ) при $U_{ВЫХ}$= 0. Выходное напряжение определяется выражением

$$U_{ВЫХ} = \frac{E_П \cdot \left(R3 - R_Д\right)}{R1 + R3}. \qquad (4.1)$$

Схема преобразователя тока в напряжение приведена на рисунке 4.3.

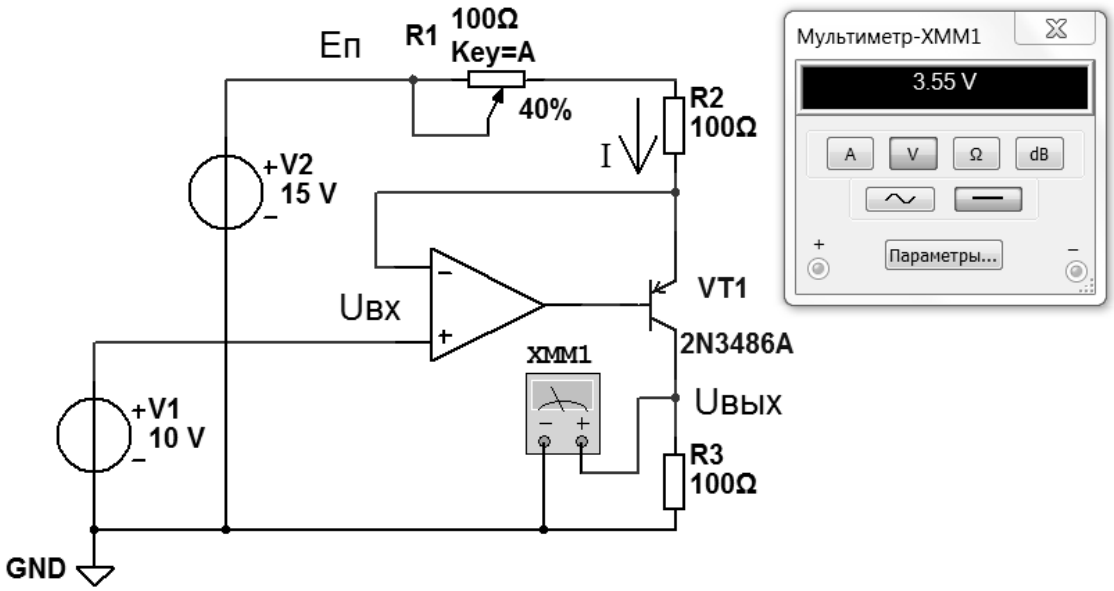

Рисунок 4.3 – Схема преобразователя тока в напряжение на ОУ

Выходное напряжение такого преобразователя определяется выражением

$$U_{ВЫХ} = \frac{\left(E_П - U_{ВХ}\right) \cdot R3}{R1 + R2}. \qquad (4.2)$$

Для преобразования напряжения в ток можно использовать схему, приведенную на рисунке 4.4.

Ток, протекающий через светодиод $HL1$, рассчитывается по формуле

$$I_{R1} \approx I_H = \frac{\left(E_П - U_{ВХ}\right)}{R1}. \qquad (4.3)$$

На основе ОУ могут быть построены генераторы сигналов различной формы. На рисунке 4.5 приведена схема генератора сигналов прямоугольной и треугольной форм.

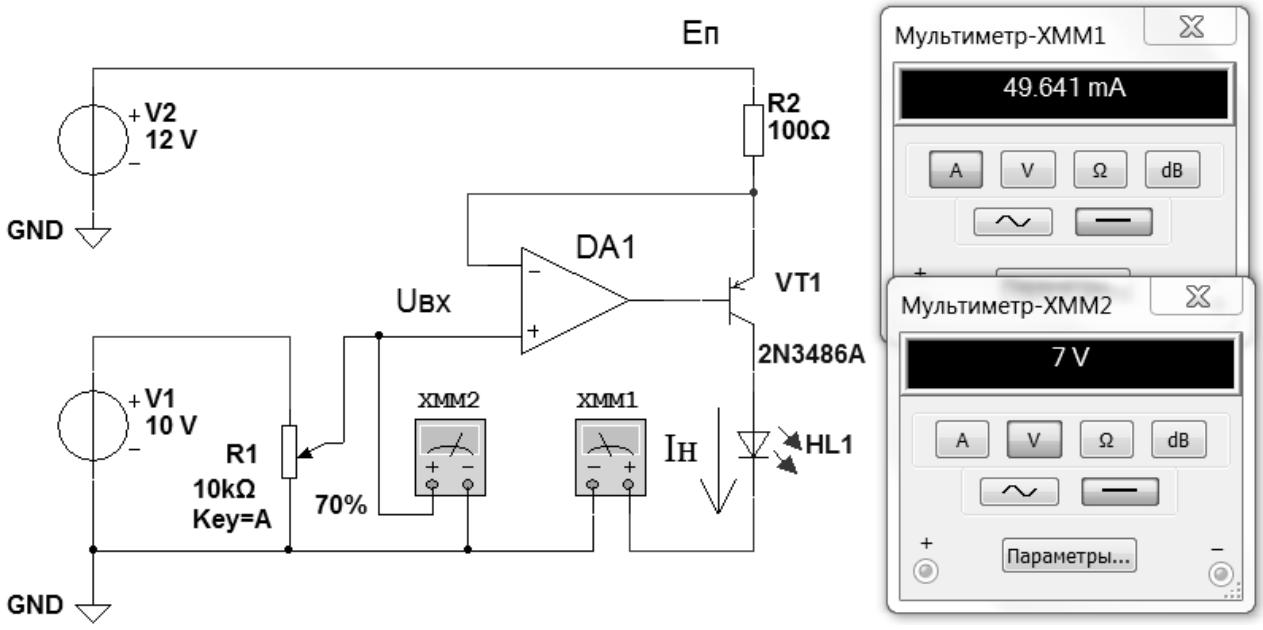

Рисунок 4.4 – Схема преобразователя напряжения в ток на ОУ

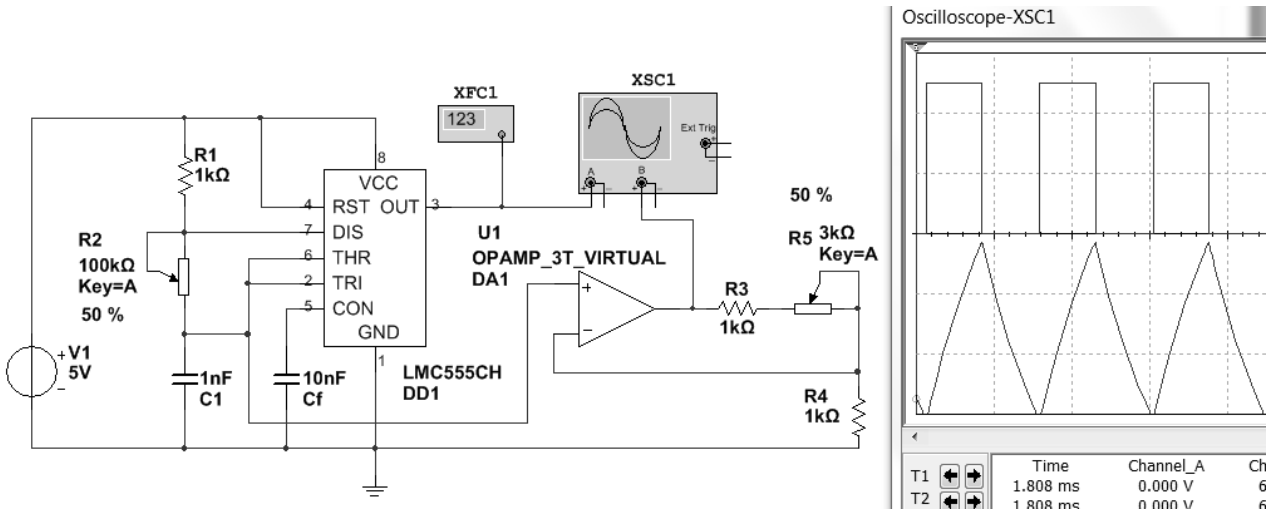

Рисунок 4.5 – Схема генератора сигналов прямоугольной и треугольной форм на ОУ

Задача 1. Выполните расчет тока I_H источника тока по указанным на рисунке 4.1 параметрам его элементов. Составьте эту схему в Multisim и исследуйте её работу. Сравните показания мультиметра *XMM*1 с данными, полученными в результате расчета.

Задача 2. Выполните расчет $U_{ВЫХ}$ преобразователя сопротивления в напряжение по указанным на рисунке 4.2 параметрам его элементов. Составьте эту схему в Multisim и исследуйте её работу. Сравните показания мультиметра *XMM*1 с данными, полученными в результате расчета.

Задача 3. Выполните расчет $U_{ВЫХ}$ преобразователя тока в напряжение по указанным на рисунке 4.3 параметрам его элементов. Составьте эту схему в Multisim и исследуйте её работу. Сравните показания мультиметра *XMM*1 с данными, полученными в результате расчета.

Задача 4. Составьте схему, приведенную на рисунке 4.4, в Multisim и исследуйте её работу, используя показания мультиметров *XMM*1 и *XMM*2. Изменяя сопротивление потенциометра *R*1, постройте график зависимости $I_H = f(U_{BX})$.

Задача 5. Составьте схему, приведенную на рисунке 4.5, в Multisim и исследуйте её работу по показаниям частотомера *XFC*1 и осциллографа *XSC*1, изменяя сопротивление потенциометров *R*2 и *R*5.

5 Преобразователи электрических измерительных сигналов: АЦП и ЦАП, параметры и схемы подключения к микроконтроллерам

***Аналого-цифровые преобразователи* (*АЦП*).** Большинство датчиков, от которых получают измерительную информацию о физических величинах, имеют аналоговые выходные сигналы. Для их ввода в цифровой прибор требуется предварительное преобразование в цифровой формат. Это делается с помощью АЦП, которые преобразуют аналоговые значения в цифровые с заданной точностью.

При таком преобразовании осуществляется квантование аналогового сигнала, т. е. мгновенные значения аналогового сигнала ограничиваются определенными уровнями, называемыми уровнями квантования.

Характеристика идеального квантования имеет вид, приведенный на рисунке 5.1.

Квантование представляет собой округление аналоговой величины до ближайшего уровня квантования, т. е. максимальная погрешность квантования равна $\pm 0{,}5h$ (h − шаг квантования).

К основным характеристикам АЦП относят число разрядов, время преобразования $t_{ПР}$, величину опорного напряжения $U_{ОП}$, величину напряжения питания $U_П$, нелинейность и др. Число разрядов − количество разрядов кода, связанного с аналоговой величиной, которое может вырабатывать АЦП.

Рисунок 5.1 – Идеальное квантование аналогового сигнала

Разрешающую способность АЦП определяют величиной, обратной максимальному числу кодовых комбинаций на выходе АЦП. Так, 10-разрядный АЦП

имеет разрешающую способность $(2^{10} = 1024)^{-1}$, т. е. при шкале АЦП, соответствующей 5 В, абсолютное значение шага квантования не превышает 5 мВ. Время преобразования $t_{ПР}$ − интервал времени от момента заданного изменения сигнала на входе АЦП до появления на его выходе соответствующего устойчивого кода.

Опорное напряжение определяет максимальное напряжение на входе АЦП, его значение соответствует коду 1023 для 10-разрядного АЦП. Например, при $U_{ОП}$ = 5 В и нулевом входном напряжении 10-разрядное АЦП выдаст на выходе 0, при входном напряжении 2,5 В на выходе будет значение 512 (половина от 1023), при входном напряжении 5 В выходной код будет равен 1023.

При $U_{ОП}$ = 2,5 В и нулевом входном напряжении 12-разрядное АЦП выдаст при нулевом входном напряжении на выходе 0, при входном напряжении 1,25 В на выходе будет значение 2048 (половина от 4095), при входном напряжении 2,5 В выходной код будет равен 4095. Очевидно, что чем выше разрядность АЦП и меньше $U_{ОП}$, тем меньше шаг квантования.

Широкое распространение получили АЦП в интегральном исполнении с последовательным считыванием данных. Они используются в составе микропроцессорных устройств.

Например, микросхема *AD*7417 фирмы AnalogDevice представляет собой 10-разрядный АЦП.

Основные параметры его следующие:

− время преобразования составляет 15 мкс;

− количество аналоговых входов − 4;

− встроенный температурный датчик (–55 °С…+125 °С);

− встроенный индикатор превышения температурного порога;

− широкий диапазон напряжений питания (+2,7…+5,5 В);

– I^2C совместимый интерфейс.

Условное обозначение микросхемы приведено на рисунке 5.2.

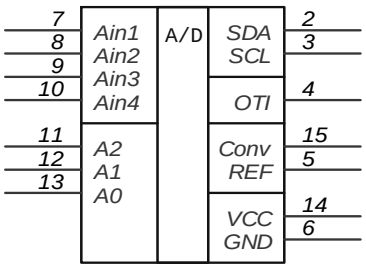

Рисунок 5.2 – Условное обозначение микросхемы АЦП *AD*7417

Назначение выводов:

– *VCC* – питание +5 В;

– *GND* – общий вывод;

– *SDA* – последовательная двунаправленная шина данных I^2C;

– *SCL* – цифровой вход тактовых импульсов интерфейса I^2C;

– *OTI* – выход цифрового сигнала индикатора превышения температурного порога. Выход устанавливается, если результат преобразования по каналу 0 больше, чем 8-битовое число, хранящееся в регистре *OTR*;

– *REF* – вход внешнего опорного напряжения +2,5 В. Чтобы использовать внутренний источник опорного напряжения, необходимо соединить этот вывод с выводом *GND*;

– *Conv* – вход цифрового сигнала начала аналого-цифрового преобразования. Если импульс больше 4 мкс, то его отрицательный фронт запускает цикл преобразования;

– A_{IN1}–A_{IN4} – аналоговые входные каналы;

– *A*0–*A*2 – три программируемых бита адреса микросхемы для последовательного интерфейса I^2C.

Микросхема *AD*7994 фирмы AnalogDevice представляет собой 12-разрядный АЦП. Условное обозначение микросхемы приведено на рисунке 5.3.

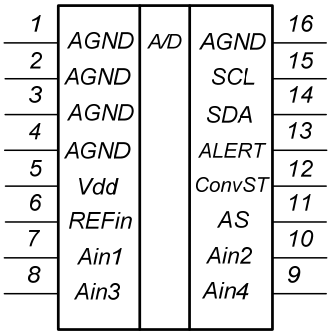

Рисунок 5.3 – Условное обозначение микросхемы АЦП *AD*7994

Основные параметры его следующие:

– количество аналоговых входов – 4;

– встроенный температурный датчик (–55 °С…+125 °С);

– встроенный индикатор превышения температурного порога;

– широкий диапазон напряжений питания (+2,7…+5,5 В);

– *I*2*C* совместимый интерфейс.

Назначение выводов:

– *Vdd* – питание +5 В;

– *AGND* – общий вывод;

– *SDA* – последовательная двунаправленная шина данных I^2C;

– *SCL* – цифровой вход тактовых импульсов интерфейса I^2C;

– *REFin* – вход внешнего опорного напряжения. Чтобы использовать внутренний источник опорного напряжения, необходимо соединить этот вывод с выводом *GND*;

– *ConvST* – вход цифрового сигнала начала аналого-цифрового преобразования. Если импульс больше 4 мкс, то его отрицательный фронт запускает цикл преобразования;

– *Vin*1–*Vin*4 – аналоговые входные каналы.

Пример подключения АЦП *AD*7994 к микропроцессору серии MCS-51 с одним аналоговым датчиком приведен на рисунке 5.4. Аналоговый сигнал от датчика через разъём *XS*1 поступает на аналоговый вход *Ain*1 АЦП *DD*2. После преобразования данные считываются микропроцессором *DD*1 по шине *SDA*.

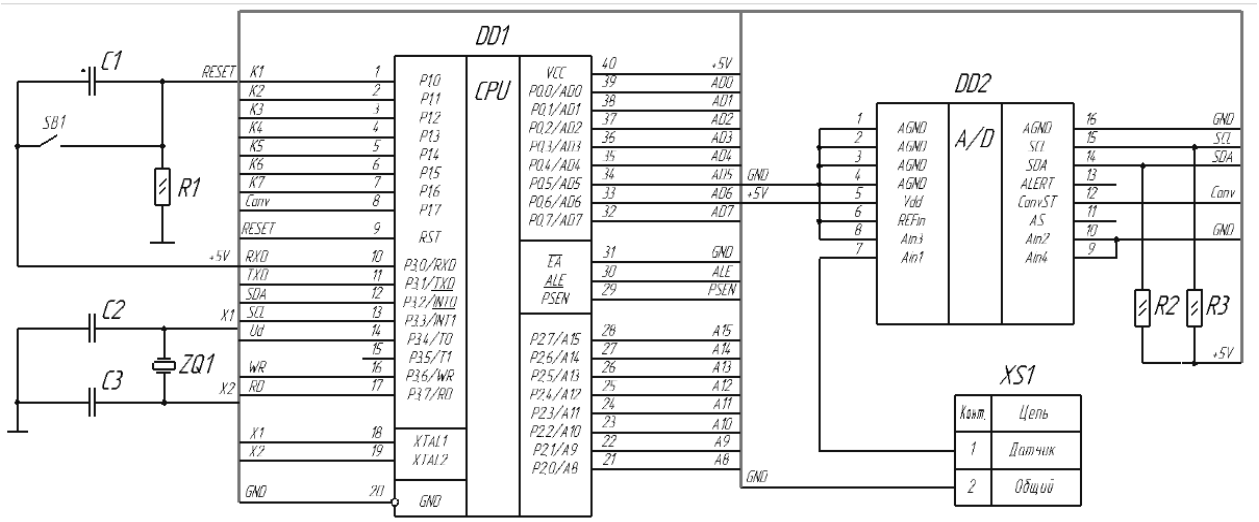

Рисунок 5.4 – Пример подключения АЦП *AD*7994 к микропроцессору серии MCS-51

***Цифро-аналоговые преобразователи* (*ЦАП*).** Предназначены для преобразования цифровых сигналов в аналоговые. Такое преобразование необходимо, например, при восстановлении аналогового сигнала, предварительно преобразованного в цифровой для передачи на большое расстояние или хранения (таким сигналом, в частности, может быть звук).

Другой пример использования такого преобразования − получение управляющего сигнала при цифровом управлении устройствами, режим работы которых определяется непосредственно аналоговым сигналом (что, в частности, имеет место при управлении электродвигателями).

Основными параметрами ЦАП являются:

− шаг квантования (разрешающая способность) – приращение выходного сигнала при изменении входного кода на единицу младшего разряда. Определяется числом разрядов, чем больше число разрядов, тем меньше шаг квантования;

− диапазон изменения выходного сигнала или максимальное выходное напряжение U_{max};

− максимальная частота преобразования f_{max}, при которой параметры преобразователя соответствуют заданным значениям.

Эта характеристика определяет быстродействие преобразователя. Оно оценивается по времени изменения сигнала на выходе при изменении старшего разряда входного кода.

Не менее важными параметрами ЦАП являются метрологические характеристики. Их получают, сравнивая идеальную характеристику преобразования с реальной. Характеристика преобразования – это ступенчатая кривая, получаемая на выходе ЦАП при последовательном изменении входного кода от мини-

мального до максимального. Если аппаратных погрешностей нет, то средние точки ступенек характеристики располагаются на прямой линии. В реальных преобразователях размеры и форма ступенек могут отличаться от идеальных.

Максимальное отклонение значения выходного сигнала от идеального во всем диапазоне преобразования – это нелинейность преобразователя. Измеряется в долях кванта или по отношению к диапазону изменения выходного сигнала. Оценивают также разность между максимальными расчетными и фактическими значениями выходного сигнала (погрешность шкалы), смещение характеристики преобразования, значение шумов, чувствительность к изменению напряжения питания, температурную стабильность и др.

Микросхемы ЦАП, выпускаемые промышленностью, различаются количеством разрядов (от 8 до 24), быстродействием (время преобразования от наносекунд до микросекунд), величиной опорного напряжения, погрешностью преобразования и другими параметрами. На рисунке 5.5 приведена схема для моделирования работы 8-разрядного ЦАП *IDAC*8 в Multisim.

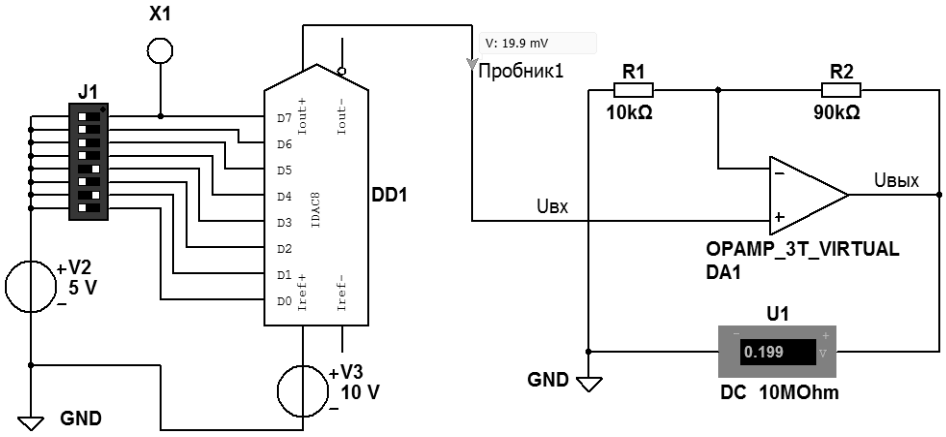

Рисунок 5.5 – Схема для моделирования работы ЦАП *IDAC*8 в Multisim

На входы *D*7–*D*0 ЦАП *DD*1 подается 8-разрядное двоичное число с помощью переключателей *J*1. Опорное напряжение на ЦАП поступает от источника *V*3. Выходной сигнал ЦАП усиливается усилителем на *DA*1.

На рисунке 5.6 приведена схема для моделирования в Multisim работы генератора пилообразного напряжения, реализованного на двух 4-разрядных двоичных счетчиках *DD*1, *DD*2 и 8-разрядного ЦАП *DD*3.

Задача 1. Разработайте схему подключения трех аналоговых датчиков к АЦП *AD*7994, работающему совместно с микропроцессором серии MCS-51.

Задача 2. Разработайте схему подключения АЦП *AD*7417 к микропроцессору серии MCS-51.

Задача 3. По величине двоичного кода, выставленного на входах *D*7–*D*0, *DD*1 (см. рисунок 5.5) и показаниям «Пробник 1» определите шаг квантования ЦАП.

Задача 4. По величине параметров *R*1 и *R*2 усилителя на ОУ *DA*1 (см. рисунок 5.5), определите его коэффициент усиления.

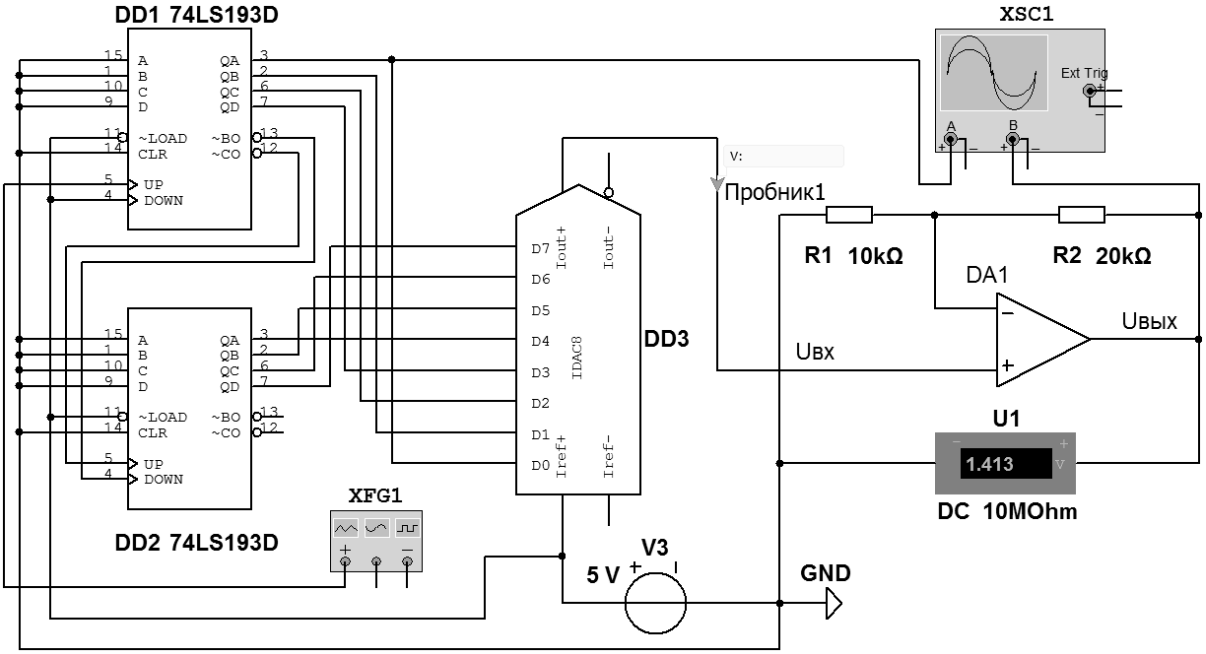

Рисунок 5.6 – Схема для моделирования работы генератора пилообразного напряжения на ЦАП в Multisim

Задача 5. Разработайте схему в Multisim для моделирования работы 16-разрядного ЦАП *IDAC*16.

Задача 6. По величине параметров *R*1 и *R*2 усилителя на ОУ *DA*1 (см. рисунок 5.6), определите его коэффициент усиления.

Задача 7. С какой частотой будут формироваться пилообразные импульсы на выходе *DA*1 (см. рисунок 5.6), если частота на выходе генератора *XFG*1 равна 256 кГц? Составьте схему в Multisim и исследуйте её работу.

6 Схемотехника подключения к микроконтроллерам аналоговых и дискретных электронных устройств

6.1 Схемотехника подключения к микроконтроллерам аналоговых электронных устройств

Совместимость микроконтроллеров и аналоговых электронных устройств обеспечивают АЦП и ЦАП. Диапазоны входных и выходных сигналов АЦП и ЦАП не всегда совпадают с диапазонами сигналов, генерируемых аналоговыми источниками, и с диапазонами сигналов, обеспечивающими работу аналоговых исполнительных элементов. В этом случае возникает необходимость в использовании между ними дополнительных буферных устройств – усилителей напряжения или мощности. На рисунке 6.1 приведена схема, обеспечивающая согласование выходного сигнала аналогового датчика с входом АЦП.

Аналоговый сигнал от датчика через разъем *XS*1 поступает на вход усилителя на *DA*1 и далее на АЦП *DD*2. После преобразования в цифровой код считывается микропроцессором *DD*1.

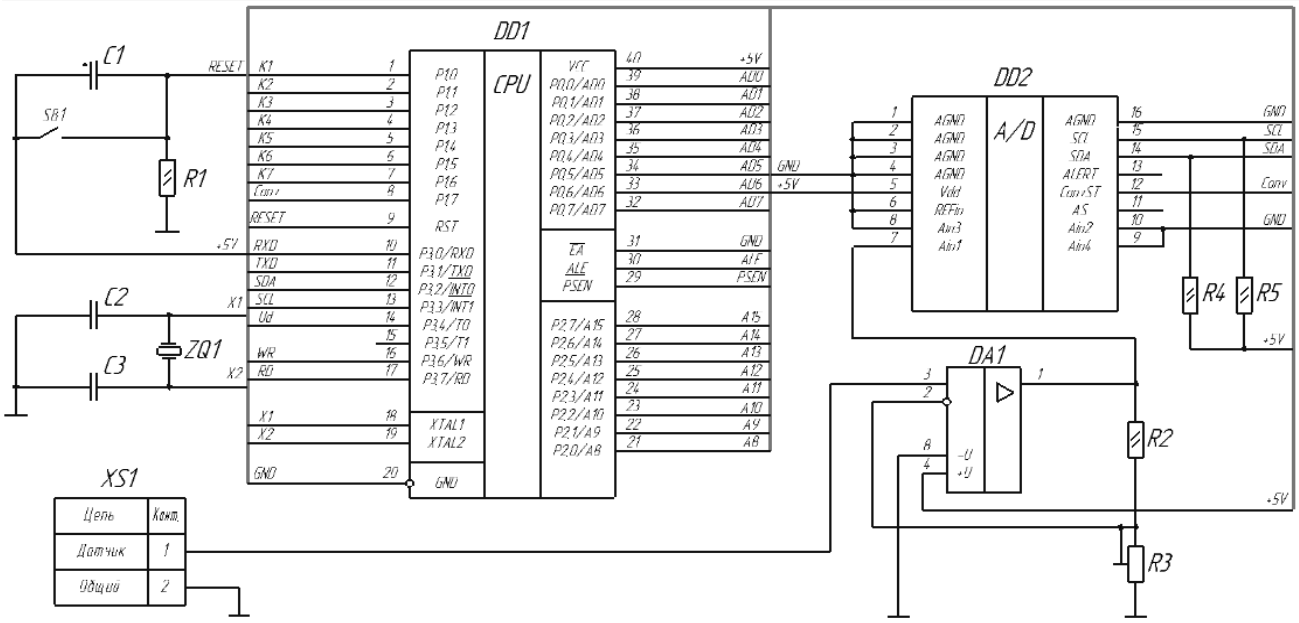

Рисунок 6.1 – Пример согласования выхода датчика с входом АЦП в микропроцессорном устройстве

На рисунке 6.2 приведена схема подключения потенциометра *R*1 к плате Arduino. При вращении вала потенциометра можно изменять сопротивление по обе стороны от его центрального вывода, что приводит к изменению напряжения на центральном выводе. Это напряжение является аналоговым сигналом, который поступает на аналоговый вход *A*0 платы Arduino.

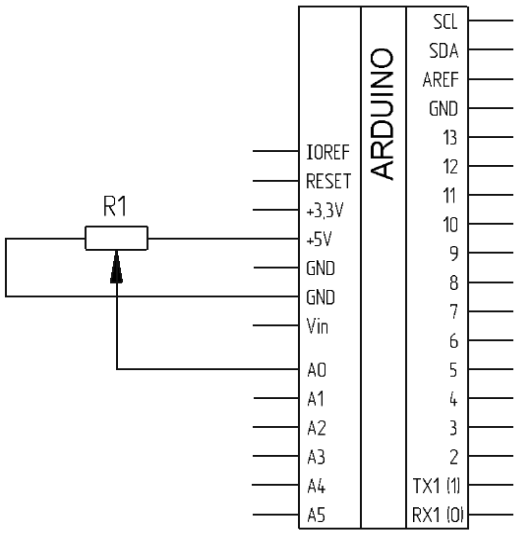

Рисунок 6.2 – Схема подключения аналогового датчика (потенциометра *R*1) к плате Arduino

Если ручка потенциометра повернута до упора в одну сторону, то на вход 10-разрядного АЦП, встроенного в контроллер *ATmega*32U4, расположенный на плате Arduino, подается 0 В и результат преобразования равен 0. Если ручка потенциометра повернута до упора в другую сторону, то на вход АЦП пода-

ется +5 В и результат преобразования равен 1023. В промежуточных положениях ручки потенциометра АЦП возвращает число между 0 и 1023, которое пропорционально напряжению на его среднем выводе.

Задача 1. Разработайте схему согласования двух аналоговых датчиков с максимальными выходными сигналами $U_{ВЫХ.ДАТ.1}$ = 126 мВ и $U_{ВЫХ.ДАТ.2}$ = 153 мВ с АЦП *AD*7417.

Задача 2. Разработайте схему согласования трех аналоговых датчиков с максимальными выходными сигналами $U_{ВЫХ.ДАТ.1}$ = 112 мВ, $U_{ВЫХ.ДАТ.2}$ = 145 мВ и $U_{ВЫХ.ДАТ.3}$ = 128 мВ с АЦП, встроенным в микроконтроллер *ATmega*328.

Задача 3. Нарисуйте схему подключения двух потенциометров к плате Arduino, используя её контакты *A*2 и *A*5.

6.2 Схемотехника подключения к микроконтроллерам дискретных электронных устройств

На рисунке 6.3 приведена схема подключения дискретного датчика (кнопки KY-004) к плате Arduino.

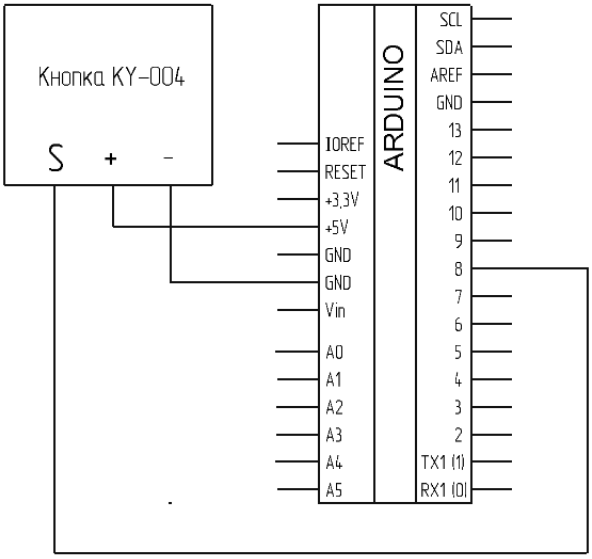

Рисунок 6.3 – Схема подключения дискретного датчика (кнопки KY-004) к плате Arduino

При нажатии клавиши соединяются две точки цепи. Когда клавиша не нажата, нет никакой связи между двумя ее выводами и нижний её вывод через резистор подключен к общей шине GND и на вход 8 платы Arduino подается сигнал низкого уровня, или логический нуль. При нажатии на кнопку устанавливается соединение между двумя её выводами и на вход 8 подается +5 В или сигнал высокого уровня, соответствующий логической единице.

На рисунке 6.4 приведена схема подключения клавиатуры к микропроцессору MCS-51.

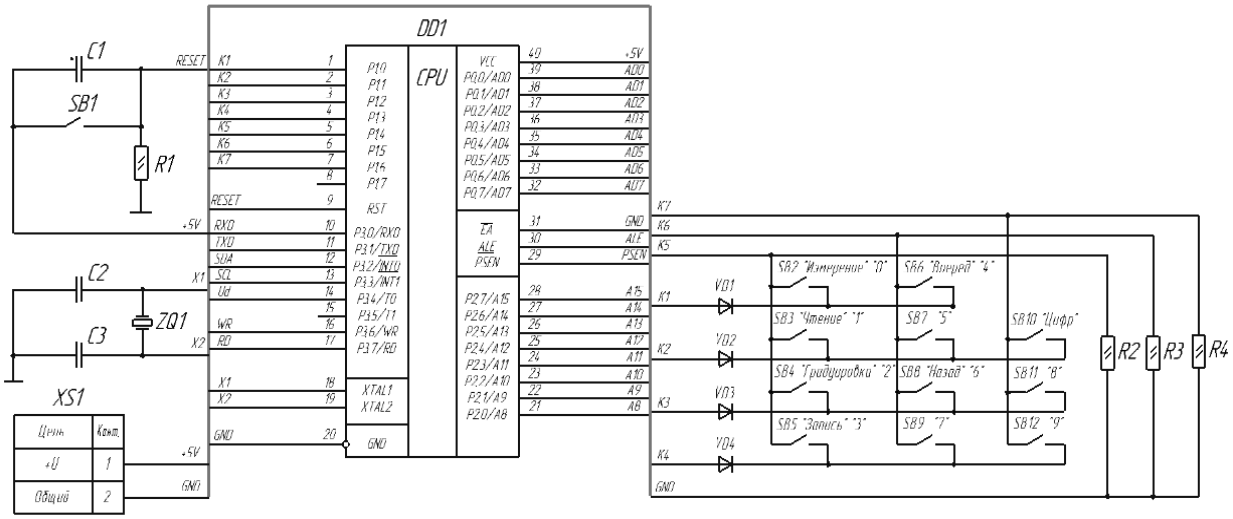

Рисунок 6.4 – Схема подключения клавиатуры к контроллеру MCS-51

Сканирование клавиш *SB*2–*SB*12 осуществляется программно последовательной передачей сигналов от *DD*1 по проводникам *K*1–*K*4 и их приемом и анализом по проводникам *K*5–*K*7.

Задача 4. Разработайте схему подключения четырех дискретных датчиков к входам 1, 3, 6, 7 контроллера, изображенного на рисунке 6.3.

Задача 5. Разработайте схему подключения трех дискретных датчиков к входам 5, 6, 8 контроллера, изображенного на рисунке 6.3.

Задача 6. Разработайте схему подключения двенадцати клавиш к контроллеру, изображенному на рисунке 6.4.

Задача 7. Разработайте схему подключения шестнадцати клавиш к контроллеру, изображенному на рисунке 6.4.

6.3 Схемотехника подключения к микроконтроллерам дисплеев и исполнительных устройств

К периферийному оборудованию приборов на основе контроллеров, кроме рассмотренных ранее датчиков, относятся дисплеи, устройства сигнализации, исполнительные устройства и др.

На рисунке 6.5 показан 4-разрядный семисегментный LED-индикатор с I^2C драйвером TM1637. Он имеет следующие характеристики:

− четыре семисегментные цифры и разделительные точки с общим анодом;
− четыре контакта подключения;
− регулируемую яркость – до восьми уровней яркости;
− логические уровни – 5 или 3,3 В;
− ток потребления – до 80 мА.

Интерфейс управления:

− *GND* – общий;
− *VCC* – питание;
− *DIO* − вход данных;

– *CLK* – вход стробирования данных.

Схема подключения к плате Arduino Nano 4-разрядного LED-дисплея с I^2C драйвером TM1637 показана на рисунке 6.6.

Рисунок 6.5 – Внешний вид 4-разрядного LED-дисплея с I^2C драйвером TM1637

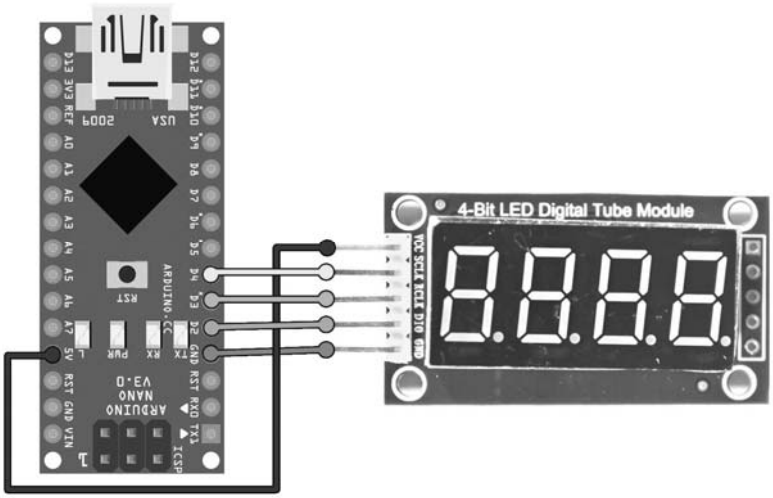

Рисунок 6.6 – Схема подключения к плате Arduino Nano 4-разрядного LED-дисплея с I^2C драйвером TM1637

На рисунке 6.7 показана микросхема жидкокристаллического индикатора (ЖКИ) WM-C1602N.

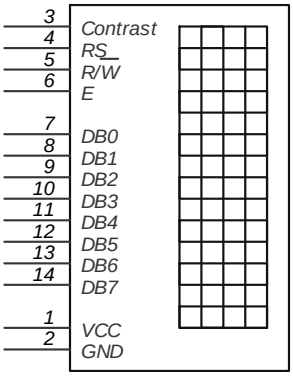

Рисунок 6.7 – Условное обозначение на схемах микросхемы ЖКИ WM-C1602N

Она имеет 2 строки по 16 символов. Индикатор работает под управлением встроенного контроллера. Назначение выводов у этой микросхемы следующее:

– *VCC* – питание +5 В;

– *GND* – общий вывод;

– *Contrast* – вход для регулировки контрастности изображения символов на индикаторе;

– *RS* – вход выбора регистра: 0 – регистр команд; 1 – регистр данных;

– *RW* – выбор режима записи или чтения;

– *E* – вход разрешения чтения/записи;

– *DB*0–*DB*7 – выводы для передачи данных.

Схема подключения к плате Arduino LCD-дисплея 1602 показана на рисунке 6.8.

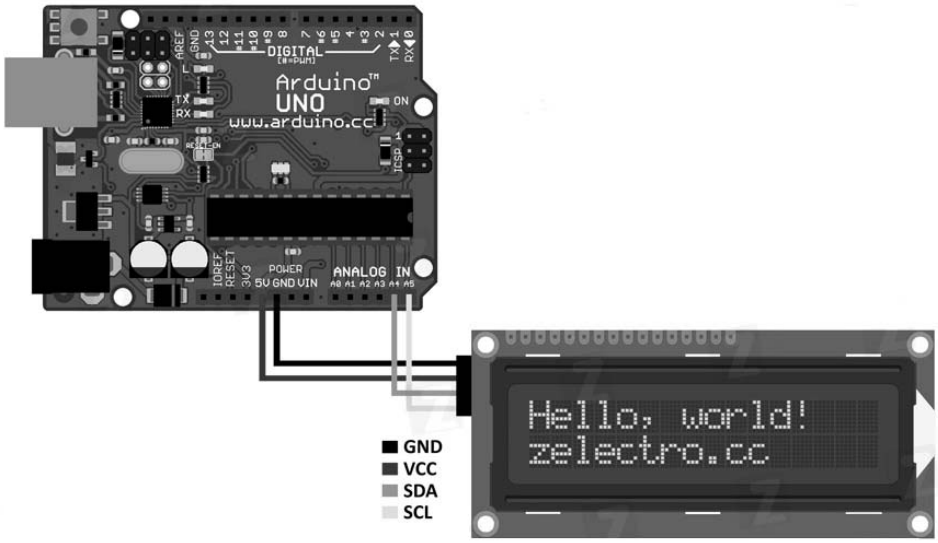

Рисунок 6.8 – Схема подключения к плате Arduino LCD-дисплея WM-C1602N

Модуль оборудован четырехпиновым разъемом, в котором:

− *SCL* – последовательная линия тактирования (SerialCLock);

− *SDA* – последовательная линия данных (SerialDAta);

− *VCC* – « +» питания;

− *GND* – «-» питания.

Для работы с данным модулем используется библиотека LiquidCrystal_I2C1602V1.

На рисунке 6.9 показана микросхема жидкокристаллического индикатора WM-C1602N совместно с клавиатурой.

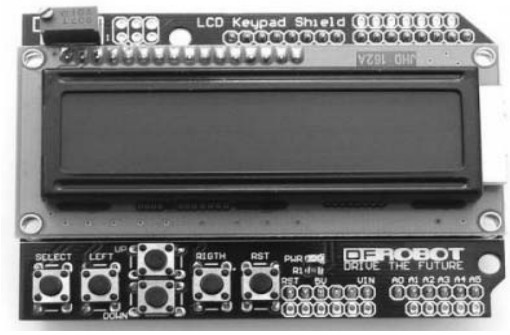

Рисунок 6.9 – Жидкокристаллический индикатор WM-C1602N с клавиатурой

В состав платы входит LCD-дисплей и шесть кнопок. Пины 4–10 задействованы для управления LCD-дисплеем. На аналоговый пин 0 считываются сигналы с кнопок. Дисплей в данной сборке работает в четырехбитном режиме. Подключение производится путем стыковки дисплея с платой из семейства Arduino (Diecimila, Duemilanove, UNO, Mega, Mega2560, Mega ADK).

Управление мощными исполнительными устройствами, подключаемыми к цифровым приборам, может быть реализовано с помощью электромагнитного реле. На рисунке 6.10 показан внешний вид реле SRD-05VDC.

Рисунок 6.10 – Внешний вид реле SRD-05VDC

Данное реле управляется напряжением +5 В и способно коммутировать до 10 А 30 В DC и 10 А 250 В AC.

Реле имеет две раздельные цепи: цепь управления, представленную контактами A1, A2, и управляемую цепь, представленную контактами 1, 2, 3. Цепи электрически не связаны между собой (рисунок 6.11).

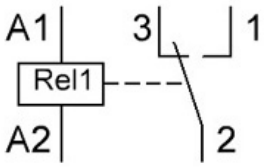

Рисунок 6.11 – Коммутационная схема реле SRD-05VDC

Релейный модуль имеет три вывода:

1) *VCC*: «+» питания;
2) *GND*: «–» питания;
3) *IN*: вывод входного сигнала.

Схема подключения реле к плате Arduino представлена на рисунке 6.12.

Управление электродвигателем. Напрямую к цифровым контактам Arduino можно подключать только устройства, потребляющие небольшую мощность, например, светодиод или динамик. Для доказательства следует рассмотреть возможность подключения электродвигателя с сопротивлением 10 Ом. При напряжении +5 В (выдаваемым пином Arduino) в соответствии с законом Ома $U = I \cdot R$ через мотор потечет ток $I = U / R = 5 / 10 = 0{,}5$ А = 500 мА, что намного больше, чем допустимый ток через цифровой выход (пин) Arduino, равный 40 мА. Поэтому при подключении электродвигателя непосредственно к пину Arduino, контроллер может выйти из строя.

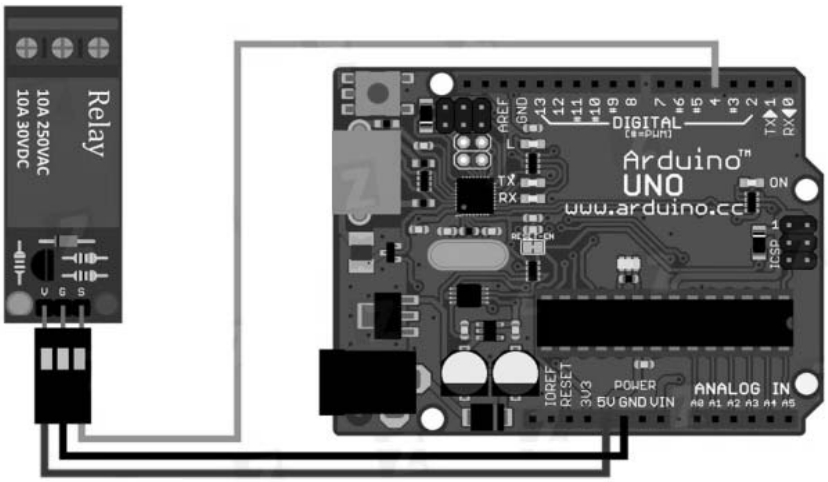

Рисунок 6.12 - Схема подключения реле SRD-05VDC к плате Arduino

Для управления электродвигателем можно использовать реле. Схема подключения электродвигателя к контроллеру через реле приведена на рисунке 6.13.

Работу электродвигателя также можно реализовать в реверсивном режиме (обеспечить вращение в обе стороны). Для этого нужно использовать два реле (рисунок 6.14).

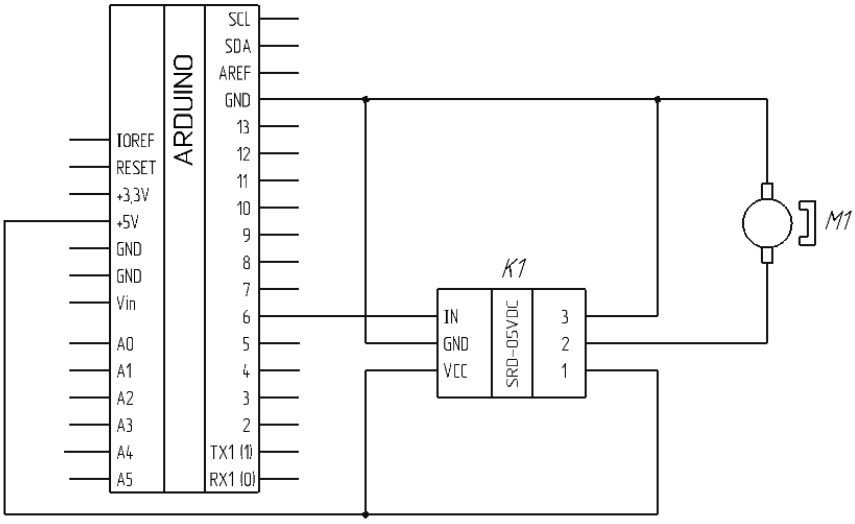

Рисунок 6.13 – Схема подключения электродвигателя к плате Arduino через реле SRD-05VDC

Задача 8. Разработайте принципиальную схему подключения к контроллеру Arduino Nano 4-разрядного LED-дисплея с I^2C драйвером TM1637.

Задача 9. Разработайте принципиальную схему подключения к контроллеру Arduino UNO LCD-дисплея 1602.

Задача 10. Разработайте принципиальную схему подключения к контроллеру Arduino UNO реле SRD-05VDC.

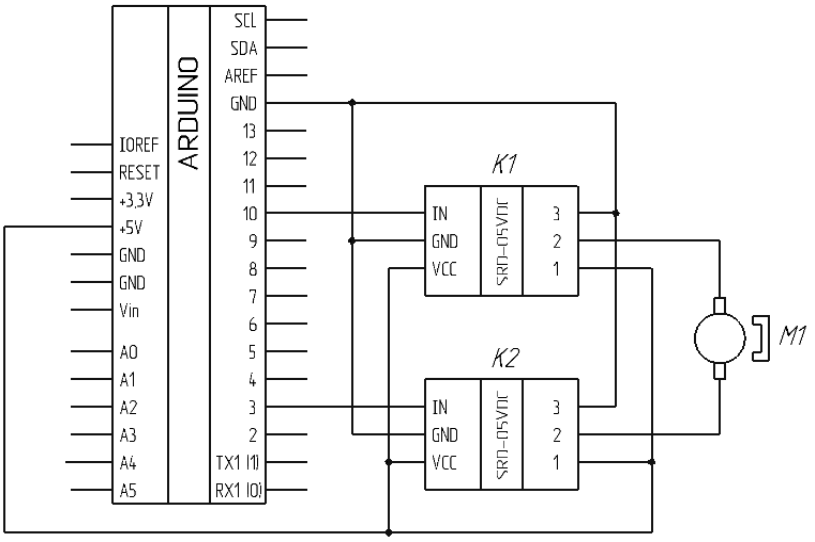

Рисунок 6.14 – Схема подключения электродвигателя к контроллеру, обеспечивающая реверс вращения его вала

Задача 11. Разработайте принципиальную схему подключения к контроллеру Arduino UNO электродвигателя через реле SRD-05VDC.

Задача 12. Разработайте принципиальную схему, обеспечивающую реверс вращения электродвигателя, на контроллере Arduino UNO с использованием двух реле SRD-05VDC.

7 Автономные источники питания: виды, параметры. Схемотехника зарядных устройств для аккумуляторов. Источники вторичного электропитания. Преобразователи переменного напряжения в постоянное. Стабилизаторы напряжения и тока

Автономные источники питания*: *виды*, *параметры. Схемотехника зарядных устройств для аккумуляторов. В связи с быстрым развитием портативных цифровых приборов для питания их электрической энергией используются автономные источники: одноразовые гальванические элементы и элементы многоразового использования − аккумуляторы.

В гальванических элементах используются реактивы для одноразового получения электрической энергии. Как только взаимодействие реактивов прекращается, выработка элементом электрической энергии завершается. Производство такой электроэнергии чрезвычайно дорого, а использованные элементы без правильной утилизации сильно загрязняют окружающую среду. В них содержится непрореагировавшая щелочь − хлорид аммония. Практический опыт показал, что в природе такие остатки щелочи постепенно убивают вокруг все живые организмы, растения, разъедают кожу. Поэтому оборот данных элементов стараются ограничивать, а их стоимость с каждым годом повышается.

Для исправления данной проблемы были изобретены аккумуляторы. При обратном протекании тока в них реактивы восстанавливаются до первоначального состояния. Однако, в обращении с аккумуляторами есть ряд нюансов − они требуют особого контроля за зарядом и разрядом, и его нарушение приводит к повреждению аккумулятора, а иногда − к пожару и взрыву.

Производимые в настоящее время аккумуляторы отличаются технологией изготовления и химическим составом.

Никель-металлгидридные (NiMH) аккумуляторы имеют высокую электрическую емкость, способны быстро заряжаться, а так же отличаются высочайшей надежностью. Они идеально подходят для питания устройств с высоким энергопотреблением, обеспечивают более чем в 3 раза большую продолжительность их работы по сравнению с алкалиновыми батарейками, могут быть перезаряжены до 1000 раз, экологически безопасны, поскольку не содержат опасных веществ, таких как кадмий или ртуть.

Никель-кадмиевые (NiCd) аккумуляторы обладают увеличеннным сроком службы, однако продолжительность разряда у них меньше, чем у NiMH аккумуляторов. Они являются наиболее дешевыми и могут обеспечить до 1000 циклов заряда-разряда. Эти аккумуляторы хорошо зарекомендовали себя при низких температурах и в жестких условиях эксплуатации.

Литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы очень легкие и имеют увеличенную электрическую емкость.

Свинцово-кислотные аккумуляторы используются для питания устройств с высоким энергопотреблением, не имеют эффекта памяти, не поддаются быстрой зарядке. Среди современных аккумуляторных батарей, семейство свинцово-кислотных аккумуляторов имеет самую низкую плотность энергии, которая измеряется в Ватт/кг, что делает их непригодными для портативных устройств, которым требуется компактный источник питания.

Номинальное напряжение аккумуляторов NiMH и NiCd – 1,2 В, Li-ion – 3,6…3,7 В, а свинцово-кислотных − 2, 6, 12 В и т. д.

Не существует универсального способа зарядки, который подходил бы для всех аккумуляторов. Разные типы аккумуляторов используют разные химические процессы, обеспечивающие их работу. В результате, разные типы аккумуляторов необходимо заряжать по-разному. Неправильная зарядка аккумулятора может существенно сократить срок его службы или вывести его из строя без возможности восстановления.

Зарядные устройства должны обеспечивать выполнение следующих функций: защиту от перегрева аккумулятора при зарядке (перегрев может вызвать дальнейшее возгорание), автоматическое выключение подачи тока при полной зарядке аккумулятора, что значительно увеличивает срок его службы, полную разрядку аккумулятора перед процессом зарядки, что очень важно, особенно для никель-кадмиевых батарей. В этом случае не образуется так называемый эффект памяти, когда аккумуляторы постепенно теряют емкость, если начинать зарядку не с нуля и заканчивать не на 100 %.

Рассмотрим пример зарядного устройства для никель-кадмиевых аккумуляторов. Традиционная зарядка никель-кадмиевых аккумуляторов током,

значение которого в десять раз меньше емкости аккумулятора, требует значительного времени, поскольку в этом случае для гарантированной полной зарядки требуется затратить более десяти часов.

Между тем аккумуляторы можно безопасно заряжать и большими токами, соответственно сокращая время зарядки. При этом, однако, необходим постоянный контроль за состоянием заряжаемого аккумулятора, чтобы избежать его выхода из строя.

Момент, когда никель-кадмиевый аккумулятор полностью заряжен, можно надежно установить, измеряя зависимость его напряжения от времени зарядки. Периодически измеряя напряжение на заряжаемом аккумуляторе, определяют момент, когда напряжение начнет уменьшаться, и прекращают зарядку или переводят зарядное устройство в безопасный режим зарядки малым током.

Второй параметр, который принято контролировать при быстрой зарядке, – время. Его рассчитывают исходя из тока быстрой зарядки, и даже если за это время напряжение на аккумуляторе не достигло максимума, зарядку прекращают.

Для создания зарядных устройств выпускаются специализированные микросхемы которые выполняют перечисленные выше функции контроля и управления. К их числу относится, например, микросхема *MAX*713. Она позволяет заряжать как единичный элемент, так и батарею, состоящую из нескольких аккумуляторов.

Контрольное время для быстрой зарядки может быть установлено в пределах от 22 до 264 мин (восемь дискретных значений), а ток − в пределах от 4 С до 0,33 С (С − емкость аккумулятора в мА·ч). Все эти параметры устанавливаются программно. Предусмотрена в микросхеме *MAX*713 и функция контроля температуры заряжаемого аккумулятора.

По окончании режима быстрой зарядки ток снижают до значений, безопасных в течение длительного периода. В микросхеме *MAX*713 это значение выбрано около 30 мА и не зависит от тока быстрой зарядки.

Принципиальная схема зарядного устройства на микросхеме *MAX*713 приведена на рисунке 7.1.

Источник питания напряжением 12 В подключают к разъему *X*1. Он должен обеспечивать ток нагрузки, по крайней мере на 50 мА больше максимального зарядного тока. Светодиод *HL*1 индицирует работу устройства в целом, а светодиод *HL*2 − режим быстрой зарядки. Если он не светится, то это означает, что зарядка закончена. Аккумулятор (батарею) подключают к разъему *X*2. Зарядный ток регулирует транзистор *VT*1. Если после включения устройства с подключенным аккумулятором светодиод *HL*2 не светится, значит, аккумулятор заряжен.

Приведенные на схеме номиналы элементов соответствуют минимальному напряжению источника питания 12 В и току зарядки 0,25 А. При напряжении питания 12 В можно заряжать батареи не более чем из семи аккумуляторов.

Источники вторичного электропитания. Преобразователи переменного напряжения в постоянное. Стабилизаторы напряжения и тока. При использовании для питания приборов сетевого переменного напряжения 220 В

требуются специальные устройства, понижающие его амплитуду, обеспечивающие его выпрямление и стабилизацию. Для повышения метрологических характеристик приборов, питающихся от автономных источников, их выходные напряжения также стабилизируют в силу изменения ЭДС с течением времени.

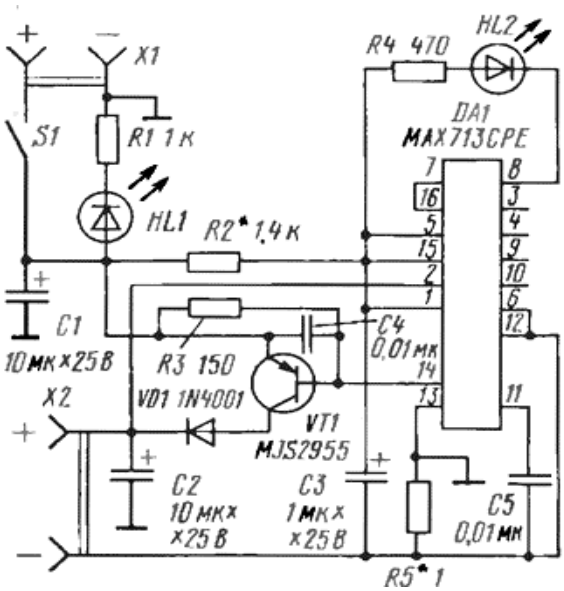

Рисунок 7.1 − Принципиальная схема зарядного устройства на микросхеме *MAX*713

Для формирования однополярного стабилизированного напряжения может быть использована одна из многочисленных микросхем стабилизаторов напряжения с типовой схемой включения. На рисунке 7.2 это микросхема *DA*1 (например, КР1157ЕН15В, максимальный ток нагрузки которой равен 0,25 А, а выходное стабилизированное напряжение $U_{ВЫХ.СТАБ}$ = (15 ± 0,3) В).

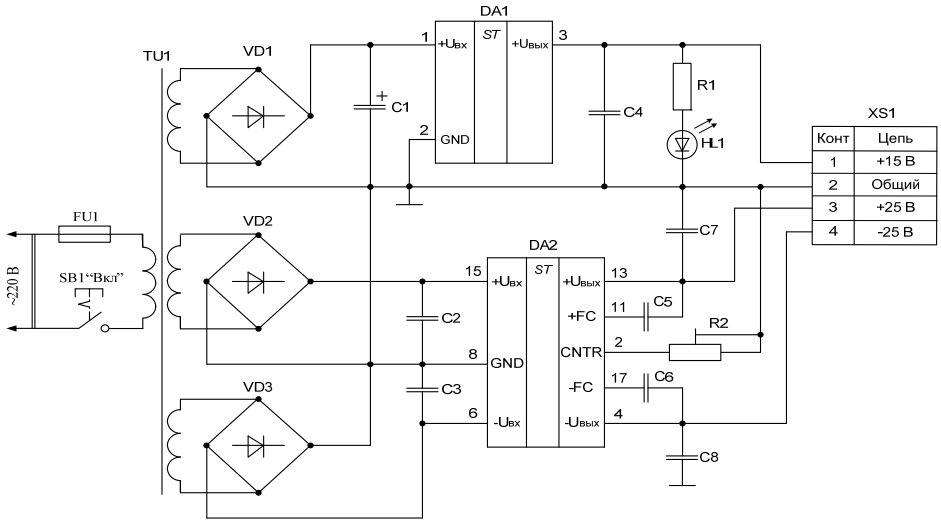

Рисунок 7.2 – Схема стабилизированного источника питания с однополярным и двухполярным выходным напряжением

На этом же рисунке микросхема *DA*2 выдаёт в нагрузку двухполярное стабилизированное напряжение. Если взять *DA*2 КР142ЕН6 с регулируемым выходным напряжением, максимальный ток нагрузки которой равен 0,2 А,

выходное стабилизированное напряжение $U_{ВЫХ.СТАБ.}$ может быть установлено с помощью подстроечного резистора $R2$ в диапазоне от ±15 до ±25 В.

Понижение амплитуды сетевого напряжения до требуемых значений осуществляется с помощью трансформатора $TU1$.

Для выпрямления переменного напряжения используются мостовые диодные выпрямители $VD1$–$VD3$.

Светодиод $HL1$ выполняет функцию индикатора включенного состояния источника питания.

Сопротивление резистора $R1$, обеспечивающее токовый режим работы светодиода $HL1$,

$$R1 = \frac{U_П - U_{ПР}}{I_{ПР.HL1}}, \tag{7.1}$$

где $I_{ПР.HL1}$ – прямой ток светодиода, А;

$U_П$ – напряжение питания, В;

$U_{ПР}$ – падение напряжения на светодиоде в рабочем режиме, В.

Мощность, рассеиваемая на светодиоде при протекании через него прямого тока,

$$P_{R1} = (I_{ПР.HL1})^2 \cdot R1. \tag{7.2}$$

Ёмкость конденсатора $C1$, используемого для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения, подаваемого на микросхему $DA1$,

$$C1 = \frac{I_Н + I_{ПР.HL1} + I_{ПОТР.DA1}}{2 \cdot f \cdot U_П}, \tag{7.3}$$

где $I_Н$ – ток нагрузки, А;

$I_{ПОТР.DA1}$ – ток, потребляемый $DA1$, А;

$U_П$– напряжение пульсаций выпрямленного напряжения, В;

f – частота переменного напряжения в сети, Гц.

На рисунке 7.3 приведена схема стабилизатора напряжения на основе микросхемы LM338K.

Необходимое значение выходного напряжения устанавливается с помощью регулируемого делителя $R1$, $R3$. Резистором $R2$ регулируется ток нагрузки, измеряемый мультиметром $XMM2$. Напряжение $U_{СТ}$ на выходе стабилизатора измеряется вольтметром $U1$. Ток, потребляемый от источника E, измеряется мультиметром $XMM1$.

Основным параметром стабилизаторов напряжения является коэффициент стабилизации

$$K_{СТ} = \frac{U_{ВХ.\max} - U_{ВХ.\mathrm{mix}}}{U_{ВЫХ.СТ1} - U_{ВЫХ.СТ2}}. \tag{7.4}$$

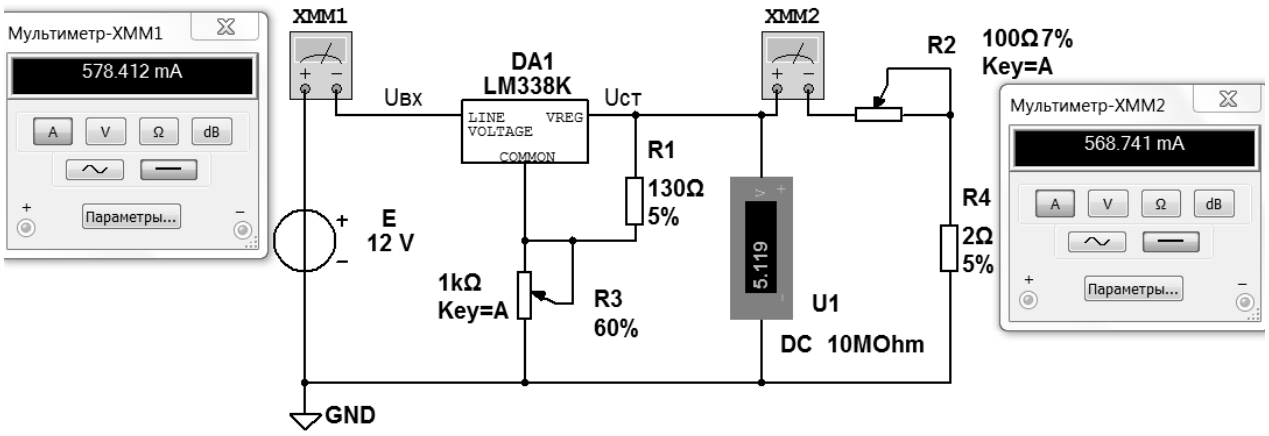

Рисунок 7.3 – Схема стабилизатора напряжения на основе микросхемы LM338K

Задача 1. Определите из справочных источников основные параметры микросхемы *MAX*713.

Задача 2. Разработайте принципиальную схему зарядного устройства на контроллере Arduino UNO для зарядки батареи из трех аккумуляторов NiMH.

Задача 3. К схеме, приведенной на рисунке 7.2, подберите из справочных источников микросхему *DA*1 с $U_{ВЫХ.СТАБ}$ = + 5 В и I_H = 3 А. Составьте схему, приведенную на рисунке 7.2, в Multisim и исследуйте её работу. Рассчитайте $K_{СТ}$.

Задача 4. К схеме, приведенной на рисунке 7.2, подберите из справочных источников светодиод *HL*1 с зеленым цветом свечения. Задавшись величиной прямого тока через него $I_{ПР.HL1}$ = 20 мА, рассчитайте сопротивление резистора *R*1 и рассеиваемую на нем мощность.

Задача 5. Для схемы, приведенной на рисунке 7.2, рассчитайте емкость конденсатора *C*1, если I_H = 1,2 А, $I_{ПР.HL1}$ = 20 мА, $U_П$ = 0,8 В, f = 50 Гц.

Задача 6. Составьте схему, приведенную на рисунке 7.3, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к ней показанные на схеме приборы. Рассчитайте $K_{СТ}$.

8 Разработка структурных и принципиальных схем электронных устройств приборов на современной элементной базе. Автоматизация проектных работ при разработке нового электронного оборудования с использованием ЭВМ и специального программного обеспечения

Разработка структурных и принципиальных схем электронных устройств приборов на современной элементной базе. Современные цифровые измерительные приборы создаются на основе контроллеров, многие из которых имеют встроенные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, флеш-память программ, оперативную память, электрически-перепрограммируемую память для хранения результатов, средства связи с ЭВМ

через USB-порт и другие блоки. Это позволяет создавать компактные высокопроизводительные и многофункциональные приборы для измерений, контроля и диагностики.

Рассмотрим пример разработки алкотестера. Для количественной оценки концентрации алкоголя в крови необходимо в процессе измерений выполнять вычислительные операции с использованием исходных данных, ранее полученных при калибровке прибора и сохраняемых в его постоянной памяти, и текущих результатов контроля. Для этого в приборе должны быть предусмотрены следующие режимы работы: калибровки, измерения, хранения результатов, вывод их на дисплей и передачу на другие устройства.

Для практической реализации этих операций в одном приборе разработаем электронный цифровой блок на основе 8-битного *AVR* контроллера ATMega32U4 с тактовой частотой 16 МГц. Он имеет встроенные: флеш-память программ объёмом 32 Кбайта, оперативную память объёмом 2Кбайта, память EEPROM объёмом 1 Кбайт для хранения данных, обеспечивающую до 100000 циклов перезаписи, 10-разрядный АЦП. Диапазон питающих напряжений контроллера может изменяться от 2,7 до 5,5 В. Структурная схема такого прибора представлена на рисунке 8.1.

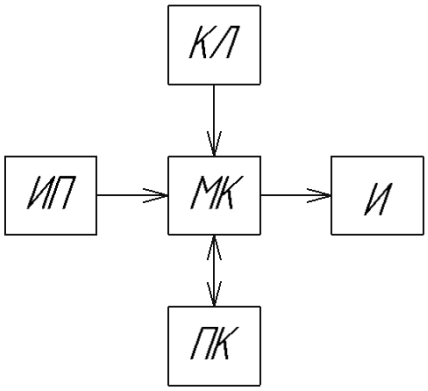

Рисунок 8.1 – Структурная схема цифрового измерительного прибора

Измерительный преобразователь (ИП) – датчик паров алкоголя в выдыхаемом воздухе, подключается к одному из аналоговых входов контроллера МК. С помощью клавиатуры (КЛ) осуществляется управление работой прибора в различных режимах. В проектируемом приборе предусмотрен обмен данными с ЭВМ (ПК) и вывод результатов измерений на устройство индикации (И).

Электрическая принципиальная схема прибора приведена на рисунке 8.2.

В качестве устройства обработки данных использован микроконтроллер ATMega32U4 (*DD*1). Его работа обеспечивается вспомогательными элементами: кварцевым резонатором *ZQ*1, резистором *R*1, конденсаторами *C*1 и *C*2. Через разъём *XS*1 контроллер подключен к источнику питания. *SB*1 – кнопка сброса микроконтроллера. Через разъём *XS*3 осуществляется обмен данными с ЭВМ.

Измерительный преобразователь подключен к аналоговому входу *DD*1 через разъём *XS*2.

Клавиатура подключена к одному из аналоговых входов контроллера и реализована на переключателях *SB*2–*SB*6 и резисторах *R*2, *R*5–*R*8.

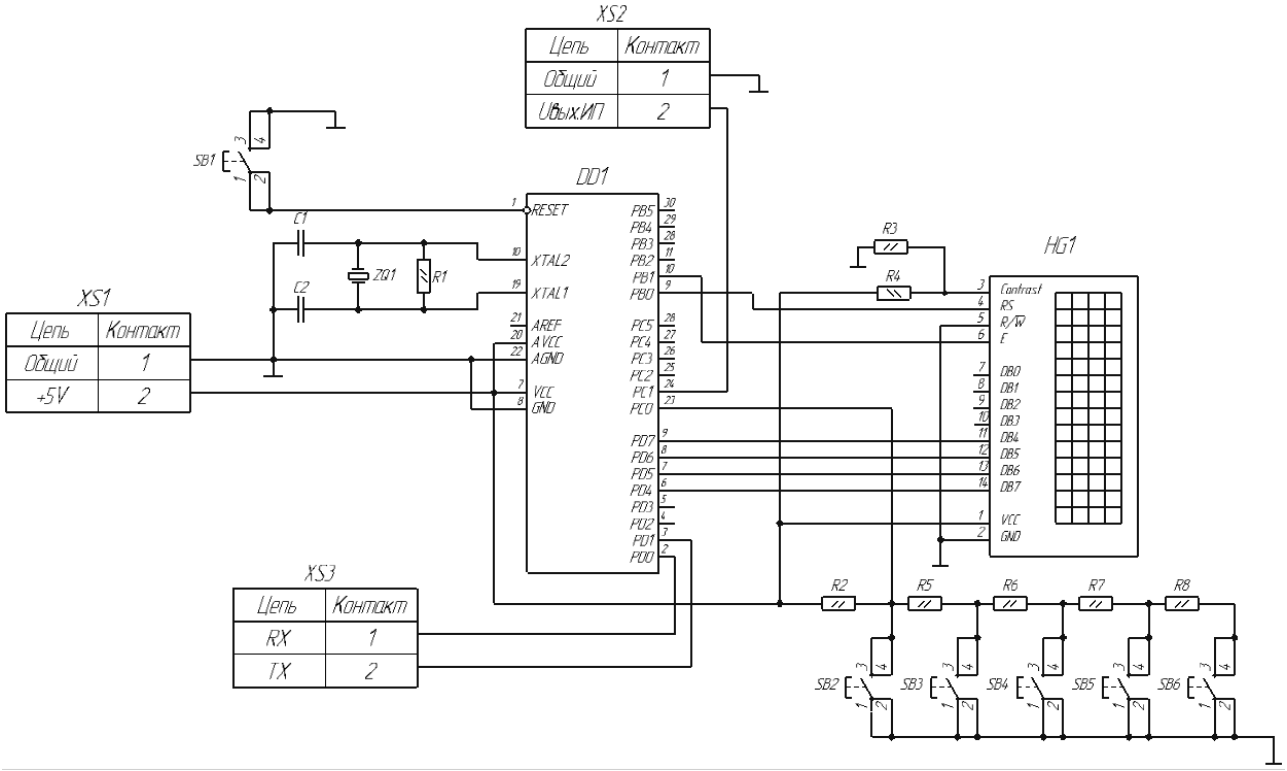

Рисунок 8.2 – Электрическая принципиальная схема цифрового прибора

Индикация результатов измерений осуществляется с помощью LCD-дисплея *HG1* TC1602 размерностью две строки по 16 символов. Обмен данными с дисплеем осуществляется по 6 цифровым портам МК DD1.

Автоматизация проектных работ при разработке нового электронного оборудования с использованием ЭВМ и специального программного обеспечения. Важнейшей задачей при проектировании электронных устройств для медицинских аппаратов – получение на выходе измерительного преобразователя сигнала с минимальными искажениями информативного параметра. Подходы к её решению рассмотрим на следующем примере.

Необходимо разработать оптико-электронный измерительный преобразователь (ОЭИП) прибора для фотометрического контроля. В основе работы фотометра лежит способность контролируемой среды ослаблять (рассеивать, отражать) проходящее сквозь нее оптическое излучение (включая ультрафиолетовый и инфракрасный участки спектра). В качестве излучателей в подавляющем большинстве разработок применяют светодиоды или полупроводниковые лазеры, в качестве фотоприемников − фотодиоды.

Сравнительный анализ выпускаемых промышленностью средств фотометрического контроля показывает, что их измерительные преобразователи являются одноканальными и подвержены воздействию влияющих величин, приводящему к появлению погрешностей. С целью повышения точности измерений выполним разработку двухканального измерительного преобразо-

вателя (ИП). Разработку схем выполним на ЭВМ с использованием программы «КОМПАС». Структурная схема ИП изображена на рисунке 8.3.

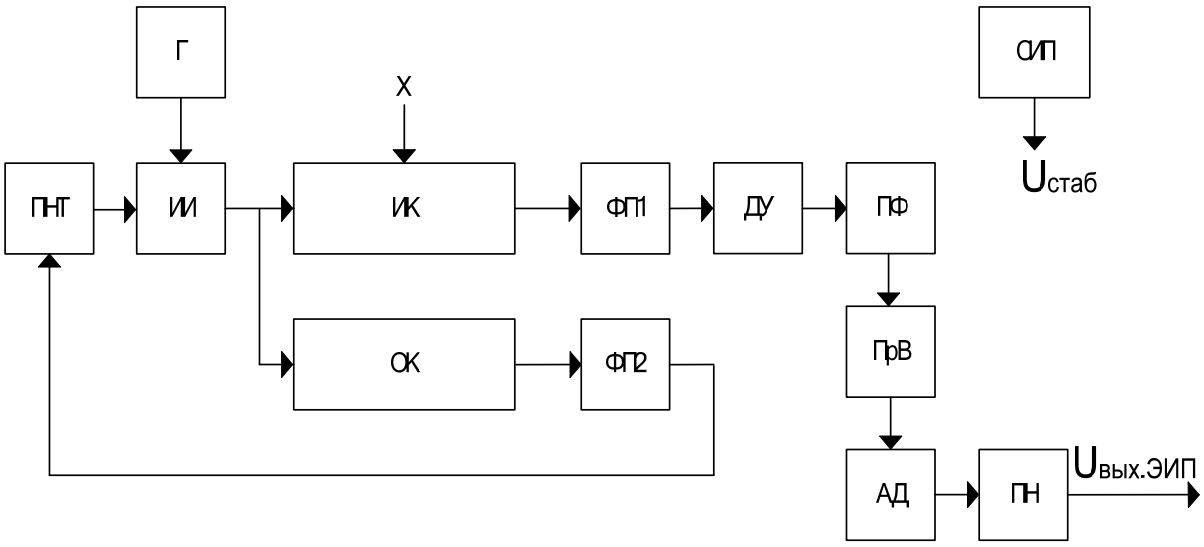

Рисунок 8.3 – Структурная схема двухканального ОЭИП

ИП имеет измерительный и опорный каналы (ИК и ОК). Носителем измерительной информации является переменный поток излучения. Для получения переменного измерительного сигнала в состав ИП включен генератор (Г), обеспечивающий питание источника излучения (ИИ) переменным током заданной частоты.

Использование переменного сигнала в качестве носителя информации позволяет уменьшить влияние на результаты измерений нестабильности характеристик электронных элементов, входящих в состав ИП. Например, наличие дрейфа нуля в операционных усилителях (ОУ) приводит к появлению в измерительном сигнале постоянной составляющей, интерпретируемой как аддитивная погрешность. Она возникает при воздействии на ОУ температуры окружающей среды и обычно носит случайный характер.

Поток излучения на выходе ИИ с помощью оптических элементов на схеме не показаны) делится на две части. Одна часть потока излучения направляется в ИК, другая – в ОК. На поток излучения, проходящий через ИК, воздействует контролируемая величина X, изменяя его мощность. Попав на фотоприемник ФП1, поток преобразуется в электрический сигнал, который усиливается дифференциальным усилителем (ДУ). Усиленный выходной сигнал далее проходит через полосовой фильтр (ПФ), который пропускает полезный сигнал и ослабляет сигналы, являющиеся помехой. После прохождения ПФ сигнал поступает на прецизионный выпрямитель (ПрВ), в котором знакопеременный электрический сигнал преобразуется в сигнал одного знака. Амплитудный детектор (АД) формирует напряжение, близкое к максимальному значению выпрямленного напряжения. Для согласования выхода АД с устройствами, на которые будет подаваться выходной сигнал ИП, используется повторитель напряжения (ПН). Питание всего устройства выполняется

стабилизированным источником питания (СИП), вырабатывающим напряжение заданной величины.

Вторая часть потока излучения направляется через ОК на второй вспомогательный фотоприемник ФП2, который генерирует электрический сигнал, используемый для стабилизации потока излучения, генерируемого ИИ, через преобразователь напряжения в ток (ПНТ).

На основе структурной схемы ИП выполняется разработка его электрической функциональной схемы (рисунок А.1, приложение А). Работа ИП осуществляется следующим образом. В первичном измерительном преобразователе (фотоприемнике *VD*2), включенном в одно из плеч измерительного моста, в состав которого также входят резисторы *R*10, *R*13, *R*14, под воздействием измеряемой физической величины X изменяется величина обратного тока. Это приводит к изменению разности потенциалов между точками *a* и *b* в одной из диагоналей измерительного моста. Эта разность потенциалов подается на вход дифференциального усилителя, собранного на ОУ *DA*5, *DA*6, *DA*8, который усиливает разностный сигнал в заданное число раз. Усиленный сигнал далее поступает на ПФ, собранный на ОУ *DA*2, *DA*3, *DA*4, *DA*7 для устранения помех. Далее сигнал поступает на прецизионный выпрямитель на ОУ *DA*9, *DA*11 для получения напряжения одного знака, а затем проходит через амплитудный детектор на ОУ *DA*10 и преобразуется в напряжение, близкое к своему максимальному значению. Повторитель напряжения на ОУ *DA*12 используется для согласования выходного сигнала амплитудного детектора с устройствами, на которые будет поступать в дальнейшем выходной сигнал ИП.

Для получения переменного электрического сигнала заданной частоты на микросхеме *DD*1 собран генератор, питающий источник излучения *HL*1. Для стабилизации потока излучения, генерируемого источником *HL*1, используется преобразователь напряжения в ток на ОУ *DA*1. Сигнал обратной связи поступает на него с делителя *VD*1, *R*7, с помощью которого формируется напряжение, пропорциональное потоку излучения, проходящему через опорный канал ИП.

Правильность технических решений при проектировании отдельных блоков и в целом ИП проверяем с использованием специального программного обеспечения Multisim. Результаты моделирования работы ИП в Multisim приведены в приложениях Б и В.

Задача 1. Разработайте структурную и электрическую принципиальную схемы толщиномера на контроллере ATmega328.

Задача 2. Разработайте структурную и электрическую принципиальную схемы турбидиметра на контроллере ATMega32U4.

Задача 3. Разработайте структурную и электрическую принципиальную схемы для измерения линейного размера и глубины залегания дефекта в сварном шве на контроллере ATmega2650.

Задача 4. Разработайте структурную и электрическую принципиальную схемы установки для намагничивания объекта контроля на контроллере ATmega168.

Задача 5. Выполните моделирование в Multisim работы преобразователя напряжения в ток на ОУ.

Задача 6. Выполните моделирование в Multisim работы дисплея на микросхеме CC56-21EWA.

Список литературы

1 **Гусев, В. Г.** Электроника и микропроцессорная техника: учебник / В. Г. Гусев, Е. М. Гусев. − Москва : КноРус, 2022. − 798 с.

2 **Шишкин, Г. Г.** Электроника: учебник для бакалавров / Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. – 2-е изд., испр. и доп. − Москва: Юрайт, 2019. − 703 с.

3 Введение в Multisim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://of.bsu.ru/e-book/mikroprochess/Manual_multisim_rus.pdf. – Дата доступа: 22.02.2022.

Приложение А
(обязательное)

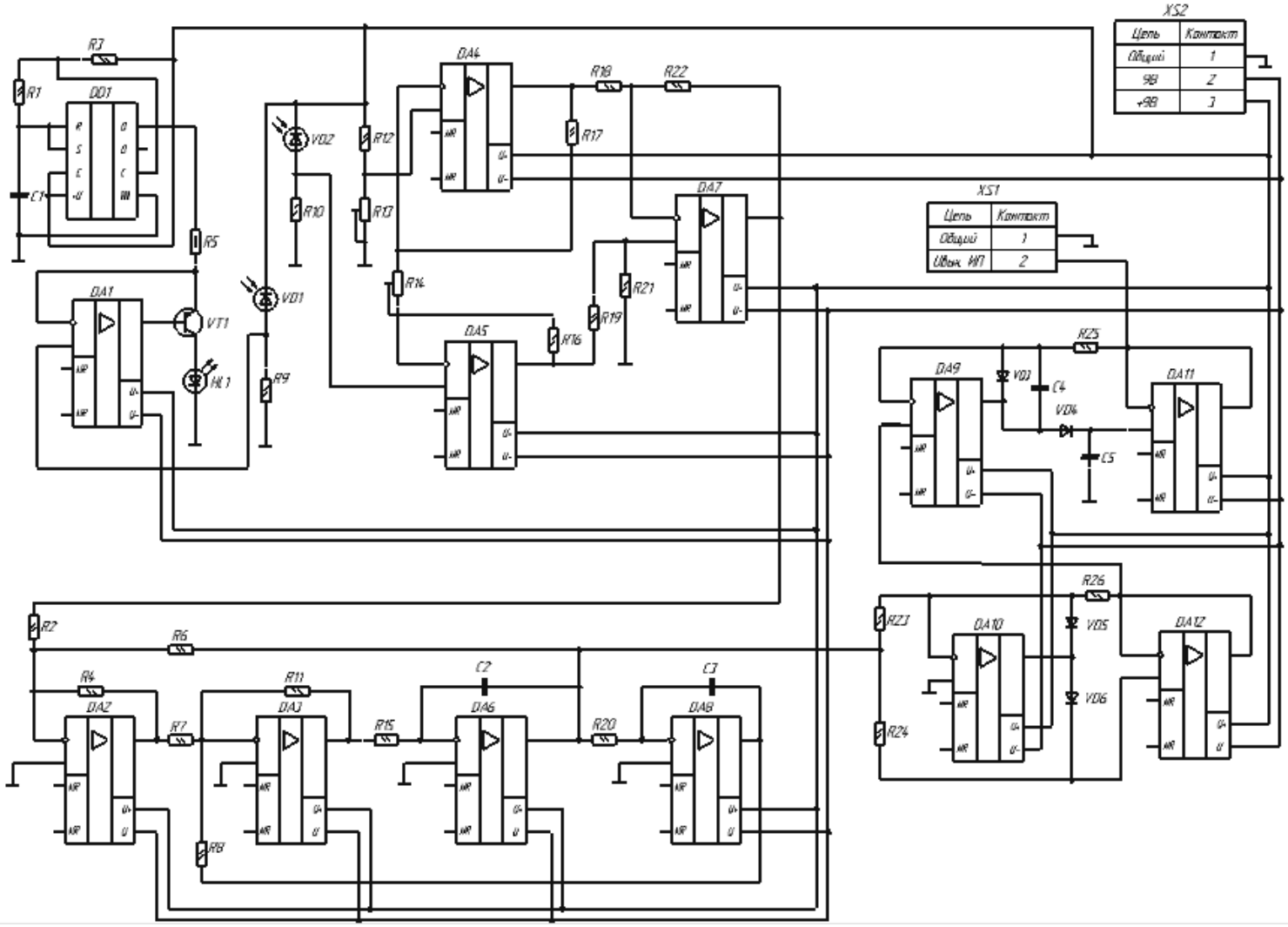

Рисунок А.1 – Схема электрическая функциональная двухканального ОЭИП

Приложение Б
(обязательное)

Моделирование работы дифференциального усилителя

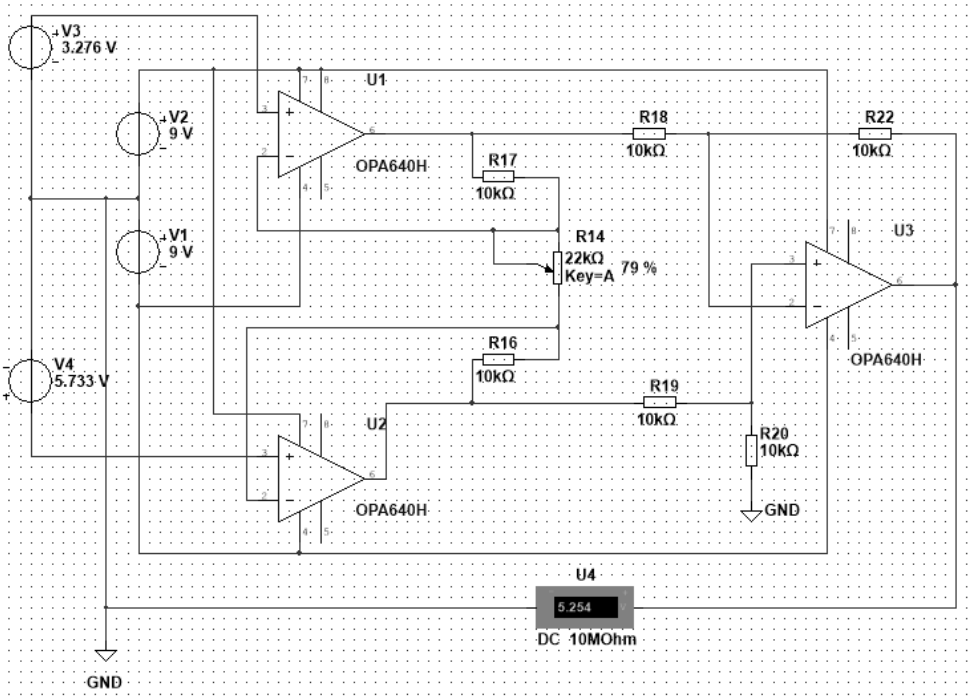

Рисунок Б.1 − Схема дифференциального усилителя в среде Multisim и результаты моделирования его работы

Моделирование работы полосового фильтра

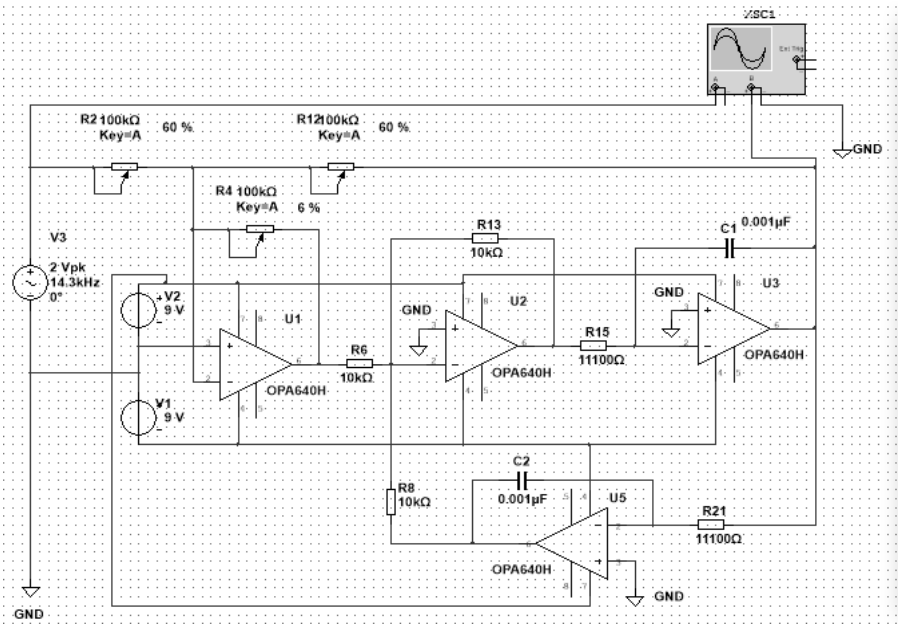

Рисунок Б.2 – Схема ПФ в Multisim

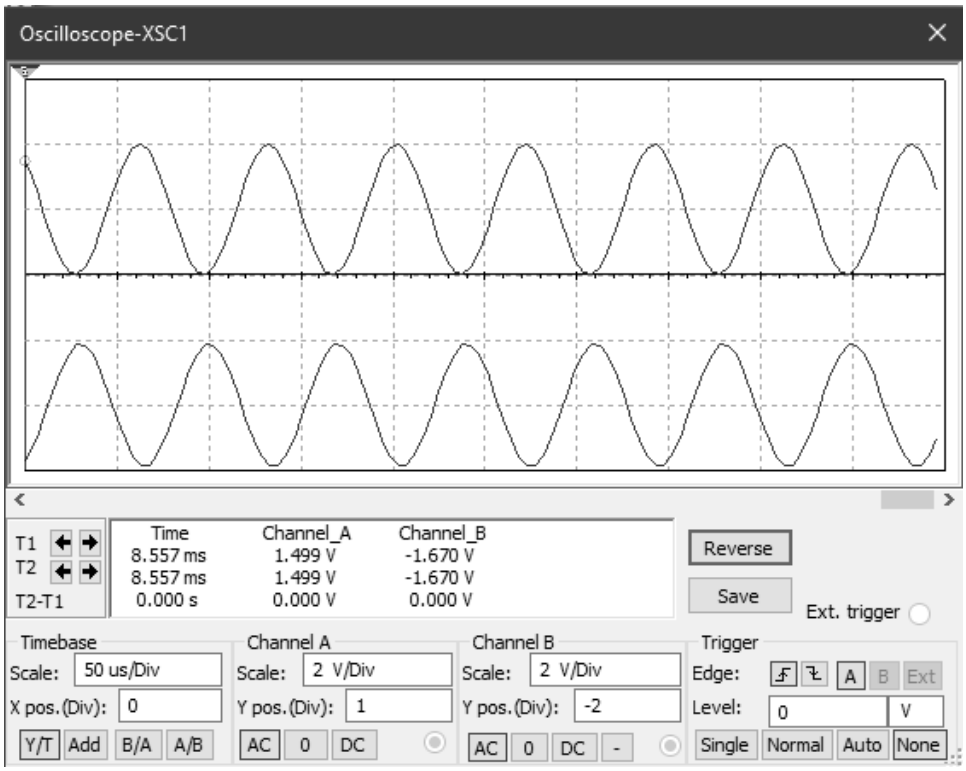

Рисунок Б.3 – Амплитуды входного и выходного сигналов ПФ на частоте $f_Г$ = 14,3 кГц

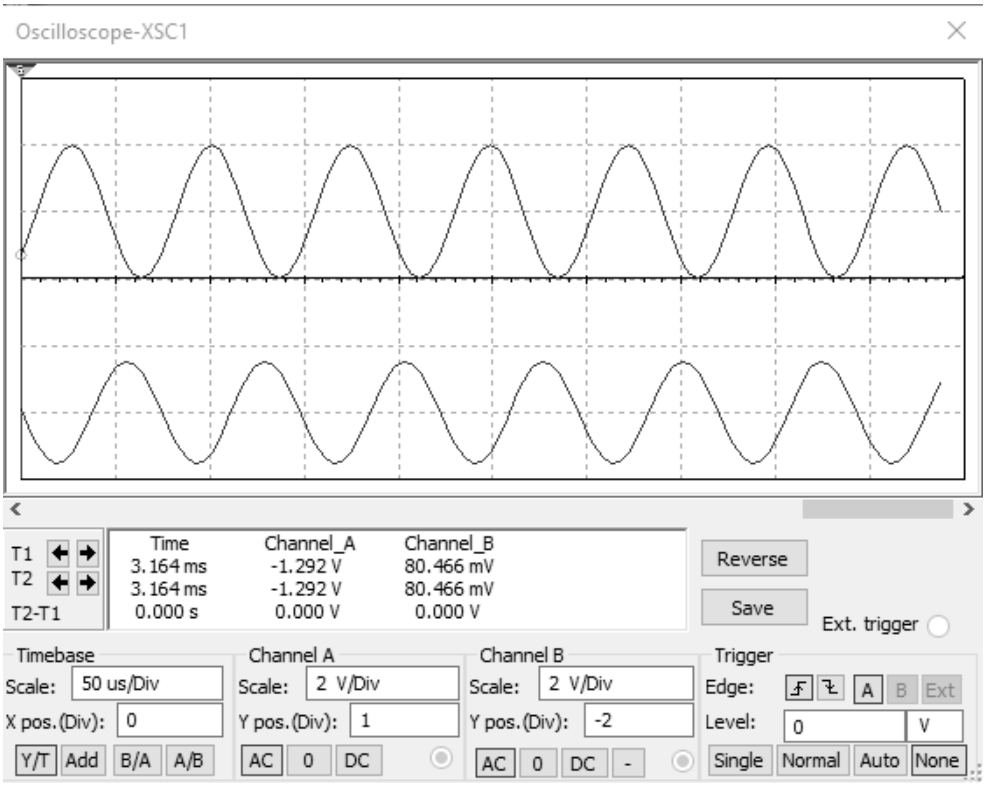

Рисунок Б.4 – Амплитуды входного и выходного сигналов ПФ на частоте f_{C1} = 13,6 кГц

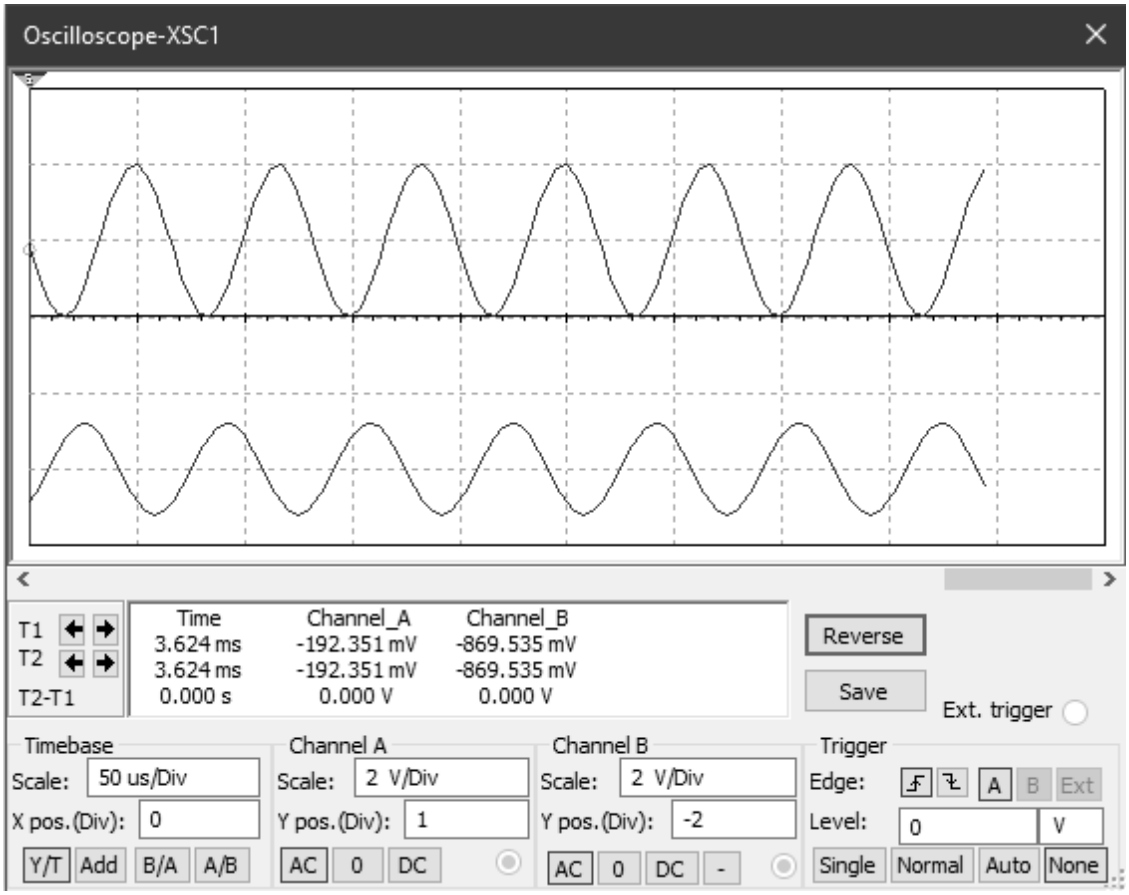

Рисунок Б.5 – Амплитуды входного и выходного сигналов ПФ на частоте f_{C2} = 15,1 кГц

Моделирование работы генератора в Multisim

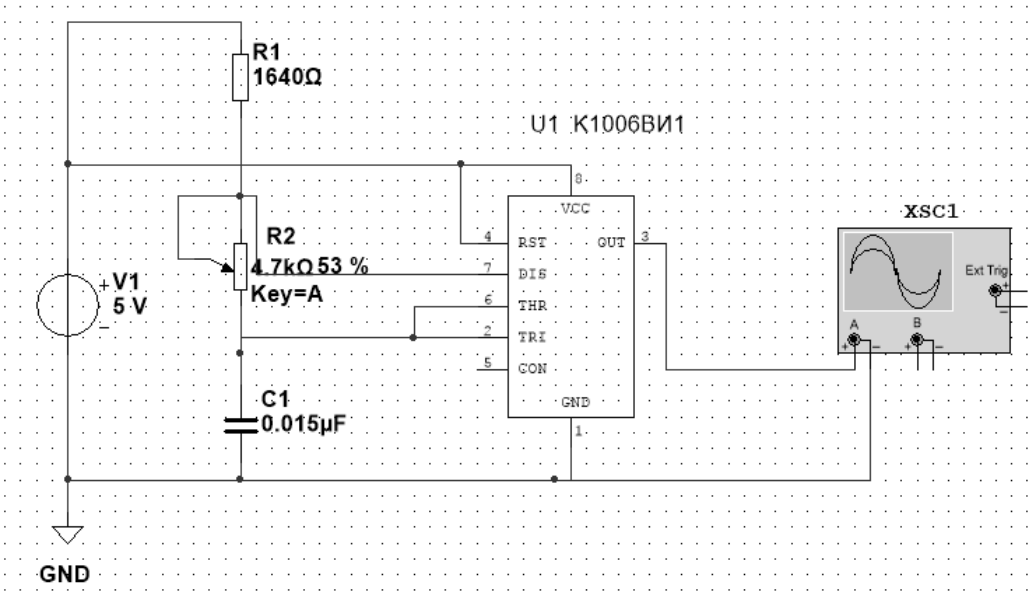

Рисунок Б.6 − Схема генератора на микросхеме К1006ВИ1 в Multisim

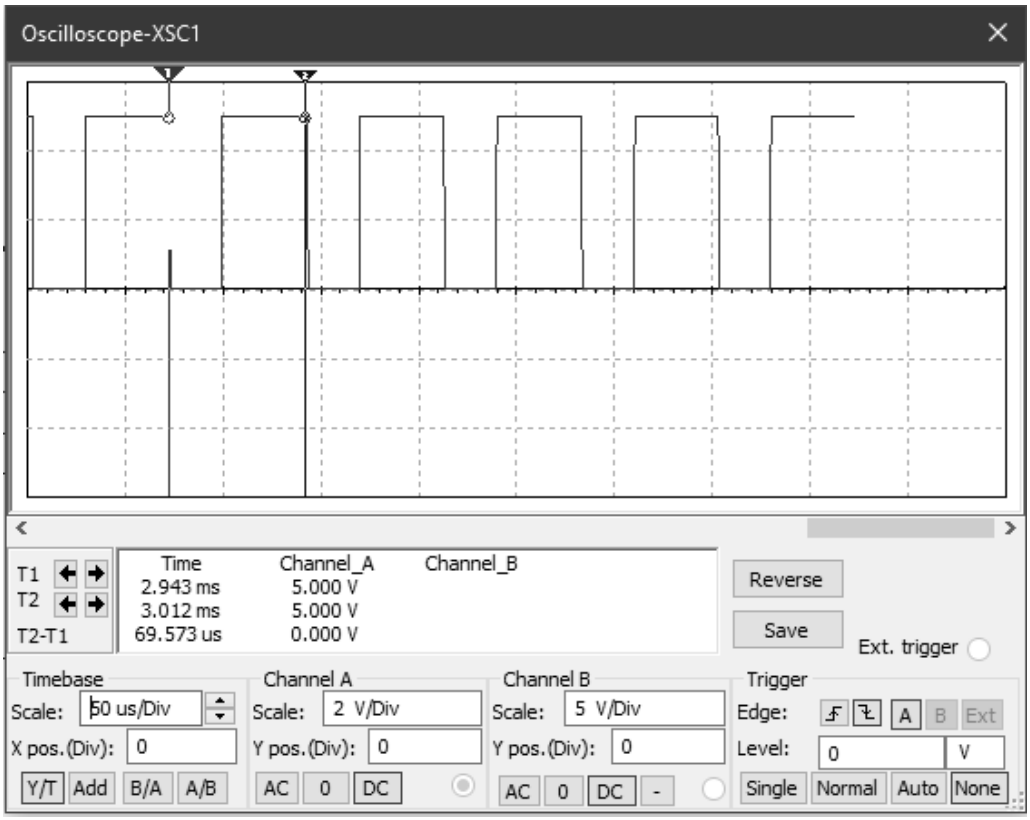

Рисунок Б.7 − Временная диаграмма работы генератора в Multisim

Приложение В
(обязательное)

Моделирование работы ОЭИП, состоящего из блоков ДУ, ПФ, ПрВ, АД, ПН

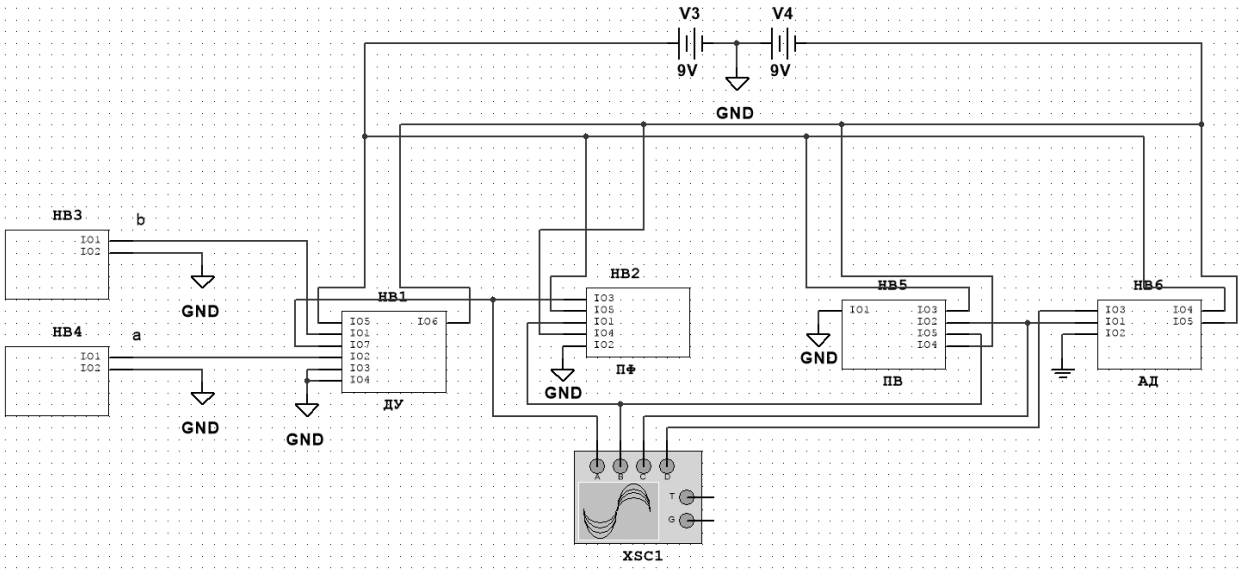

Рисунок В.1 – Модель схемы ОЭИП, оформленная в виде блоков

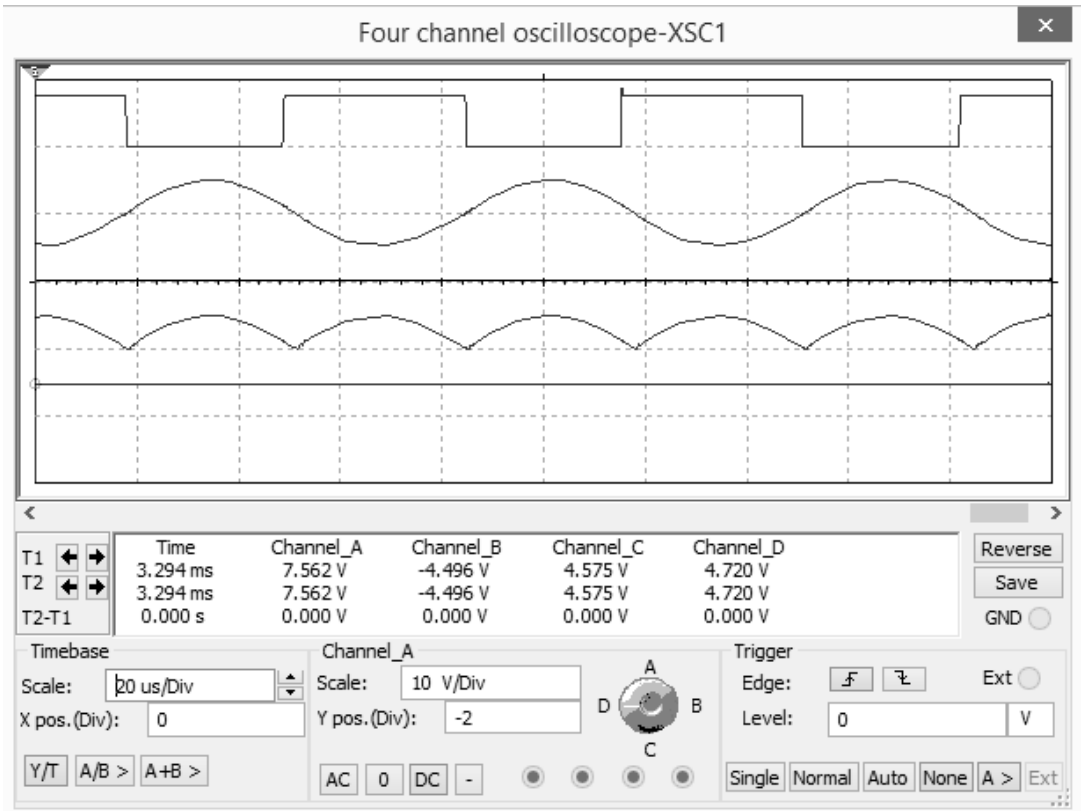

Рисунок В.2 – Показания осциллографа XSC1. Сверху вниз: выходной сигнал ДУ, выходной сигнал ПФ, выходной сигнал ПрВ, выходной сигнал ИП