

Лабораторная работа №14

Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи

1. Цель работы

Освоить порядок моделирования цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей с помощью программы Multisim 11.0.2.

2. Общие сведения

Различают две формы представления информации — непрерывную (аналоговую) и прерывистую (цифровую, дискретную). Непрерывная форма характеризует процесс, который не имеет перерывов и теоретически может изменяться в любой момент времени и на любую величину (например, крики животных, музыкальные произведения).

Все сигналы в живой и неживой природе существуют в аналоговой форме (влажность, давление, температура воздуха, освещённость, скорость ветра, нервные импульсы животных, речь человека и т.д.). Цифровые сигналы появились совсем недавно (середина прошлого века). Это искусственные сигналы, изобретённые людьми.

Цифровые сигналы могут изменяться лишь в определённые моменты времени и принимать лишь заранее обусловленные значения (например, только значения напряжений 0,2 и 3,5 В). Моменты времени возможного изменения уровня цифрового сигнала задаёт тактовый генератор конкретного цифрового устройства. Современные ЭВМ работают с цифровыми сигналами, поэтому необходимо уметь трансформировать аналоговые сигналы в цифровые (например, оцифровать изображение художественной картины, записать выступление музыкальной группы).

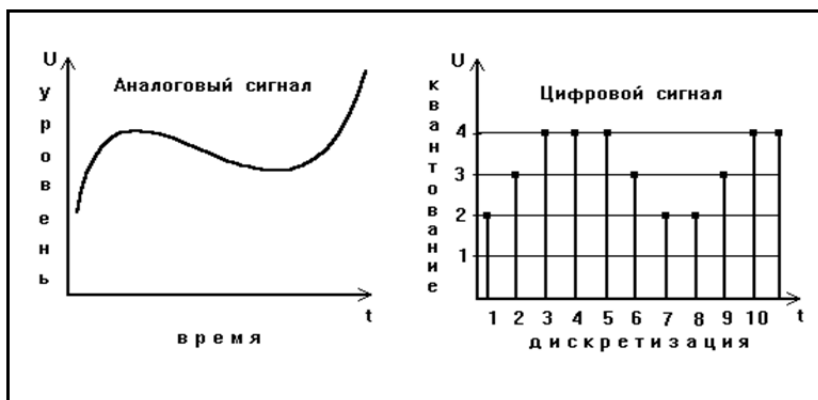
Для преобразования аналогового сигнала в цифровой сигнал требуется провести дискретизацию непрерывного сигнала во времени, квантование по уровню, а затем кодирование отобранных значений.

Дискретизация — замена непрерывного (аналогового) сигнала последовательностью отдельных во времени отсчётов (семплов) этого сигнала.

Квантование — разбиение диапазона уровней непрерывной величины на конечное число интервалов и округление входных уровней до разрешённых значений.

На рисунке схематично показан процесс преобразования аналогового сигнала в цифровой сигнал. Цифровой сигнал в данном случае может принимать лишь пять различных разрешённых уровней. Естественно, что качество такого преобразования невысокое. Из рисунка видно, что изменение цифро-

вого сигнала происходит лишь в определённые моменты времени (в данном случае этих моментов одиннадцать).



Кодирование — представление результата измерения уровня в точке выборки (отсчета) двоичным числом.

При преобразовании непрерывный сигнал заменяют последовательностью чисел. Показанный на рисунке непрерывный сигнал заменяется числами 2-3-4-4-4-3-2-2-3-4-4. Десятичная система счисления в рассматриваемом примере использована лишь для большей наглядности. Фактически аналоговый сигнал преобразуют в последовательность единиц и нулей. Результаты данного преобразования можно представить в виде таблицы.

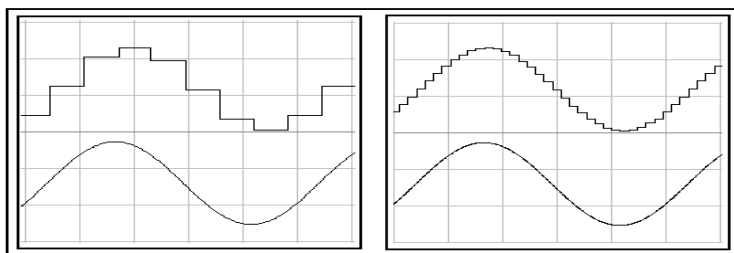
Таблица.

Время	Десятичные числа	Двоичные числа
t_1	2	0010
t_2	3	0011
t_3	4	0100
t_4	4	0100
t_5	4	0100
t_6	3	0011
t_7	2	0010
t_8	2	0010
t_9	3	0011
t_{10}	4	0100
t_{11}	4	0100

Здесь цифровые сигналы представлены четырьмя разрядами двоичных

чисел. Очевидно, что, чем больше разрядов у двоичных чисел (то есть чем больше число уровней квантования) и чем чаще во времени осуществляются отсчёты (выборки), тем точнее будет преобразован непрерывный сигнал в цифровой.

Образное представление о качестве оцифрованного сигнала дают кинофильмы, снятые с разной скоростью. Первые немые фильмы были сняты с частотой 16 кадров в секунду. Из-за низкой частоты съёмки некоторые фазы движения объектов терялись, и перемещение персонажей на экране становилось комичным, дёрванным. Переход на частоту 24 кадров в секунду сняло эту проблему, движение стало плавным.



Предыдущий рисунок показывает, как влияет частота дискретизации аналого-цифрового преобразования на качество оцифрованного сигнала. В нижней части диаграмм показан исходный аналоговый сигнал (синусоида частотой 1 кГц). В верхней части рисунков изображён сигнал после двойного преобразования при разных значениях частоты дискретизации. В данном случае аналоговый сигнал был вначале преобразован в цифровой, а затем цифровой сигнал обратно конвертирован в аналоговый. Рисунки отличаются использованной частотой дискретизации. В первом случае частота дискретизации составляла 8 кГц, во втором – 32 кГц. Из рисунка видно, что с ростом частоты дискретизации качество преобразования улучшается. На качество цифрового сигнала сильно влияет также его разрядность.

Необходимая частота дискретизации (при заданной наибольшей частоте в спектре преобразуемого сигнала) определяется с помощью **теоремы Котельникова** (в англоязычной литературе её называют теоремой Найквиста — Шеннона или теоремой отсчётов) [2]. Теорема гласит: любой сигнал со спектром частот от 0 до f_{\max} можно передать с необходимой точностью при помощи чисел, следующих друг за другом через интервалы времени, равные $1/2f_{\max}$.

Первое представление об аналоговом и цифровом способах хранения и распространения информации можно получить, рассматривая два способа записи звуковых сигналов: аналоговую и цифровую аудиозаписи.

При аналоговой аудиозаписи непрерывный электрический сигнал, формируемый источником звука на выходе микрофона, с помощью магнитной головки наносится на движущуюся магнитную ленту. Недостатком аналогового способа обработки информации является то, что копия бывает всегда хуже оригинала, причём с увеличением числа перезаписей качество фонограммы постоянно ухудшается. Длительное хранение магнитной ленты приводит к её размагничиванию и в итоге – к потере записи.

При цифровой аудиозаписи используется процесс выборки, заключающийся в периодическом измерении уровня (громкости, амплитуды) аналогового звукового сигнала (например, поступающего с выхода микрофона) и превращении полученного значения в последовательность двоичных чисел. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой используется специальный конвертер, называемый аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). В англоязычной литературе используется термин Analog Digital Converter (ADC). Сигнал на выходе АЦП представляет собой последовательность двоичных чисел, которая может быть обработана компьютером. Обратная конверсия цифрового сигнала в непрерывный сигнал осуществляется с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП, DAC).



Качество аналогово-цифрового преобразования характеризует параметр, называемый разрешением. **Разрешение** — это количество уровней квантования, используемых для замены непрерывного аналогового сигнала цифровым сигналом. Восемьразрядная выборка позволяет получить только 256 различных уровней квантования цифрового сигнала, а шестнадцатизрядная выборка — 65 536 уровней.

Ещё один показатель качества трансформации непрерывного сигнала в цифровой сигнал — это частота дискретизации — количество преобразований аналог-цифра (выборок), производимое устройством в одну секунду. Этот показатель измеряют килогерцами (килогерц — тысяча выборок в секунду). Типичное значение частоты дискретизации лазерных (оптических) аудиодисков — 44,1 кГц.

3. Задания на выполнение лабораторной работы

3.1. Задание 1. Исследование ЦАП

Собрать схему ЦАП, использующего взвешивающую резистивную матрицу. Установить напряжение на источнике напряжения V1 равным номеру варианта. Коммутируя ключи 1, 2, 3 и 4, сделать 16 измерений и заполнить таблицу 1. В последнюю колонку занести показания вольтметра U1.

На рисунке показан момент подачи на вход ЦАП комбинации цифровых сигналов 1011В (ключ старшего разряда S4 находится внизу).

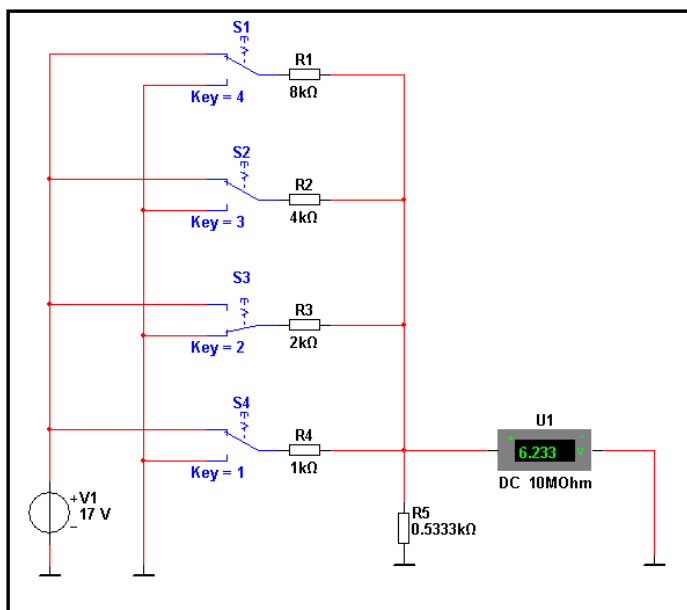
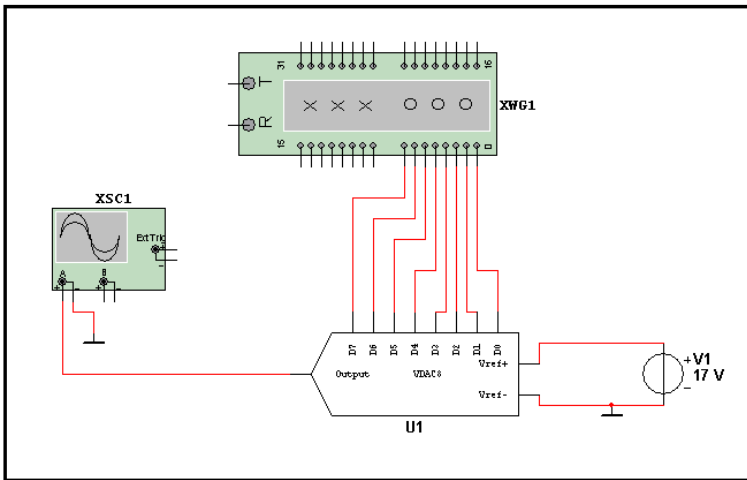


Табл. 1.1

Цифровой сигнал				Аналоговый сигнал U, В
Ключ 1	Ключ 2	Ключ 3	Ключ 4	
0	0	0	0	
0	0	0	1	
0	0	1	0	
0	0	1	1	
...	
1	1	1	1	

3.2. Задание 2. Исследование микросхемы ЦАП

Составить схему, показанную на следующем рисунке. Преобразовать 16 букв своей фамилии и имени (без пробелов) в десятичную систему счисления. Если число символов в фамилии и имени меньше 16, то следует использовать часть букв отчества. Первые буквы фамилии, имени и отчества должны быть заглавными, остальные – строчные. Для записи использовать кириллицу.



Ввести 16 чисел в генератор слов (Word Generator) и поочерёдно подать их на ЦАП 16. Поместить в отчёт временные диаграммы, которые формируются на экране осциллографа в процессе моделирования ЦАП. С помощью осциллографа измерить аналоговое напряжение U , соответствующее каждому значению цифрового сигнала.

Опорное напряжение U_{op} в схеме должно быть установлено равным номеру варианта (на рисунке показано опорное напряжение для варианта 17).

Рассчитать значение выходного напряжения U_p , которое соответствует каждой входной комбинации. Результаты исследований занести в таблицу. Сопоставить результаты расчетов и измерений.

Табл.3.2.1.

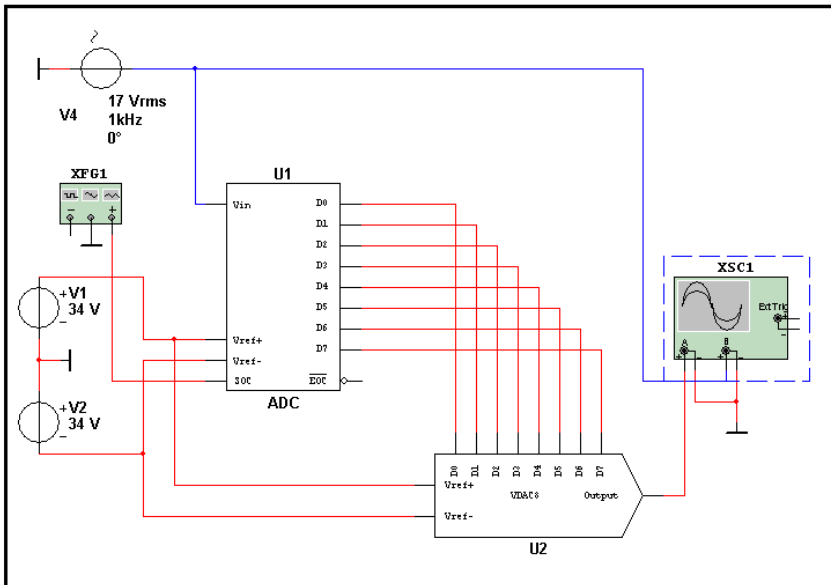
Буквы	Десятичный код, D	Аналоговое напряжение, В	
		Расчетное, U_p	Измеренное, U

3.4. Задание 4. Исследование двойного преобразования (АЦП-ЦАП)

Собрать схему, показанную на рисунке. Подать на вход АЦП синусоидальное напряжение, установив действующее напряжение на источнике U_{in} , равным номеру варианта. Опорные напряжения выбрать равными удвоенному значению номера варианта.

Временные диаграммы зарисовать в масштабе при различных частотах дискретизации: 4; 8; 16 и 32 кГц.

При частоте дискретизации 32 кГц дополнительно зарисовать еще три временные диаграммы при соединении между собой АЦП и ЦАП с помощью 1 разряда (D7), двух разрядов (D7, D6) и трех разрядов (D7, D6, D5). Другими словами, из восьми проводов, соединяющих АЦП и ЦАП, последовательно оставлять только один, два и три провода в старших разрядах.



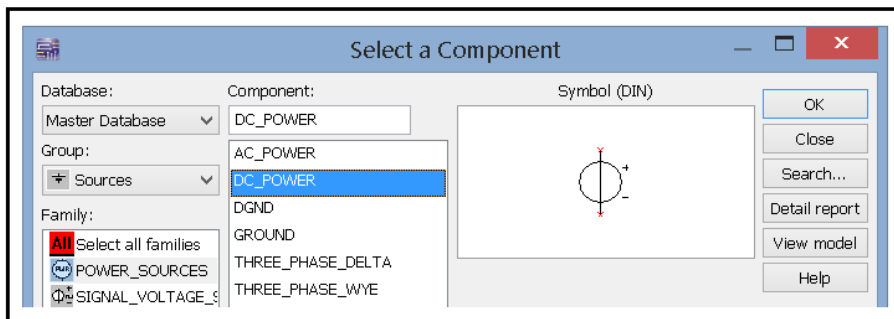
4. Порядок выполнения лабораторной работы

4.1. Методические указания к заданию 3.1

Принцип работы ЦАП, использующего взвешивающую резистивную матрицу, заключается в изменении тока, протекающего через резистор R5. Чем больше ключей формируют высокое напряжение, тем большее напряжение формируется на резисторе R5. Легко заметить, что вклад каждого ключа (каждого двоичного разряда) различен. Наибольший вклад в выходное напряжение даёт ключ S4. Это объясняется тем, что через резистор R4 протекает наибольший ток, так как номинал этого резистора наименьший. Минимальный квант выходного напряжения формируется ключом S1 (младший разряд двоичного числа).

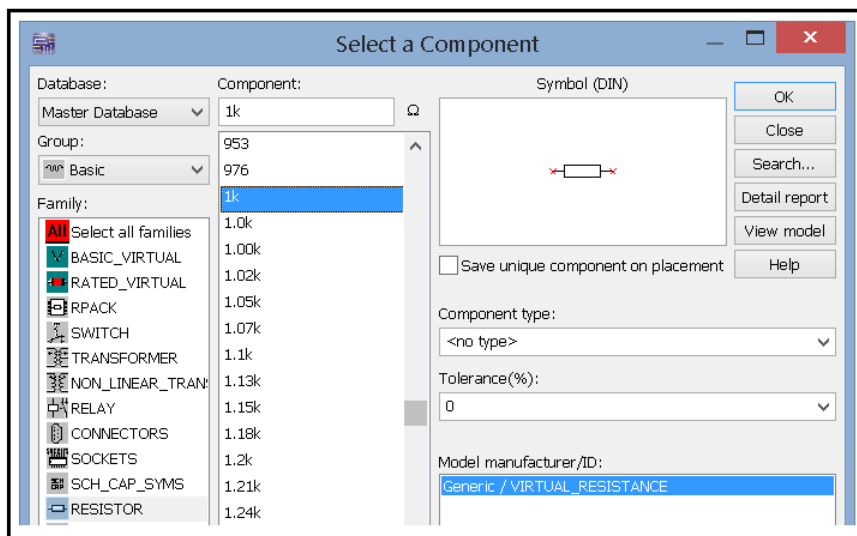
Ещё одна конструктивная особенность взвешивающей резистивной матрицы состоит в том, что номиналы резисторов выбраны такими же, как и веса разрядов двоичных чисел: 1, 2, 4, 8. Это простейший способ построения ЦАП.

Извлечение источника напряжения из базы данных Multisim происходит в такой последовательности: панель **Components** → группа **Sources** → семейство **POWER_SOURCES** → компонент **DC_POWER**.



Установка заданного напряжения происходит стандартно: двойной щелчок по установленному элементу открывает диалоговое окно, которое позволяет сделать необходимые корректировки параметров компонента.

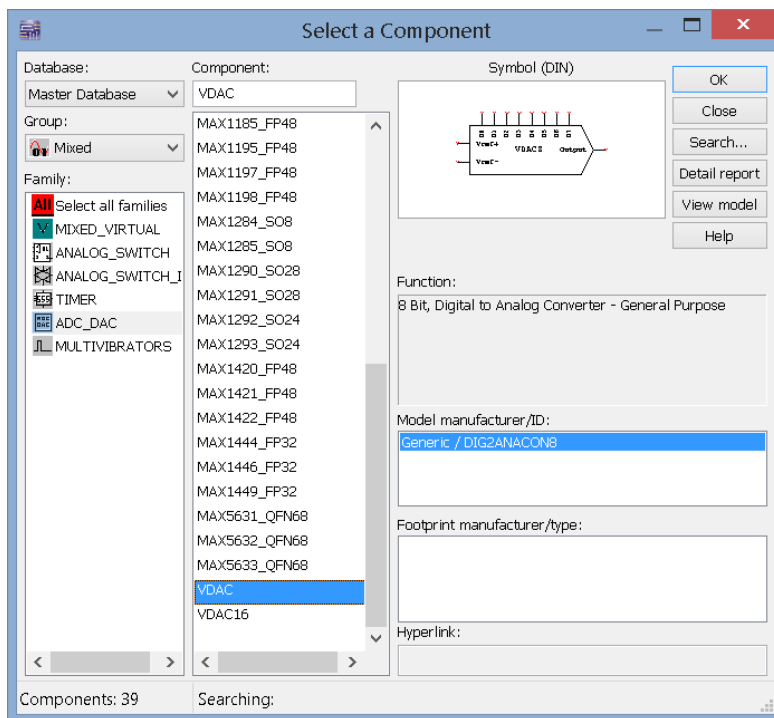
Для установки в схему резисторов нужно выполнить команды: панель **Components** → группа **Basic** → семейство **RESISTOR** → в списке компонентов выбрать нужный номинал резистора или установить номинал вручную.



4.2. Методические указания к заданию 3.2

Микросхема ЦАП находится в базе данных Multisim. Для её установки нужно пройти путь: панель **Components** → группа **Mixed** → семейство **ADC_DAC** → компонент **VDAC**.

При исследовании ЦАП цифровой сигнал формируется с помощью генератора слов (Word Generator). В каждом варианте цифровые сигналы разные и определяются буквами фамилии, имени и отчества студента. Преобразование русских букв в десятичные числа производится на основании кодовой таблицы СР-1251 (Приложение 1).

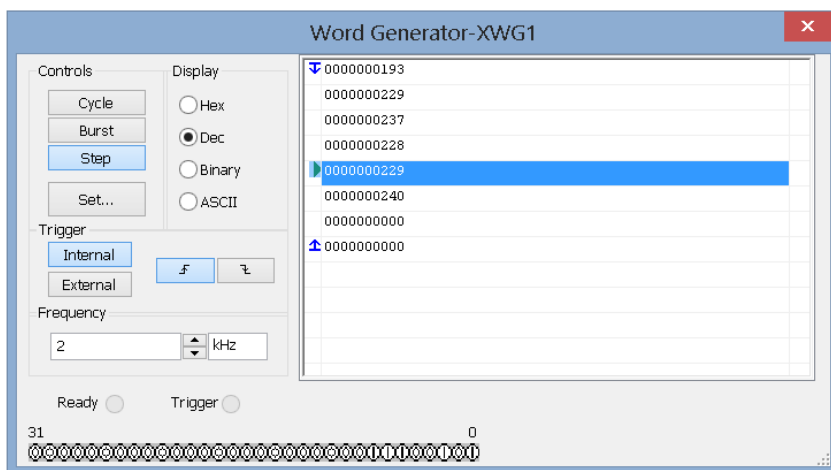


Измерения (и построение временных диаграмм) целесообразно производить в пошаговом режиме работы генератора слов (Step). Однократное нажатие на одноимённую кнопку приводит к однократному цифроаналоговому преобразованию. Частота генератора слов (Word Generator) должна быть установлена равной 2 кГц.

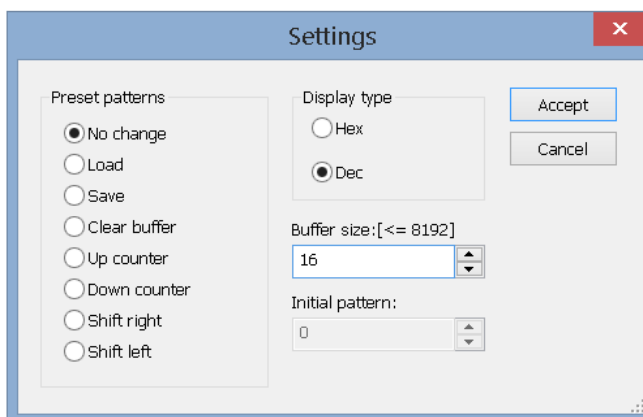
Вводить информацию в генератор слов можно в шестнадцатеричной, десятичной или двоичной СС, а также в коде ASCII. Последний вариант самый рациональный. Однако для представления кириллицы потребуется шестнадцатиразрядный код Unicode, поэтому записать символьную информацию придётся с использованием десятичной или шестнадцатеричной СС (использование двоичной СС самые нерациональный вариант).

На рисунке показан пример ввода в буфер памяти генератора шести слов фамилии Бендер. В конце введены два машинных слова, содержащих нули. Это сделано для повышения наглядности временных диаграмм.

Буфер памяти генератора слов целесообразно ограничить шестнадцатью двоичными словами. Это позволит в пошаговом режиме циклически исследовать формируемые сигналы.



Для изменения объёма буфера нужно вызвать диалоговое окно **Settings** (Установки). Вызов этого окна происходит при щелчке по кнопке **Set...**



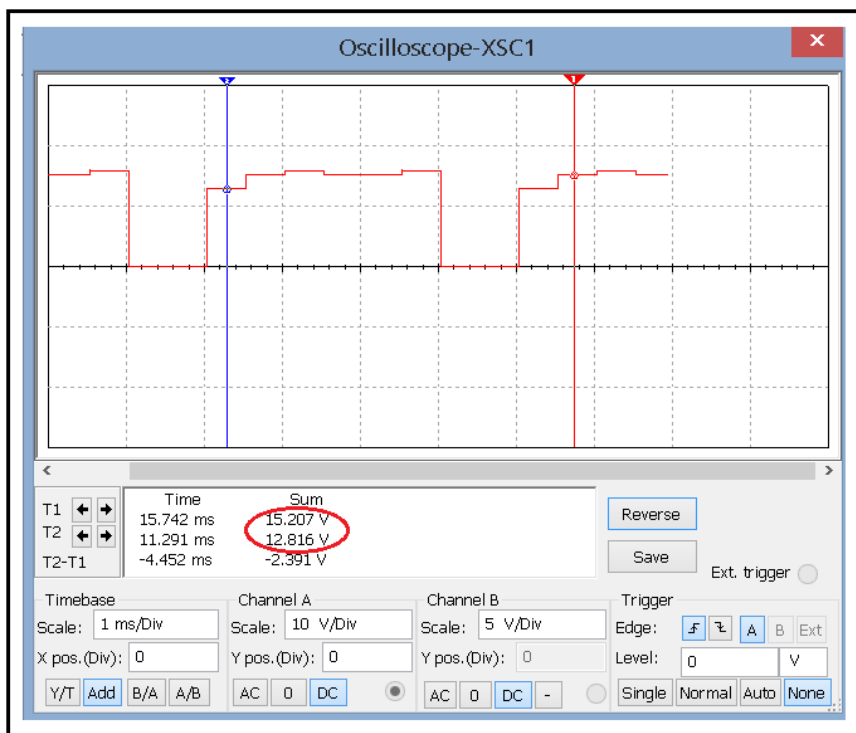
Выбрав подходящую систему счисления (Hex, Dec), нужно в окне **Buffer size** (Размер буфера) указать число используемых символов.

Временную развёртку на осциллографе (Timebase) следует установить 1 ms/Div, а чувствительность 5 V/Div (для вариантов 1...8) или 10 V/Div (для вариантов 9...16).

При измерении аналогового сигнала с помощью осциллографа нужно открыть детальное изображение осциллографа (двойной щелчок по свёрнутому изображению). Считывание показаний осциллографа следует произво-

дить с помощью одного или двух цветных маркеров.

Пример настройки осциллографа (состояние управляющих элементов) приведён на следующем рисунке. Осциллограф в данном случае работает в одноканальном режиме и канал В (Channel B) не используется.



Овалом показана область вывода результатов измерения.

Выходное напряжение восьмиразрядного ЦАП рассчитывается по формуле:

$$U_p = D \cdot U_{op} / 256 ,$$

где D - десятичный код цифрового сигнала; U_{op} – опорное напряжение (определяется номером варианта).

Если $U_{op} = 17$ В, то приведённая формула будет иметь компактный вид, удобный для проведения расчётов в варианте 17:

$$U_p = D \cdot 17 / 256 = D \cdot 0,0664 .$$

Сделанные округления приведут к появлению небольших различий между расчётными и измеренными значениями.

В следующей таблице приведены результаты моделирования и расчётов для слова Бендер.

Табл. 4.2.1

Буквы	Десятичный код, D	Аналоговое напряжение, В	
		Расчётное, U_p	Измеренное, U
Б	193	12,816	12,816
е	229	15,207	15,207
н	237	15,738	15,738
д	228	15,141	15,141
е	229	15,207	15,207
р	240	15,937	15,937

Анализ таблицы 4.2.1 показывает, что наименьшее различие выходных напряжений (для букв «д» и «е») составляет 0,066 В.

В общем случае величина ступеньки (кванта) рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{U_{op}}{2^n},$$

здесь n – число разрядов ЦАП.

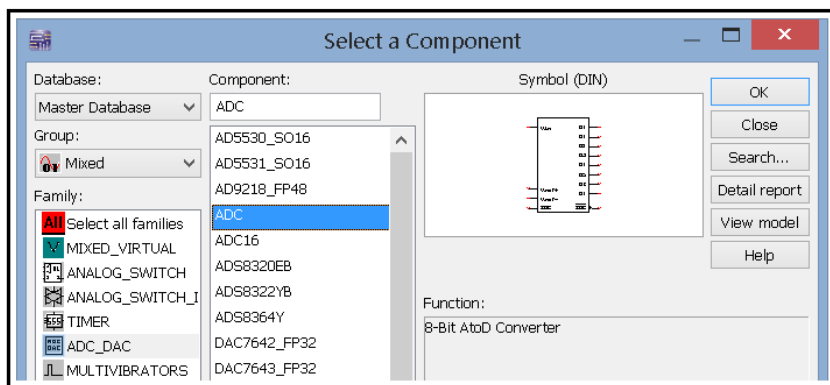
Для восьмиразрядного ЦАП предыдущая формула будет иметь вид:

$$\Delta = \frac{U_{op}}{256}.$$

При $U_{op} = 17$ В величина наименьшей ступеньки восьмиразрядного ЦАП составит 0,0664 В.

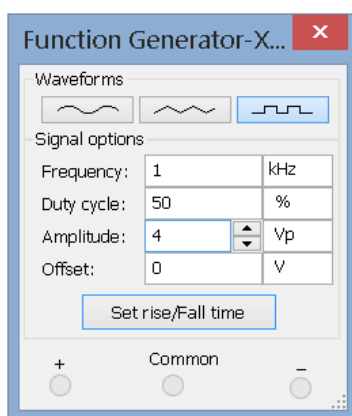
4.3. Методические указания к заданию 3.3

Для выбора АЦП из базы данных нужно пройти путь: панель **Components** → группа **Mixed** → семейство **ADC_DAC** → компонент **ADC**.



Рассмотрим назначение элементов. На вход АЦП SOC подаётся сигнал от генератора Function Generator, который определяет частоту дискретизации. Так как в данном задании входное напряжение U_{in} постоянное, то не имеет значения, на какой частоте работает генератор (например, можно установить частоту 1 кГц).

Следующий рисунок показывает параметры, которые нужно установить на генераторе.



К выходам АЦП подключены индикаторы, которые обозначены в соответствии с их весовыми коэффициентами. Это делает удобным процедуру

определения цифрового сигнала D , выраженного в десятичной системе счисления.

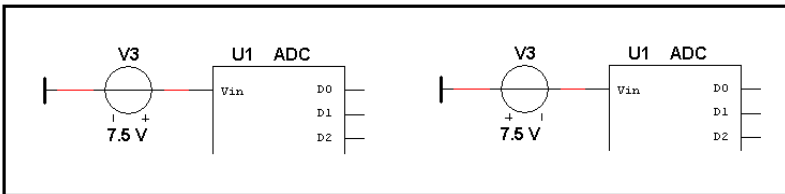
Выходной код АЦП рассчитывается по формуле:

$$D = 128 + U_{in} \cdot 128 / U_{op},$$

где U_{in} - входное аналоговое напряжение; D - выходное число, представленное в десятичной системе счисления.

Следует обратить внимание, что при $U_{in} = 0$ выходной десятичный код $D = 128$, при $U_{in} > 0$ выходной код $D > 128$, а при $U_{in} < 0$ выходной код $D < 128$.

Для смены полярности входного напряжения U_{in} необходимо отсоединить источник U_{in} и подключить его другим полюсом ко входу АЦП.



4.4. Методические указания к заданию 3.4

В последнем задании входное напряжение U_{in} вначале с помощью АЦП превращается в поток цифр. Затем цифры с помощью ЦАП обратно конвертируются в аналоговое напряжение. Таким образом, в идеальном случае после двойного преобразования выходное напряжение ЦАП должно полностью совпасть с входным напряжением U_{in} . Однако качество трансформации во многом определяется выбранной частотой дискретизации и разрядностью используемых преобразователей.

В процессе исследований данной схемы нужно дать качественную оценку точности преобразований в зависимости от частоты дискретизации и разрядности АЦП и ЦАП.

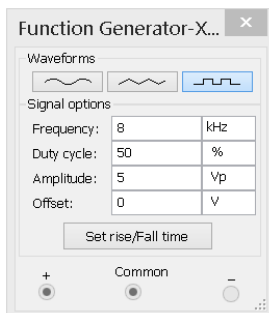
При проведении моделирования величины времени развёртки и усиления по каждому каналу следует подобрать таким образом, чтобы полнее использовать весь экран осциллографа. Целесообразно время развёртки установить таким, чтобы число периодов, укладываемых на экране было 2...3. При исследовании двухканальных осциллограмм наглядность изображений можно повысить с помощью смещения графиков по вертикали (Y Position).

Во время моделирования осциллограф будет работать в двухканальном режиме. Важно, чтобы осциллограммы входного и выходного напряжений были изображены в одинаковых масштабах. Для повышения наглядности осциллограмм желательно использовать разноцветные изображения. Для это-

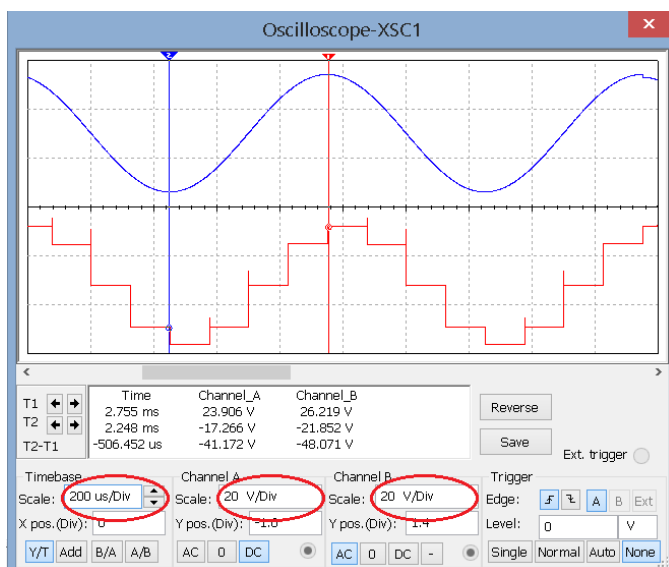
го нужно изменить цвета двух проводов, подходящих к осциллографу.

При анализе диаграмм нужно помнить, что действующее напряжение источника синусоидального напряжения в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного значения напряжения.

Настройки тактового генератора (Function Generator) показаны на рисунке.



На следующем рисунке показаны настройки осциллографа для варианта 17 и тактовой частоте, равной 8 кГц. Овалами, отмечены органы управления, которые придётся использовать при изменении номера варианта и частоты дискретизации.



5. Требования к отчёту

Отчёт подготавливается в электронном виде. Он должен содержать постановки задач, скриншоты, которые показывают порядок решения задачи, схемы, таблицы с результатами расчётов и моделирования, временные диаграммы, необходимые комментарии и анализ полученных результатов.

6. Контрольные вопросы

6.1. Как определить напряжение наименьшей ступеньки восьмиразрядного ЦАП, если известны опорные напряжения?

6.2. Как с помощью осциллографа определить длительность одной ступеньки сигнала на выходе ЦАП?

6.3. Как с помощью осциллографа определить разность напряжений двух ступенек?

6.4. Какая частота дискретизации используется при записи (считывании) в оптических аудиодисках?

6.5. Сколько уровней квантования используется при записи (считывании) в оптических аудиодисках?

6.6. Сколько уровней квантования имеет 16-ти разрядный ЦАП?

6.7. Как с помощью теоремы Котельникова по известной максимальной частоте спектра определить необходимую частоту дискретизации АЦП?

6.8. Как по известной частоте дискретизации определить длительность одной ступеньки на выходе ЦАП?

6.9. Что называется, разрешением АЦП?

6.10. Приведите примеры аналоговых сигналов.

6.11. Почему внутри ЭВМ циркулируют преимущественно цифровые сигналы?

6.12. Приведите примеры цифроаналогового и аналого-цифрового преобразования.

7. Список литературы

1. Алексеев А.П. Информатика 2015 [Текст]: учеб. пособие/ Алексеев А.П. – М: СОЛОН-Пресс, 2015. – 400 с. ISBN 978-5-91359-158-6
2. Теория электрической связи: Учебник для вузов/А.Г.Зюко, Д.Д.Кловский, В.И.Коржик, М.В.Назаров; Под ред. Д.Д.Кловского. М.: Радио и связь, 1998. - 432 с.

Приложение 1

Таблица СР-1251

пробел	32	!	33	"	34	#	35	\$	36
%	37	&	38	'	39	(40)	41
*	42	+	43	,	44	-	45	.	46
/	47	0	48	1	49	2	50	3	51
4	52	5	53	6	54	7	55	8	56
9	57	:	58	;	59	<	60	=	61
>	62	?	63	@	64	A	65	B	66
C	67	D	68	E	69	F	70	G	71
H	72	I	73	J	74	K	75	L	76
M	77	N	78	O	79	P	80	Q	81
R	82	S	83	T	84	U	85	V	86
W	87	X	88	Y	89	Z	90	[91
\	92]	93	^	94	_	95	`	96
a	97	b	98	c	99	d	100	e	101
f	102	g	103	h	104	i	105	j	106
k	107	l	108	m	109	n	110	o	111
p	112	q	113	r	114	s	115	t	116
u	117	v	118	w	119	x	120	y	121
z	122	A	192	Б	193	B	194	Г	195
Д	196	E	197	Ж	198	З	199	И	200
Й	201	К	202	Л	203	М	204	Н	205
О	206	П	207	Р	208	С	209	Т	210
У	211	Ф	212	Х	213	Ц	214	Ч	215
Ш	216	Щ	217	Ъ	218	Ы	219	Ь	220
Э	221	Ю	222	Я	223	а	224	б	225
в	226	г	227	д	228	е	229	ж	230
з	231	и	232	й	233	к	234	л	235
м	236	н	237	о	238	п	239	р	240
с	241	т	242	у	243	ф	244	х	245
ц	246	ч	247	ш	248	щ	249	ъ	250
ы	251	ь	252	э	253	ю	254	я	255