

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра промышленной электроники
и информационно-измерительной техники

С. А. Сильвашко

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и микроэлектроника

Оренбург
2018

УДК 681.51(076.5)
ББК 32.965.07я7
С 36

Рецензент – профессор, доктор технических наук В. Н. Булатов

Сильвашко, С. А.
С 36 Информационно-измерительные и управляющие системы : методические указания / С. А. Сильвашко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2018. – 64 с.

В методических указаниях изложены задания для выполнения лабораторных работ, предусмотренных рабочей программой дисциплины «Информационно-измерительные и управляющие системы». Приведена методика выполнения лабораторных работ и краткие теоретические сведения по отдельным разделам дисциплины.

Методические указания предназначены для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника.

УДК 681.51(076.5)
ББК 32.965.07я7

© Сильвашко С. А., 2018
© ОГУ, 2018

Содержание

Введение	5
1 Лабораторная работа № 1. Распознавание сигнала и определение его параметров на основе корреляционного анализа	6
1.1 Задание для подготовки к лабораторной работе	6
1.2 Задание на лабораторную работу	6
1.3 Порядок выполнения лабораторной работы	6
1.4 Варианты индивидуальных заданий	7
1.5 Вопросы для самоконтроля	8
2 Лабораторная работа № 2. Исследование вероятностных характеристик случайных процессов.....	9
2.1 Задание для подготовки к лабораторной работе.....	9
2.2 Задание на лабораторную работу	9
2.3 Порядок выполнения лабораторной работы	9
2.4 Вопросы для самоконтроля	11
3 Лабораторная работа № 3. Исследование энергетических спектров зашумленных модулированных сигналов	12
3.1 Краткие сведения из теории	12
3.2 Задание для подготовки к лабораторной работе.....	15
3.3 Задание на лабораторную работу	15
3.4 Порядок выполнения лабораторной работы	16
3.5 Вопросы для самоконтроля	17
4 Лабораторная работа № 4. Фильтрация, демодуляция и декодирование КАМ-сигналов.....	18
4.1 Краткие сведения о КАМ-сигналах и способах их демодуляции и декодирования	18
4.2 Задание для подготовки к лабораторной работе.....	21
4.3 Задание на лабораторную работу	21
4.4 Порядок выполнения лабораторной работы	22

4.5 Вопросы для самоконтроля	22
5 Лабораторная работа № 5. Исследование типовых узлов устройства сопряжения с объектом ИИиУС.....	24
5.1 Краткие сведения о типовых узлах устройства сопряжения с объектом	24
5.1.1 Нелинейные измерительные преобразователи.....	24
5.1.2 Фильтры для нелинейных преобразователей.....	26
5.1.3 Устройства выборки-хранения	28
5.2 Задание для подготовки к лабораторной работе	31
5.3 Задание на лабораторную работу	32
5.4 Порядок выполнения лабораторной работы	32
5.5 Варианты индивидуальных заданий	40
5.6 Вопросы для самоконтроля	41
6 Лабораторная работа № 6 Исследование метрологических характеристик аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей.....	42
6.1 Погрешности аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей	42
6.2 Задание для подготовки к лабораторной работе	46
6.3 Задание на лабораторную работу	46
6.4 Порядок выполнения лабораторной работы	46
6.5 Варианты индивидуальных заданий	52
6.6 Вопросы для самоконтроля	53
7 Лабораторная работа № 7. Исследование канала передачи измерительной информации.....	54
7.1 Краткие теоретические сведения.....	54
7.2 Задание для подготовки к лабораторной работе.....	60
7.3 Задание на лабораторную работу	61
7.4 Порядок выполнения лабораторной работы	61
7.5 Варианты индивидуальных заданий	63
7.6 Вопросы для самоконтроля	63
8 Литература, рекомендуемая для изучения при подготовке к занятиям	64

Введение

Информационно-измерительные и управляющие системы (ИИиУС) широко применяют для контроля за технологическими процессами в производстве (в том числе в машиностроении, энергетике и т. п.), для получения измерительной информации от удаленных объектов и т. д. Такие системы обеспечивают возможность одновременного измерения большого числа параметров контролируемого объекта (объектов), обработки результатов измерений и выработки управляющих воздействий для различных исполнительных устройств.

Лабораторный практикум, предусмотренный по дисциплине «Информационно-измерительные и управляющие системы», направлен на приобретение обучающимися навыков исследования основных характеристик измерительных сигналов и типовых структурных элементов ИИиУС с помощью современных программных средств.

Методические указания предназначены для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника.

1 Лабораторная работа № 1. Распознавание сигнала и определение его параметров на основе корреляционного анализа

Целью лабораторной работы является исследование возможности обнаружения сигнала с заданной частотой в полигармоническом периодическом сигнале на основе корреляционного анализа.

Аудиторное время, отводимое на занятие – 4 академических часа.

1.1 Задание для подготовки к лабораторной работе

1.1.1 Изучить понятия автокорреляционной функции, взаимно-корреляционной функции, корреляционного анализа [8.1, С. 72 – 90].

1.2 Задание на лабораторную работу

1.2.1 Исследовать возможность обнаружения гармонического колебания с известной частотой в спектре полигармонического периодического сигнала на основе корреляционного анализа.

1.2.2 Исследовать возможность определения параметров обнаруженного гармонического колебания на основе использования параметров корреляционной функции.

1.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1.3.1 В среде математического пакета Mathcad, используя корреляционный анализ, определить наличие гармонических колебаний с частотами ω_k ($k = 1, 2, 3, 4$) в периодическом сигнале $u(t)$ с периодом повторения T . Варианты индивидуальных заданий для проведения исследований приведены в таблице 1.

Примечание – Свидетельством наличия гармонического колебания с заданной частотой в спектре полигармонического сигнала считать величину амплитуды корреляционной функции, превышающую значение 10^{-10} В^2 .

Полученные в ходе исследований взаимно-корреляционные функции представить графически.

1.3.2 Для одного из обнаруженных гармонических колебаний определить амплитуду и начальную фазу. Записать аналитическое выражение, описывающее обнаруженное колебание.

Используя аналитические выражения обнаруженного колебания и его образа, вычислить взаимно-корреляционную функцию. Построить график функции. Сравнить полученный график с графиком взаимно-корреляционной функции, построенном при выполнении п. 1.3.1 для колебания с такой же частотой.

Проанализировать полученный результат, сформулировать выводы.

Представить отчет о проведенных исследованиях руководителю занятия.

1.4 Варианты индивидуальных заданий

Таблица 1 – Варианты индивидуальных заданий

Номера вариантов	Вид сигнала $u(t)$	Период сигнала (T) , с	Частота гармоники (ω_k) , рад/с
1	$u(t) = \frac{2,5 \cdot [\sin 81t + 5,4 - \sin 51t + 3,4]}{\sin 3t + 0,2}$	$\frac{2\pi}{6}$	30, 48, 60, 72
2	$u(t) = \frac{2 \cdot [\sin 37,5t + 1,875 - \sin 22,5t + 1,125]}{\sin 1,5t + 0,075}$	$\frac{2\pi}{3}$	24, 33, 54, 60
3	$u(t) = \frac{[\sin 52,5t + 2,1 - \sin 32,5t + 1,3]}{\sin 2,5t + 0,1}$	$\frac{2\pi}{5}$	20, 35, 50, 60
4	$u(t) = \frac{1,2 \cdot [\sin 73,5t + 3,15 - \sin 38,5t + 1,65]}{\sin 3,5t + 0,15}$	$\frac{2\pi}{7}$	28, 42, 63, 77
5	$u(t) = \frac{1,4 \cdot [\sin 72,5t + 2,9 - \sin 42,5t + 1,7]}{\sin 2,5t + 0,1}$	$\frac{2\pi}{5}$	25, 60, 70, 90
6	$u(t) = \frac{1,75 \cdot [\sin 43,5t + 7,25 - \sin 22,5t + 3,75]}{\sin 1,5t + 0,25}$	$\frac{2\pi}{3}$	12, 18, 27, 42
7	$u(t) = \frac{[\sin 73,5t + 1,575 - \sin 45,5t + 0,975]}{\sin 3,5t + 0,075}$	$\frac{2\pi}{7}$	21, 49, 70, 91
8	$u(t) = \frac{2,5 \cdot [\sin 95t + 1,425 - \sin 55t + 0,825]}{\sin 5t + 0,075}$	$\frac{2\pi}{10}$	30, 70, 90, 120

Продолжение таблицы 1

Номера вариантов	Вид сигнала $u(t)$	Период сигнала (T) , с	Частота гармоники (ω_k) , рад/с
9	$u(t) = \frac{3 \cdot [\sin 116t + 4,35 - \sin 76t + 2,85]}{\sin 4t + 0,15}$	$\frac{2\pi}{8}$	80, 88, 120, 136
10	$u(t) = \frac{0,8 \cdot [\sin 103,5t + 2,875 - \sin 58,5t + 1,625]}{\sin 4,5t + 0,125}$	$\frac{2\pi}{9}$	43, 72, 90, 138

1.5 Вопросы для самоконтроля

1.5.1 Записать выражение корреляционной функции для детерминированного сигнала конечной длительности. Пояснить физическую сущность корреляционной функции.

1.5.2 Чему равно максимальное значение автокорреляционной функции?

1.5.3 В каком случае на практике используют автокорреляционную функцию, а в каком – взаимно-корреляционную?

1.5.4 В чем различие между автокорреляционной функцией и взаимно-корреляционной функцией?

1.5.5 Приведите свойства автокорреляционной и взаимно-корреляционной функций.

1.5.6 Каково практическое применение корреляционного анализа?

1.5.7 Как определяется корреляционная функция периодического сигнала?

1.5.8 Поясните особенности корреляционной функции гармонического колебания.

1.5.9 Как связаны корреляционная функция и спектральная характеристика сигнала?

2 Лабораторная работа № 2. Исследование вероятностных характеристик случайных процессов

Целью лабораторной работы является исследование вероятностных характеристик случайных процессов с различными законами распределения.

Аудиторное время, отводимое на занятие – 4 академических часа.

2.1 Задание для подготовки к лабораторной работе

2.1.1 Изучить основы теории случайных сигналов [8.1, С. 142 – 149, 155 – 161].

2.2 Задание на лабораторную работу

2.2.1 Исследовать законы распределения и числовые характеристики случайной величины с равномерным распределением.

2.2.2 Исследовать законы распределения и числовые характеристики случайной величины с нормальным распределением.

2.3 Порядок выполнения лабораторной работы

Примечание – Для проведения исследований получить у руководителя занятия файлы, содержащие массивы числовых значений случайных величин с равномерным и нормальным законами распределения, полученных в результате сечения некоторых случайных процессов, заданных ансамблями реализаций, в произвольный момент времени t_k .

2.3.1 В среде математического пакета Mathcad открыть файл $rN.prn$, где N – номер варианта. Файл содержит массив числовых значений случайной величины, распределенной по **равномерному** закону.

Вычислить: математическое ожидание m_r , дисперсию D_r и среднее квадратическое отклонение σ_r случайной величины.

Построить в одной системе координат графики функции распределения $F(r)$ и плотности распределения вероятности $p(r)$ случайной величины.

Проанализировать полученный результат. Сформулировать выводы.

2.3.2 В среде математического пакета Mathcad открыть файл $nN.prn$, где N – номер варианта. Файл содержит массив числовых значений случайной величины, распределенной по **нормальному** закону.

Используя встроенные функции Mathcad, вычислить: математическое ожидание m_n , дисперсию D_n и среднее квадратическое отклонение σ_n случайной величины.

С помощью функции **rnorm**(m, μ, σ) с параметрами $m = 50, \mu = m_n, \sigma = \sigma_n$ сгенерировать массив случайных чисел с нормальным законом распределения. Вычислить: математическое ожидание m_{n1} , дисперсию D_{n1} и среднее квадратическое отклонение σ_{n1} для полученного массива чисел.

Построить в одной системе координат графики функций распределения $F(n)$, $F(n1)$ и плотностей распределения вероятности $p(n)$, $p(n1)$ исходной и сгенерированной случайных величин.

Используя функцию Mathcad **corr**, вычислить коэффициент корреляции элементов исходного и сгенерированного массивов числовых значений случайных величин.

Проанализировать полученный результат. Сформулировать выводы.

2.3.3 Для массива числовых значений, находящегося в файле $nN.prn$, определить вероятность попадания случайной величины в интервал значений, указанный в таблице 2.

Таблица 2 – Варианты исходных данных для выполнения п. 2.3.3

Номера вариантов	Интервал попадания значений случайной величины	Номера вариантов	Интервал попадания значений случайной величины
1	$m_n - 2\sigma_n \leq n \leq \infty$	6	$m_n - 2\sigma_n \leq n \leq m_n + 2\sigma_n$
2	$m_n - 3\sigma_n \geq n \geq m_n + \sigma_n$	7	$m_n \leq n \leq \infty$
3	$-\infty \leq n \leq m_n + 3\sigma_n$	8	$m_n - 3\sigma_n \leq n \leq m_n + 2\sigma_n$
4	$m_n - 3\sigma_n \leq n \leq m_n + 3\sigma_n$	9	$m_n - 2\sigma_n \geq n \geq m_n + 2\sigma_n$
5	$m_n - \sigma_n \leq n \leq m_n + 3\sigma_n$	10	$m_n - \sigma_n \geq n \geq m_n + 3\sigma_n$

Проанализировать полученный результат. Сформулировать выводы.

Подготовить отчет о проведенных исследованиях и представить руководителю занятия.

2.4 Вопросы для самоконтроля

2.4.1 Приведите примеры случайных сигналов, имеющих место в электронных устройствах измерительного канала информационно-измерительной системы, воздействующих на первичные измерительные преобразователи, на линию связи при передаче измерительной информации.

2.4.2 Что называется функцией распределения случайной величины, плотностью распределения вероятности случайной величины? Как связаны эти две функции?

2.4.3 Чему равна площадь фигуры, ограниченной снизу осью x , а сверху – графиком функции плотности вероятности нормально распределенной случайной величины?

2.4.4 Перечислите числовые характеристики случайных величин и приведите математические выражения для их вычисления.

2.4.5 Пояснить понятие доверительного интервала. Чему равна вероятность пребывания случайной величины в первом (втором, третьем) доверительном интервале?

2.4.6 Приведите математическое выражение для плотности распределения вероятности нормально распределенной случайной величины.

2.4.7 В чем различие между случайной величиной и случайным процессом?

2.4.8 Что понимают под реализацией случайного процесса?

3 Лабораторная работа № 3. Исследование энергетических спектров зашумленных модулированных сигналов

Цель лабораторной работы – исследовать энергетический спектр зашумленного модулированного сигнала и возможность восстановления сигнала на основе знания спектральных характеристик сигнала и широкополосного шума.

Аудиторное время, отводимое на занятие – 4 академических часа.

3.1 Краткие сведения из теории

В общем случае амплитудно-модулированное (АМ) колебание описывают выражением:

$$s(t) = [A_0 + s_M(t)] \cos \omega_0 t + \varphi_0, \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда несущего колебания;

$s_M(t)$ – модулирующее колебание;

ω_0 – частота несущего колебания;

φ_0 – начальная фаза несущего колебания.

В рамках лабораторной работы с целью облегчения понимания физической сути процессов рассматривается частный случай АМ-колебания – модуляция несущего колебания гармоническим сигналом. В этом случае выражение (1) примет вид:

$$s(t) = [A_0 + A_M \cos \Omega t + \Phi] \cos \omega_0 t + \varphi_0, \quad (2)$$

где A_M – амплитуда модулирующего сигнала;

Ω – частота модулирующего сигнала;

Φ – начальная фаза модулирующего сигнала.

Отношение m между амплитудами модулирующего сигнала A_M и несущего колебания A_0 называется **коэффициентом модуляции** (или *глубиной модуляции*):

$$m = \frac{A_M}{A_0} . \quad (3)$$

С учетом (3) выражение (2) примет вид:

$$s(t) = A_0 [1 + m \cos \Omega t + \Phi] \cos \omega_0 t + \varphi_0 . \quad (4)$$

На рисунке 1 приведена временная диаграмма АМ-колебания при модуляции гармоническим сигналом.

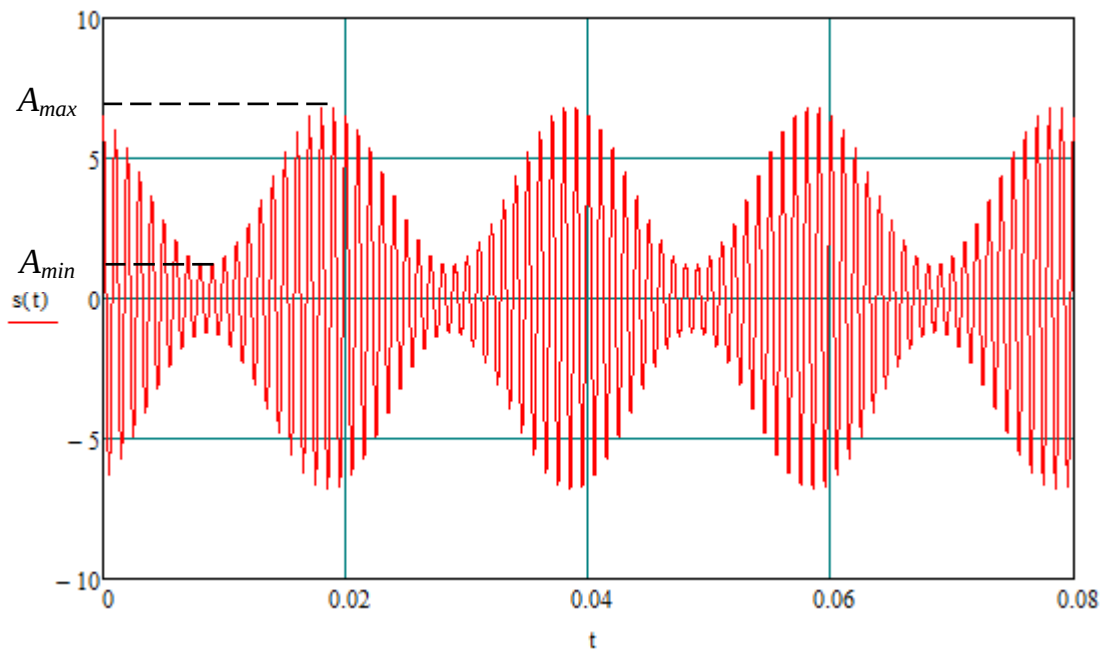


Рисунок 1

Коэффициент модуляции может быть определен экспериментально с использованием временной диаграммы модулированного колебания (рисунок 1):

$$m = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} . \quad (5)$$

Выражение (4) можно представить в виде трех гармонических составляющих:

$$s(t) = A_0 [1 + m \cos \Omega t + \Phi] \cos \omega_0 t + \varphi_0 = A_0 \cos \omega_0 t + \varphi_0 + \frac{A_0 m}{2} \cos [\omega_0 + \Omega t + \varphi_0 + \Phi] + \frac{A_0 m}{2} \cos [\omega_0 - \Omega t + \varphi_0 - \Phi] . \quad (6)$$

Как видно из выражения (6), при амплитудной модуляции гармоническим сигналом АМ-колебание представляет собой сумму трех гармонических колебаний: одно колебание (*несущее*) с частотой ω_0 и два колебания (*боковые частоты*) с частотами $\omega_0 \pm \Omega$.

Таким образом, амплитудный спектр АМ-колебания при модуляции гармоническим сигналом содержит три спектральных составляющих: гармонику на частоте ω_0 , уровень которой A_0 не зависит от уровня модулирующего сигнала, и две гармоники на частотах $\omega_0 - \Omega$ и $\omega_0 + \Omega$, амплитуды которых равны $\frac{A_0 m}{2}$ и пропорциональны коэффициенту модуляции.

На практике реальные сигналы (особенно передаваемые по линиям связи) кроме гармонических составляющих сигнала, используемого для передачи информации, содержат шумовую составляющую. Причем шумовой сигнал, как правило, содержит гармоники в широком диапазоне частот. Несмотря на то, что отдельные гармоники шумового сигнала могут обладать достаточно незначительной мощностью по сравнению с мощностью сигнала, суммарная мощность всех гармонических составляющих шума (мощность шумового сигнала) может превосходить мощность информационного сигнала. В этом случае на временной диаграмме зашумленного сигнала (рисунок 2) из-за шума, представляющего собой случайный процесс, практически невозможно наблюдать привычное изображение АМ-сигнала.

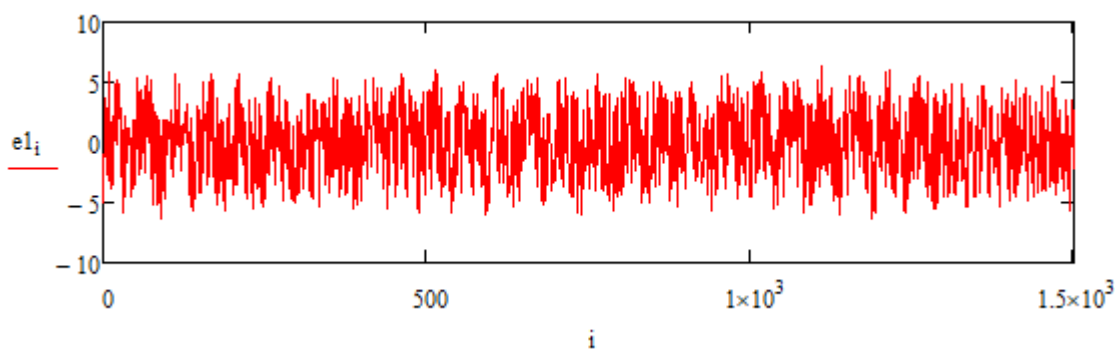


Рисунок 2

В результате анализа временной диаграммы, приведенной на рисунке 2, казалось бы, можно сделать вывод, что выделить (воспроизвести) информационный

сигнал в данном практическом случае не возможно. Однако в частотной области энергия шумового сигнала, как отмечено выше, распределяется между всеми многочисленными гармоническими составляющими, рассредоточенными в широком частотном диапазоне (как бы «размазывается» по частоте), из-за чего амплитудный спектр шума по уровню может оказаться ниже информативного спектра модулированного колебания. Как показано на рисунке 3, в спектре зашумленного сигнала (временная диаграмма которого приведена на рисунке 2) гармоники модулированного колебания (в центре рисунка) значительно превосходят по уровню гармоники шума и могут быть выделены посредством фильтрации (например, по уровню).

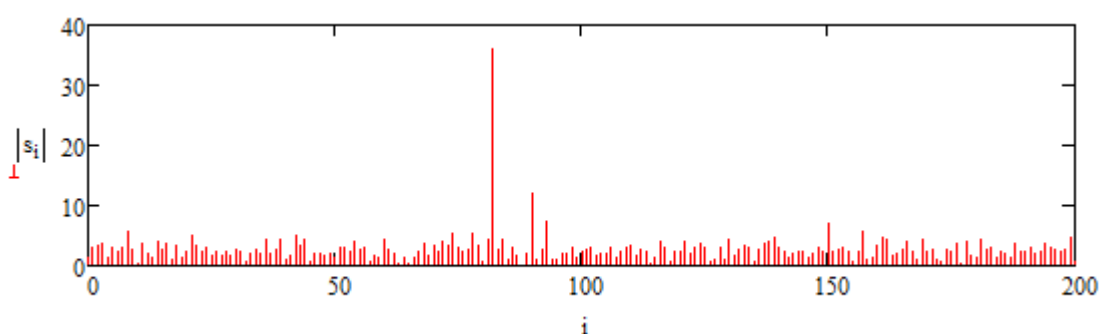


Рисунок 3

3.2 Задание для подготовки к лабораторной работе

3.2.1 Изучить теоретический материал, связанный с темой проводимых исследований [8.1, С. 92 – 98, 164 – 170], материал подраздела 3.1 методических указаний.

3.2.2 Ознакомиться с реализацией дискретного преобразования Фурье в математическом пакете Mathcad [8.4, С. 105 – 117].

3.3 Задание на лабораторную работу

3.3.1 Применяя быстрое преобразование Фурье и методы фильтрации, выделить АМ-колебание из аддитивной смеси информативного сигнала и «белого» шума.

3.3.2 Восстановить параметры АМ-колебания, составить его аналитическое описание.

3.4 Порядок выполнения лабораторной работы

Примечание – Для проведения исследований получить у руководителя занятия файл, содержащий массив выборок значений сигнала с равномерной временной дискретизацией $T_0 = 100$ нс, представляющего собой смесь АМ-колебания и «белого» шума.

3.4.1 В среде математического пакета Mathcad открыть файл $N.prn$, где N – номер варианта индивидуального задания. Применяя быстрое преобразование Фурье (БПФ) к массиву дискретных выборок сигнала, получить массив спектральных составляющих сигнала. Построить диаграмму модуля спектра сигнала.

Отфильтровать спектр модулированного колебания (методом обнуления спектральных составляющих, уровень которых меньше уровня спектральных составляющих АМ-колебания). Построить диаграмму модуля спектра отфильтрованного сигнала.

Результаты представить руководителю занятия.

3.4.2 Применяя обратное БПФ (ОБПФ) к спектру отфильтрованного сигнала, восстановить АМ-колебание во временной области. Построить временную диаграмму АМ-колебания.

По временной диаграмме восстановленного АМ-колебания (с учетом заданного интервала дискретизации T_0) определить:

- T_M – период огибающей АМ-колебания;
- T_0 – период несущего колебания;
- ΔT_M – временное смещение косинусоидальной огибающей АМ-колебания от начала координат;
- ΔT_0 – временное смещение косинусоидального несущего колебания от начала координат;
- A_{max} , A_{min} – максимальное и минимальное значения амплитуд модулированного колебания.

Вычислить:

- ω_0 – частоту несущего колебания;
- Ω – частоту модулирующего колебания;

- φ_0 – начальную фазу несущего колебания;
- Φ – начальную фазу модулирующего колебания;
- m – коэффициент модуляции.

Используя полученные числовые значения параметров АМ-колебания, составить аналитическое выражение модулированного колебания по формуле (4).

Построить в одной системе координат временные диаграммы двух АМ-колебаний: восстановленного с помощью ОБПФ после фильтрации и описанного аналитически.

Проанализировать полученный результат. Сформулировать выводы.

Подготовить отчет о проведенных исследованиях и представить руководителю занятия.

3.5 Вопросы для самоконтроля

3.5.1 Какие виды помех могут иметь место в канале передачи измерительной информации?

3.5.2 Какое влияние оказывает широкополосный шум на информативный параметр измерительного сигнала?

3.5.3 Что собой представляет спектр амплитудно-модулированного колебания?

3.5.4 В каких гармониках АМ-колебания заложена передаваемая информация?

3.5.5 Сколько достаточно иметь гармоник АМ-колебания, чтобы обеспечить возможность извлечения передаваемой информации?

3.5.6 Как на практике определить коэффициент амплитудной модуляции?

3.5.7 Какое максимальное значение может принимать коэффициент амплитудной модуляции, при котором еще возможно восстановление информации при демодуляции?

3.5.8 Как зависит уровень гармоник несущего колебания и уровни боковых гармоник от величины коэффициента амплитудной модуляции?

4 Лабораторная работа № 4. Фильтрация, демодуляция и декодирование КАМ-сигналов

Целью лабораторной работы является исследование возможности демодуляции зашумленных сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией на основе корреляционного анализа.

Аудиторное время, отводимое на занятие – 4 академических часа.

4.1 Краткие сведения о КАМ-сигналах и способах их демодуляции и декодирования

Для передачи дискретной (бинарной) информации широко применяется квадратурно-амплитудная модуляция (КАМ). Данный вид модуляции имеет некоторые особенности управления параметрами несущего колебания. При КАМ **изменяется фаза**, так и **амплитуда сигнала**, что позволяет увеличить количество кодируемых бит и при этом существенно повысить помехоустойчивость.

Квадратурное представление заключается в выражении колебания линейной комбинацией **двух ортогональных составляющих** – синусоидальной и косинусоидальной:

$$s(t) = x(t) \sin \omega t + \phi + y(t) \cos \omega t + \phi, \quad (7)$$

где $x(t)$ и $y(t)$ – биполярные дискретные величины.

В простейшем случае при квадратурной амплитудной модуляции используют два уровня дискретной величины $x(t)$ и два уровня дискретной величины $y(t)$. Результирующий сигнал будет представлять собой сигнал КАМ-4.

Такой вид модуляции можно пояснить с помощью векторной диаграммы (рис. 4), на которой в декартовой системе координат с вертикальной осью y и горизонтальной осью x изображают **положение конца вектора** (сигнальную точку) модулированного сигнала. Координаты каждой сигнальной точки определяются значениями $x(t)$ и $y(t)$. При использовании сигнала КАМ-4 такими значениями являются два передаваемых бита информации.

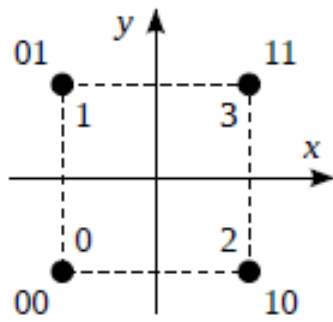


Рисунок 4

Структура квадратурного модулятора показана на рисунке 5. Основу модулятора составляют два **балансных модулятора** и **сумматор** высокочастотных сигналов (с частотой ω), на выходе которого образуется квадратурно-модулированный сигнал $s(t)$. Несущие колебания, поступающие на опорные входы балансных модуляторов, имеют взаимный фазовый сдвиг 90 градусов, то есть находятся в

квадратуре. Входные модулирующие сигналы $x(t)$ и $y(t)$ являются квантованными по уровню и дискретными во времени. Длительность их тактового интервала определяется частотой тактирования. Таким образом, входные сигналы – это сигналы с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ).

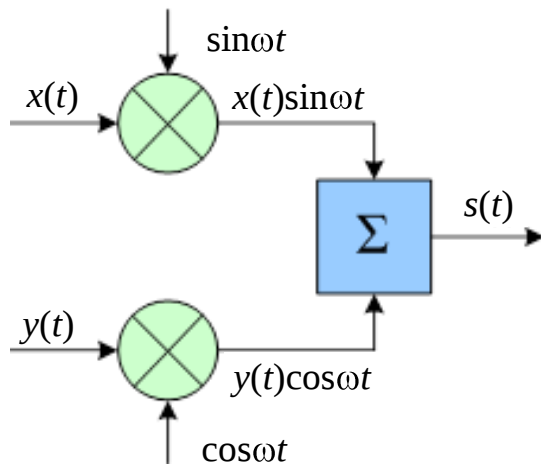


Рисунок 5

При КАМ-4 два бита информации передаются в пределах одного периода несущего колебания $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ (**цуга**). При передаче одного байта двоичного кода сигнал КАМ-4 $s(t)$ состоит из четырех цугов, причем в первом цуге передаются два младших бита d_0 и d_1 , в следующем цуге – биты d_2 и d_3 , далее – биты d_4 и d_5 , и в последнем цуге – биты d_6 и d_7 . С учетом этого модель сигнала КАМ-4 имеет вид:

$$s(t) = \begin{cases} x_0 \sin \omega_0 t + x_1 \cos \omega_0 t, & \text{при } 0 \leq t < T_0, \\ x_2 \sin \omega_0 t + x_3 \cos \omega_0 t, & \text{при } T_0 \leq t < 2T_0, \\ x_4 \sin \omega_0 t + x_5 \cos \omega_0 t, & \text{при } 2T_0 \leq t < 3T_0, \\ x_6 \sin \omega_0 t + x_7 \cos \omega_0 t, & \text{при } 3T_0 \leq t \leq 4T_0. \end{cases} \quad (8)$$

Множители x_i (где $i = 0, 1, \dots, 7$) в (8) кодируют следующим образом:

- а) $x_i = +1$ при $d_i = 0$;
- б) $x_i = -1$ при $d_i = 1$.

Демодуляция сигнала КАМ-4 осуществляется одновременно двумя каналами на основе значения корреляционной функции при нулевом смещении

(то есть при $\tau = 0$ вычисляется максимум корреляции между КАМ-сигналом и ожидаемым образом в виде *синусной* и *косинусной* составляющих). В первом канале производится операция, адекватная вычислению интеграла

$$x_{2k} = \frac{1}{T_0} \int_{k \cdot T_0}^{k+1 \cdot T_0} e_k(t) \cdot 2 \sin \omega_0 t \, dt, \quad (9)$$

а во втором канале – адекватная вычислению интеграла

$$x_{2k+1} = \frac{1}{T_0} \int_{k \cdot T_0}^{k+1 \cdot T_0} e_k(t) \cdot 2 \cos \omega_0 t \, dt, \quad (10)$$

где $k = 0, 1, 2, 3$ – номер цуга;

$e_k(t)$ – часть КАМ-сигнала $s(t)$ в пределах k -го цуга.

Примечание – При выполнении демодуляции в среде Mathcad учесть, что исходный сигнал $s(t)$, соответствующий передаче одного байта со скоростью v байт/с, задан массивом s_i чисел. Размер массива равен l .

Последовательность операций при демодуляции КАМ-сигнала в среде Mathcad:

1) определить длительность цуга T_0 , частоту несущего колебания ω_0 и период дискретизации T_∂ ;

2) сформировать массивы значений выборок es_i и ec_i из функций $2\sin(\omega_0 t)$ и $2\cos(\omega_0 t)$ соответственно с периодом дискретизации T_∂ . Размеры массивов es_i и ec_i должны быть равными размеру массива s_i ;

3) получить два массива элементов: $s_i \cdot es_i$ и $s_i \cdot ec_i$;

4) заменяя интегралы в выражениях (9) и (10) суммой площадей трапеций (или прямоугольников), а длительность цуга T_0 – на размер массива (число элементов) в пределах цуга, вычислить демодулированные значения $\hat{x}_i$ для всех цугов принятого сигнала $s(t)$.

После демодуляции принятого сигнала осуществляется **декодирование** информации, то есть замена ϵ_i на соответствующие им d_i с учетом принятого способа кодирования.

В реальных линиях связи КАМ-сигналы сильно зашумлены, то есть представляют собой, в общем случае, случайные процессы. Можно полагать, что демодулированные значения ϵ_i распределены по нормальному закону. Кроме этого при большом числе передаваемых сообщений события, связанные с появлением в сообщениях нуля и единицы можно считать равновероятными и равными 0,5. Следовательно, при отсутствии шума можно было бы записать: $P(x_i = 1) = P(x_i = -1) = 0,5$. Тогда при декодировании принятого сообщения для принятия решения о наличии бита $d_i = 0$ или бита $d_i = 1$ демодулированное значение x_i достаточно сравнить с пороговым значением, в качестве которого можно принять $por = 0$, и если $x_i < por$, то $d_i = 1$, а если $x_i > por$, то $d_i = 0$.

Учитывая, что демодулированный сигнал подвержен воздействию шума, значение порога смещается относительно нуля влево или вправо. В этом случае в качестве порогового значения следует принять математическое среднее демодулированных значений ϵ_i ($por = m_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^8 \epsilon_i}{8}$), а процедура декодирования будет такая же, как описана выше.

4.2 Задание для подготовки к лабораторной работе

4.2.1 Изучить теоретический материал, изложенный в подразделе 4.1, а также лекционный материал, связанный с темой проводимых исследований.

4.3 Задание на лабораторную работу

4.3.1 Исследовать методы фильтрации, демодуляции и декодирования сигнала КАМ-4.

4.4 Порядок выполнения лабораторной работы

Примечание – Для проведения исследований получить у руководителя занятия файл, содержащий массив выборок значений сигнала с равномерной дискретизацией, представляющего собой смесь сигнала КАМ-4 и «белого» шума (отношение сигнал/шум = 1/6). Сигналом передается один байт информации со скоростью $2,5 \times N$ килобайт/с, где N – номер варианта индивидуального задания.

4.4.1 В среде математического пакета Mathcad открыть файл *N.prn*.

Определить размер массива выборок значений сигнала. Вычислить длительность цуга T_0 , частоту несущего колебания ω_0 и период дискретизации T_0 .

Построить временную диаграмму сигнала.

Отфильтровать сигнал КАМ-4, подавив шумовую составляющую на частотах, превышающих $10\omega_0$. Построить спектральную диаграмму отфильтрованного сигнала.

Применяя ОБПФ, восстановить сигнал КАМ-4 во временной области. Построить его временную диаграмму. Сравнить временные диаграммы зашумленного и отфильтрованного сигналов. Сформулировать выводы.

4.4.2 Используя выражения (9) и (10) (заменяя в них интегралы суммой площадей трапеций), демодулировать сигнал КАМ-4.

Вычислить математическое среднее демодулированных значений ϵ_i сигнала. Приняв его за величину порога, декодировать полученное сообщение. Представить результат декодирования в виде байта информации $d_7 - d_0$. Проанализировать полученный результат, сформулировать выводы.

Подготовить отчет о проведенных исследованиях и представить руководителю занятия.

4.5 Вопросы для самоконтроля

4.5.1 Для передачи какого вида информации применяют квадратурно-амплитудную модуляцию?

4.5.2 В чем достоинство квадратурно-амплитудных видов модуляции по сравнению с амплитудной или фазовой модуляцией?

4.5.3 Приведите структуру и поясните функционирование квадратурного модулятора.

4.5.4 Какова структура сигнала КАМ-4 и как кодируется несущее колебание в зависимости от битов передаваемой информации?

4.5.5 На чем основана демодуляция сигнала КАМ-4?

4.5.6 Каковы особенности спектра сигнала КАМ-4 и как они могут быть использованы для обеспечения фильтрации сигнала из смеси с широкополосным шумом?

5 Лабораторная работа № 5. Исследование типовых узлов устройства сопряжения с объектом ИИиУС

Целью лабораторной работы является привитие навыков исследования основных характеристик типовых структурных элементов ИИиУС с помощью современных программных средств схемотехнического моделирования.

Аудиторное время, отводимое на занятие – 6 академических часов.

5.1 Краткие сведения о типовых узлах устройства сопряжения с объектом

В зависимости от решаемых с помощью ИИиУС задач, вида входных сигналов от объекта контроля и управления, построения структурной схемы устройства сопряжения с объектом (УСО), в состав УСО могут входить те или иные типовые узлы (устройства): преобразователи ток-напряжение, функциональные преобразователи (например, нелинейные преобразователи-выпрямители (НПВ)), фильтры, аналоговые и цифровые мультиплексоры, аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи, устройства выборки-хранение и др. Рассмотрим некоторые из названных устройств.

5.1.1 Нелинейные измерительные преобразователи

Класс нелинейных преобразователей существует для реализации самых различных функций: получения абсолютного значения функции, перемножения сигналов, логарифмирования и антилогарифмирования сигналов и т. п. В рамках изучаемой тематики интерес представляют НПВ, применяемые в УСО для согласования датчика переменного напряжения (или тока) с АЦП. Упрощенная схема однополупериодного НПВ представлена на рисунке 6. Если пренебречь падением напряжения на открытом диоде VD (то есть считать его внутреннее сопротивление $R_{d\ np} = 0$) и токами утечки при закрытом диоде ($R_{d\ обр} \rightarrow \infty$), то:

– для положительного напряжения на входе НПВ коэффициент передачи равен:

$$K_{U+} = -\frac{R_{oc} R_{dnp}}{R_{oc} + R_{dnp} R} = 0; \quad (11)$$

– для отрицательного напряжения на входе НПВ коэффициент передачи, с учетом бесконечно большого сопротивления закрытого диода, равен:

$$K_{U-} = -\frac{R_{oc} R_{dобр}}{R_{oc} + R_{dобр} R} = -\frac{R_{oc}}{R}. \quad (12)$$

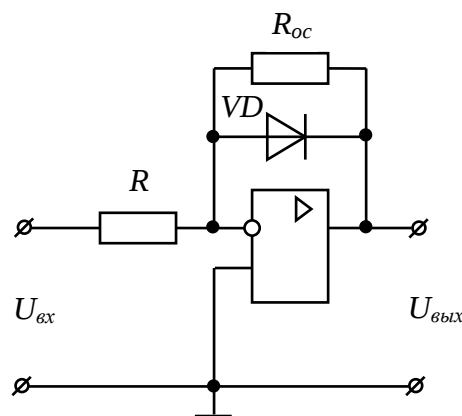


Рисунок 6

На практике идеальных диодов не бывает, да и эффективность однополупериодного выпрямителя невысока (постоянная составляющая напряжения после однополупериодного выпрямления составляет, примерно, $0,318U_m$, где U_m – амплитуда напряжения на входе преобразователя), поэтому высокоточные НПВ выполняют по *двухполупериодной* схеме с компенсирующим диодом. Упрощенная схема такого НПВ представлена на рисунке 7.

Первый каскад схемы выполняет функцию НПВ с коэффициентом передачи напряжения (при закрытом диоде $VD1$) близком к единице, второй – инвертирующего сумматора. Напряжение с выхода первого каскада снимается через компенсирующий диод $VD2$, параметры режима которого идентичны параметрам режима диода $VD1$. Это обеспечивает компенсацию ошибки, внесенной диодом $VD1$.

Во втором каскаде реализовано сложение входного сигнала и его инверсного выпрямленного значения, снимаемого с выхода НПВ. Сопротивление резистора $R2$ в

два раза меньше сопротивления резистора $R1$, поэтому входное напряжение складывается с выходным напряжением первого каскада в пропорции 1:2. В результате этого выходное напряжение преобразователя (рисунок 7) при «выпрямлении» гармонического колебания вида $u(t) = U_m \cos \omega t$ представляет собой последовательность полупериодов напряжения одной полярности с удвоенной частотой 2ω : $u_{\text{вых}}(t) = K_U |U_m \cos \omega t|$, где K_U – коэффициент передачи напряжения всей схемы.

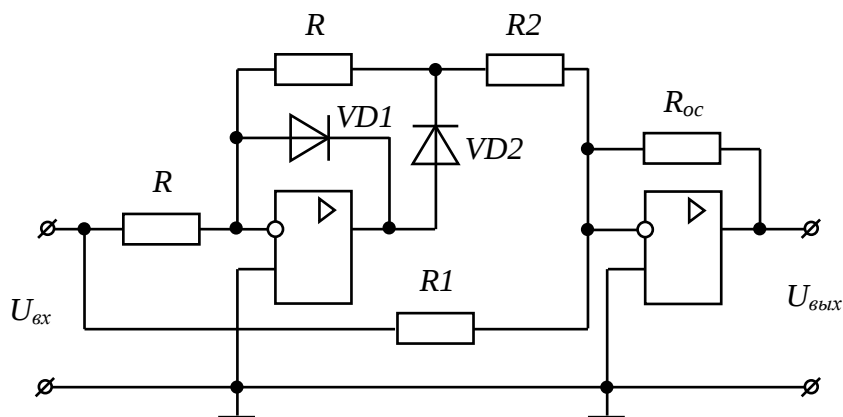


Рисунок 7

Постоянная составляющая напряжения на выходе схемы, приведенной на рисунке 7, определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} \approx -\frac{R_{\text{ос}}}{R1} \cdot \frac{2U_m}{\pi}, \quad (13)$$

где U_m – амплитуда напряжения на входе преобразователя.

5.1.2 Фильтры для нелинейных преобразователей

Фильтры, используемые в ИИиУС, разделяют по назначению (хотя функционально они могут и не различаться). Фильтры, используемые в системах обработки данных (СОД), служат решению проблем помехоустойчивости с требуемой точностью аппроксимации амплитудно-фазового (чаще всего только амплитудного) спектра. Фильтры, относящиеся к измерительным преобразователям, наоборот,

решают задачи *преобразования спектра*. Примером фильтра второго типа является фильтр нижних частот (ФНЧ), который включают после НПВ для выделения постоянной составляющей из выпрямленного напряжения (для преобразования пульсирующего однополярного напряжения в постоянное напряжение).

В качестве простейшего ФНЧ первого порядка может служить интегрирующий усилитель (рисунок 8). Его основное назначение – выделить постоянной составляющей из спектра выпрямленного напряжения, которая пропорциональна амплитуде U_m входного переменного напряжения.

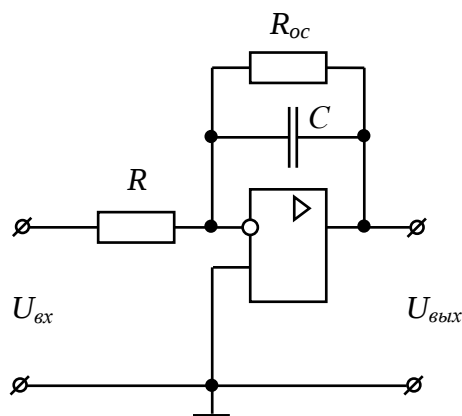


Рисунок 8

Рассмотрим основные параметры, которым должен удовлетворять ФНЧ, исходя из его функционального назначения.

Спектр сигнала $u_{\text{вых}}(t) = K_U |U_m \cos \omega t|$ на выходе выпрямителя (рисунок 7) математически можно представить выражением:

$$U_k = K_U \frac{2U_m \cos k\pi}{\pi (1 - 4k^2)}, \quad (14)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ – номер гармоники.

С помощью ФНЧ из сигнала (14) необходимо выделить только постоянную составляющую (гармонику с номером $k = 0$), уровень которой при двухполупериодном выпрямлении равен:

$$U_{вых0} = K_U \cdot \frac{2U_m}{\pi}. \quad (15)$$

Все остальные гармоники должны быть подавлены.

Для того чтобы подавить гармоники U_1 , U_2 , U_3 и т. д., частота среза ФНЧ ω_c должна удовлетворять условию:

$$\omega_c < k_n \omega_1, \quad (16)$$

где k_n – коэффициент подавления гармоник (оценивается по первой гармонике, как самой ощутимой, то есть $k_n = \frac{U_{1вых}}{U_{1вх}}$, где $U_{1вх}$, $U_{1вых}$ – амплитуды гармоник на входе и выходе ФНЧ соответственно);

ω_1 – частота первой гармоники сигнала на входе фильтра.

Коэффициент передачи ФНЧ по постоянной составляющей (при двухполупериодном выпрямлении) определяется выражением:

$$K_{ФНЧ0} = \frac{U_{вых0}}{U_m} = K_{УФНЧ} \frac{2U_m}{\pi U_m} \approx 0,637 K_{УФНЧ}, \quad (17)$$

где $K_{УФНЧ}$ – коэффициент усиления активного фильтра (рисунок 8) на постоянном токе.

Частота среза ФНЧ может быть вычислена из соотношения:

$$\omega_c \approx \frac{1}{K_{УФНЧ} RC} = \frac{1}{R_{ос} C}. \quad (18)$$

5.1.3 Устройства выборки-хранения

Устройство выборки-хранения (УВХ) в структуре СОД предназначено для «запоминания» значения входного аналогового измерительного сигнала, содержащего информацию об измеряемой физической величине, и поддержания его

неизменным в течение времени, требуемого для преобразования этого сигнала в цифровой код (то есть на время цикла преобразования АЦП).

Известны различные варианты реализации схем УВХ. Все они отличаются, в первую очередь, быстродействием выборки и точностью хранения запомненного напряжения. Упрощенная функциональная схема УВХ приведена на рисунке 9.

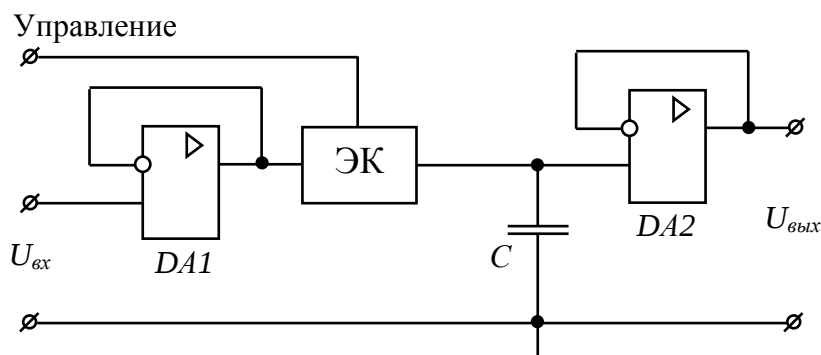


Рисунок 9

Схема обладает умеренной точностью и повышенным быстродействием. Усилители $DA1$ и $DA2$ реализованы по схеме повторителя напряжения и характеризуются большим входным и малым выходным сопротивлениями. Усилитель $DA1$ выполняет функцию буфера для входного сигнала и служит для развязки источника сигнала и емкостной нагрузки (конденсатор C). Усилитель $DA2$ служит в качестве выходного буфера, обеспечивающего согласование выхода УВХ с нагрузкой (уменьшает ток разряда конденсатора C через сопротивление нагрузки во время хранения запомненного напряжения). Электронный ключ (ЭК) служит для подключения конденсатора C к выходу усилителя $DA1$ во время запоминания входного сигнала, и для отключения конденсатора во время хранения запомненного значения этого сигнала.

Функционирование УВХ поясняется временными диаграммами, приведенными на рисунке 10. При наличии импульса управления (этап **выборки** значения входного сигнала) ЭК открыт (его проходное сопротивление стремится к нулю) и конденсатор C быстро заряжается выходным током усилителя $DA1$ до уровня входного сигнала. Чтобы при открытом ключе ЭК напряжение на конденсаторе успевало достичь уровня входного сигнала, необходимо обеспечить выполнение условия:

$$t_{выб} \geq \tau_{зар}, \quad (19)$$

где $t_{выб}$ – время выборки, равное длительности управляющего импульса;

$\tau_{зар} = R_{вых} + R_{ок} C$ – постоянная времени цепи заряда конденсатора C ;

$R_{вых}$, $R_{ок}$ – выходное сопротивление усилителя $DA1$ и сопротивление открытого ЭК соответственно.

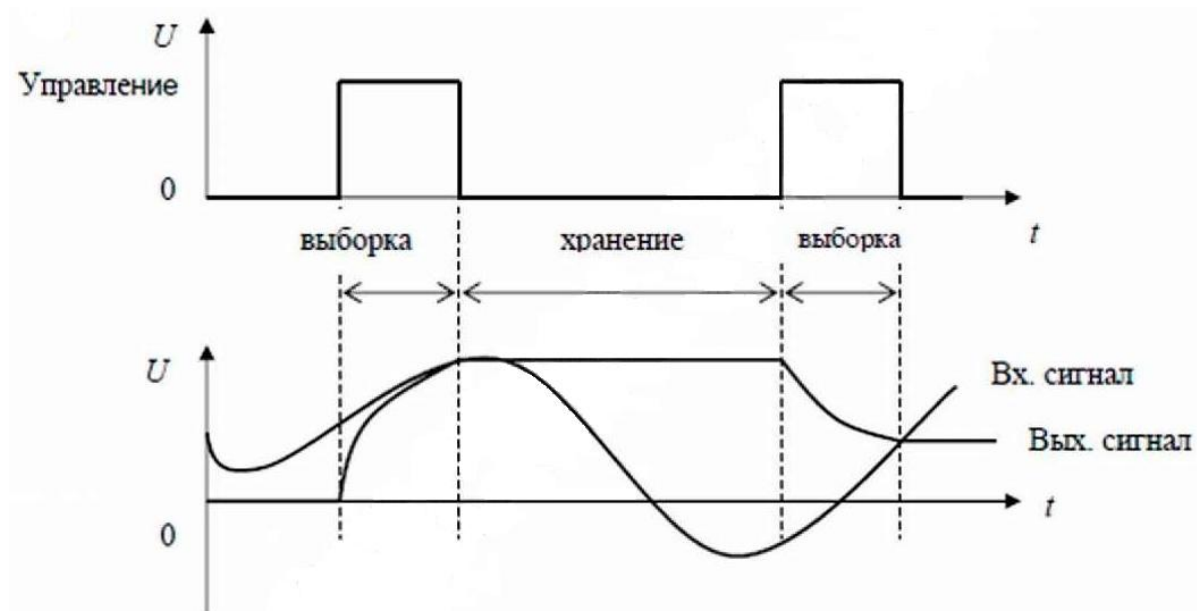


Рисунок 10

При отсутствии управляющего сигнала ЭК находится в разомкнутом состоянии и характеризуется большим внутренним сопротивлением. УВХ при этом условии находится в режиме **хранения** информации. В связи с тем, что используемые в схеме элементы не являются идеальными, конденсатор C будет медленно разряжаться через сопротивление разомкнутого ключа ($R_{рк}$), сопротивление диэлектрика между обкладками конденсатора (R_c), входное сопротивление усилителя $DA2$ (R_y), а также под влиянием тока смещения усилителя $DA2$. Потеря напряжения на конденсаторе к концу времени хранения (t_{xp}) будет определяться соотношением:

$$\Delta U_{xp} = \frac{I_y t_{xp}}{C}, \quad (20)$$

где I_y – суммарный ток разряда.

Анализ выражений (19) и (20) свидетельствует о наличии противоречия: для **точной выборки** значения входного сигнала **номинал** запоминающего конденсатора C УВХ должен быть **как можно меньше**, в то же время для **длительного хранения** значения сигнала без потери напряжения **номинал конденсатора C** должен быть **как можно больше**. Для уменьшения имеющего место противоречия целесообразно (при наличии возможности) увеличивать время выборки сигнала.

Изменение напряжения на конденсаторе C во время хранения приводит к появлению **динамической ошибки** аналого-цифрового преобразования. С целью уменьшения погрешности преобразования необходимо выбирать быстродействующие АЦП (что позволит уменьшить требуемое время хранения t_{xp}), уменьшать суммарный ток утечки I_y (за счет применения в качестве усилителя $DA2$ операционного усилителя с большим входным сопротивлением, конденсатора C с высококачественным тефлоновым, полистирольным или поликарбонатным диэлектриком, в качестве ЭК – полевого транзистора с большим сопротивлением канала в закрытом состоянии).

При поступлении каждого очередного импульса управления (рисунок 10) напряжение на конденсаторе C изменяется до значения входного сигнала в текущем такте запоминания (то есть конденсатор C или подзаряжается, или разряжается до уровня входного сигнала).

5.2 Задание для подготовки к лабораторной работе

5.2.1 Изучить материал учебного пособия [4.2, С. 116 – 118, 120 – 130], материал подраздела 5.1. Повторить учебный материал дисциплины «Основы аналоговой и цифровой электроники» в части описания преобразователей аналоговых сигналов на ОУ, устройства и функционирования мультиплексоров, демультиплексоров, счетчиков и регистров.

5.2.2 Используя исходные данные (таблица 3) и схему, приведенную на рисунке 11, выполнить расчет коэффициента передачи преобразователя K_U для положительной и отрицательной полувольт входного напряжения, полагая диод идеальным.

5.2.3 Используя исходные данные (таблица 3) и схему, приведенную на рисунке 13, выполнить расчет емкости конденсатора фильтра нижних частот для двух значений коэффициента подавления: $k_n = 1$ и $k_n = 0,1$.

5.2.4 Подготовить восьмиразрядный двоичный код входной информации для проведения исследований по пунктам 5.4.5 и 5.4.7 (выполнить перевод входных данных в соответствии с вариантом (таблица 4) из шестнадцатеричного в двоичный код).

5.2.5 Продумать схемы для проведения исследований по пунктам 5.4.5 и 5.4.6 методических указаний.

5.3 Задание на лабораторную работу

5.3.1 Исследовать однополупериодный и двухполупериодный нелинейные преобразователи гармонических сигналов.

5.3.2 Исследовать схему фильтра нижних частот для нелинейного преобразователя-выпрямителя.

5.3.3 Исследовать функционирование мультиплексора и демultipлексора в УСО ИИиУС.

5.3.4 Исследовать функционирование устройства выборки-хранения в УСО ИИиУС.

5.4 Порядок выполнения лабораторной работы

5.4.1 Собрать схему однополупериодного нелинейного преобразователя-выпрямителя (рисунок 11). Установить амплитуду синусоидального напряжения источника сигнала $V1$ равной 1 В, а частоту напряжения $f_{вх}$ и сопротивление резистора $R3$ – в соответствии с вариантом индивидуальных заданий (таблица 3). Выполнить моделирование.

Перенести в отчет с экрана осциллографа изображение диаграмм входного и выходного напряжений схемы. Определить частоту выходного сигнала, а также амплитуду положительной и отрицательной полуволн напряжения на выходе выпрямителя. Используя результаты измерений, вычислить значение коэффициента

передачи K_U . Сравнить полученный результат с расчетным значением K_U , вычисленным при подготовке к занятию (п. 5.2.2).

Сформулировать выводы.

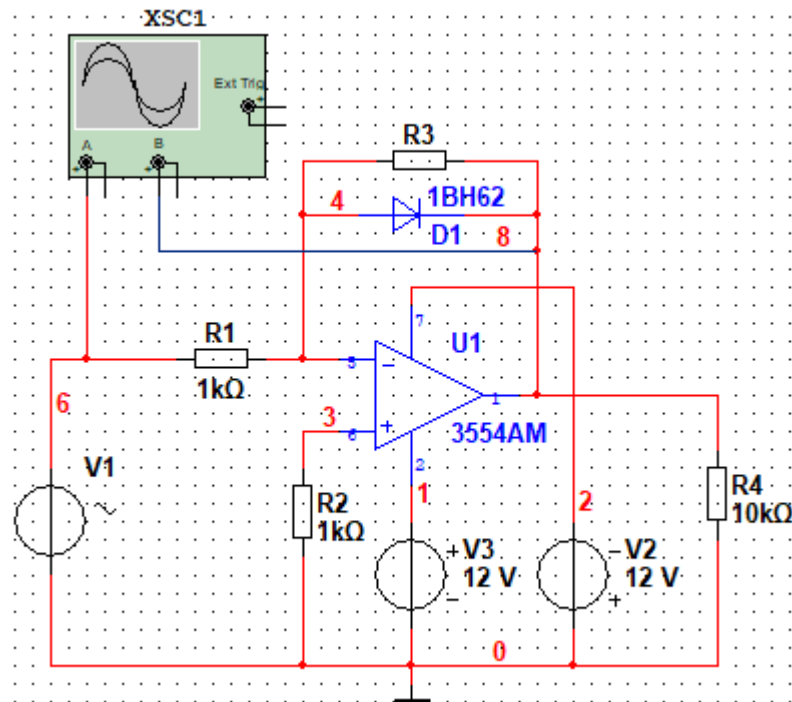


Рисунок 11

5.4.2 Собрать схему высокоточного нелинейного преобразователя-выпрямителя (рисунок 12). Установить параметры входного напряжения, аналогично п. 5.4.1, а сопротивление резистора R_{oc} – в соответствии с вариантом индивидуальных заданий (таблица 3). Выполнить моделирование.

Перенести в отчет с экрана осциллографа изображение диаграмм входного и выходного напряжений схемы. Определить частоту и амплитуду выходного напряжения. Используя результаты измерений, определить значение коэффициента передачи напряжения схемы K_U .

Провести качественное сравнение функционирования схем, исследованных в пунктах 5.4.1 и 5.4.2. По результатам исследований сформулировать выводы.

5.4.3 Собрать схему для исследований, приведенную на рисунке 13. Емкость конденсатора C задать равной значению, вычисленному в п. 5.2.3 при $k_n = 1$. Выполнить моделирование.

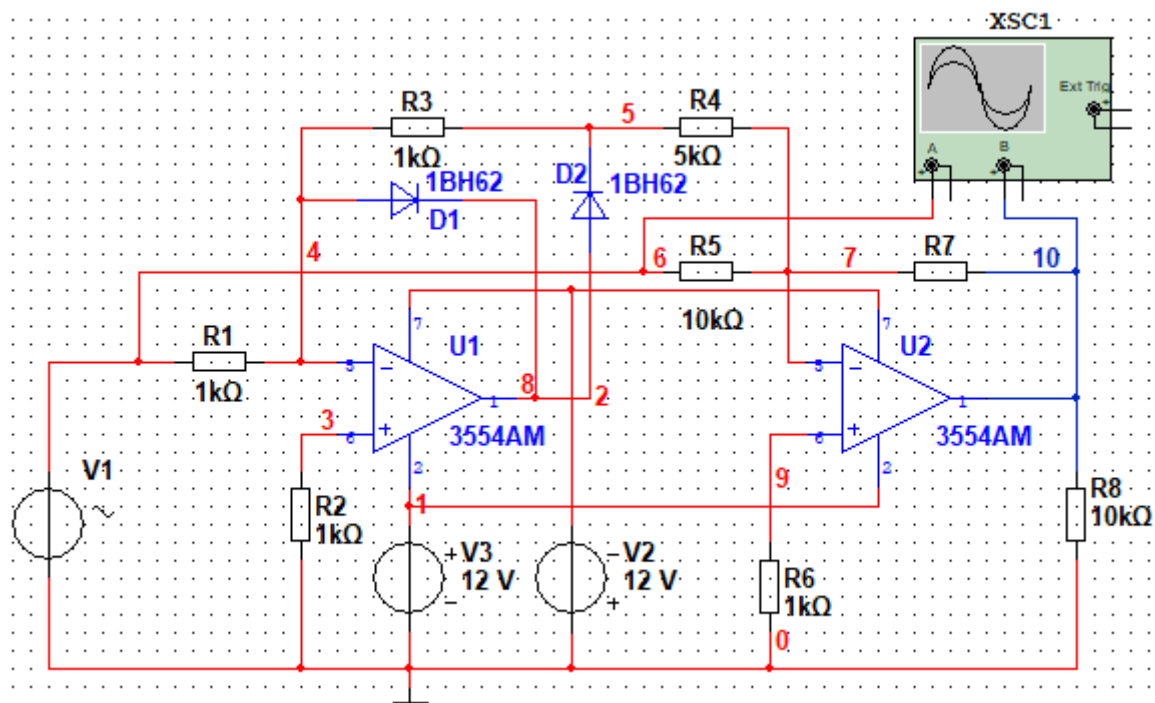


Рисунок 12

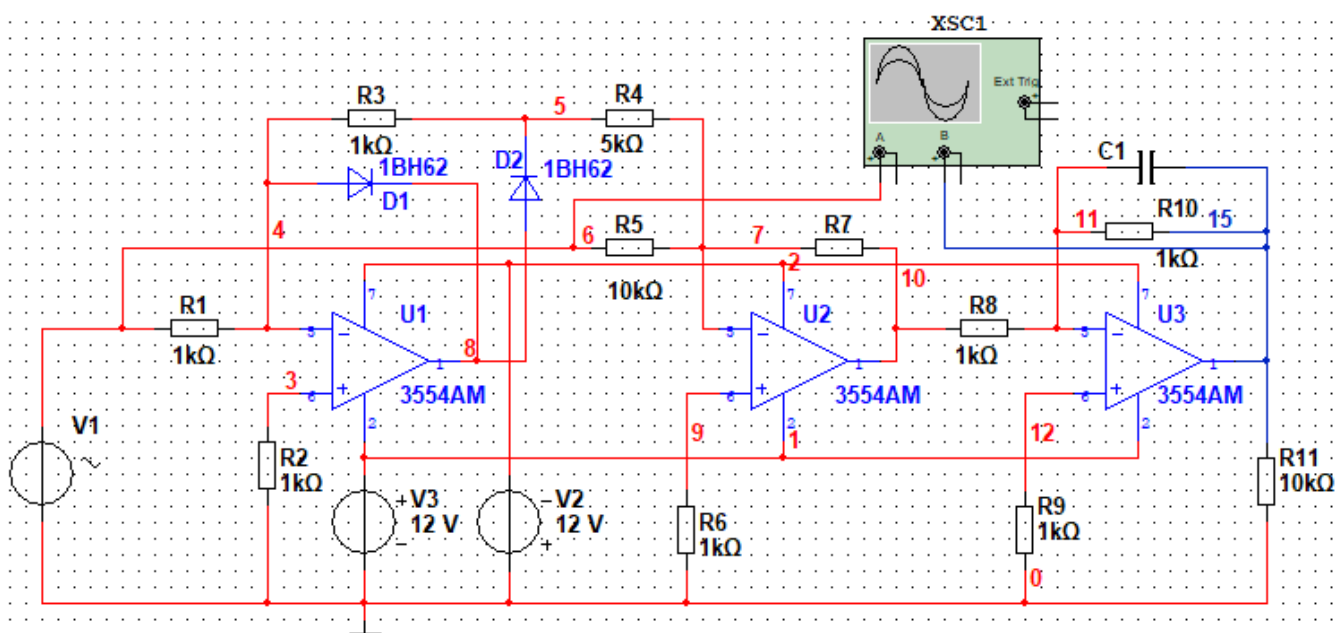


Рисунок 13

Перенести в отчет с экрана осциллографа изображение диаграмм входного и выходного напряжений схемы. Вычислить постоянную составляющую (среднее значение) выходного напряжения по формуле

$$U_{вых0} = \frac{U_{вых макс} + U_{вых мин}}{2}, \quad (21)$$

где $U_{вых\ макс}$ и $U_{вых\ мин}$ – соответственно максимальное и минимальное значения выходного напряжения.

Определить амплитуду пульсаций в выходном напряжении.

Вычислить коэффициент передачи напряжения фильтра по постоянной составляющей аналитически и по результатам измерений.

Сравнить полученные результаты. Сформулировать выводы.

5.4.4 Снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) ФНЧ. С этой целью отсоединить резистор $R8$ от выхода операционного усилителя $U2$ и присоединить к источнику сигнала $V1$. Подключить к схеме фильтра нижних частот измеритель АЧХ Bode Plotter (вход «IN» подключить ко входу фильтра, а вход «OUT» – к выходу). Снять АЧХ схемы и определить частоту среза $f_{ср}$. Сравнить экспериментально полученное значение с заданной частотой среза (с учетом заданной частоты входного сигнала $f_{вх}$ при $k_n = 1$). По АЧХ определить коэффициент передачи напряжения ФНЧ на частоте первой гармоники входного напряжения фильтра.

Задать емкость конденсатора C ФНЧ равной значению, вычисленному в п. 5.2.3 при $k_n = 0,1$. Повторить исследования по пунктам 5.4.3 и 5.4.4. Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы о влиянии емкости конденсатора фильтра на величину постоянной составляющей и амплитуду пульсаций в напряжении на выходе фильтра.

5.4.5 Собрать схему для исследования процесса передачи одnorазрядных данных (например, информации с концевых выключателей) из восьми измерительных каналов по одной линии связи с помощью цифрового мультиплексора 74151N.

Для имитации датчиков входной информации использовать элементы: VDD – источник постоянного напряжения; GROUND – заземление. Сигналы управления (адресный код) формировать с помощью генератора прямоугольных импульсов CLOCK_VOLTAGE и двоичного счетчика 7493N. Для установки на выходах счетчика кода «0000» перед началом моделирования процесса передачи данных использовать кнопочный переключатель SPDT и элементы VDD и GROUND.

Установить следующие значения параметров генератора прямоугольных импульсов CLOCK_VOLTAGE:

- а) Frequency = 1 кГц;
- б) Duty Cycle = 50%;
- в) Voltage = 4,5 В.

Контролировать процесс передачи сигналов с входа на выход мультиплексора с помощью логического анализатора. На экран прибора вывести диаграммы напряжений на счетном входе счетчика 7493N, на адресных входах мультиплексора и на выходе мультиплексора.

Примечание – Для нормального функционирования логического анализатора предварительно подготовить его к измерениям следующим образом:

- а) Clock Source – выбрать Internal;
- б) Clock Rate – установить 1 кГц;
- в) Clocks/Div – установить равным 2.

Задать входную информацию, подлежащую передаче с восьми входов мультиплексора ($D0 \dots D7$) на выход (Y). В качестве входной информации использовать двоичный код, подготовленный при подготовке к лабораторной работе (п. 5.2.4). При этом учесть, что на вход $D0$ поступает младший бит информации, а на вход $D7$, соответственно, старший.

Выполнить моделирование. Проанализировать полученные диаграммы напряжений (на экране логического анализатора). Убедиться, что логический уровень («0» или «1») сигнала на выходе Y мультиплексора совпадает с заданным логическим уровнем сигнала на его входе D_i при совпадении номера входа i с десятичным эквивалентом двоичного адреса на входах A , B и C .

Перенести схему, использованную для проведения исследований, и вид экрана логического анализатора в отчет. Проанализировать результаты проведенного исследования. Сформулировать выводы.

5.4.6 Собрать схему для исследования аналогового мультиплексора AD8184AN. Для имитации источников входной информации использовать элементы DC_POWER. Сигналы управления (адресный код) формировать тем же способом,

что и при выполнении п. 5.4.5. К выходу интегральной микросхемы AD8184AN подключить резистор сопротивлением 10 кОм. Контролировать процесс передачи с помощью осциллографа.

В качестве входной аналоговой информации для передачи использовать данные (в виде постоянных напряжений), приведенные в таблице 5.

Выполнить моделирование. В отчет перенести схему, использованную для проведения исследований, и диаграммы напряжений на счетном входе счетчика (формирователя адреса) и на выходе мультиплексора.

Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

5.4.7 Собрать схему для исследования дешифратора-демультиплексора 74154N при функционировании в режиме демультиплексора (рисунок 14). Восьмиразрядный регистр 74165N в схеме используется для преобразования входной информации из параллельного в последовательный код. Назначение выводов микросхемы: **A, B, ..., H** – информационные входы для параллельного ввода данных; **SER** – информационный вход для последовательного ввода данных; **SH / $\overline{LD}$** – управляющий вход для выбора режима ввода (высокий уровень напряжения на входе – параллельный ввод, низкий уровень – последовательный ввод, сдвиг вправо данных на выходе); **QH** – информационный выход; **INH, CLK** – управляющие входы (синхронизация).

Примечание – При **SH / $\overline{LD}$** = 0, **INH** = 0 и наличии синхроимпульсов на входе **CLK** (перепад напряжения от низкого к высокому уровню) регистр функционирует в режиме сдвига записанных данных вправо (в сторону старших разрядов).

Задать на входах **A, B, ..., H** данные, подлежащие передаче через демультиплексор. В качестве входных данных использовать двоичный код, подготовленный при выполнении п. 5.2.4 во время подготовки к лабораторной работе.

Примечание – При установке на входах **A, B, ..., H** напряжений, соответствующих логическим уровням входного двоичного кода, следует учесть, что на выход **QH** данные поступают **со сдвигом вправо**.

Перед началом моделирования установить на входе **SH / $\overline{LD}$** регистра и на входах **R01, R02** счетчика высокий уровень напряжения. Включить моделирование.

Последовательно подать на вход $SH / \overline{LD}$ и на входы $R01$, $R02$ низкие уровни напряжений. Наблюдать процесс передачи данных на выходы демультиплексора на экране логического анализатора.

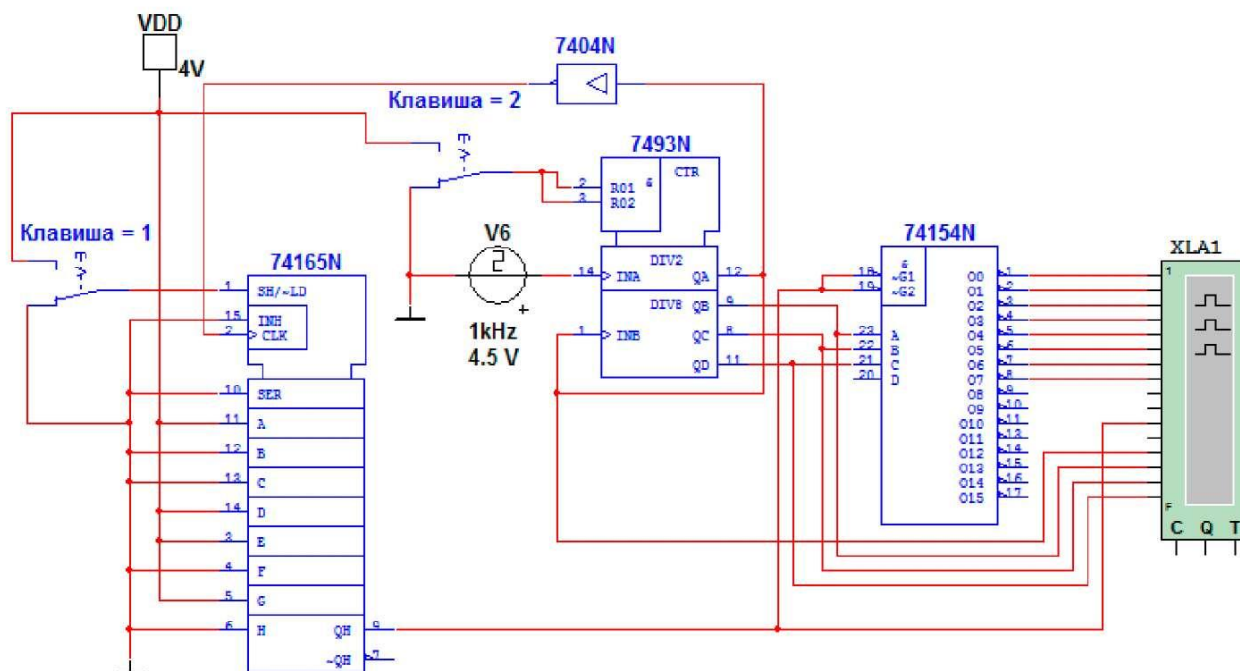


Рисунок 14

Примечание - Логический анализатор настроить следующим образом:

- Clock Source – выбрать Internal;
- Clock Rate – установить 1 кГц;
- Clocks/Div – подобрать таким образом, чтобы на экране наблюдалось не менее восьми периодов тактовых импульсов.

По виду диаграмм напряжений на экране логического анализатора установить соответствие логических уровней сигналов на выходах демультиплексора (00 ... 07) логическим уровням входного двоичного кода в соответствующих разрядах (при совпадении номера разряда номеру выхода демультиплексора).

В отчет перенести схему, использованную для проведения исследований, и вид экрана логического анализатора. Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

5.4.8 Собрать схему УВХ (рисунок 15).

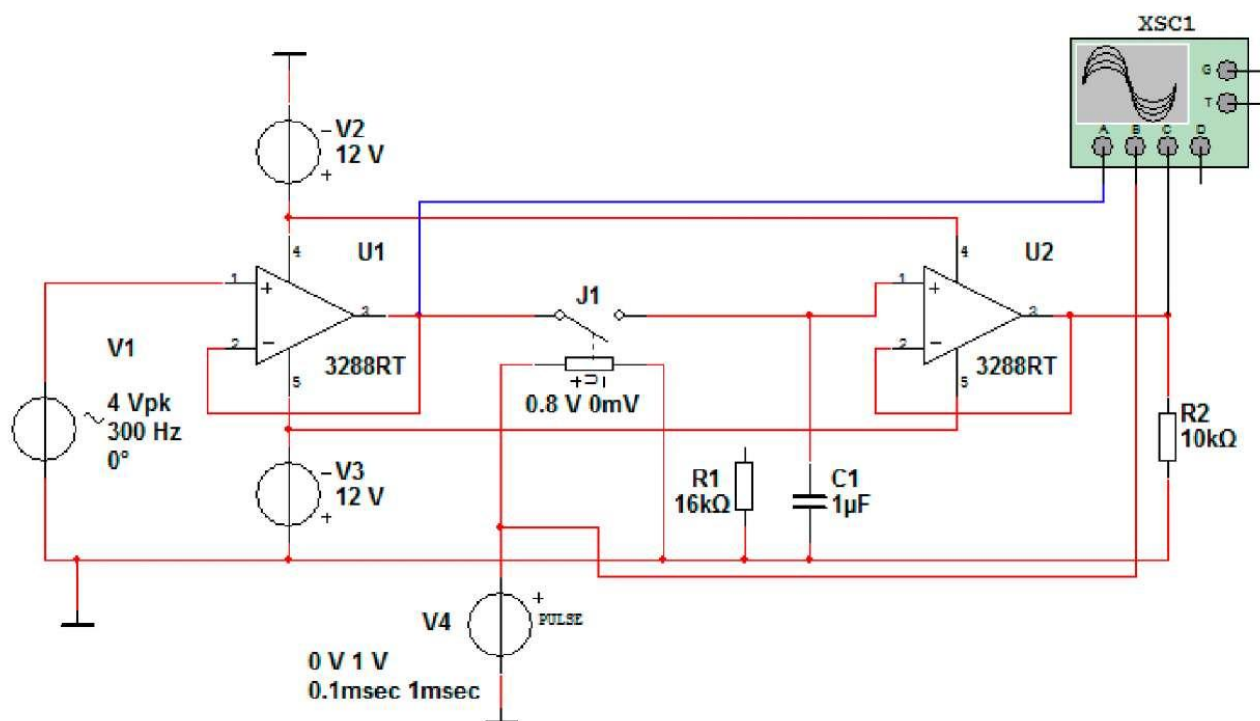


Рисунок 15

Установить значения параметров источников напряжения:

1) AC_POWER (V1):

- а) напряжение – 4 В;
- б) напряжение смещения – 5 В;
- в) частота – 300 Гц;

2) PULSE_VOLTAGE (V4):

- а) начальное значение – 0 В;
- б) амплитуда импульса – 1 В;
- в) период – 1 мс.

Выполнить моделирование. Перенести в отчет схему, использованную для проведения исследований, и диаграммы напряжений в контролируемых точках схемы.

Повторить моделирование при длительностях управляющего импульса, формируемого источником V4, 0,05 мс и 0,1 мс. Диаграммы напряжений в контролируемых точках схемы после каждого моделирования перенести в отчет. Проанализи-

ровать полученные результаты. Сформулировать выводы о зависимости напряжения на выходе УВХ от длительности управляющих импульсов.

Включить параллельно конденсатору $C1$ резистор $R1$ (рисунок 15). Исследовать зависимость потери напряжения на конденсаторе к концу времени хранения от входного сопротивления повторителя напряжения $U2$.

Исследования провести при длительности управляющего импульса 0,1 мс и сопротивлениях резистора $R1$ 20 кОм и 2 кОм.

Диаграммы напряжений в контролируемых точках схемы после каждого моделирования перенести в отчет. Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы о зависимости потери напряжения на конденсаторе к концу времени хранения от входного сопротивления повторителя напряжения $U2$.

5.5 Варианты индивидуальных заданий

Таблица 3

Номера вариантов	$f_{вх}$, Гц	$R3$, кОм	$R7$, кОм	Номера вариантов	$f_{вх}$, Гц	$R3$, кОм	$R7$, кОм
1	50	5	51	9	85	5,1	50
2	30	6	68	10	90	6,8	60
3	40	7	75	11	95	7,5	70
4	20	8	82	12	105	8,2	80
5	45	9	91	13	110	9,1	90
6	25	10	100	14	115	10,4	100
7	60	11	110	15	120	11,5	110
8	70	12	120	16	125	12,6	120

Таблица 4

Номера вариантов	Данные	Номера вариантов	Данные	Номера вариантов	Данные
1	A2	6	1B	11	C3
2	A3	7	2B	12	C4
3	4A	8	3B	13	C5
4	A5	9	4B	14	C6
5	A6	10	5B	15	C7

Таблица 5

Номера вариантов	Информационные сигналы			
	$U1, В$	$U2, В$	$U3, В$	$U4, В$
1	1,2	0,7	2,8	3,2
2	0,12	3,4	-1,1	1,8
3	3,1	0,23	-0,8	2,2
4	-1,6	1,9	0,33	1,24
5	2,22	0,14	3,2	-2,5
6	0,62	0,9	4,1	-1,2
7	-2,45	-0,7	3,6	1,56
8	6,23	0,34	2,2	1,2
9	0,88	-3,6	4,66	-2,2
10	5,82	4,22	0,62	-5,12
11	0,2	-0,7	2,34	-3,2
12	3,12	-3,4	-1,71	4,8
13	-3,1	4,23	0,8	-2,2
14	4,61	-1,9	-3,33	1,24
15	3,28	-3,14	3,2	-2,5
16	-0,67	0,95	4,13	5,21

5.6 Вопросы для самоконтроля

5.6.1 Пояснить назначение измерительных преобразователей в УСО.

5.6.2 Для чего предназначен нелинейный преобразователь-выпрямитель?

5.6.3 Как определяется коэффициент передачи напряжения высокоточного нелинейного преобразователя-выпрямителя?

5.6.4 В чем преимущество схемы высокоточного нелинейного преобразователя-выпрямителя по сравнению с упрощенным НПВ?

5.6.5 Как определить постоянную составляющую напряжения в спектре сигнала на выходе высокоточного НПВ?

5.6.6 Какие требования предъявляются к ФНЧ в составе НПВ?

5.6.7 Как зависит коэффициент пульсаций напряжения на выходе ФНЧ от емкости конденсатора в цепи обратной связи?

5.6.8 Пояснить назначение в структуре УСО устройства выборки-хранения.

5.6.9 Пояснить назначение в структуре УСО цифрового и аналогового мультиплексоров.

6 Лабораторная работа № 6 Исследование метрологических характеристик аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей

Целью лабораторной работы является привитие навыков исследования основных характеристик типовых структурных элементов ИИиУС с помощью современных программных средств схемотехнического моделирования.

Аудиторное время, отводимое на занятие – 6 академических часов.

6.1 Погрешности аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей

Для согласования работы аналоговых и цифровых устройств ИИиУС возникает необходимость преобразования аналоговых сигналов в цифровые, а цифровых – в аналоговые. Эта задача решается включением в состав УСО ИИиУС аналого-цифровых (АЦП) и цифроаналоговых (ЦАП) преобразователей. В настоящее время АЦП и ЦАП выполняют, как правило, в интегральном исполнении.

Процесс преобразования аналогового напряжения в двоичный код или, наоборот, двоичного кода в аналоговое напряжение, всегда сопровождается наличием погрешностей. Погрешности преобразователей можно разделить на **статические** и **динамические**. В случае ЦАП к *статическим* относят погрешности, остающиеся после завершения всех переходных процессов, связанных со сменой входного кода. *Динамические* погрешности определяются переходными процессами на выходе ЦАП или его составных узлов, возникшими вследствие смены входного кода. К основным **статическим** погрешностям ЦАП можно отнести:

- *абсолютную погрешность преобразования в конечной точке шкалы* (погрешность полной шкалы) – отклонение значения выходного напряжения (или тока) от номинального значения, соответствующего конечной точке шкалы функции преобразования;

- *напряжение смещения нуля на выходе* – напряжение на выходе ЦАП при нулевом входном коде;

– *температурную погрешность* – дополнительную составляющую статистической погрешности, возникающую при изменении температуры окружающей среды в заданном диапазоне;

– *нелинейность ЦАП* – отклонение действительной функции преобразования от оговоренной прямой линии.

Погрешности нелинейности в общем случае разделяют на два типа – **интегральные** и **дифференциальные**.

Погрешность интегральной нелинейности – максимальное отклонение реальной характеристики от идеальной. Определяют данную погрешность в процентах от конечного диапазона выходной величины.

Погрешность дифференциальной нелинейности – отклонение реальной характеристики от идеальной для смежных значений кода. Для характеристики всей функции преобразования ЦАП выбирается максимальная по модулю локальная дифференциальная нелинейность.

На рисунке 16 показаны кривые, поясняющие характер некоторых статических погрешностей ЦАП. Линия $U_{\text{вых. ид}}$ соединяет точки, соответствующие идеальной зависимости выходного напряжения ЦАП от входного двоичного кода. Кусочно-линейная кривая $U_{\text{вых. р}}$ представляет реальную зависимость $U_{\text{вых.}}$ от кода N (где N – десятичный эквивалент двоичного кода).

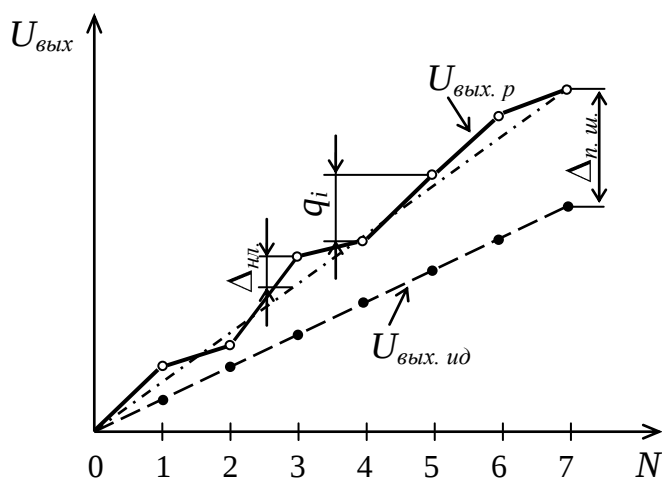


Рисунок 16

На практике используют представление погрешностей как в виде абсолютных, так и в виде относительных значений. Рассмотрим способ определения некоторых относительных статических погрешностей ЦАП:

1) относительная *погрешность полной шкалы* $\delta_{n.ш.}$ определяется как отношение абсолютной погрешности $\Delta_{n.ш.}$ для максимального кода N к напряжению на выходе ЦАП при этом коде, то есть:

$$\delta_{n.ш.} = \frac{\Delta_{n.ш.}}{U_{вых. p \cdot max}} = \frac{|U_{вых. p \cdot max} - U_{вых. ид \cdot max}|}{U_{вых. p \cdot max}}; \quad (22)$$

2) относительная *погрешность интегральной нелинейности* $\delta_{нл}$ определяется как отношение наибольшего отклонения ΔU_{max} кривой $U_{вых. p.}$ от прямой, соединяющей крайние точки этой кривой, к наибольшему напряжению на выходе ЦАП:

$$\delta_{нл} = \frac{\Delta_{нл max}}{U_{вых. p \cdot max}} = \frac{\Delta U_{max}}{U_{вых. p \cdot max}}; \quad (23)$$

3) относительная *погрешность дифференциальной нелинейности* $\delta_{диф}$ представляет собой отношение наибольшей по модулю разности единичного приращения выходного напряжения q_i и среднего значения этого приращения q_{cp} к наибольшему напряжению на выходе ЦАП:

$$\delta_{диф} = \frac{|q_i - q_{cp}|_{max}}{U_{вых. p \cdot max}}, \quad (24)$$

где $q_{cp} = \frac{U_{вых. p \cdot max}}{2^n - 1};$

4) *погрешность дискретности* (квантования) зависит от разрядности ЦАП n и определяется из выражения:

$$\delta_{\partial} = \frac{1}{2^n - 1}. \quad (25)$$

Основные погрешности АЦП, как и ЦАП, также можно разделить на **статические** и **динамические**. Наличие статических погрешностей приводит к отклонению реальной передаточной характеристики преобразователя от идеальной. **Статическую** погрешность АЦП определяют: *погрешность квантования, аддитивная погрешность, мультипликативная погрешность, дифференциальная нелинейность, интегральная нелинейность*.

Максимальная **погрешность квантования** определяется значением шага квантования и не зависит от уровня квантуемого сигнала.

Аддитивная погрешность (*погрешность смещения нуля*) представляет собой смещение всей передаточной характеристики влево или вправо относительно оси входного напряжения.

Масштабная (*мультипликативная*) **погрешность** представляет собой разность между идеальной и реальной передаточными характеристиками в точке максимального выходного значения при условии нулевой аддитивной погрешности. Это проявляется в изменении наклона передаточной функции АЦП.

Разность входных напряжений АЦП между каждым кодовым переходом должна быть равна величине младшего значащего разряда (МЗР), который составля-

ет $\frac{U_{6x_{max}}}{2^n - 1}$. Отклонение этой разности от МЗР определяется как **дифференциальная нелинейность**.

Интегральная нелинейность – это погрешность, которая вызывается отклонением передаточной характеристики АЦП от прямой линии.

На практике производитель часто определяет для АЦП *статическую точность преобразования* через **интегральный параметр** – погрешность в конечной точке шкалы преобразования (**погрешность полной шкалы**), которая характеризует степень отклонения функции преобразования в конечной точке шкалы. В наихудшем случае погрешность полной шкалы равна сумме отдельных составляющих статической погрешности, которые рассмотрены выше.

Динамическая погрешность АЦП – составляющая погрешности преобразования, вызванная **изменением входной величины за время преобразования**.

На рисунке 17 показаны кривые, поясняющие характер некоторых статических погрешностей АЦП. Числовые значения основных относительных статических погрешностей АЦП определяют с помощью тех же выражений, что и в случае ЦАП ((22) – (25)).

Функция преобразования типового АЦП приведена на рисунке 17.

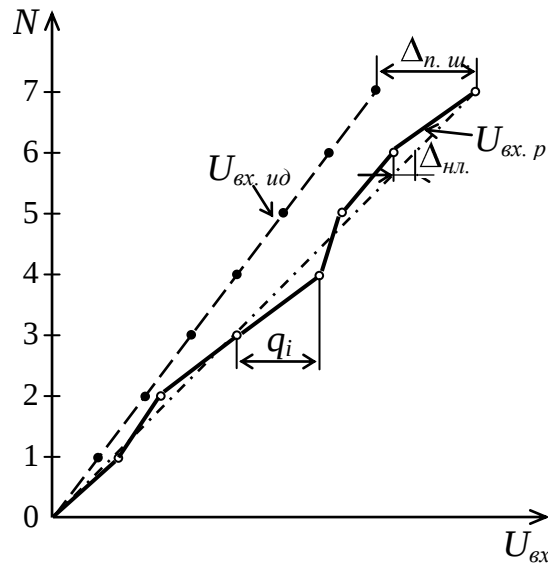


Рисунок 17

6.2 Задание для подготовки к лабораторной работе

6.2.1 Изучить материал учебного пособия [8.2, С. 131 – 143] и подраздел 6.1 методических указаний.

6.3 Задание на лабораторную работу

6.3.1 Исследовать метрологические характеристики АЦП.

6.3.2 Исследовать метрологические характеристики ЦАП.

6.4 Порядок выполнения лабораторной работы

6.4.1 В среде Multisim подготовить схему (рисунок 18) для исследования ЦАП. Напряжение источника $V1$ установить в соответствии с вариантом индивидуальных заданий (таблица 11).

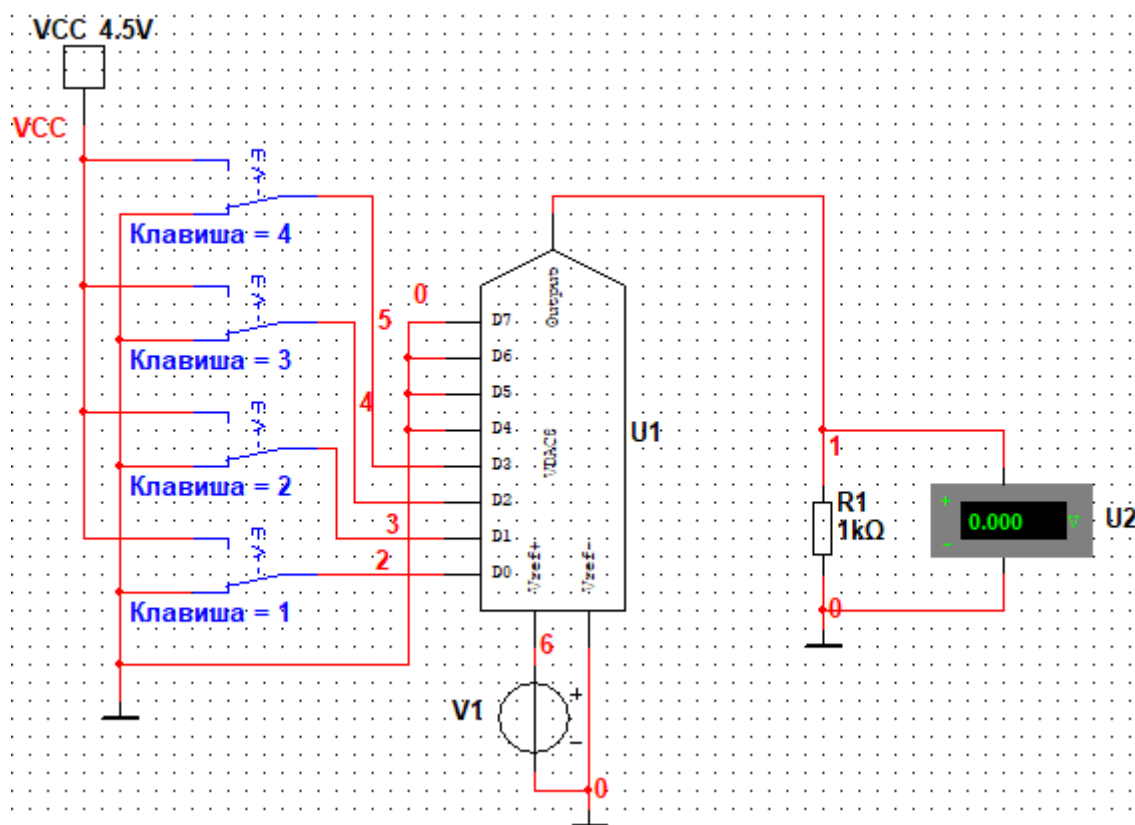


Рисунок 18

Изменяя двоичный код N на входе ЦАП от 0000 до 1111 (таблица 6) с помощью переключателей, заносить в таблицу 7 показания вольтметра U_2 (аналоговое напряжение $U_{вых.р}$ на выходе ЦАП).

Таблица 6 – Код на входе ЦАП

N		Десятичный эквивалент															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Двоичный код	D_0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	D_1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
	D_2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
	D_3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Определить среднее значение приращения выходного напряжения ЦАП q_{cp} для идеального преобразователя, используя выражение

$$q_{cp} = \frac{U_{on}}{2^n - 1}, \quad (26)$$

где U_{on} – напряжение источника опорного напряжения $V1$, и, используя выражение

$$U_{вых.лин_i} = N_i \cdot q_{cp}, \quad (27)$$

где $i = N_i = 0, 1, \dots, 15$, вычислить напряжение $U_{вых.лин}$ на выходе ЦАП для всех значений входного кода и заполнить соответствующую строку в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты исследования ЦАП

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{вых.р},$ мВ																
$U_{вых.лин},$ мВ																
$\Delta U, \text{мВ}$																
$q_i, \text{мВ}$																
$ q_i - q_{cp} ,$ мВ																

Вычислить отклонение ΔU реальной кривой характеристики ЦАП от соответствующей линейной характеристики при каждом значении N_i по формуле

$$\Delta U = \left| U_{вых.р} - U_{вых.лин} \right|. \quad (28)$$

Результаты занести в соответствующую строку таблицы 7.

Вычислить единичные приращения выходного напряжения q_i на каждом шаге преобразования по формуле

$$q_i = U_{вых.р_i} - U_{вых.р_{i-1}}. \quad (29)$$

Результаты вычислений занести в соответствующую строку таблицы 7.

Вычислить для всех значений q_i разности $|q_i - q_{cp}|$ и заполнить последнюю строку таблицы 7.

Используя результаты исследований, приведенные в таблице 7, вычислить погрешность полной шкалы $\delta_{\text{пл}}$, погрешность интегральной нелинейности $\delta_{\text{нл}}$, погрешность дифференциальной нелинейности $\delta_{\text{диф}}$, погрешность дискретности $\delta_{\text{д}}$.

Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

6.4.2 В среде Multisim подготовить схему (рисунок 19) для исследования АЦП. Напряжения источников V1 и V2 установить в соответствии с вариантом индивидуальных заданий (таблица 11).

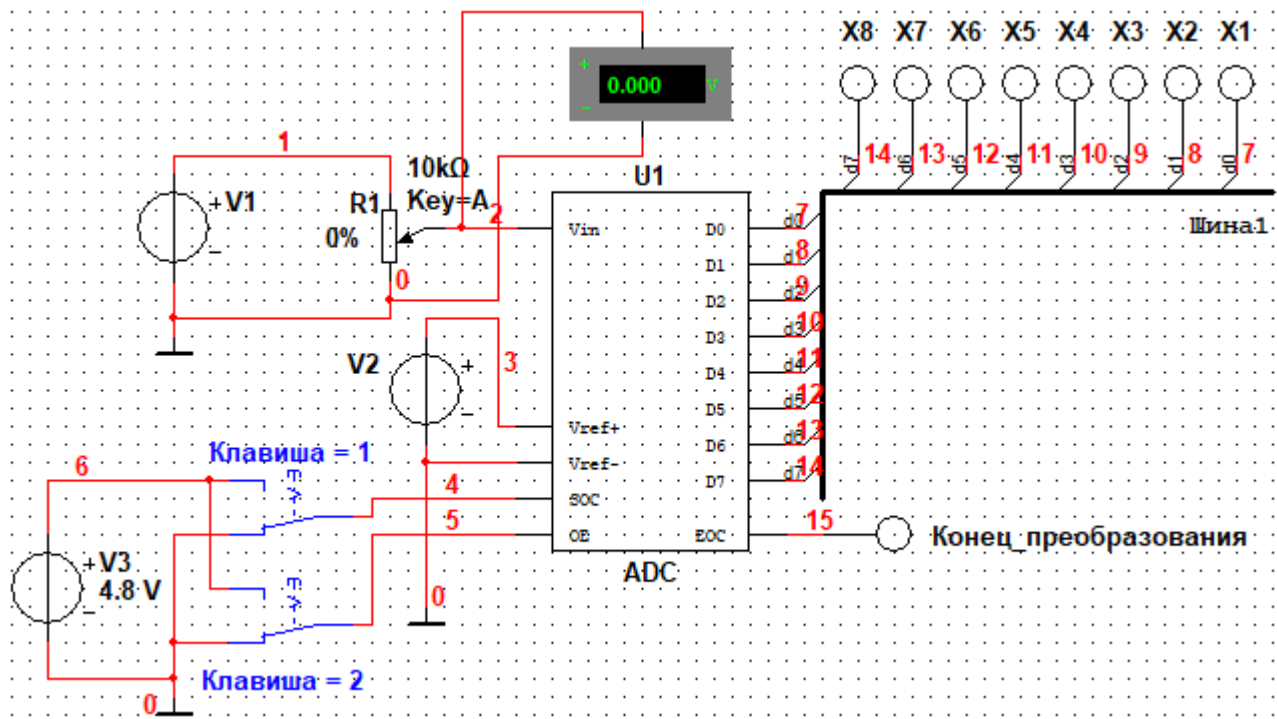


Рисунок 19

Примечание – Назначение выводов виртуального АЦП приведено в таблице 8.

Таблица 8 – Назначение выводов виртуального АЦП

Обозначение	Вход/выход	Назначение
V_{in}	I	Аналоговое входное напряжение
V_{ref++}	I	Опорное напряжение (+)
V_{ref-}	I	Опорное напряжение (-)
D0 – D7	O	Цифровые выходы
SOC	I	Начать преобразование
EOC	O	Конец преобразования
OE	I	Разрешение цифрового вывода

Определить шаг (в процентах) приращения аналогового напряжения на входе АЦП, соответствующий величине младшего значащего разряда:

$$\Delta U_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{on}}}{U_{\text{ex}} \cdot 2^n - 1} \cdot 100\%, \quad (30)$$

где U_{on} , U_{ex} – напряжения источников V2 и V1 соответственно.

Установить вычисленное значение в поле «*Приращение*» вкладки *Параметры* окна свойств переменного резистора (рисунок 20).

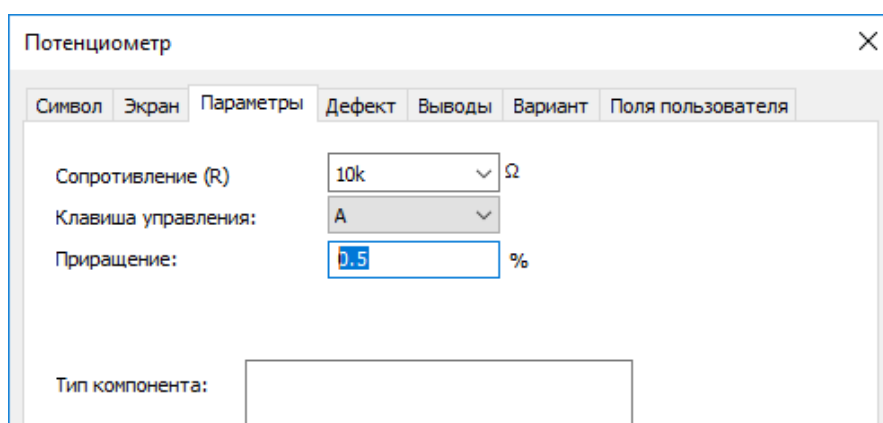


Рисунок 20

Изменяя напряжение на входе АЦП с заданным шагом, выполнять аналого-цифровое преобразование и заносить в первую строку таблицы 9 показания вольтметра, соответствующие двоичным кодам в диапазоне от 0000 до 1111

Таблица 9 – Результаты исследования АЦП

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{\text{ex. p}},$ мВ																
$U_{\text{ex. лин}},$ мВ																
$\Delta U,$ мВ																
$q_i,$ мВ																
$ q_i - q_{\text{ср}} ,$ мВ																

Определить среднее значение приращения входного напряжения АЦП q_{cp} для идеального преобразователя, используя выражение (26), и с помощью выражения

$$U_{ex.лин_i} = N_i \cdot q_{cp}, \quad (31)$$

где $i = N_i = 0, 1, \dots, 15$, вычислить напряжение $U_{ex.лин}$ на входе АЦП для всех значений выходного кода. Заполнить соответствующую строку в таблице 9.

Используя выражение (28) и заменяя в нем $U_{вых.}$ на $U_{ex.}$, вычислить отклонение ΔU реальной кривой характеристики АЦП от соответствующей линейной характеристики при каждом значении N_i . Результаты занести в соответствующую строку таблицы 9.

Вычислить единичные приращения входного напряжения q_i на каждом шаге преобразования по формуле

$$q_i = U_{ex.p_i} - U_{ex.p_{i-1}}. \quad (32)$$

Результаты вычислений занести в соответствующую строку таблицы 9.

Вычислить для всех значений q_i разности $|q_i - q_{cp}|$ и заполнить последнюю строку таблицы 9.

Используя результаты исследований, приведенные в таблице 9, вычислить погрешность полной шкалы $\delta_{ши}$, погрешность интегральной нелинейности $\delta_{ил}$, погрешность дифференциальной нелинейности $\delta_{диф}$, погрешность дискретности δ_o аналого-цифрового преобразователя.

Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

6.4.3 В среде Multisim подготовить схему (рисунок 21) для проведения исследований. Напряжения источников $V1$, $V2$ и $V4$ установить в соответствии с вариантом индивидуальных заданий (таблица 11).

Установить в поле «**Приращение**» вкладки **Параметры** окна свойств переменного резистора 5% (рисунок 20).

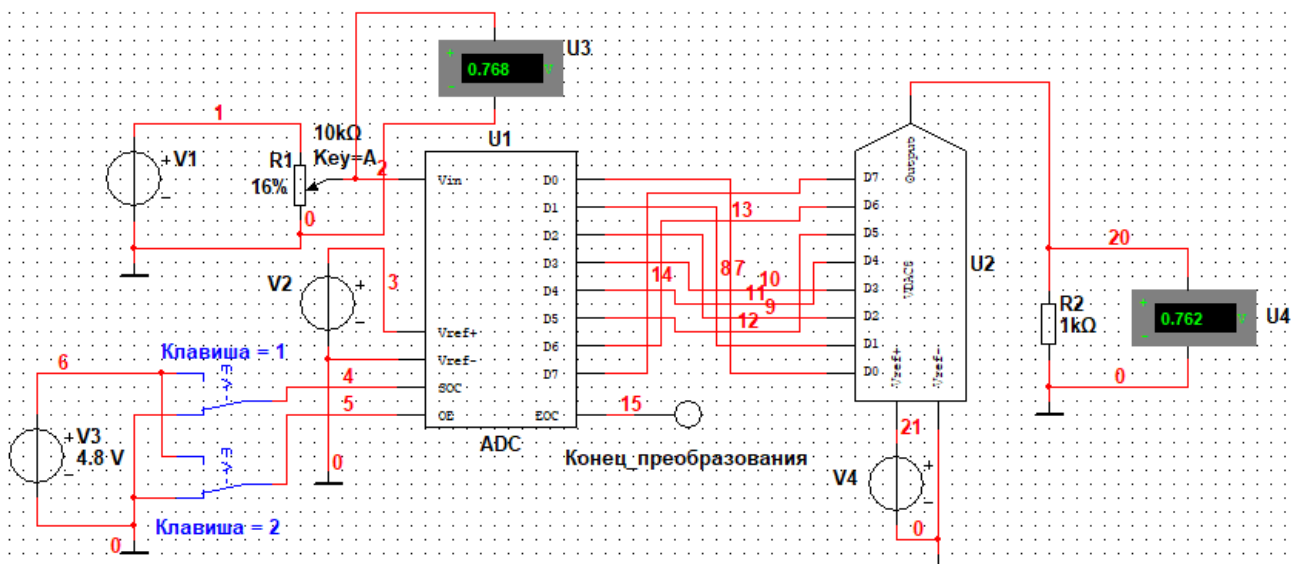


Рисунок 21

Изменяя сопротивление резистора $R1$ в процентном отношении от нуля до 50% с заданным шагом, заносить в таблицу 10 показания вольтметров $U3$ и $U4$.

Таблица 10 – Результаты исследования

Показания вольтметров	Сопротивление резистора $R1$, %									
$U3$, мВ										
$U4$, мВ										

Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

Подготовить отчет о проведенных исследованиях и представить руководителю занятия.

6.5 Варианты индивидуальных заданий

Таблица 11 – Варианты индивидуальных заданий

Номера вариантов	$V1$, В	$V2$, В	$V4$, В	Номера вариантов	$V1$, В	$V2$, В	$V4$, В
1	4,9	5	5	7	9,8	10	10
2	8	10	10	8	4,8	5	5
3	9,6	10	10	9	5	5	5
4	4,5	5	5	10	9,1	10	10
5	4,3	5	5	11	9,5	10	10
6	4,7	5	5	12	9,7	10	10

6.6 Вопросы для самоконтроля

6.6.1 Напишите основное уравнение цифроаналогового преобразования.

6.6.2 Назовите основные достоинства и недостатки ЦАП с двоично-весовыми резисторами.

6.6.3 Назовите основные достоинства и недостатки ЦАП с матрицей $R-2R$.

6.6.4 Назовите основные виды погрешностей ЦАП. Как они определяются?

6.6.5 Поясните принцип функционирования АЦП последовательного счета.

6.6.6 Поясните принцип функционирования АЦП поразрядного уравнивания.

6.6.7 Поясните достоинства и недостатки АЦП с двойным интегрированием.

6.6.8 От чего зависит точность аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования?

6.6.9 Какие функциональные задачи решаются в УСО с помощью АЦП и ЦАП?

6.6.10 Поясните процедуру преобразования аналогового напряжения в цифровой код.

7 Лабораторная работа № 7. Исследование канала передачи измерительной информации

Целью лабораторной работы является привитие навыков моделирования канала передачи измерительной информации ИИиУС, выделения информационного сигнала на фоне аддитивного шума.

Аудиторное время, отводимое на занятие – 6 академических часов.

7.1 Краткие теоретические сведения

Для передачи измерительной информации на расстояние один или несколько параметров сигнала-носителя подвергают модуляции. *Модуляцией* называют процесс управления параметрами несущего сигнала в соответствии со значениями измеряемой величины. При этом управляющую величину называют **модулирующей**, а сигнал-носитель после модуляции – **модулированным**. Если модуляции подвергают только один параметр сигнала-носителя, имеет место *однопараметрическая модуляция*, в противном случае – *многопараметрическая модуляция*. Преобразователи, в которых осуществляется модуляция сигнала, называют **модуляторами**.

Демодуляцией называется выделение модулирующей функции из модулированного сигнала. Устройства, с помощью которых из модулированного сигнала выделяют модулирующую функцию, называют **демодуляторами**.

В зависимости от расстояния, на которое передается измерительная информация, в качестве сигнала-носителя может быть использована **последовательность видеоимпульсов** (в цифровом канале) или **гармоническое колебание** (например, при передаче по радиоканалу).

Если для передачи измерительной информации используют проводную (кабельную) линию связи, то сигналом-носителем, как правило, выступает импульсная последовательность. В этом случае параметрами, которые можно изменять с помощью модуляции, являются амплитуда X_m , длительность импульсов τ_u , частота

следования ω_0 или период T_0 , положение импульсов относительно тактовых сигналов и др. С учетом этого различают следующие виды импульсной модуляции: **амплитудно-импульсная** (АИМ), **широтно-импульсная** (ШИМ), **частотно-импульсная** (ЧИМ), **фазоимпульсная** (ФИМ), **временн-импульсная** (ВИМ), **кодоимпульсная** (КИМ) и т. д.

В качестве примера рассмотрим сигналы с КИМ. Такой сигнал получают, например, при преобразовании аналогового сигнала в цифровой код. Аналоговый непрерывный сигнал квантуют по времени (с заданным шагом временной дискретизации Δt) и по уровню (с шагом $q = \Delta U$), после чего каждый дискретный уровень передают с помощью кода (наибольшее распространение получил двоичный код). На рисунке 22 приведен пример получения сигнала с КИМ в результате преобразования аналогового колебания в четырехразрядный двоичный код. Каждая дискретная выборка аналогового сигнала, в зависимости от ее значения, преобразуется в последовательность импульсов длительностью τ_u . При этом логическая единица кодируется импульсом с амплитудой U_{max} , а логический ноль – импульсом с амплитудой U_{min} (чаще всего $U_{min} = 0$).

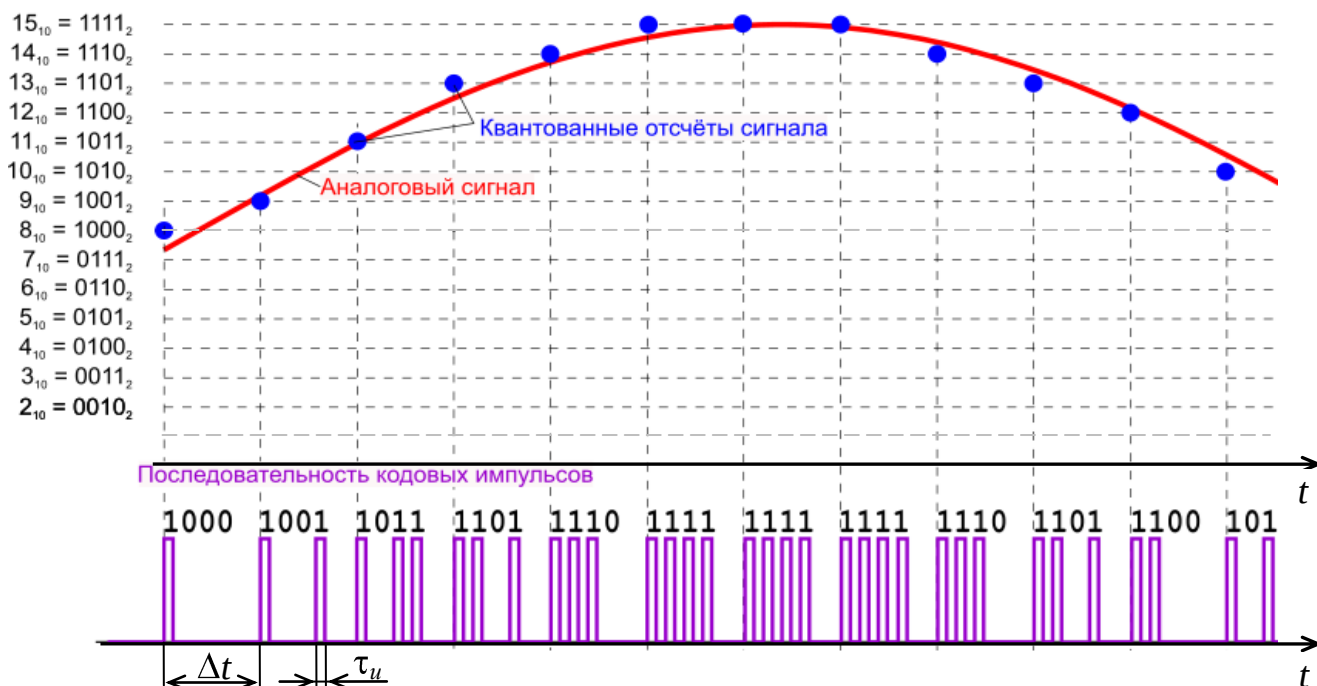


Рисунок 22

Сигнал с КИМ, полученный выше рассмотренным методом, является униполярным (одной полярности). Кроме этого длительность импульсов τ_u , используемых для кодирования двоичных последовательностей, меньше периода их следования. Это приводит к тому, что в спектре таких сигналов имеется постоянная составляющая, что вызывает определенные трудности при передаче таких сигналов с использованием линий электросвязи. Если в рассмотренном сигнале $U_{min} = 0$, то внутри каждого такта сигнал возвращается к нулевому уровню. Рассмотренный способ КИМ относится к кодам с возвратом к нулю («return-to-zero» – RZ). Коды RZ имеют и определенные достоинства: во-первых, искажение формы предыдущих импульсов (что непременно имеет место в каналах с ограниченной полосой пропускания) не влияет на последующие (то есть, отсутствует интерференция сигналов); во-вторых, упрощается синхронизация приемника («подстраивать» синхронизацию можно в каждом такте, в котором имеется импульс сигнала).

В линиях электросвязи широкое распространение получили КИМ-сигналы с кодами NRZ («nonreturn-to-zero» – без возврата к нулю). К достоинствам NRZ-сигналов следует отнести:

- в них длительность импульса совпадает с длительностью такта передачи импульса. В результате этого NRZ-сигналы имеют максимальную энергию, что существенно повышает их помехоустойчивость;

- в таких сигналах практически отсутствует постоянная составляющая, что позволяет использовать их в линиях электросвязи;

- увеличение длительности импульсов приводит к сужению их спектров и, как следствие, к более эффективному использованию полосы пропускания канала связи.

Наиболее простым вариантом КИМ-сигнала с кодом NRZ является сигнал NRZ-L. При таком способе кодирования каждый бит информации передается в течение одного тактового интервала (такта) T_u . При этом для кодирования нуля и единицы используют разнополярные (биполярные) импульсы. Например, высокий положительный уровень напряжения в течение T_u свидетельствует о передаче единицы информации, высокий отрицательный уровень – о передаче нуля информации (или

наоборот). Если передается двоичный код вида $d_N d_{N-1} \dots d_2 d_1$, то напряжение в линии связи в каждом такте можно представить следующим выражением:

$$u_{kT_u} = \begin{cases} U_{max}, & \text{если } d_k = 1, \\ -U_{max}, & \text{если } d_k = 0, \end{cases} \quad (33)$$

где $k = 1, 2, \dots, N$ – номер разряда двоичного кода;

N – число разрядов.

На рисунке 23 показана временная диаграмма КИМ-сигнала с биполярным кодом NRZ-L, модулированного двоичным кодом 10111011.

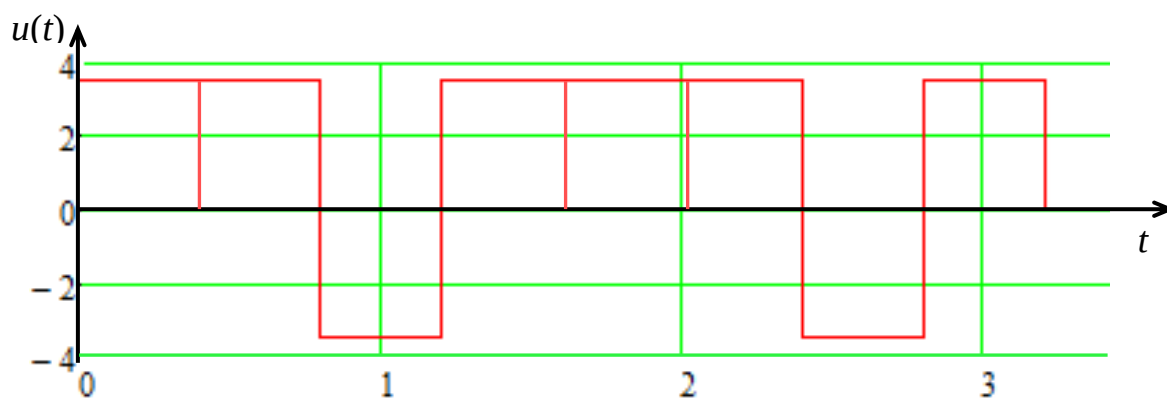


Рисунок 23

В качестве **недостатков** NRZ-сигналов можно отметить:

- наличие межсигнальной интерференции (частичное наложение предшествующего импульса на последующий из-за неидеальности формы прямоугольных импульсов);
- возникновение проблем с синхронизацией в случаях, когда уровень сигнала долго не меняется (следование в модулирующем коде нескольких единиц или нулей подряд);
- для длинных последовательностей сигналов с неизменным уровнем могут возникнуть проблемы при сопряжении передатчика и линии связи из-за появления в сигнале постоянной составляющей.

Гармонический сигнал, используемый в качестве сигнала-носителя, математически описывают выражением:

$$u(t) = U_0 \cos \omega_0 t + \psi_u, \quad (34)$$

где U_0 – амплитуда колебания;

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \text{ – угловая частота;}$$

T_0 – период колебания;

ψ_u – начальная фаза.

Параметры гармонического сигнала U_0 , ω_0 и ψ_u при отсутствии модуляции являются постоянными величинами.

В общем случае для передачи информации изменению в колебании $u(t)$ можно подвергать амплитуду U_0 колебания (при **амплитудной модуляции** (АМ)), частоту ω_0 колебания (при **частотной модуляции** (ЧМ)), фазу ($\omega_0 t + \psi_u$) колебания (при **фазовой модуляции** (ФМ)), или одновременно несколько параметров – при смешанных видах модуляции.

В случае АМ под действием управляющей (модулирующей) функции изменяется амплитуда гармонического сигнала-носителя $u(t)$ по закону изменения этой функции на некоторую величину ΔU относительно начального значения U_0 . Аналитически АМ-сигнал можно представить следующим образом:

$$u_{AM}(t) = U(t) \cos \omega_0 t + \psi_u, \quad (35)$$

где $U(t)$ – огибающая амплитуд несущего колебания $u(t)$, зависящая от характера передаваемого сообщения. Если в качестве модулирующей функции использовать гармоническое колебание вида $s_{mod}(t) = S_0 \cos \Omega t + \varphi$, то выражение (35) примет вид:

$$u_{AM}(t) = U_0 [1 + m \cos \Omega t + \varphi] \cos \omega_0 t + \psi_u, \quad (36)$$

где $m = \frac{\Delta U_m}{U_0} = \frac{k_{AM} S_0}{U_0}$ – коэффициент амплитудной модуляции;

ΔU_m – максимальное отклонение амплитуды несущего колебания от начального уровня U_0 (амплитуда огибающей);

k_{AM} – коэффициент пропорциональности.

Если в качестве управляющей (модулирующей) функции используется сигнал с КИМ, то имеет место **амплитудная манипуляция** (АМн), при которой амплитуда сигнала-носителя изменяется скачкообразно. Например, если модулирующая функция представляет собой КИМ-сигнал с биполярным кодом NRZ-L, то амплитуда модулированного колебания будет принимать два значения:

$$U_m = \begin{cases} 0,5U_0 (1+m), & \text{если } u_{\text{мод}} = U_{\text{max}}, \\ 0,5U_0 (1-m), & \text{если } u_{\text{мод}} = -U_{\text{max}}, \end{cases} \quad (37)$$

где коэффициент модуляции $m \leq 1$.

Для уверенного обнаружения в условиях воздействия помех на линию передачи в принятом и демодулированном сигнале информационной составляющей, необходимо обеспечить определенное отношение мощности сигнала к мощности помех. Если помеха имеет характер «белого» шума (то есть ее спектр однородный во всем диапазоне частот), то увеличить это отношение можно, предварительно пропустив принятый сигнал через идеальный фильтр нижних частот. Отношение сигнал/шум в случае белого шума определяется из выражения:

$$\frac{P_c}{N} = \frac{P_{cp}}{\sigma^2}, \quad (38)$$

где N – мощность шума в полосе частот сигнала;

σ – среднее квадратичное отклонение шума.

Упрощенная структурная схема канала передачи измерительной информации изображена на рисунке 24. Проанализируем процесс передачи измерительной информации от источника к потребителю на примере приведенной схемы. Измерительная информация в цифровой форме (в виде КИМ-сигнала) поступает на один из входов модулятора, на второй вход которого поступает несущее колебание.

С выхода модулятора в канал связи поступает модулированный сигнал (например, NRZ-L-сигнал или сигнал с АМн).

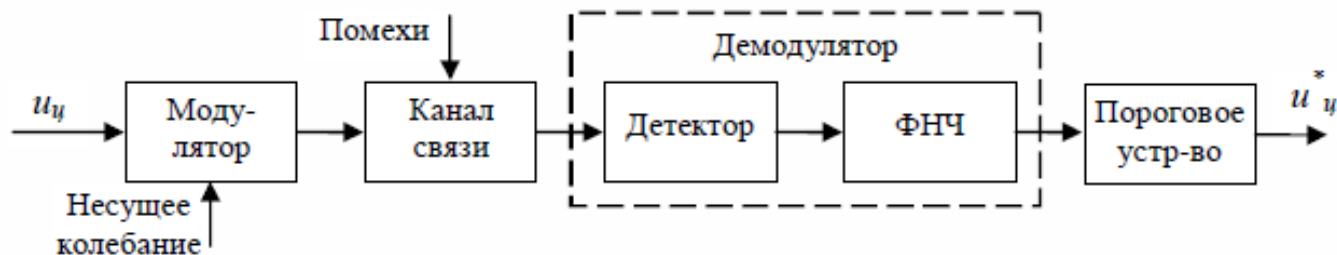


Рисунок 24

Процесс передачи модулированного колебания по каналу связи сопровождается воздействием помех. Как известно, различают *аддитивные* и *мультипликативные* помехи. В канале связи наиболее существенное влияние на информативный сигнал оказывают аддитивные помехи. В этом случае математически сигнал на входе приемника (демодулятора) можно представить следующим образом:

$$s(t) = u(t) + n(t), \quad (39)$$

где $u(t)$ – полезный сигнал (модулированное колебание);

$n(t)$ – помеха.

В случае АМн демодулятор представляет собой совокупность амплитудного детектора и фильтра нижних частот (ФНЧ), который выделяет огибающую выпрямленного однополярного колебания. С помощью порогового устройства выделенное низкочастотное колебание преобразуется в цифровой сигнал (КИМ-сигнал). Уровень порога выбирают примерно равным $U_0 / 2$, где U_0 – ожидаемый уровень напряжения логической единицы на выходе демодулятора.

7.2 Задание для подготовки к лабораторной работе

7.2.1 Изучить теоретический материал учебного пособия [8.1, С. 54 – 62, 68 – 70], а также подраздел 7.1 методических указаний.

7.3 Задание на лабораторную работу

7.3.1 Исследовать канал передачи измерительной информации при использовании для передачи сигналов двух типов: NRZ-L-сигнала и сигнала с амплитудной манипуляцией.

7.4 Порядок выполнения лабораторной работы

7.4.1 В математической системе Mathcad в соответствии с вариантом индивидуальных заданий сформировать 4096 выборок КИМ-сигнала. Амплитуду сигнала выбрать с учетом выполнения условия: отношение сигнал/шум равно 0,5. Построить временную диаграмму сигнала.

Применяя быстрое преобразование Фурье (БПФ), получить спектр сформированного колебания. Построить спектральную диаграмму сигнала. Оценить эффективную ширину спектра сигнала, применяя пятипроцентный критерий.

7.4.2 Используя в качестве модулирующего колебания КИМ-сигнал, сформировать NRZ-L-колебание. Используя встроенную функцию Mathcad, сгенерировать 4096 выборок шумового сигнала с нулевым математическим ожиданием и заданным средним квадратическим отклонением (СКО) $\sigma_{ш}$.

Сформировать смесь сигнала и аддитивной помехи (шума). Построить диаграммы полученного колебания во временной и частотной областях.

Применяя фильтр нижних частот с полосой пропускания, равной эффективной ширине спектра сигнала, выделить информационный сигнал. С помощью обратного БПФ восстановить сигнал во временной области.

Построить диаграммы выделенного сигнала в частотной и временной областях.

Приняв в качестве уровня порога распознавания значение $p = 0$, восстановить КИМ-сигнал.

Увеличивая мощность шума (за счет увеличения СКО), определить минимальное отношение сигнал/шум, при котором еще возможно восстановление исходного КИМ-сигнала.

Проанализировать полученные результаты.

Сформулировать выводы о возможности восстановления измерительной информации при воздействии на NRZ-L-сигнал помехи в виде «белого» шума.

7.4.3 Сформировать сигнал с амплитудной манипуляцией, используя в качестве модулирующего колебания КИМ-сигнал. Выбрать амплитуду несущего гармонического колебания, при которой обеспечивается глубина модуляции, равная 100 % ($m = 1$).

Построить временную диаграмму сигнала с амплитудной манипуляцией.

Сформировать смесь модулированного сигнала и аддитивной помехи (шума), используя заданное значение СКО шума. Построить диаграммы полученного колебания во временной и частотной областях.

7.4.4 Применяя модель полосового фильтра, выделить сигнал в полосе частот, содержащей гармоники информативного колебания. Построить временную диаграмму выделенного сигнала.

С помощью двухполупериодного детектора и фильтра нижних частот выделить огибающую модулированного сигнала. Для этого выполнить детектирование отфильтрованного сигнала во временной области, применяя БПФ, получить спектр выпрямленного сигнала и, используя коэффициент передачи ФНЧ первого порядка, получить спектр огибающей на выходе ФНЧ.

Восстановить сигнал во временной области на основе обратного БПФ. Построить диаграммы сигнала во временной и частотной областях, иллюстрирующие все этапы процесса демодуляции.

Моделируя пороговое устройство с порогом $p = 0,5U_{вых}$, где $U_{вых}$ – максимальный уровень исходного КИМ-сигнала, восстановить информативный сигнал. Построить временную диаграмму сигнала и сравнить ее с временной диаграммой исходного КИМ-сигнала.

Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

7.4.5 Используя модель ФНЧ второго порядка, повторить процедуру выделения огибающей и восстановления информативного сигнала.

Сформулировать выводы.

Подготовить отчет о проведенных исследованиях и представить руководителю занятия.

7.5 Варианты индивидуальных заданий

Таблица 12 – Варианты индивидуальных заданий

Номера вариантов	Кодовая группа	Длительность такта T , с	Период несущего колебания, с	СКО шума, $\sigma_{ш}$
1	01101100	0,2	0,1T	2,9
2	10110101	0,3	0,06T	3,2
3	11101001	0,4	0,07T	3,5
4	01001101	0,5	0,09T	3,7
5	11000110	0,25	0,08T	3,3
6	11101010	0,35	0,05T	3,8
7	01100011	0,45	0,06T	3,0
8	11100111	0,2	0,07T	3,6
9	11001110	0,5	0,09T	3,4
10	10110100	0,4	0,05T	3,1

7.6 Вопросы для самоконтроля

7.6.1 Что называют модуляцией, демодуляцией?

7.6.2 Перечислите основные виды импульсной модуляции.

7.6.3 Какие виды модуляции находят применение при передаче цифровой информации?

7.6.4 Чем отличается амплитудная модуляция от амплитудной манипуляции?

7.6.5 Какой спектр имеет амплитудно-модулированное колебание?

7.6.6 В чем особенность спектра амплитудно-манипулированного колебания?

7.6.7 Каковы особенности спектров КИМ-сигналов?

7.6.8 Как влияет широкополосный шум на качество восстановления сигнала на приемной стороне линии передачи?

8 Литература, рекомендуемая для изучения при подготовке к занятиям

8.1 Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов / С. И. Баскаков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2003. – 462 с. – ISBN 5-06-003843-2.

8.2 Булатов, В. Н. Элементы и узлы информационных и управляющих систем (основы теории и синтеза) [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В. Н. Булатов; М-во образования Рос. Федерации, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 3.84 Мб). – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2002. – Загл. с тит. экрана. – Adobe Acrobat Reader 5.0. – Режим доступа: http://artlib.osu.ru/site_new/find-book.

8.3 Садовский, Г. А. Теоретические основы информационно-измерительной техники : учебное пособие / Г. А. Садовский. – М.: Высш. шк., 2008. – 478 с. – ISBN 978-5-06-005738-6.

8.4 Сильвашко, С. А. Программные средства компьютерного моделирования элементов и устройств электроники : учебное пособие / С. А. Сильвашко, С. С. Фролов; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2014. – 170 с.