

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ**

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЦАП И АЦП**

Методические указания к лабораторной работе

САМАРА 1994 [1996]

Автор-составитель А.Г.Гимадиев

УДК 681.325

Исследование статических характеристик ЦАП и АЦП:
Метод. указания к лаборат.работе/ Самар. гос.
аэрокосм. ун-т; Сост. А.Г.Гимадиев. Самара, 1994.
16 с.

Изложены схемы, принцип действия и характеристики цифроаналоговых (ЦАП) и аналогово-цифровых (АЦП) преобразователей, используемых в электронных системах управления, диагностики и контроля. На базе простейших ЦАП и АЦП показана методика определения их статических характеристик.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 13.02.08 по курсу лекций "Электронные системы управления". Подготовлены на кафедре АСЗУ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

Рецензенты: Н.В. Дьягильский,
П.Т. Емелькин

СО Д Е Р Ж А Н И Е

1.ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	5
2.АНАЛОГОВО ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	6
3.ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦАП И АЦП.....	10
3.1.Схемы лабораторных установок.....	10
3.2.Определение статической погрешности преобразователя.....	13
4.КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПОЛУЧЕННЫХ ЗНАНИЙ.....	13
Список рекомендуемой литературы.....	14

Преобразование аналоговых и цифровых величин является одной из основных операций в вычислительных и управляющих системах, поскольку физические параметры, такие как давление, температура, расход являются аналоговыми, а большинство практических методов обработки, вычисления и визуального представления информации - цифровыми. Устройства, в которых осуществляется автоматическое преобразование цифровых кодов в эквивалентные им значения напряжения или тока называют цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП). Устройства, в которых непрерывно изменяющийся аналоговый сигнал автоматически преобразовывается в эквивалентные значения числовых кодов, называют аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП). К основным параметрам ЦАП и АЦП относятся диапазон изменения входных и выходных значений, быстродействие, погрешность преобразований, которые должны учитываться при проектировании цифровых ЭСУ.

В лабораторной работе рассмотрены простейшие четырехразрядные ЦАП и АЦП; на примере которых изучаются схема преобразователей, принцип действия и методика оценки погрешности преобразования сигналов.

Цель лабораторной работы: знакомство со схемой, принципом действия ЦАП и АЦП; оценка погрешности цифроаналоговых и аналогово-цифровых преобразований сигналов.

Содержание работы: на основе описания преобразователей сигналов студенты знакомятся с назначением, основными техническими характеристиками ЦАП и АЦП; изучают схему и принцип действия преобразователей; описывают принципиальную схему и действие четырехразрядных ЦАП и АЦП, определяют их статические характеристики.

1. ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

ЦАП используются там, где необходимо сформировать управляющее воздействие на объект регулирования по цифровой информации, выдаваемой арифметически-логическим устройством (АЛУ) электронной системы регулирования.

В ЦАП обеспечивается соответствие между входным числовым значением N_{t_i} и ее аналоговым эквивалентом $X(t_i)$ для любого момента времени t_i . Количественно эта связь выражается формулой

$$X(t_i) = N_{t_i} \Delta x \pm \delta x_i,$$

где Δx - шаг квантования по уровню (аналоговый эквивалент младшего разряда (МР) кода); δx_i - погрешность преобразования.

К основным характеристикам ЦАП относятся диапазон изменения входных и выходных параметров, быстродействие, погрешность преобразования сигналов. Диапазон изменения входных и выходных параметров ЦАП определяется отношением

$$\Delta D = \frac{N_{max}}{N_{min}} = \frac{X_{max}}{X_{min}}.$$

При линейном преобразовании сигналов входное и выходное значения имеют одинаковый диапазон, который определяется числом разрядов цифрового кода.

Быстродействие ЦАП характеризуется шагом (периодом) квантования Δt и временем преобразования (установления) $t_{пр}$. Шаг квантования - интервал времени между двумя последовательными преобразованиями.

Значение, обратное периоду квантования, $1/\Delta t = f_{кв}$ называют частотой квантования.

называют

Время преобразования $t_{пр}$ — интервал времени от момента изменения кода на входе ЦАП до момента установления выходного аналогового сигнала.

Погрешность преобразования ЦАП (статическая погрешность) характеризуется погрешностью квантования и инструментальной погрешностью, которая определяется нестабильностью источника опорного напряжения, погрешностью ключей резистивных матриц и выходных операционных усилителей. Инструментальные погрешности проявляются в смещении нуля или параллельном сдвиге статической характеристики ЦАП, в изменении коэффициента передачи и в отклонении характеристики ЦАП от идеальной прямой (нелинейность преобразователя).

В настоящее время применяются в основном два способа цифроаналогового преобразования сигналов: с использованием резистивной матрицы с весовыми двоично-взвешенными сопротивлениями и матрицы с двумя номиналами сопротивлений, которую обычно называют матрицей $R-2R$.

Рассмотрим более подробно ЦАП с весовыми двоично-взвешенными сопротивлениями (рис.1), состоящую из следующих элементов: " n " ключей, по одному на каждый разряд, управляемых преобразуемым двоичным кодом N ; матрицы двоично-взвешенных резисторов; источника опорного напряжения $U_{оп}$; выходного операционного усилителя, с помощью которого суммируются токи, протекающие через двоично-взвешенные сопротивления (для получения аналогового выходного сигнала $U_{вых}$, пропорционального цифровому коду).

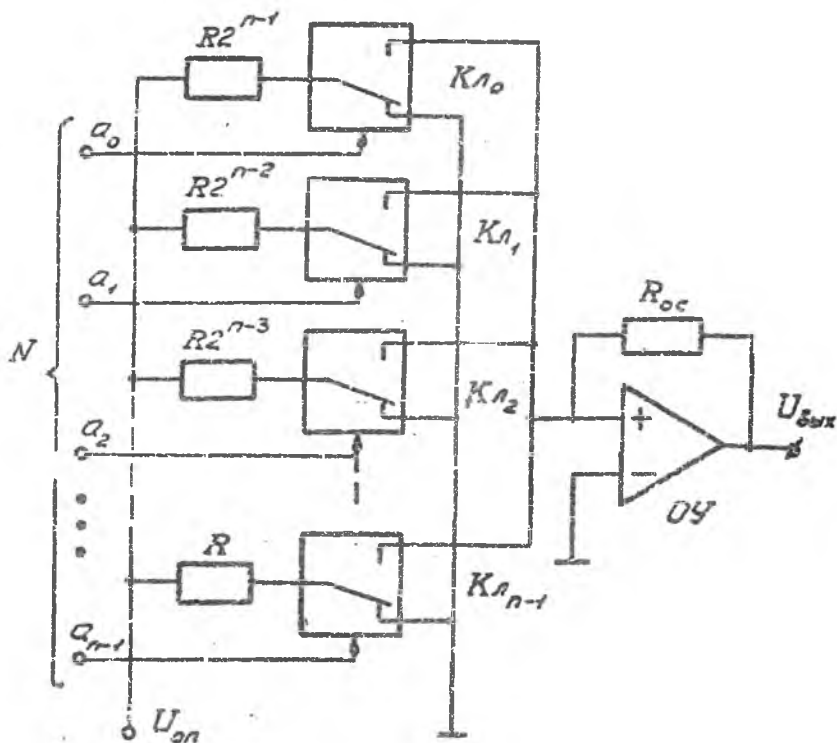
Пусть на входе в ЦАП задан двоичный код

$$N = a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12^1 + a_02^0 = \sum_{i=0}^{i=n-1} a_i 2^i,$$

где a_i — коэффициенты, принимающие значение 1 или 0. Каждый i -й разряд кода управляется ключом $K_{i,i}$, который подключается к источнику опорного напряжения $U_{оп}$, когда $a_i=1$, или к общей шине, когда $a_i=0$. Сопротивление резистора в старшем разряде имеет значение R , сопротивление следующего (более низшего разряда) $2R$ и т.д. до сопротивления в младшем разряде, значение которого $2^{n-1}R$. Выходное напряжение ЦАП определяется зависимостью

$$U_{вых} = - \frac{U_{оп} R_{ос}}{2^{n-1} R} \sum_{i=0}^{i=n-1} a_i 2^i.$$

Сопротивления в младшем и старшем разрядах отличаются в 2^{n-1} раз и должны быть реализованы с высокой точностью. Например, для 12-разрядного ЦАП использование в старшем разряде сопротивления 10 кОм требует включения в младший разряд преобразователя сопротивления 20 МОм . Это создает определенные трудности при реализации ЦАП посредством интегральной технологии. Поэтому ЦАП такого принципа действия выполняются низкоразрядными.



Р и с.1. Принципиальная схема цифроаналогового преобразователя с двоично-взвешенными сопротивлениями

Для обеспечения более высокой точности цифроаналогового преобразования применяются ЦАП с двумя номиналами сопротивлений, отличающихся в два раза в каждом разряде. Более подробно эта схема ЦАП

рассматривается в лекционном курсе. В лабораторной работе исследуется четырехразрядный ЦАП, построенный на принципе использования матрицы с двоично-взвешенными сопротивлениями.

2. АНАЛОГОВО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

АЦП являются устройствами, преобразующими непрерывные сигналы в цифровые, пригодные для работы с АЛУ ЭВМ:

$$N_{ti} = x(t_i) / \Delta x \pm \delta N_{ti}$$

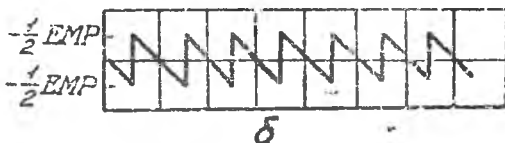
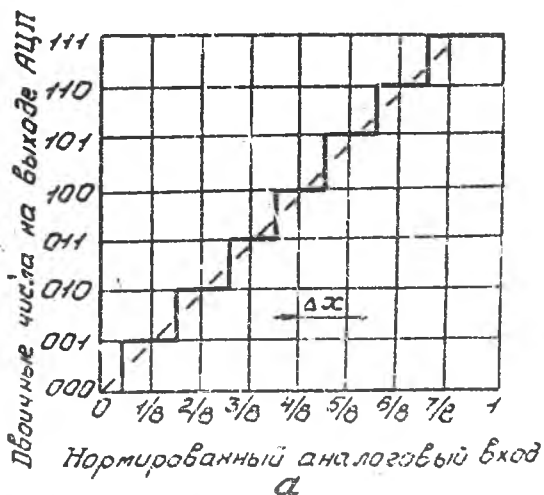
где δN_{ti} — погрешность преобразования на данном шаге.

Основными параметрами АЦП, так же как и ЦАП, являются диапазон изменения входных и выходных величин, быстродействие и статическая погрешность.

Инструментальная погрешность приводит к тому, что характеристика квантования реального АЦП отличается от идеальной, представленной на рис.2. Если соединить середины ступеней идеальной ломаной линии характеристики квантования АЦП, то получится прямая с единичным наклоном, выходящая из начала координат (штриховая линия). В реальных АЦП эта прямая не проходит через нуль (погрешность смещения нуля или нижнего уровня сигнала) и ее наклон может отличаться от единичного (погрешность коэффициента передачи). Кроме того, может иметь место отклонение усредненной характеристики квантования от идеальной прямой (погрешность нелинейности). Рассмотренная статическая характеристика определяет работу преобразователя при постоянных или квазипостоянных сигналах. При преобразовании сигналов, изменяющихся во времени, возникает динамическая погрешность, которая зависит от периода (частоты) квантования, времени преобразования и динамической (апертурной) погрешности, возникающей из-за несоответствия преобразованного выходного цифрового сигнала входному аналоговому сигналу. Для снижения апертурной погрешности АЦП обычно используют устройства захвата и хранения (УВХ), которые фиксируют мгновенные значения изменяющегося во времени входного сигнала $U_{вх}(t)$ на время, необходимое для последующего преобразования в АЦП.

АЦП по принципу действия основаны в большинстве случаев на использовании элементов ЦАП и сравнении входного сигнала АЦП с сигналом

на его выходе, пропущенным через ЦАП. Если сравниваемые сигналы равны, то преобразование закончено и на выходе АЦП сформирован кодовый сигнал, соответствующий аналоговому сигналу на его входе.

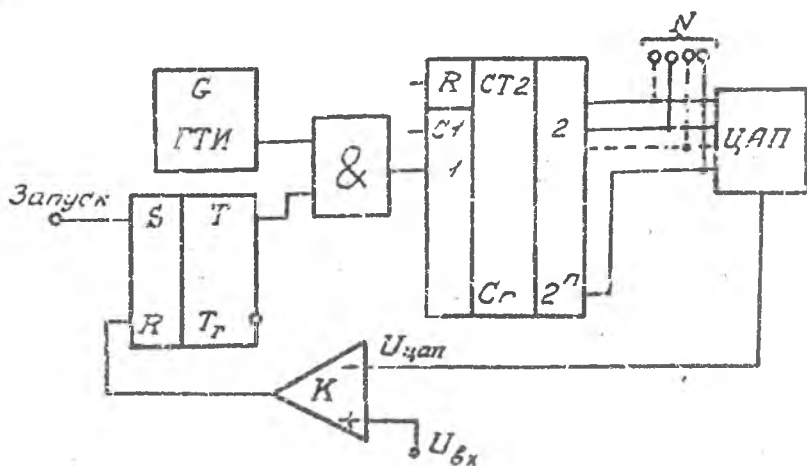


Р и с.2. Характеристика квантования (а) и ошибка квантования (б) идеального трехразрядного АЦП

Все АЦП можно подразделить на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные. К последовательным АЦП относятся: а) с единственным приближением, основанном на уравнивании входного аналогового значения суммой минимальных (для данного преобразователя) по весу эталонов (квантов); б) с двоично-взвешенным приближением, в которых уравнивание входного сигнала осуществляется суммой N - эталонов (N - число разрядов последовательных АЦП), введенных по двоичному закону. Существуют и другие типы последовательных АЦП, например, основанных на преобразовании напряжения в частоту интегрирования входного сигнала за фиксированный интервал времени.

Параллельные АЦП основаны на использовании $(2^n - 1)$ эталонов с весами в один квант. Сравнение входного аналогового сигнала с каждым эталоном производится одновременно с помощью $2^n - 1$ схем сравнения (компараторов).

Рассмотрим подробно одну из схем АЦП (рис.3). Импульс запуска подключает счетчик Cr к выходу генератора тактовых импульсов ГТИ. Так как счетчик соединен поразрядно с ЦАП, то напряжение на выходе последнего увеличивается по ступенчатому закону. Процесс преобразования заканчивается, когда напряжение на выходе ЦАП сравняется с входным напряжением $U_{вх}$. При этом компаратор прекращает поступление импульсов на счетчик и осуществляет считывание с него выходного кода, пропорционального входному напряжению.



Р и с.3. Принципиальная схема последовательного АЦП с единичным приближением

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦАП И АЦП

3.1. Схемы лабораторных установок

Лабораторная установка для изучения ЦАП (рис.4) выполнена на базе матрицы резисторов, позволяющей преобразовать четырехразряд-

ный кодový сигнал в напряжение. Входной код устанавливается при помощи переключателей К1...К4, причем К1 соответствует младшему разряду, а К4 - старшему. Каждый разряд при включенном ключе ("1") вносит в выходной сигнал свою долю, пропорциональную весу разряда. Если ключ К1 установлен в положение "1", а остальные ключи соответствуют "0", то на выходе устанавливается напряжение

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{16} U_{\text{оп}}$$

если все ключи включены на "1", то

$$U_{\text{вых}} = \frac{15}{16} U_{\text{оп}}$$

Остальные сочетания разрядов и соответствующие им коэффициенты указаны в таблице. Коэффициенты преобразований

могут быть получены на основе закона Ома для замкнутой электрической цепи (для одного из сочетаний разрядов прощелать самостоятельно). На выходе из реальной ЦАП устанавливается операционный усилитель, который формирует выходной сигнал. Если периодически изменять положения входных ключей в соответствии с изменяющимся во времени кодовым сигналом, то на выходе будет наблюдаться ступенчатая во времени функция. Такое преобразование называют экстраполированием нулевого порядка. Может быть экстраполирование более высокого порядка, которое учитывает предысторию процесса в каждом такте, и кривая выходного сигнала представляет собой плавную кривую.

Лабораторная установка для изучения АЦП (рис.5) включает в себя: генератор тактовых импульсов ГТИ; компаратор Д1; логический элемент Д2, построенный по схеме "И"; счетчик ДЗ и ЦАП. На вход в компаратор подаются два сигнала: преобразуемый аналоговый и с выхода ЦАП. До момента сравнения сигнал на выходе ЦАП меньше входного. Поэтому на выходе компаратора поддерживается уровень логической единицы и генератор тактовых импульсов через схему совпадения заполняет разряды счетчика. При этом ЦАП, контролируя возрастающий выходной код счетчика, выдает на своем выходе нарастающее напряжение (ток), пропор-

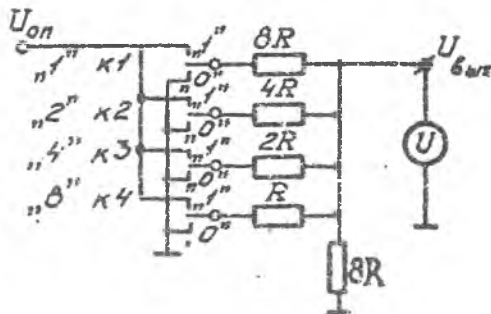


Рис.4 Принципиальная схема цифроаналогового преобразователя

циональное коду. При достижении уровня этого сигнала, равного входному напряжению, компаратор переключается в логический "0" и схема "И" блокирует прохождение тактовых импульсов на счетчик. Счет

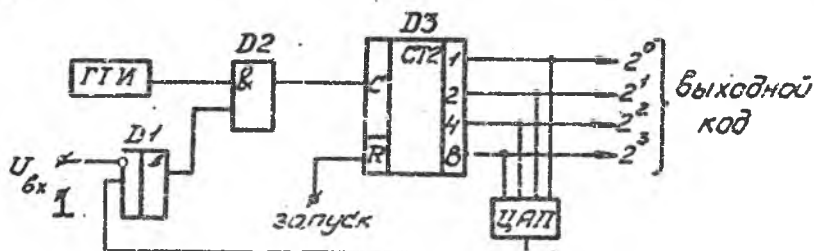


Рис. 5. Принципиальная схема аналого-цифрового преобразователя.

останавливается и на выходе счетчика фиксируется код, эквивалентный входному напряжению. Для повторного измерения необходимо подать на вход импульс "Запуск", который сбросит счетчик, и процесс повторится.

Таблица коэффициентов передачи четырех-разрядного ЦАП

K4	K3	K2	K1	$U_{вых}/U_{оп}$
I	I	I	I	15/16
I	I	I	0	14/16
I	I	0	I	13/16
I	I	0	0	12/16
I	0	I	I	11/16
I	0	I	0	10/16
I	0	0	I	9/16
I	0	0	0	8/16
0	I	I	I	7/16
0	I	I	0	6/16
0	I	0	I	5/16
0	I	0	0	4/16
0	0	I	I	3/16
0	0	I	0	2/16
0	0	0	I	1/16
0	0	0	0	0

3.2. Определение статической погрешности преобразователей

Для исследования характеристики ЦАП необходимо подать на вход опорное напряжение, например 5 В. Изменяя положение ключей К1...К4 последовательно для всех возможных комбинаций, определяют при помощи вольтметра выходное напряжение, пропорциональное входному коду. Показания заносят в таблицу и строят график статической характеристики ЦАП. Определяют разрешающую способность ЦАП:

$$h = (U_{max} - U_{min}) / (b - 1),$$

где U_{min}, U_{max} - значения напряжения в начальной и конечной точках характеристики преобразователя; $b = 2^n$ - число возможных значений кода.

Степень квантования может служить единицей измерения выходной аналоговой величины и его называют единицей младшего разряда (ЕМР).

Погрешность преобразования δ_n определяется нелинейностью характеристики ЦАП, которая выражается в долях ЕМР или в процентах относительно $U_n = U_{max} - U_{min}$:

$$\delta_n = \Delta U / h, \quad (\text{ЕМР}), \quad \text{или} \quad \delta_n = (\Delta U / U_n) \cdot 100\%,$$

где ΔU - максимальное отклонение характеристики преобразователя от прямой.

Для исследования характеристик АЦП на вход в преобразователь подается напряжение в интервале $0 < U < U_{max}$. Изменяя входное напряжение и нажимая каждый раз кнопку "Запуск", наблюдает на светодиодном индикаторе цифровой код, соответствующий величине входного напряжения. Значения входного напряжения и кодов заносят в таблицу и строят график (см. рис. 2).

Определяют шаг квантования сигнала по уровню и наибольшую статическую погрешность, аналогично погрешности ЦАП.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПОЛУЧЕННЫХ ЗНАНИЙ

- 1) Преобразовать число 21 в десятичном исчислении в число двоичного исчисления.
- 2) Преобразовать целое число 1101011 двоичного исчисления в число десятичного исчисления.

- 3) Назначение, основные типы и характеристики ЦАП.
- 4) Назначение, основные типы и характеристики АЦП.
- 5) Принципиальная схема и действие ЦАП.
- 6) Принципиальная схема и действие АЦП.
- 7) Погрешности ЦАП и АЦП, определяемые во их статическим характеристикам.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электронные промышленные устройства: Учеб. для студ. вузов спец. пром. электроника/ В.И.Васильев, Д.М.Гусев, В.Н.Миронов и др. М: Высш.шк., 1988. 303 с.

2. Федорюк Б.Т., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП. Функционирование, параметры, применение. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

3. Гнатек В.Р. Справочник по цифроаналоговым и аналогово-цифровым преобразователям / Пер. с англ. Под ред. Д.А.Рычина. М: Радио и связь, 1982. 552 с.

4. Бесекерский Б.А. Цифровые автоматические системы. М: Наука, 1976. 576 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЦАП И АЦП**

Автор-составитель Г и м а д н е в Асгат Гатылтолыч

Редактор И.Я.Чегощев

Тех.редактор Г.А.Усачева

Корректор Н.С.Куприянова

Подписано в печать 17 02 95. формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 0,7. Усл.кр.-отт. 0,6. Уч.-изд.л. 0,6.

Тираж 100 экз. Заказ 79. Арт. С-2Imp/94.

**Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П.Королева
443086 Самара, Московское шоссе, 34.**

**ИПО Самарского государственного аэрокосмического
университета имени академика С.П.Королева.
443001 Самара, Ульяновская, 18.**