

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РСФСР  
НОВОСИБИРСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Ленинского комсомола**

**Кафедра радиофизики**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**Технические Средства Автоматизации Научных Исследований**

**Лабораторная работа № 8**

**Применение цифро - аналоговых преобразователей (ЦАП)**

**Новосибирск  
1985**

Описание лабораторной работы включает технические характеристики оборудования и методические указания для практического изучения приборов, предназначенных для цифро - аналогового преобразования. На примере исследования характеристик полевого транзистора изучаются методы работы с цифро - аналоговыми преобразователями.

Составители: Батраков А.М., Голубенко В.И., Козак В.Р.,  
Кузин Г.И., Левичев В.Б., Нифонтов В.И.,  
Орешков А.Д., Пискунов Г.С., Ренков В.В.,  
Селиванов А.И., Тарарышкин С.В., Уваров Н.П.,  
Эйдельман В.И.

Печатается по решению кафедры радиотехники

Цель работы - знакомство с аппаратурой, предназначенной для преобразования цифровых величин в аналоговые, в практической работе с ней при изучении характеристик реальных устройств.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Внедрение цифровой вычислительной техники в микропроцессоры в автоматические системы выдвигает на первый план проблему их связи с объектами, параметры которых в большинстве случаев характеризуются величинами, являющимися непрерывными функциями времени. Для обеспечения вывода из процессора результатов обработки информации на управляемый объект необходимо преобразовать цифровые сигналы в непрерывные выходные сигналы, пригодные для работы с аналоговыми устройствами автоматических систем управления - это осуществляется при помощи цифро-аналоговых преобразователей.

## 2. ЦАП. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Принцип работы ЦАП состоит в суммировании аналоговых величин, пропорциональных весам разрядов каждого цифрового кода, который может быть двоичным, двоично-десятичным и т.д. В зависимости от того, преобразуется цифровой код непосредственно в аналоговую величину (ток, напряжение, перемещение и т.д.) или в промежуточный сигнал с последующим преобразованием в выходную аналоговую величину, различают ЦАП с прямым и промежуточным преобразованием.

В большинстве случаев преобразование сводится к преобразованию цифрового кода в напряжение, поэтому в данной работе будут рассматриваться ЦАП с выходным сигналом в виде постоянного напряжения.

Процесс получения аналогового сигнала характеризуется основными параметрами ЦАП: быстродействием, динамическим диапазоном, линейностью, погрешностью.

Погрешность, обусловленная квантованием сигнала, равна:

$$\delta = A - N \cdot Q,$$

где  $A$  - точное значение аналогового сигнала,

$N$  - цифровой эквивалент,

$Q$  - дискретность преобразования,

$N \cdot Q$  - уровень квантования, ближайший к преобразуемой величине.

Инструментальная погрешность — аппаратная погрешность, состоящая из погрешности настройки, временной и температурной погрешностей и погрешности, обусловленной воздействием внешних и внутренних помех на отдельные элементы. Часто погрешность ЦАП выражают в единицах младшего разряда (ЕМР).

Инструментальная погрешность проявляется в виде:

1. Сдвиг нуля, характеризующего параллельный сдвиг передаточной характеристики реального ЦАП. Наличие такой погрешности приводит к одинаковой ошибке во всем диапазоне выходных напряжений.

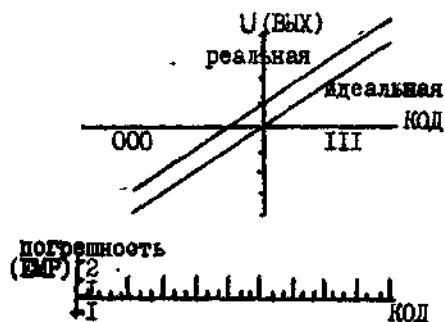


Рис. 1

2. Искажения передаточной характеристики за счет изменения коэффициента усиления и дрейфа источника опорного напряжения, из-за чего характеристика поворачивается вокруг нуля аналогового напряжения.

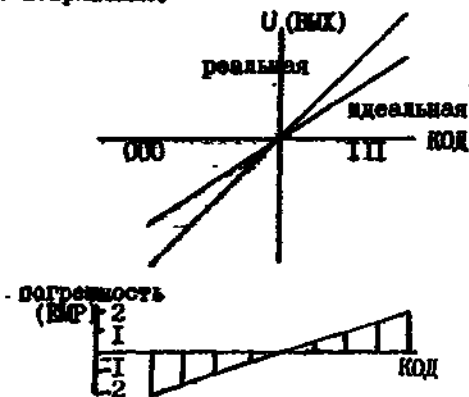


Рис. 2

3. Отклонения передаточной характеристики ЦАП от прямой (нелинейность). Особым случаем нелинейности является немонотонность передаточной характеристики. Монотонность характеризуется изменением в одном направлении выходного сигнала ЦАП при изменении в одном направлении входного кода во всем рабочем диапазоне. В случае немонотонности передаточной характеристики одному и тому же значению аналоговой величины соответствуют различные коды. Немонотонность часто встречается у ЦАП с резистивными сетками.

Время установления  $T$  — интервал времени между моментом поступления входного цифрового кода и моментом установления с заданной точностью выходного сигнала. Время установления тем больше, чем выше требуемая точность. При этом  $T$  зависит от разности последовательных кодов, задаваемых в ЦАП, а также от частотных свойств операционных усилителей и фильтров на выходе ЦАП.

Динамический диапазон  $D$  — определяется отношением максимального значения входной или выходной величины к минимальному:

$$D = A(\text{MAX}) / A(\text{MIN}) = N(\text{MAX}) / N(\text{MIN})$$

В случае линейного преобразования входная и выходная величины имеют одинаковый динамический диапазон. Динамический диапазон выражают либо в количестве разрядов цифрового кода, либо в децибеллах.

В различных системах к ЦАП предъявляются различные требования по точности и быстродействию. ЦАП со средними параметрами имеет погрешность 1–0,1%, динамический диапазон 10–12 разрядов и время установления 1–10 мкс. Быстродействующие ЦАП имеют время установления 30–500 нсек, при динамическом диапазоне до 10 разрядов. Точные ЦАП имеют погрешность 0,01% и менее, время установления до нескольких сотен микросекунд. Прецизионные ЦАП выполняют по схемам с промежуточным преобразованием.

### 3. ЦАП С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

На рис.3 изображена схема ЦАП с весовыми резисторами. Двоич-

ное число  $N$ , имеющее  $M$  цифр  $A(0), A(1), \dots, A(M-1)$ , загружается в  $M$ -разрядный регистр. Это число может быть представлено в виде:

$$N = A(0) \cdot 2^0 + A(1) \cdot 2^1 + \dots + A(M-1) \cdot 2^{M-1},$$

где  $A(K)$  равно 0 или 1.

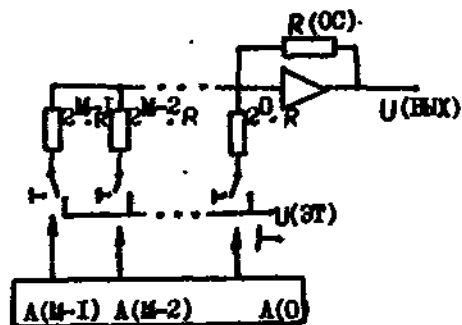


Рис.3

Каждый разряд регистра соединен через электронный ключ с резистивной схемой. Сопротивление резисторов выбрано так, чтобы они составляли ряд значений  $2^0 \cdot R, 2^1 \cdot R, \dots, 2^{M-1} \cdot R$ . Каждый резистор подключен одной стороной к точке суммирования операционного усилителя, а другой - через электронный ключ - к источнику эталонного напряжения  $U(ЭТ)$ , если данный разряд  $A(K)=1$ . Если  $A(K)=0$ , то резистор подключен к шине 0 Вольт. Каждый бит ЦАП, находящийся в единичном состоянии, управляет источником тока;

$$I(K) = U(ЭТ) / (2^K \cdot R), \text{ где } K=0, 1, \dots, M-1.$$

Выходной ток резисторной схемы равен току через резистор обратной связи  $R(OC)$ :

$$I(OC) = \sum_{K=0}^{M-1} A(K) \cdot U(ЭТ) / (2^K \cdot R), \text{ следовательно, вы-}$$

ходное напряжение операционного усилителя равно

$$U(ВЫХ) = I(OC) \cdot R(OC)$$

и пропорционально числу  $N$ , поданному на вход ЦАП.

Недостатком ЦАП с весовыми резисторами является широкий

диапазон номиналов резисторов. Возможен вариант построения ЦАП с резисторной сеткой  $R-2R$ , где требуются резисторы только двух номиналов  $R$  и  $2R$ .

Источником погрешности в таких схемах ЦАП является точность изготовления и подгонки резисторов, ненулевое сопротивление ключей в замкнутом состоянии, остаточные напряжения ключей.

#### 4. ЦАП С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

ЦАП этого типа имеет большее время установления выходного сигнала. Промежуточной аналоговой величиной может быть duty-цикл (ЦАП на основе широтно-импульсной модуляции - ЦАП - ШИМ) или частота следования импульсов (ЦАП с число-импульсным преобразованием - ЦАП - ЧИМ). Поскольку в настоящее время ЦАП - ШИМ встречаются чаще, чем ЦАП - ЧИМ, мы ограничимся рассмотрением только ЦАП - ШИМ.

##### 4.1. ЦАП НА ОСНОВЕ ШИРотно-ИМПУльСНОЙ МОДУляЦИИ

Схема ЦАП - ШИМ приведена на рис.4. Входной код по сигналу "ЗАПИСЬ" записывается в регистре  $RT$ . Счетчик  $CT$  подсчитывает импульсы тактовой частоты  $F$ . Коды  $RT$  и  $CT$  сравниваются схемой сравнения. При переполнении старший разряд счетчика  $CT$  переходит из состояния 1 в 0, и на выходе одновибратора  $C$  появляется импульс, который при неравенстве кодов  $RT$  и  $CT$  устанавливает триггер  $T$  в состояние 0. Ключ  $K2$  замыкается, и на вход фильтра низких частот (ФНЧ) подключается эталонное напряжение  $U(ЭТ)$ . Это состояние поддерживается до тех пор, пока коды не сравняются. В момент сравнения кодов низкий потенциал на выходе схемы сравнения переключает триггер  $T$  в состояние 1, размыкая  $K2$  (отключая  $U(ЭТ)$  от ФНЧ) и замыкая ключ  $K1$ .

В дальнейшем процесс протекает аналогично описанному, и на вход ФНЧ поступают импульсы эталонного напряжения, длительность которых определяется входным кодом, а частота равна  $F/2^M$ . Постоянная составляющая напряжения, выделяемая ФНЧ из последовательности импульсов, пропорциональна входному коду.

Схема ЦАП - ШИМ содержит минимальное количество аналоговых узлов. Погрешности ключей К1 и К2 не влияют на общую погрешность преобразования, но влияют их относительный дрейф. На погрешность ЦАП не влияет медленное изменение тактовой частоты.

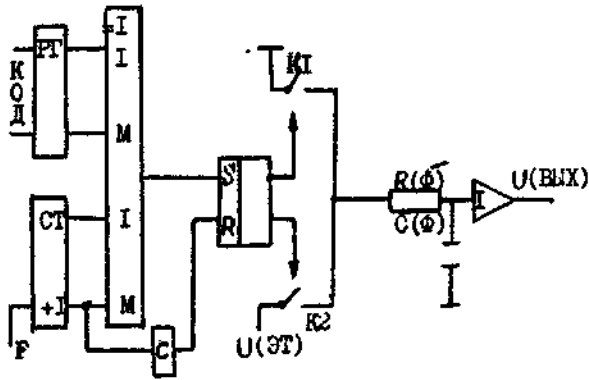


Рис.4

В ЦАП - ШИМ имеется погрешность от пульсаций выходного напряжения на выходе ФНЧ. Максимальная амплитуда этих пульсаций будет при скважности равной 2. Можно показать  $|I|$ , что погрешность от пульсаций, приведенная к  $U(ЭТ)$ , равна:

$$2^M/8 \cdot R(\Phi) \cdot C(\Phi) \cdot F,$$

где  $M$  - разрядность ЦАП;  
 $R(\Phi) \cdot C(\Phi)$  - постоянная времени фильтра;  
 $F$  - тактовая частота.

Погрешности от пульсаций можно уменьшать, увеличивая постоянную времени фильтра или уменьшая период преобразования, но в первом случае увеличивается время установления, а во втором повышаются требования к ключам по быстродействию.

В реальных конструкциях ЦАП с промежуточным преобразованием часто выполняют в виде двух блоков. Цифровой блок располагается около цифровой системы, а аналоговый - непосредственно около управляемого объекта.

## 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Ознакомьтесь с описанием блоков:

ПК8 - 8 - преобразователь кода в скважность;

ЦАП 2-8 - двухканальный ЦАП;

АЦП I2-256 - аналого-цифровой преобразователь.

- Измерьте время установления ЦАП - ШИМ при задании нулевого выходного напряжения, выведите на ЦДР график зависимости выходного напряжения ЦАП - ШИМ от времени.
- Применяя ЦАП 2-8, определите зависимость тока канала от напряжения затвор - исток для полевого транзистора типа КТ 307, при напряжении стока равном 5 Вольт. Выведите на ЦДР график этой зависимости. Определите напряжение отсечки для полевого транзистора. Схема измерений приведена на рис.5.
- Изменяя выходное напряжение первого канала ЦАП 2-8 от 0 до 5,12В, с помощью АЦП I2-256 измерьте реальное выходное напряжение. Разность между заданным и измеренным напряжением выведите на ЦДР в виде графика. Для согласования выходного напряжения ЦАП с входным напряжением АЦП использовать выход 1:3.

### ОПИСАНИЕ БЛОКОВ; ПРИМЕНЯЕМЫХ В РАБОТЕ

#### ЦАП - ШИМ

В данном исполнении ЦАП - ШИМ состоит из двух блоков: преобразователя кода в скважность (ПК8 - 8) и фильтра нижних частот (ФНЧ). ПК8 - 8 (ГО603) является полностью цифровым блоком и имеет 8 независимых преобразователей код - скважность. По команде  $F(I6)$  в любой из каналов ПК8 - 8 можно записать код. В соответствии с этим кодом на выходе данного канала ПК8 будет получен ШИМ-сигнал, который поступает на вход ФНЧ. ФНЧ преобразует ШИМ-сигнал в постоянное напряжение, однозначно соответствующее входному коду.

#### КАМАК функции ПК8 - 8:

$F(I6) A(K)$  - запись кода в канал "K"=0,1,...7

код #00000 соответствует напряжению -10 В,

код #07777 соответствует напряжению - 0 В,

код #10000 соответствует напряжению +0 В,

код #177777 соответствует напряжению +10 В.

F(17) A(K) - подготовка канала "К" к измерению,

F(0) .A(K) - чтение обратного кода.

Примечания:

1. В данной работе команды F(17) и F(0) можно не применять.
2. МЕЖДУ КОМАНДАМИ F(16) И F(17), F(17) И F(0) НЕОБХОДИМА ПАУЗА НЕ МЕНШЕ 10 мс (КОНСТРУКТИВНАЯ ОСОБЕННОСТЬ).

Параметры ЦАП - МИМ:

погрешность	- НЕ БОЛЕЕ 0,01%.
динамический диапазон	- 16 дБ. разрядов.
выходное напряжение	- ± 10 В,
время установления	- ИЗМЕРИТЬ.

#### ЦАП 2-8 (16L.005)

Двухканальный ЦАП с прямым преобразованием выполнен по схеме с суммированием токов.

Разрядность - 8 дБ. разрядов.

Погрешность - 0,4%.

Выходное напряжение:

на выходе ЦАП - 1	0 - -5,12 В (есть выход I:3.000)
на выходе ЦАП - 2	0 - +5,12 В

Дискретность - 20 мВ.

Время установления - 10 мкс.

КАМАК ФУНКЦИИ:

F(16) A(0) - запись кода ЦАП - 1,

F(16) A(1) - запись кода ЦАП - 2,

F(25) A(0) - +I в счетчик ЦАП - 1,

F(25) A(1) - +I в счетчик ЦАП - 2.

Код 0 соответствует напряжению 0 Вольт на выходе ЦАП.

Для работы ЦАП 2-8 необходимо выключить линию "I" крестя.

#### АЦП I2-256 (10603)

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП I2-256) является АЦП поразрядного уравнивания с дифференциальным входом. Интерфейс прибора имеет ЗУ емкости 256 слов. Работа с АЦП организована так, что измерительную часть можно запустить на любое число измерений от 1 до 256 и данные уложить в ячей-

ки ЗУ, определяемые командой F(16).

КАМАК ФУНКЦИИ:

F(0) A(0) - чтение данных, после чтения происходит инкрементирование адресного счетчика ЗУ, гасится LAM запрос и после подготовки очередного слова данных выдается сигнал L (время готовности 3-4 мкс). Сигнал Q=L. Прочитанное слово содержит в I2 разряде знак ("0" соответствует положительному сигналу на входе) в результате преобразования в прямом коде.

F(10) A(0) - сброс L.

F(16) A(0) - запись управляющего слова:

W8 - W1 начальный адрес ЗУ (NN),

W16 - W9 конечный адрес ЗУ (NK).

В режиме, когда АЦП будет измерять входной сигнал, в управляющем слове "NN" указывает адрес ЗУ, начиная с которого в ЗУ будет умножен код результата преобразования входного сигнала.

Число измерений, которое выполнит АЦП, равно NK - NN + 1. В режиме, когда из АЦП будет считываться информация, "NN" указывает начальный адрес ЗУ, по которому надо прочитать результат преобразования. При попытке прочитать по адресу больше чем "NK" сигнал Q будет равен 0.

F(17) A(0) - запись режима запуска ("I" - запуск по F(25), 0 - внешний).

F(24) A(0) - блокировка L.

F(25) A(0) - запуск на заданное число измерений (NK - NN + 1), сброс L.

F(26) A(0) - снятие блокировки L.

LAM - запрос генерируется после окончания измерения и при готовности выдать информацию для чтения.

ПРИМЕЧАНИЕ: АЦП НЕ ИМЕЕТ КОМАНДЫ F(8) !!!

ПАРАМЕТРЫ:

погрешность	- не более 0,1%.
разрядность	- 11 дБ. разрядов + знак,
входное напряжение	- -2,048 В + +2,048 В,
дискретность	- 1 мВ,
время преобразования	- 1,25 мс/на одно измерение.

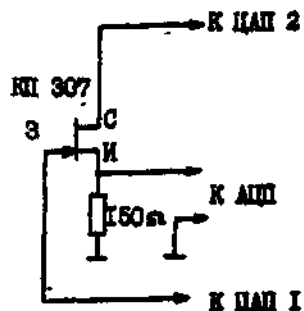


Рис.5

Последовательность действий при работе с АЦП I2-256 может быть следующей:

1. Декларировать модуль АЦП.
2. Снять блокировку LAM запроса.
3. Указать код запуска измерений.
4. Задать необходимое число измерений (I).
5. Запустить АЦП.
6. Организовать ожидание LAM запроса.
7. Задать начальный и конечный адреса ЗУ.
8. Выполнить необходимое число раз команду чтения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бакалав В.К., Крюк И.П., Дукьянов Л.М. Интегральные схемы. АЦП и ЦАП. - М: Энергия, 1978.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника /Под ред. Алексеевко А.Г. - М: Мир, 1982.

Лабораторный практикум

Технические Средства Автоматизации Научных Исследований

Лабораторная работа № 6

Применение цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП)

Составители: Баграков А.М., Годубенко В.М., Козак В.Р.,  
Кузин Г.Н., Желвачев Е.Б., Нифонтов В.М.,  
Орешков А.Д., Пискунов Г.С., Репков В.В.,  
Седыханов А.Н., Тарарышкин С.В., Уваров Н.Н.,  
Эйдецкий В.И.

Ответственный за выпуск Г.Н. Кузин

Подписано в печать 3.12.85

Бумага прочая. Офсетная печать.

Тираж 500 экз. Заказ №1595

Формат 60x84 1/16

Уч.-изд.л. 0.75

Бесплатно