

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная электроника»

Л. А. Захаренко

**МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
И МИКРОСХЕМОТЕХНИКА.
ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ
И АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по одноименному курсу для студентов
специальности 1-36 04 02
«Промышленная электроника»**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2008

УДК 621.382.049.77+004.387(075.8)
ББК 32.844.1я73
3-38

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 2 от 11.12.2006 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
О. Н. Широков

Захаренко, Л. А.

3-38

Микроэлектроника и микросхемотехника. Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи : лаб. практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» / Л. А. Захаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 27 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-754-4.

Даны краткие теоретические сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ: общие сведения о принципах работы, основные технические характеристики ЦАП и АЦП, подробно рассмотрена схемотехника АЦП. Приведены необходимые схемы и формулы, поясняющие теоретический материал.

Для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника».

УДК 621.382.049.77+004.387(075.8)
ББК 32.844.1я73

ISBN 978-985-420-754-4

© Захаренко Л. А., 2008
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2008

Лабораторная работа № 15

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1. Цель работы

Исследование статических и динамических характеристик цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) К572ПА1.

2. Используемое оборудование:

- блок питания ± 15 В;
- лабораторный макет с цифро-аналоговыми преобразователями 572ПА1 и 1108ПА1;
- двухканальный осциллограф С1-83;
- генератор ГЗ-112/1;
- вольтметр В7-40А;
- комплект проводов.

3. Теоретическая часть

3.1. Общие сведения о цифро-аналоговых преобразователях

Назначение ЦАП:

Преобразование между аналоговыми и цифровыми величинами – основная операция в вычислительных и управляющих системах, поскольку физические параметры, такие, как температура, перемещение, напряженность магнитного поля, скорость, звук и т. д., являются аналоговыми, а большинство практических методов обработки, вычисления и визуального представления информации – цифровыми.

Преобразование цифровых величин в пропорциональные аналоговые величины необходимо для того, чтобы результаты цифровых вычислений могли быть использованы и без труда поняты в аналоговой системе.

Кроме того, если все АЦП разделить на медленно- и быстродействующие, то в первой группе будут преобладать АЦП интегрирующего типа, а во второй – АЦП, содержащие ЦАП. Последние осуществляют обратное преобразование цифровых сигналов в аналоговые и в составе АЦП служат для формирования аналогового сигнала, с которым сравнивается преобразуемый сигнал.

3.2. Основные параметры ЦАП

При последовательном возрастании входного цифрового сигнала от 0 до $N_{\text{МАКС}}$ через единицу младшего разряда (ЕМР) выходной сигнал $U_{\text{ВЫХ}}$ образует ступенчатую кривую. Такую кривую называют обычно характеристикой преобразования ЦАП. В отсутствие аппаратных погрешностей средние точки ступенек расположены на идеальной прямой 1 (рис. 15.1). При этом каждому значению входного кода соответствует определенное значение выходного напряжения. Реальная характеристика преобразования может существенно отличаться от идеальной размерами и формой ступенек, а также ориентацией на координатном поле. Для количественного описания этих различий существует целый ряд параметров.

Идеальная характеристика преобразования (прямая 1, рис. 15.1) – прямая линия, проведенная через точки $(0,0)$, и $(U_{\text{ВЫХ.ЦАП.МАХ}}, 2^N)$, где N – разрядность ЦАП.

Оптимальная характеристика преобразования (прямая 4, рис. 15.1) – прямая линия – эмпирически проводится так, чтобы минимизировать значение погрешности нелинейности. Часто проводится по методу наименьших квадратов.

Реальная характеристика преобразования (прямая 3, рис. 15.1).

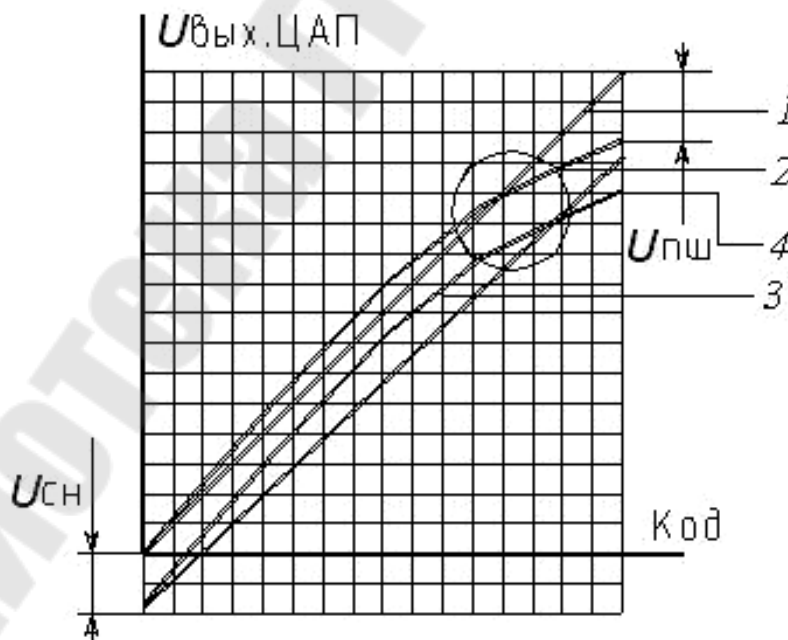


Рис. 15.1. Графическое представление основных параметров ЦАП

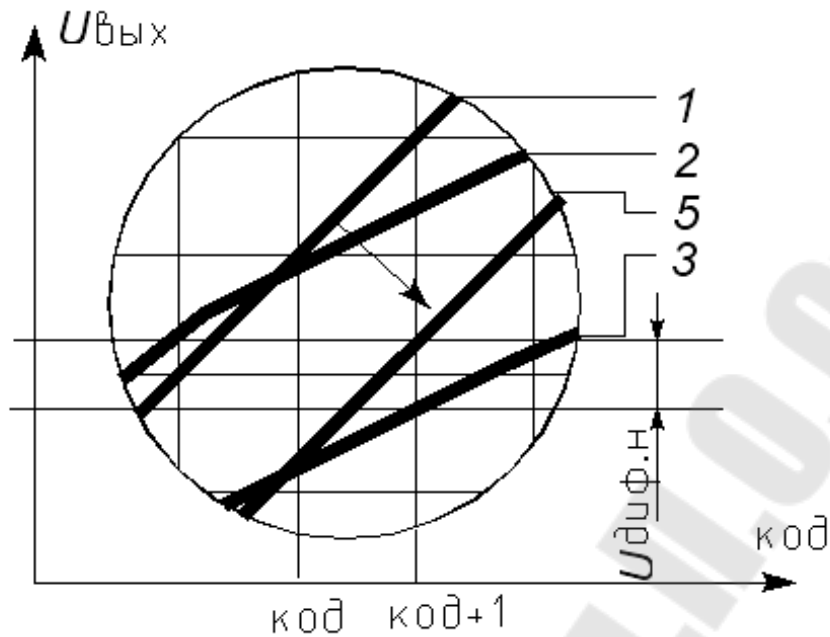


Рис. 15.2. Графическое представление дифференциальной нелинейности (фрагмент предыдущего рисунка в увеличенном масштабе)

3.2.1. Статические параметры

Разрешающая способность — это приращение выходного напряжения при переходе от одного смежного кода к другому, т. е. отличающихся на единицу младшего разряда (ЕМР). Это приращение является шагом квантования. Разрешающую способность для двоичных преобразователей можно рассчитать по формуле:

$$h = \frac{U_{\text{оп}}}{2^N - 1},$$

где N — разрядность ЦАП; $U_{\text{оп}}$ — опорное напряжение преобразователя (вообще говоря, правильнее в этой формуле следовало записать бы вместо опорного напряжения разность между максимальным входным и выходным напряжением, потому что эта разность может отличаться от значения опорного напряжения, но для большинства ЦАП это не так, т. е. максимальное выходное напряжение и опорное совпадают). Чем больше разрядность преобразователя, тем выше разрешающая способность.

Погрешность нелинейности δ_L — определяется как максимальное отклонение реальной характеристики преобразования (кривая 3) от идеальной характеристики во всем диапазоне преобразования. Эта

погрешность иногда носит название абсолютной погрешности нелинейности. Когда абсолютное значение погрешности не столь важно, измеряют отклонение относительно оптимальной прямой. Погрешность нелинейности может измеряться как в абсолютных величинах выходной величины (вольты, милливольты), так и в относительных (в %, при этом берется отношение разницы к максимальному выходному напряжению).

Дифференциальная погрешность нелинейности δ_{LD} – это максимальное отклонение реальной характеристики преобразования от идеальной (или оптимальной прямой) прямой при переходе от одного значения цифрового кода к смежному коду, причем идеальная прямая переносится в одну из этих точек (см. рис. 15.1, кривая 5).

При определении интегральной и дифференциальной погрешности нелинейности обычно пользуются оптимальной прямой, а информацию об отклонении оптимальной прямой от идеальной прямой несет параметр погрешность полной шкалы или погрешность коэффициента передачи.

Таким образом, дифференциальная погрешность нелинейности показывает максимально возможное приращение ошибки на выходе относительно предыдущего значения при изменении значения входного кода на единицу младшего разряда (ЕМР), т. е. при увеличении цифрового кода на 1. А интегральная погрешность нелинейности показывает максимально возможное значение накопившихся ошибок дифференциальной нелинейности.

Исходя из определения интегральной и дифференциальной погрешностей нелинейности, дифференциальная погрешность должна быть меньше или равна (т. е. не более) удвоенного значения интегральной погрешности нелинейности.

Другое понимание дифференциальной нелинейности можно дать следующим образом: дифференциальная погрешность нелинейности показывает отклонение действительных ступеней квантования от их среднего значения.

Монотонность характеристики преобразования – возрастание (уменьшение) или постоянство значений выходного напряжения при равномерном возрастании (уменьшении) входного цифрового кода. Если погрешность дифференциальной нелинейности меньше $-h$, то характеристика преобразования немонотонна. Таким образом можно записать следующее условие монотонности:

$$\delta_{LD} > -h.$$

Диапазон значений выходного сигнала – разность максимального и минимального значений выходного сигнала. Для ЦАП с резистивным выходом диапазон выходного напряжения, в котором погрешность нелинейности не более $0,5h$.

Погрешность смещения нуля – значение выходного напряжения, когда на вход ЦАП подан цифровой код, соответствующий нулю. Является аддитивной составляющей. Определить погрешность смещения нуля ($U_{сн}$) позволяет рис. 15.1, на котором изображена характеристика преобразования некоторого ЦАП (кривая 3). Погрешность смещения нуля определяется как значение выходного напряжения при входном нулевом цифровом коде.

Погрешность полной шкалы ($U_{пш}$) – определяется как отклонение реальной характеристики преобразования при скомпенсированной погрешности смещения нуля (кривая 2) от идеальной характеристики (кривая 1) при максимальном входном коде (см. рис. 15.1). Может измеряться как в милливольтгах, так и в процентах (при этом берется отношение разницы к максимальному выходному напряжению). Является мультипликативной составляющей. Иногда для характеристики погрешности шкалы используют коэффициент передачи (усиления) ЦАП – угол наклона характеристики преобразования.

Погрешность симметрии нуля – разность значений выходного напряжения, когда, например, в прямом коде со знаком знаковый разряд переключается, а код амплитуды соответствует нулю.

3.2.2. Динамические параметры

Динамические параметры ЦАП определяются по изменению выходного напряжения при скачкообразном изменении значения цифрового кода на входе ЦАП от некоторого значения $N_{вх1}$ до некоторого значения $N_{вх2}$ (рис. 15.3).

Время установления – интервал времени от момента времени изменения логического уровня входного цифрового сигнала на 50 % до момента установления выходного сигнала в заданных пределах точности установления d . Значение времени установления увеличивается с возрастанием разности последовательно преобразуемых значений входного кода. Поэтому оно определяется обычно при максимальном значении разности последовательно преобразуемых сигналов, а также при определенном значении нагрузки ЦАП. На рис. 15.3 время установления это участок 4, этот интервал можно подразделить на три участка:

Время задержки – интервал времени, за который выходное напряжение изменяется на 10 % от разности выходных напряжений (участок 1).

Время нарастания – интервал времени, за который выходное напряжение изменяется от 10 % от разности выходных напряжений до 90 % (участок 2).

Время окончательного установления – интервал времени, за который выходное напряжение переходит от нарастания до установления в заданных пределах d (участок 3).

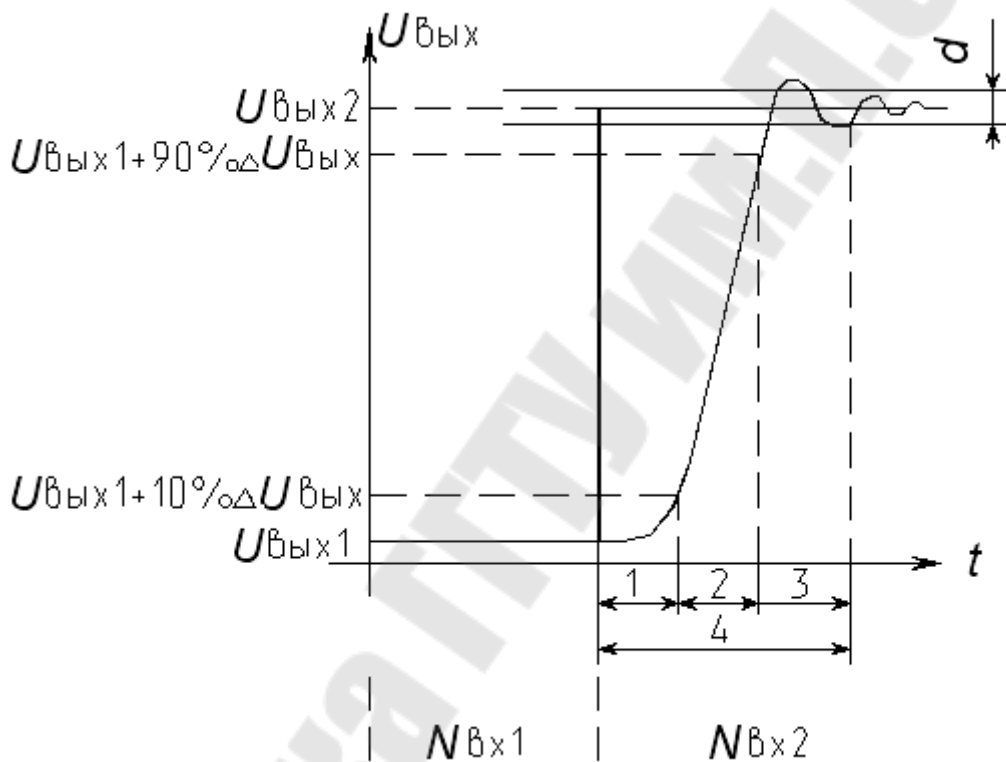


Рис. 15.3. Переходная характеристика ЦАП для определения его динамических параметров

Время переключения – сумма времен задержки и нарастания (1 + 2).

Скорость нарастания – скорость изменения выходного напряжения на участке 2. Измеряется как отношение приращения выходного напряжения на участке 2 ко времени, за которое произошло приращение. От скорости нарастания зависит время нарастания.

Динамическая погрешность – отличие значения выходного напряжения от истинного, вызванная тем, что следующее переключение произошло в момент времени, когда еще не закончился процесс установления выходного сигнала.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Подключить двуполярный источник питания согласно указанной полярности к лабораторному макету. Переключатель «пит» находится в нажатом состоянии, что соответствует питанию микросхемы К572ПА1 15В.

4.2. Измерить погрешность полной шкалы поверяемого ЦАП К572ПА1. Для этого подключить вольтметр к гнездам XS7 и XS8. Переключатель SA1 переключите в положение 2. Кнопочные переключатели кода установите на входе поверяемого ЦАП код полной шкалы (все кнопки нажаты). Снимите показание вольтметра.

4.3. Рассчитайте погрешность полной шкалы поверяемого ЦАП К572ПА1 по формуле:

$$\pm \delta_{\text{ПШ}} = 2 \cdot U_{\text{ИЗМ}} - h = 2 \cdot U_{\text{ИЗМ}} - \frac{U_{\text{ОП}}}{2^N},$$

где $U_{\text{ИЗМ}}$ – показание вольтметра; h – значение единицы младшего разряда; $U_{\text{ОП}} = 10,24$ В – напряжение опоры для поверяемого ЦАП; N – разрядность поверяемого ЦАП;

4.4. Переключатель SA1 установите в положение 1 (кнопка нажата). Подключите вольтметр к контактам XS9, XS10. Измерьте погрешность преобразования отдельно для каждого из 10 разрядов поверяемого ЦАП. Данные измерений занесите в таблицу 15.1:

Таблица 15.1

Номер разряда, n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$										
$\delta_n, \text{В}$										

Рассчитываем по формуле δ_n :

$$\delta_n = \frac{2 \cdot U_{\text{ИЗМ}}}{K},$$

где δ_n – абсолютная погрешность преобразования для каждого разряда; $U_{\text{ИЗМ}}$ – показания вольтметра, взятые из таблицы 15.1; K – коэффициент передачи буферного усилителя.

4.5. Для диапазона кодов, заданных преподавателем, рассчитайте интегральную нелинейность каждой кодовой комбинации поверяемого ЦАП К572ПА1 по формуле:

$$\delta_{\text{ИН.РАС}} = \sum_{n=1}^m A_n \cdot \delta_n,$$

где m – разрядность поверяемого ЦАП; n – номер включенного разряда; A_n – коэффициенты двоичного числа, имеющие значение 1 или 0 (что соответствует включению или отключению разряда).

Данные расчета занесите в таблицу 15.2:

Таблица 15.2

Код				
$\delta_{\text{ИН.РАС}}, \text{ В}$				
$U_{\text{ИН.ИЗМ}}, \text{ В}$				
$\delta_{\text{ИН.ИЗМ}}, \text{ В}$				
$\delta_{\text{ДИФ.РАС}}, \text{ В}$				
$\delta_{\text{ДИФ.ИЗМ}}, \text{ В}$				

4.6. Для каждой кодовой комбинации заданного диапазона измерьте погрешности преобразования $U_{\text{ИН.ИЗМ}}$, аналогично предыдущему пункту. Данные измерения занесите в таблицу 15.2.

4.7. Рассчитайте для каждой кодовой комбинации заданного диапазона измеренную интегральную нелинейность по формуле:

$$\delta_{\text{ИН.ИЗМ}} = \frac{2 \cdot U_{\text{ИН.ИЗМ}}}{K}$$

Данные расчета занесите в таблицу 15.2.

4.8. Для всех кодовых переходов рассчитайте расчетную дифференциальную нелинейность по формуле:

$$\delta_{\text{ДИФ.РАС}} = \delta_{\text{ИН.РАС}(N+1)} - \delta_{\text{ИН.РАС}(N)}$$

Данные расчета занесите в таблицу 15.2.

4.9. Для всех кодовых переходов рассчитайте «измеренную» дифференциальную нелинейность по формуле:

$$\delta_{\text{ДИФ.ИЗМ}} = \delta_{\text{ИН.ИЗМ}(N+1)} - \delta_{\text{ИН.ИЗМ}(N)}$$

Данные расчета занесите в таблицу 15.2.

4.10. Найдите и выделите в таблице 15.2. максимальные по модулю значения дифференциальной и интегральной нелинейности. Проверьте, не превосходят ли рассчитанные значения для погрешности полной шкалы, дифференциальной и интегральной нелинейности данные, приведенные в справочнике.

4.11. Измерьте время установления $t_{\text{уст}}$ (см. рис. 15.3) поверяемого ЦАП К572ПА1. Для этого подключите канал X осциллографа к гнездам XS5, XS6, канал Y – XS7, XS8. Переключатель SA1 в поло-

жение 1. Переключателем «стат/дин» переведите лабораторный стенд из режима измерения статики в режим измерения динамики.

4.12. Нажать кнопку «млр.», все остальные кнопки переключателя «код» в отжатом состоянии. Подключите генератор к гнездам XS3, XS4 и подайте с него сигнал прямоугольной формы максимального размаха с частотой $f = 100$ кГц. Синхронизируйтесь по положительному фронту, что соответствует переходу кода с 000...01 на 111...10, измерьте время установления с точностью $1/2h$, где h – значение младшего разряда преобразователя. Синхронизируясь по отрицательному фронту сигнала, что соответствует переходу кода 000...01 на 111...10, измерьте время установления с точностью $1/2h$.

4.13. Установите напряжение питания поверяемого ЦАП, равную 5 В, отжав кнопочный переключатель «пит». Повторить действия пунктов 2–12.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать основные теоретические сведения, результаты выполнения работы по всем пунктам, необходимые расчеты со всеми промежуточными результатами, схемы всех экспериментов, необходимые таблицы и основное – выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение цифро-аналогового преобразователя и приведите его область применения.
2. По каким признакам и как классифицируются цифро-аналоговые преобразователи?
3. Приведите структурную схему и поясните принцип работы ЦАП с матрицей двоично-взвешенных резисторов.
4. Приведите структурную схему и поясните принцип работы ЦАП с матрицей резисторов R-2R.
5. Приведите основные статические параметры микросхем ЦАП.
6. Приведите основные динамические параметры микросхем ЦАП.

7. Литература

1. Бахтиаров, Г. Д. Аналого-цифровые преобразователи / Г. Д. Бахтиаров, В. В. Малинин, В. П. Школин. – Москва : Совет. радио, 1980.
2. Гнатек, Ю. Р. Справочник по цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователям / Ю. Р. Гнатек. – Москва : Радио и связь, 1982.

3. Коломбет, Е. А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов / Е. А. Коломбет. – Москва : Радио и связь, 1991.

4. Хоровиц, Хило. Искусство схемотехники. В 3 т. Т. 2 / Хило Хоровиц. – Москва : Мир, 1992. – С. 233–264.

5. Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры : справочник / И. В. Новаченко [и др.]. – Москва : Радио и связь, 1989. – С. 232–235.

Лабораторная работа № 16
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ
ПРИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ

1. Цель работы

Исследовать метод последовательных приближений и опытным путем определить основные параметры АЦП, построенных по этому методу, определить достоинства и недостатки этих АЦП.

2. Используемое оборудование:

- блок питания ± 15 В;
- лабораторный макет;
- осциллограф С1-82;
- генератор ГЗ-112/1;
- вольтметр В7-40-2 шт.;
- комплект проводов.

3. Теоретическая часть

3.1. Основные методы построения АЦП

В основу классификации положена аналогия процессов аналого-цифрового преобразования и измерения длины отрезка, в соответствии с которой выделены три классических метода: подсчета, итерационный и прямой.

В последнее время наибольшее распространение получил подход к классификации, основанный на том, как во времени разворачивается процесс преобразования аналоговой величины в цифровую. В основе преобразования выборочных значений сигнала в цифровые эквиваленты лежат операции квантования и кодирования. Они могут осуществляться с помощью либо последовательной, либо параллельной, либо последовательно-параллельной процедуры приближения цифрового приближения цифрового эквивалента к преобразуемой величине.

Исходя из этого, целесообразно разделить методы построения АЦП на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные. При этом надо иметь в виду, что последовательную процедуру можно реализовать с помощью как единичных, так и двоично-взвешенных приближений. Таким образом, все АЦП можно разделить на последовательные с единичными и двоично-взвешенными приближениями; параллельные; последовательно-параллельные.

3.2. АЦП последовательных приближений

Преобразователь этого типа является наиболее распространенным вариантом последовательных АЦП с двоично-взвешенными приближениями (рис 16.1).

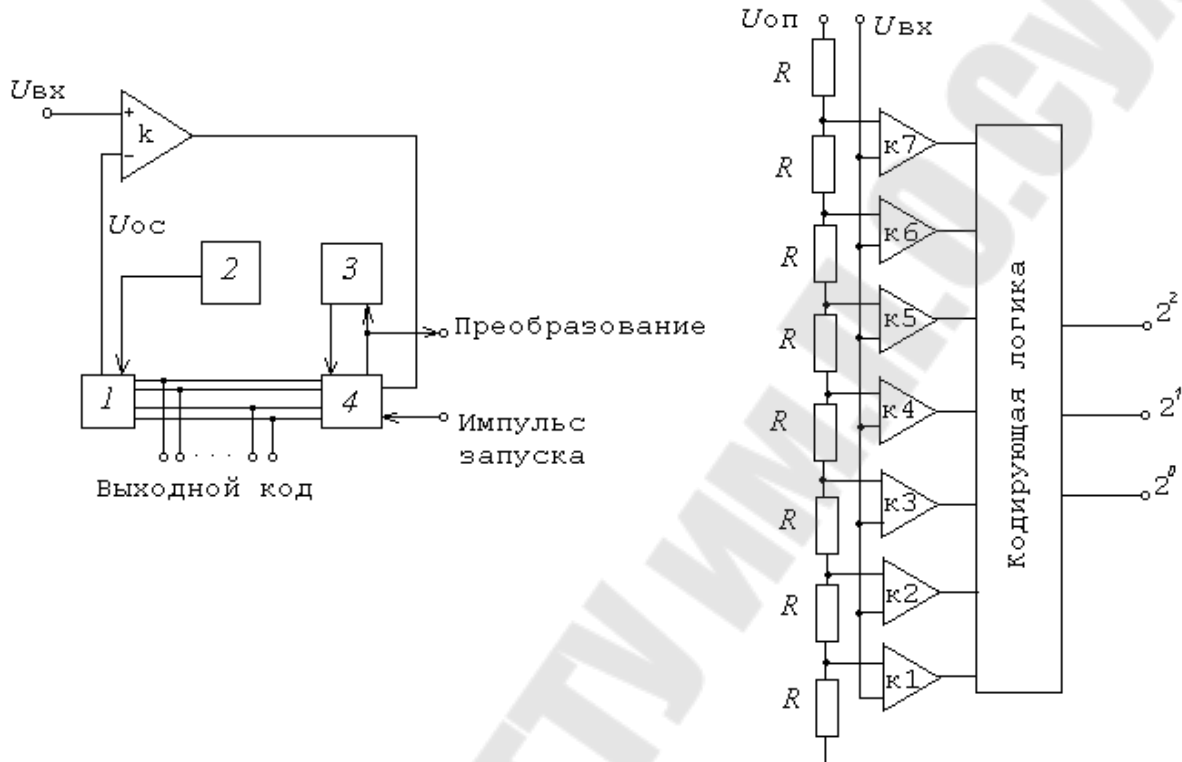


Рис. 16.1. Структурная схема АЦП последовательных приближений:

- 1 – ЦАП (преобразователь код – напряжение);
- 2 – источник опорного напряжения;
- 3 – генератор тактовых импульсов;
- 4 – программное устройство управления

В основе работы этого класса преобразователей лежит принцип дихотомии, т. е. последовательного сравнения измеряемой величины с $1/2, 1/4, 1/8$ и т. д. от возможного максимального значения её. Это позволяет для m -разрядного АЦП выполнить весь процесс преобразования за m последовательных шагов приближений (итераций) вместо $2^m - 1$ при использовании единичных приближений и получить существенный выигрыш в быстродействии. Так, уже при $m = 10$ выигрыш достигает двух порядков и позволяет получить с помощью таких АЦП в зависимости от числа используемых разрядов до $10^5 - 10^6$ преобразований в секунду. В то же время статическая погрешность этого типа преобразователей, определяемая в основном используемым в нем ЦАП, может быть очень малой, что позволяет реализовать разрешающую способность до 16 двоичных разрядов.

Таким образом, данный класс АЦП представляет определённый технический компромисс между точностью и быстродействием для значительно большего числа практических приложений, поэтому находит широкое применение как при построении цифровых измерительных приборов, так и при работе совместно с устройством выборки и запоминания в различных областях цифровой обработки быстро изменяющихся сигналов и процессов.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Подготовка стенда к работе. На входы «+5 В», «-5 В» подать с источника питания напряжения ± 5 В соответственно, соединить вход « \perp », с соответствующим выходом источника питания. Вход « $U_{\text{оп}}$ » соединить перемычкой с гнездом «5 В». Перемычкой соединить вход « $U_{\text{вх}}$ » и выход « $U_{\text{вх}}$ » источника входного напряжения. Вход «С» соединить с выходом внешнего генератора прямоугольных импульсов.

4.2. Снять статическую характеристику АЦП. Для этого, изменяя $U_{\text{вх}}$, необходимо снимать показания с индикатора двоичного кода. Проверить правильность преобразования можно по формуле:

$$U = \frac{|U_{\text{оп}}|}{2^n} \cdot \sum_{i=0}^9 2^i \cdot D_i ,$$

где $|U_{\text{оп}}| = 5$ В; n – разрядность АЦП ($n = 10$); D_i – значения разрядов двоичного кода на индикаторах D9D0 (0 или 1).

4.3. Подать на вход 1 и вход 2 осциллографа выходные сигналы $U_{\text{вых.комп}}$ и $U_{\text{вых.ацп}}$, а частоту генератора установить равной 1 кГц. Значение $U_{\text{вх}}$ выбрать произвольно. Зарисовать форму сигналов $U_{\text{вых.комп}}$ и $U_{\text{вых.ацп}}$ в соответствии с масштабом.

4.4. Определить быстродействие АЦП. Для этого установить частоту генератора $< f_{\text{max}} = 100$ кГц и снять статическую характеристику преобразования. Если показания АЦП соответствуют $U_{\text{вх}}$, то можно увеличивать частоту в сторону $f_{\text{max}} = 100$ кГц. Оценить двоичный код можно, нажав и удерживая кнопку SA2. Если же показания индикатора кода сильно искажены, то частоту генератора надо уменьшать, при этом периодически оценивая код на индикаторах D9-D0. Уменьшать частоту надо до тех пор, пока код не перестанет искажаться. Таким образом можно найти такое предельное значение частоты $f_{\text{пр}}$, выше которого АЦП даёт явно ложную информацию. По значению $f_{\text{пр}}$

можно определить быстродействие АЦП последовательных приближений: $t_{\text{ПР}} = \frac{1}{f_{\text{ПР}}}$.

4.5. Исследовать работу АЦП в пошаговом режиме. Для этого отключить генератор от входа «С» стенда и соединить вход «С» переключателем с выходом одновибратора. Затем привести АЦП в стартовый режим. Нажимая кнопку «Шаг/Сброс» добиться того, чтобы все индикаторы, кроме D9 были зажжены, а индикатор «Стоп» погашен. Установить $U_{\text{ВХ}}$ произвольным образом и, нажимая кнопку «Шаг/Сброс», записывать двоичный код на индикаторах D9D0, значения $U_{\text{ВЫХ.КОМП}}$ в таблицу 16.1:

Таблица 16.1

Шаг	Двоичный код	$U_{\text{ВЫХ.КОМП, В}}$
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

Кнопку «Шаг/Сброс» нажимать до зажигания индикатора «Стоп». Когда он зажегся, преобразование закончено и двоичный код сформирован окончательно. Если нажать «Шаг/Сброс» еще раз, АЦП перейдет в стартовое состояние.

Проверить правильность преобразования и оценить относительную погрешность: $\delta_{\text{ОТН}}$ по формуле:

$$\delta_{\text{ОТН}} = \frac{U_{\text{ИЗМ}} - U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \cdot 100 \%,$$

где $U_{\text{ИЗМ}} = \frac{|U_{\text{ОП}}|}{2^n} \cdot \sum_{i=0}^9 2^i \cdot D_i$.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать основные теоретические сведения, результаты выполнения работы по всем пунктам, необходимые расчеты со всеми промежуточными результатами, схемы всех экспериментов, необходимые таблицы и основное – выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение аналого-цифрового преобразователя и приведите его область применения.
2. По каким признакам и как классифицируются аналого-цифровые преобразователи?
3. Приведите структурную схему и поясните принцип работы АЦП, построенных по методу последовательных приближений.
4. Приведите достоинства и недостатки АЦП, построенных по методу последовательных приближений.
5. Приведите основные статические параметры микросхем АЦП.
6. Приведите основные динамические параметры микросхем АЦП.

7. Литература

1. Бахтияров, Г. Д. Аналого-цифровые преобразователи / Г. Д. Бахтияров, В. В. Малинин, В. П. Школин. – Москва : Совет. радио, 1980.
2. Гнатек, Ю. Р. Справочник по цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователям / Ю. Р. Гнатек. – Москва : Радио и связь, 1982.
3. Коломбет, Е. А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов / Е. А. Коломбет. – Москва : Радио и связь, 1991.
4. Хоровиц, Хило. Искусство схемотехники. В 3 т. Т. 2 / Хило Хоровиц. – Москва : Мир, 1992. – С. 233–264.
5. Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры : справочник / И. В. Новаченко [и др.]. – Москва : Радио и связь, 1989. – С. 328.

Лабораторная работа № 17
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ДВОЙНОГО
ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПРИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ
ПРЕОБРАЗОВАНИИ

1. Цель работы

Исследовать метод двойного интегрирования и опытным путем определить основные параметры АЦП, построенных по этому методу, определить достоинства и недостатки этих АЦП.

2. Используемое оборудование:

- блок питания ± 15 В;
- лабораторный макет с АЦП двойного интегрирования;
- осциллограф С1-82;
- генератор ГЗ-112/1;
- вольтметр В7-40-2 шт.;
- комплект проводов.

3. Теоретическая часть

3.1. АЦП с двухтактным интегрированием

Недостатком рассмотренных последовательных АЦП является их относительно низкая помехоустойчивость, что ограничивает их разрешающую способность, как правило, на уровне 8...10 разрядов. От этого недостатка в значительной мере свободны АЦП, использующие в процессе преобразования операцию интегрирования входного сигнала за фиксированный интервал времени.

Одним из наиболее распространенных вариантов преобразователей такого типа является АЦП с двухтактным интегрированием (рис. 17.1, а). Полный цикл его работы состоит из двух тактов. В первом с помощью аналогового интегратора происходит интегрирование входного напряжения за фиксированный интервал времени

$$T = N_{\text{макс}} \Delta t_{\text{сч}},$$

где $N_{\text{макс}}$ — емкость счетчика, определяющая разрешающую способность АЦП.

В результате этой операции на интегрирующем конденсаторе накапливается заряд

$$q_1 = U_{\text{вх}}/RC,$$

где $U_{\text{вх}}$ — среднее значение входного напряжения за время T .

Во втором такте происходит разряд конденсатора от источника опорного напряжения $U_{\text{ВХ}}$, который имеет полярность, противоположную входному напряжению, и подключается к интегратору с помощью переключателя Кл. Этот процесс продолжается до возвращения конденсатора в начальные условия (рис. 17.1, б), что фиксируется компаратором. В результате удаленный из конденсатора заряд

$$q_2 = U_{\text{оп}} t / RC.$$

t – время разряда конденсатора. Это время является переменным, и его последующее измерение с помощью счетных импульсов с периодом следования $\Delta t_{\text{сч}}$ позволяет получить цифровой эквивалент $U_{\text{ВХ}}$. Действительно, поскольку условием правильной работы АЦП является

$$q_1 = q_2,$$

то

$$\frac{U_{\text{ВХ}}}{RC} T = \frac{U_{\text{оп}}}{RC} t,$$

откуда

$$t = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{оп}}} T,$$

или в пересчете на количество счетных импульсов

$$N = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{оп}}} N_{\text{МАКС}}.$$

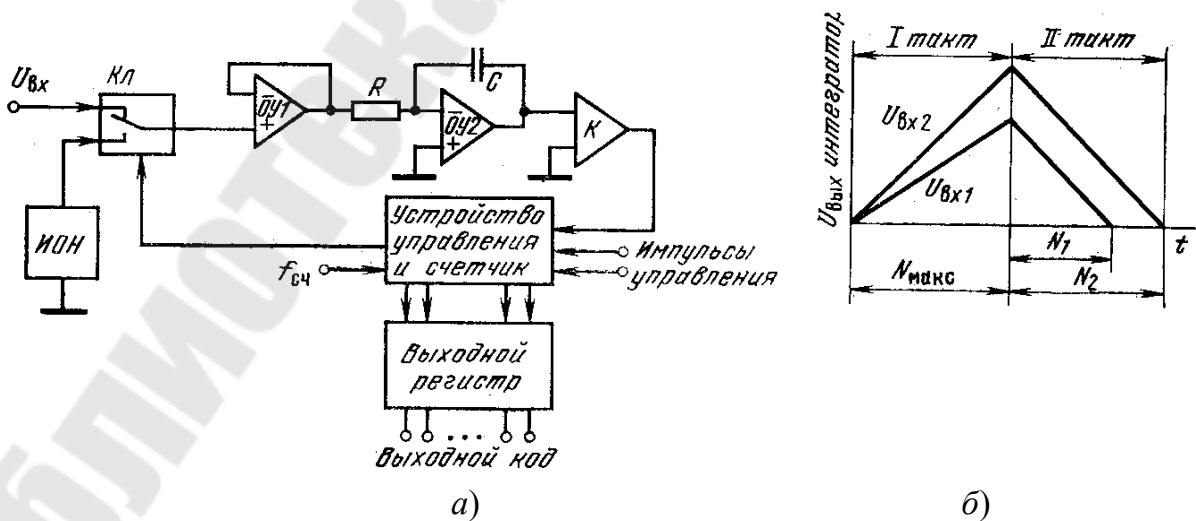


Рис. 17.1. Структурная схема АЦП с двухтактным интегрированием (а) и временные диаграммы, поясняющие его работу (б)

Используя процедуру двойного интегрирования, этот тип АЦП приобретает важные свойства.

Во-первых, интегрирование входного сигнала приводит к его усреднению и сглаживанию всех быстрых по сравнению с временем интегрирования помех, наводок и шумов. Интегрирование сигнала за время T эквивалентно его фильтрации с помощью фильтра низких частот, подавляющий различные частотные составляющие, присутствующие на входе интегратора. В частности, легко видеть, что если выбрать интервал интегрирования T кратным периоду частоты питающей сети, например, 50 Гц, то на этой частоте будут полностью подавляться наводки, проходящие по цепям питания и являющиеся одним из факторов, ограничивающих точность АЦП. В терминах теории обработки сигналов сказанное можно трактовать как увеличение отношения сигнал/помеха на выходе интегратора, а поскольку это отношение является критерием помехозащищенности, то этот результат означает повышение помехоустойчивости АЦП, использующих интегрирование входного сигнала.

Во-вторых, интегрирование входного сигнала приводит к уменьшению динамических погрешностей АЦП, связанных с изменением сигнала в процессе преобразования. В частности, исчезают составляющие динамической погрешности, обусловленные нечетными производными входного сигнала.

В-третьих, использование двухтактного интегрирования позволяет компенсировать ряд составляющих статической погрешности и существенно увеличивать общую точность преобразования. К этим составляющим относятся погрешности буферного усилителя, возникающие за счет изменения коэффициента усиления и синфазного сигнала, погрешности интегратора, обусловленные изменением постоянной времени интегратора, и дрейфы этих составляющих, если их скорость такова, что за время одного преобразования ими можно пренебречь.

Быстродействие АЦП с двухтактным интегрированием определяется при заданном числе разрядов, т. е. значении $N_{\text{МАКС}}$ частотой счетных импульсов $f_{\text{сч}}$. Выбор последней в значительной мере ограничивается временем включения компаратора. Это связано с тем, что, например, для 12-разрядного АЦП с максимальным входным напряжением 2 В шаг квантования имеет значение около 500 мкВ. При этом компаратор должен обладать чувствительностью порядка 100 мкВ. Как правило высокочувствительные интегральные компараторы имеют типичные времена включения порядка 200 нс при перевозбуждениях 5...10 мВ. При уменьшении напряжения перевозбуждения эти

времена существенно увеличиваются и могут достигать нескольких микросекунд. Поэтому правильный выбор компаратора является важным моментом проектирования АЦП с двухтактным интегрированием и прецизионных АЦП вообще. Когда ни один из выпускаемых промышленностью компараторов не подходит по чувствительности, можно рекомендовать компаратор на основе операционного усилителя с соответствующим коэффициентом усиления в разомкнутом состоянии. Но в любом случае надо знать время включения при требуемом перевозбуждении. Если эти данные отсутствуют, их надо получить экспериментально. Обычно частоту $f_{сч}$ выбирают в диапазоне 10...100 кГц. При $N_{МАКС} = 4096$ это составляет, например, время преобразования 40...400 мс.

Таким образом, высокие точностные характеристики АЦП с двухтактным интегрированием получаются за счет невысокого быстродействия и основной областью их применения являются цифровые вольтметры постоянного напряжения, а также системы обработки данных, оперирующие с постоянными или медленно изменяющимися сигналами.

Составляющими статической погрешности АЦП с двухтактным интегрированием являются:

- нестабильность источника опорного напряжения со всеми ее составляющими, которая, непосредственно пересчитывается в погрешность АЦП;
- нестабильность частоты счетных импульсов, влияющих на коэффициент передачи преобразователя;
- напряжения смещения буферного каскада, интегратора и компаратора и их дрейфы;
- нелинейность интегратора, которая определяется коэффициентом усиления операционного усилителя в разомкнутом состоянии.

Для высокоточных АЦП с двойным интегрированием необходимо учитывать такие дополнительные составляющие, как:

- нелинейность буферного каскада, обусловленную изменением коэффициента ослабления синфазной составляющей в диапазоне изменения входного сигнала;
- потери в интегрирующем конденсаторе, происходящие за счет явления абсорбции, как это имеет место в точных устройствах выборки и запоминания;
- шумы, проходящие на вход от различных плохо контролируемых факторов;

– составляющие, связанные с неидеальностью используемых аналоговых ключей, и другие эффекты, зависящие от конкретного схемного выполнения аналоговой части АЦП.

В тех случаях, когда не удается удовлетворительно распределить составляющие статической погрешности между отдельными – элементами и выполнить требования, предъявляемые к допустимой погрешности преобразования, используют методы автоматической коррекции, в первую очередь смещения нуля.

Дальнейшим развитием метода двухтактного интегрирования является метод четырехтактного интегрирования, совмещенный с коррекцией некоторых видов погрешностей.

В заключение отметим, что АЦП с двухтактным интегрированием благодаря высоким точностным характеристикам, простоте структурной схемы и хорошей реализуемости на ИС нашли широкое применение. На основе метода двухтактного интегрирования созданы преобразователи с числом разрядов от 8 до 16 при временах преобразования от единиц до сотен миллисекунд. Достижением последних лет является разработка АЦП с двухтактным интегрированием в виде двух БИС, одна из которых содержит аналоговую часть, а вторая – цифровую.

4. Порядок выполнения работы

Написать формулу для расчета погрешности

4.1. Ознакомиться с устройством стенда. Изучить назначение ручек переменных резисторов, которое являются следующим:

' $-U_{ВХ}$ ' – регулировка уровня входного напряжения АЦП в пределах $0В-U_{пит}$;

' $-U_{ОП}$ ' – регулировка уровня опорного напряжения АЦП в пределах $0В-U_{пит}$;

' $\sim U_{ПОМ}$ ' – регулировка амплитуды напряжения сигнала помехи с частотой $f = 50Гц$;

' $U_{СМ}$ ' – регулировка величины постоянного напряжения смещения сигнала помехи;

Тумблером SA1 можно изменять постоянные времени интегрирующего усилителя (T_1 , T_2). После ознакомления с элементами управления подать на стенд питание (+11 В...13 В, –11 В...13 В). Подавать 15 В не рекомендуется во избежание «защелкивания» элементов DD2.1–DD2.4, которые выполнены по КМОП-технологии. Затем, изменяя « $-U_{ВХ}$ » зарисовать форму входного и выходного напряжений для двух различных значений $-U_{ВХ}$. $U_{ОП}$ установить в пределах 7 В–10 В.

4.2. Не подавая на вход АЦП сигнал помехи, снять передаточную характеристику (8–10 точек) АЦП при измерении сигнала постоянного тока. Рассчитать погрешность преобразователя δ и данные занести в таблицу 17.1:

Таблица 17.1

$N_{п.п}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{вх}, В$									
$T_{ввых}, мс$									
$K_{ПР}$									
$\delta, \%$									

4.3. Подать на вход $\sim U_{ПОМ}$ сигнал помехи (соединить соответствующие гнезда переключками) с частотой, кратной частоте преобразователя ($f_{ПР} = 25$ Гц) и снять передаточную характеристику АЦП при измерении сигнала постоянного тока при наличии сигнала помехи. Рассчитать погрешность δ преобразователя и данные занести в таблицу 17.2:

Таблица 17.2

$N_{п.п}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{вх}, В$									
$T_{ввых}, мс$									
$K_{ПР}$									
$\delta, \%$									

4.4. Изменить тумблером SA1 постоянную времени АЦП и снять передаточную характеристику при измерении сигнала постоянного тока при наличии сигнала помехи и при изменении параметров интегратора. Рассчитать погрешность δ преобразователя и данные занести в таблицу 17.3:

Таблица 17.3

$N_{п.п}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{вх}, В$									
$T_{ввых}, мс$									
$K_{ПР}$									
$\delta, \%$									

4.5. Вернуть тумблер SA1 в исходное состояние («Т1»), подать на вход « $-U_{ПОМ}$ » сигнал помехи и установить регулятором « $U_{СМ}$ » напряжение смещения, снять передаточную характеристику при измерении сигнала постоянного тока при наличии сигнала помехи и при

наличия напряжения смещения. Рассчитать погрешность δ преобразователя и данные занести в таблицу 17.4:

Таблица 17.4

$N_{п.п}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{вх}, В$									
$T_{вых}, мс$									
$K_{ПР}$									
$\delta, \%$									

4.6. Подать на вход « $-U_{ПОМ}$ » сигнал помехи от генератора с частотой, не кратной частоте преобразователя ($f_{ПР} = 25 Гц$) и убрать регулятором « $U_{СМ}$ » напряжение смещения, снять передаточную характеристику при измерении сигнала постоянного тока при наличии сигнала помехи, не кратной частоте прямого интегрирования. Рассчитать погрешность δ преобразователя и данные занести в таблицу 17.5:

Таблица 17.5

$N_{п.п}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{вх}, В$									
$T_{вых}, мс$									
$K_{ПР}$									
$\delta, \%$									

4.7. По результатам выполнения предыдущих пунктов построить на одном листе в одном масштабе графики $T_{вых} = f(U_{вх})$ для всех пяти случаев.

4.8. Результаты выполнения всех пунктов свести в сводную таблицу 17.6.

Таблица 17.6

Вид воздействующих сигналов	$U_{вх} - \text{пост.}$ $U_{ПОМ=25} - \text{нет}$ $U_{ПОМ\neq 25} - \text{нет}$ $U_{СМ} - \text{нет}$ $T_{инт} = T1$	$U_{вх} - \text{пост.}$ $U_{ПОМ=25} - \text{есть}$ $U_{ПОМ\neq 25} - \text{нет}$ $U_{СМ} - \text{нет}$ $T_{инт} = T1$	$U_{вх} - \text{пост.}$ $U_{ПОМ=25} - \text{есть}$ $U_{ПОМ\neq 25} - \text{нет}$ $U_{СМ} - \text{нет}$ $T_{инт} = T2$	$U_{вх} - \text{пост.}$ $U_{ПОМ=25} - \text{есть}$ $U_{ПОМ\neq 25} - \text{нет}$ $U_{СМ} - \text{есть}$ $T_{инт} = T1$	$U_{вх} - \text{пост.}$ $U_{ПОМ=25} - \text{нет}$ $U_{ПОМ\neq 25} - \text{есть}$ $U_{СМ} - \text{нет}$ $T_{инт} = T1$
$K_{ПР}$					
$\delta, \%$					

4.9. Сделать вывод о точности, стабильности, помехоустойчивости и быстродействии АЦП, построенных по принципу двойного интегрирования.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать основные теоретические сведения, результаты выполнения работы по всем пунктам, необходимые расчеты со всеми промежуточными результатами, схемы всех экспериментов, необходимые таблицы и основное – выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

6. Контрольные вопросы

1. Приведите структурную схему и поясните принцип работы АЦП, построенных по методу двойного интегрирования.

2. Приведите временные диаграммы, поясняющие работу АЦП двойного интегрирования.

3. Приведите достоинства и недостатки АЦП, построенных по методу двойного интегрирования.

4. Чем определяется статическая погрешность АЦП двойного интегрирования?

5. Чем определяется быстродействие АЦП двойного интегрирования?

7. Литература

1. Бахтиаров, Г. Д. Аналого-цифровые преобразователи / Г. Д. Бахтиаров, В. В. Малинин, В. П. Школин. – Москва : Совет. радио, 1980.

2. Гнатек, Ю. Р. Справочник по цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователям / Ю. Р. Гнатек. – Москва : Радио и связь, 1982.

3. Коломбет, Е. А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов / Е. А. Коломбет. – Москва : Радио и связь, 1991.

4. Хоровиц, Хило. Искусство схемотехники. В 3 т. Т. 2 / Хило Хоровиц. – Москва : Мир, 1992. – С. 233–264.

5. Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры : справочник / И. В. Новаченко [и др.]. – Москва : Радио и связь, 1989. – С. 242.

Содержание

Лабораторная работа № 15

Исследование интегральных микросхем цифро-аналоговых преобразователей..... 3

Лабораторная работа № 16

Исследование метода последовательных приближений при аналого-цифровом преобразовании..... 13

Лабораторная работа № 17

Исследование метода двойного интегрирования при аналого-цифровом преобразовании..... 18

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Захаренко Леонид Александрович

**МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
И МИКРОСХЕМОТЕХНИКА.
ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ
И АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

**Лабораторный практикум
по одноименному курсу для студентов
специальности 1-36 04 02
«Промышленная электроника»**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. И. Жукова*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 11.11.08.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,70.

Изд. № 6.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.