

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
”Оренбургский государственный университет”

Индустринльно-педагогический колледж  
Отделение автоматизации информационных и технологических процессов

А.В. ЗОБИН

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА  
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»



Рекомендовано к изданию Редакционно–издательским советом  
государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
”Оренбургский государственный университет”

Оренбург 2009

УДК 62-52 (07)

ББК 32.965я7

З-78

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры ТММСК ГОУ ОГУ

Н.Ю. Глинская

**Зобин, А.В.**  
3-78 **Исследование цифро-аналогового преобразователя: методические указания к лабораторной работе по дисциплине “Типовые элементы и устройства систем автоматического управления” / А.В.Зобин. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. - 13с.**

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по дисциплине “Типовые элементы и устройства систем автоматического управления“ для студентов специальности 220301 - «Автоматизация технологических процессов и производств».

ББК 32.965я7

© Зобин А.В., 2009

© ГОУ ОГУ, 2009

## Содержание

Введение .....	4
1 Общие положения .....	5
1.1 Основные параметры ЦАП.....	5
1.2 Принципы построения ЦАП .....	6
2 Исследование цифро-аналогового преобразователя .....	10
2.1 Цель работы .....	10
2.2 Порядок выполнения лабораторной работы .....	10
2.3 Содержание отчета .....	10
Список использованных источников .....	13

## Введение

Цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) называется электронное устройство, предназначенное для преобразования цифровой информации в аналоговую. Они используются для формирования сигнала в виде напряжения или тока, функционально связанного с управляющим кодом. В большинстве случаев эта функциональная зависимость является линейной. Наиболее часто ЦАП используются для сопряжения устройств цифровой обработки сигналов с системами, работающими с аналоговыми сигналами. Кроме этого, ЦАП используются в качестве узлов обратной связи в аналого-цифровых преобразователях и в устройствах сравнения цифровых величин с аналоговыми.

Области применения ЦАП достаточно широки. Они применяются в системах; передачи данных, в измерительных приборах и испытательных установках, в синтезаторах напряжения и генераторах сложных функций, для формирования изображений на экране дисплеев и др. В связи с этим разработано и выпускается большое количество интегральных микросхем ЦАП.

Схемы ЦАП можно классифицировать по различным признакам: принципу действия, виду выходного сигнала, полярности выходного сигнала, элементной базе и др. По принципу действия наибольшее распространение получили ЦАП следующих видов: со сложением токов, с делением напряжения и со сложением напряжений. В микроэлектронном исполнении применяются только первые два типа.

По виду выходного сигнала ЦАП делят на два вида: с токовым выходом и с выходом по напряжению. Для преобразования выходного тока ЦАП в напряжение обычно используются операционные усилители. По полярности выходного сигнала ЦАП принято делить на однополярные и двухполярные.

Управляющий код, подаваемый на вход ЦАП, может быть различным: двоичным, двоично-десятичным, Грея, унитарным и др. Кроме того, различными могут быть и уровни логических сигналов на входе ЦАП.

При формировании выходного напряжения ЦАП под действием управляющего кода обычно используются источники опорного напряжения. В зависимости от вида источника опорного напряжения ЦАП делят на две группы: с постоянным опорным напряжением и с изменяющимся опорным напряжением. Кроме этого, ЦАП делят по основным характеристикам: количеству разрядов, быстродействию, точности преобразования, потребляемой мощности.

# 1 Общие положения

## 1.1 Основные параметры ЦАП

Все параметры ЦАП можно разделить на две группы: статические и динамические. К статическим параметрам ЦАП относят: разрешающую способность, погрешность преобразования, диапазон значений выходного сигнала, характеристики управляющего кода, смещение нулевого уровня и некоторые другие.

К динамическим показателям ЦАП принято относить: время установления выходного сигнала, предельную частоту преобразования, динамическую погрешность.

*Разрешающая способность ЦАП* определяется как величина, обратная максимальному количеству градаций выходного сигнала. Так, например, если разрешающая способность ЦАП составляет  $10^{-5}$ , то это означает, что максимальное число градаций выходного сигнала равно  $10^5$ . Иногда разрешающую способность ЦАП оценивают выходным напряжением при изменении входного кода на единицу младшего разряда, т. е. шагом квантования. Очевидно, что чем больше разрядность ЦАП, тем выше его разрешающая способность.

Погрешность преобразования ЦАП принято делить на дифференциальную и погрешность нелинейности. С ростом кода на входе ЦАП растет и выходное напряжение, однако при увеличении напряжения могут быть отклонения от линейной зависимости. *Погрешностью нелинейности* называют максимальное отклонение выходного напряжения от идеальной прямой во всем диапазоне преобразования.

*Дифференциальной погрешностью* называют максимальное отклонение от линейности для двух смежных значений входного кода.

*Напряжение смещения нуля* определяется выходным напряжением при входном коде, соответствующем нулевому значению.

*Время установления  $t_{уст}$*  — это интервал времени от подачи входного кода до вхождения выходного сигнала в заданные пределы, определяемые погрешностью.

*Максимальная частота преобразования* - наибольшая частота дискретизации, при которой все параметры ЦАП соответствуют заданным значениям.

По совокупности параметров ЦАП принято делить на три группы: общего применения, прецизионные и быстродействующие. *Быстродействующие* ЦАП имеют время установления меньше 100 нс. К *прецизионным* относят ЦАП, имеющие погрешность нелинейности менее 0,1%.

## 1.2 Принципы построения ЦАП

Существует несколько схем, являющихся базой для построения многих разновидностей ЦАП соответствующего класса. Для формирования соответствующих уровней выходного напряжения (или тока) к выходу ЦАП подключается необходимое количество опорных сигналов  $E_1, E_2...E_n$  (или токов  $I_1, I_2...I_n$ ), либо устанавливают соответствующее дискретное значение коэффициента деления  $K_1, K_2...K_n$ .

На рисунке 1 приведена схема ЦАП с суммированием токов.

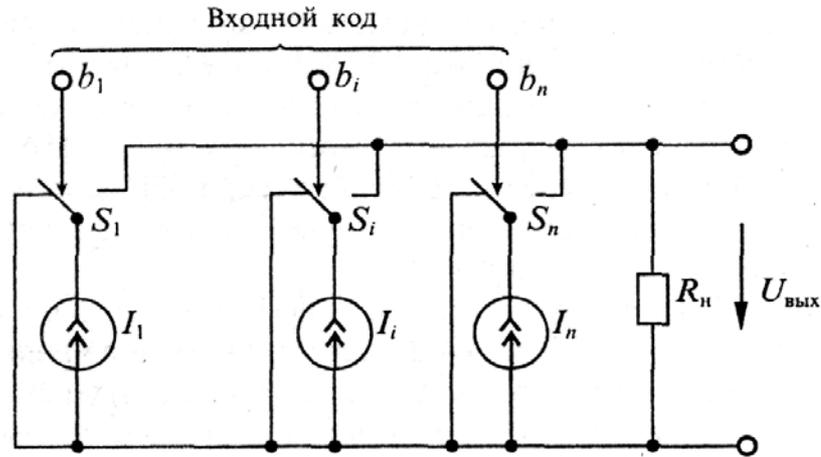


Рисунок 1 - Упрощенная схема ЦАП с суммированием токов

В этой схеме используются  $n$  опорных источников тока  $I_1, I_2...I_n$ . Входной код  $b_1, b_2... b_n$  управляет ключами  $S_1, S_2...S_n$ , которые или подключают источники тока к нагрузке, или замыкают их накоротко. При этом если  $b_i = 0$ , то соответствующий источник закорочен и в работе схемы не участвует. Если же  $b_i = 1$ , то соответствующий источник тока подключен к нагрузке. Результирующий ток равен сумме токов опорных источников, для которых  $b_i = 1$ . Напряжение на выходе будет равно результирующему току  $I_{\Sigma}$ , умноженному на сопротивление  $R_n$ , т. е.

$$U_{\text{вых}} = I_{\Sigma} R_n. \quad (1)$$

Так, например, если входной код является двоичным, то результирующий ток определяется выражением:

$$I_{\Sigma} = I_0 (b_1 2^{n-1} + b_2 2^{n-2} + \dots + b_n 2^0) = I_0 N, \quad (2)$$

где  $n$  - число двоичных разрядов входного тока,  
 $N$  -  $n$  - разрядное цифровое слово.

Упрощенная схема ЦАП со сложением напряжений приведена на рисунке 2.

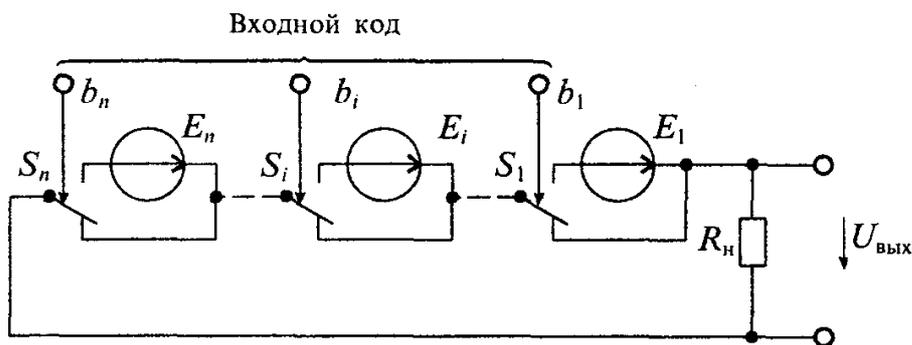


Рисунок 2 - Упрощенная схема ЦАП с суммированием напряжений

В этой схеме используется  $n$  опорных источников напряжения  $E_1, E_2 \dots E_n$ . Входной код управляет ключами  $S_1, S_2 \dots S_n$ , которые или подключают соответствующие источники опорного напряжения к нагрузке, или отключают их. Так же, как и для схемы с суммированием токов, при  $b_i = 1$  соответствующий источник напряжения включен, а при  $b_i = 0$  — выключен. Результирующее напряжение на выходе равно сумме напряжений включенных опорных источников.

Так, например, для входного двоичного кода выходное напряжение определяется по формуле

$$U_{\Sigma} = U_{\text{вых}} = U_0 (b_1 2^{n-1} + b_2 2^{n-2} + \dots + b_n 2^0) = U_0 N. \quad (3)$$

Упрощенная схема ЦАП с делением опорного напряжения  $E_0$  приведена на рисунке 3.

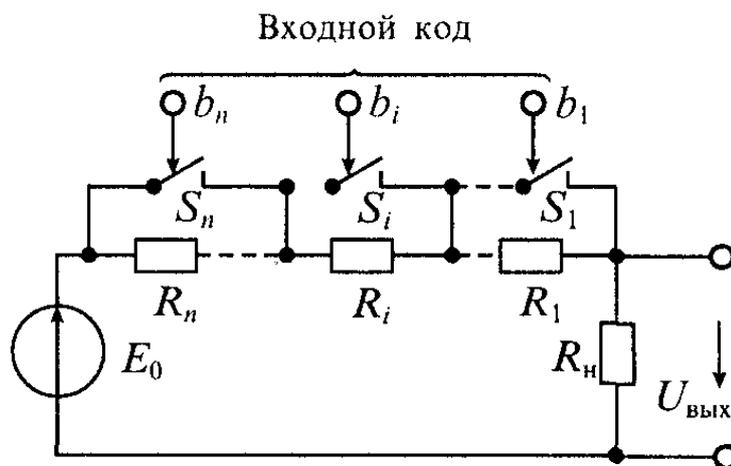


Рисунок 3 - Упрощенная схема ЦАП с делением напряжения

В этой схеме имеется один источник опорного напряжения и набор калиброванных сопротивлений  $R_1, R_2 \dots R_n$ , с помощью которых напряжение

опорного источника может быть разделено до значения, соответствующего входному коду.

Выходное напряжение для схемы, приведенной на рисунке 3, определяется формулой

$$U_{\text{вых}} = \frac{E_0 R_H}{R_{\Sigma} + R_H}, \quad (4)$$

где  $R_{\Sigma}$  — результирующее сопротивление устанавливаемое при помощи ключей  $S_1, S_2 \dots S_n$  которые управляются входным кодом.

При  $R_H = 0$  эта схема превращается в управляемый источник тока, т. е. работает так же, как схема со сложением токов. Практически выполнить  $R_H = 0$  можно при помощи операционного усилителя с параллельной обратной связью.

Практическая схема ЦАП со сложением токов обычно выполняется на различных резистивных матрицах и одном источнике опорного напряжения. На рисунке 4 приведена схема ЦАП с суммированием токов, в котором использован один источник опорного напряжения  $E_0$ , и резистивная матрица типа  $R-2R$ , изображенная на рисунке 4 б.

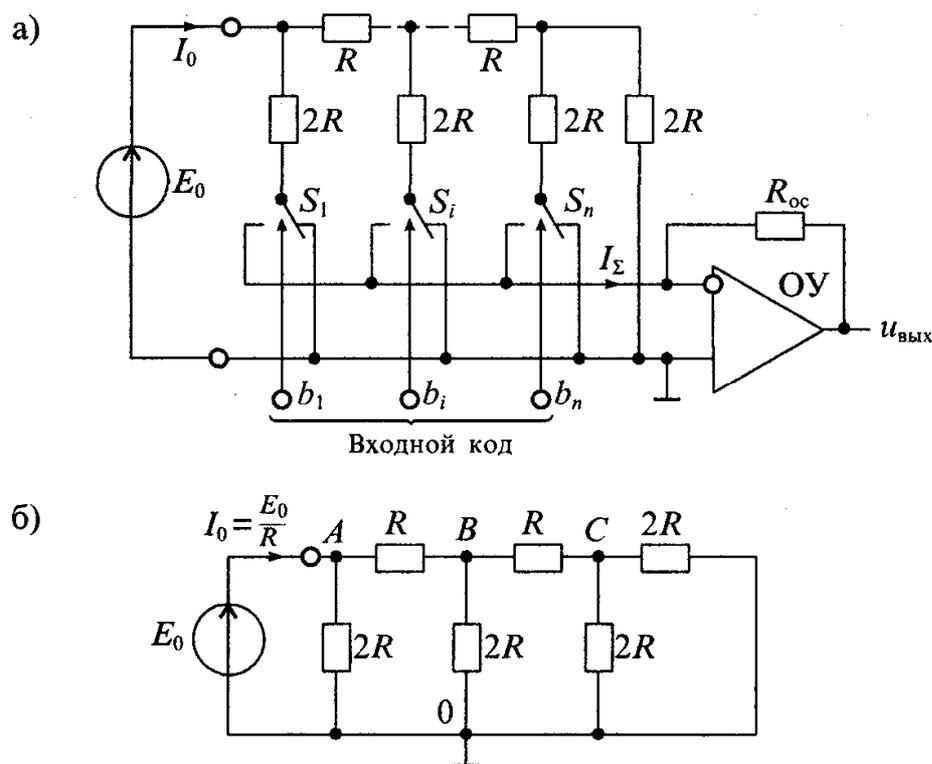


Рисунок 4 - Схема ЦАП со сложением токов на резистивной матрице типа  $R-2R$  (а) и структура резистивной матрицы (б)

Особенность этой резистивной матрицы заключается в том, что при любом положении ключей  $S_1, S_2 \dots S_n$  входное сопротивление матрицы всегда равно  $R$ , а следовательно, ток, втекающий в матрицу, равен  $I_0 = E_0/R$ . Далее он последовательно делится в узлах  $A, B, C$  по двоичному закону. Двоичный закон

распределения токов в ветвях резистивной матрицы соблюдается при условии равенства нулю сопротивления нагрузки. Так как нагрузкой резистивной матрицы является операционный усилитель ОУ, охваченный отрицательной обратной связью через сопротивление  $R_{oc}$  то его входное сопротивление равно нулю с достаточно высокой точностью.

Напряжение на выходе операционного усилителя определяется выражением

$$U_{вых} = \frac{E_0 R_{oc}}{R 2^n} (b_1 2^{n-1} + b_2 2^{n-2} + \dots + b_n 2^0) = \frac{E_0 R_{oc}}{R 2^n} N, \quad (5)$$

где  $b_i = 1$ , если ключ  $S_i$  находится в положении, при котором ток протекает на инвертирующий вход ОУ, и  $b_i = 0$ , если ключ  $S_i$  находится в положении, при котором ток протекает в общий вывод,  $n$  — число разрядов преобразователя.

Максимальное значение выходного напряжения (т.е. напряжение в конечной точке диапазона) имеет место при всех  $b_i = 1$  и определяется по формуле:

$$U_{вых. max} = \frac{E_0 R_{oc} (1 - 2^{-n})}{R} = \frac{E_0 R_{oc}}{R} - h \quad (6)$$

где  $h$  — шаг квантования, т. е. приращение выходного напряжения при изменении входного кода на единицу младшего разряда:

$$h = \frac{E_0 R_{oc}}{2^n R}. \quad (7)$$

Как следует из формулы (5), выходное напряжение ЦАП зависит не только от входного кода  $N$ , но и от напряжения  $E_0$  опорного источника. Если допустить, что напряжение  $E_0$  меняется, то выходное напряжение ЦАП будет пропорционально произведению двух величин: входного кода и напряжения, поданного на вход опорного сигнала. В связи с этим такие ЦАП обычно называют перемножающими. В интегральных микросхемах перемножающих ЦАП источник опорного напряжения отсутствует, но имеется вход для его подключения.

## 2 Исследование цифро-аналогового преобразователя

### 2.1 Цель работы

Научить студента моделировать и исследовать работу цифро-аналоговых преобразователей представленных в виде электронной модели в среде «Electronics Workbench».

### 2.2 Порядок выполнения лабораторной работы

Согласно принципиальным схемам ЦАП поочередно составить в среде Workbench схему и выполнить моделирование.

### 2.3 Содержание отчета

Отчет по проделанной лабораторной работе должен содержать:

- схему исследуемого ЦАП;
- результаты расчетов;
- выводы по результатам проделанной работы.

#### *ЦАП с весовыми резисторами*

ЦАП с весовыми резисторами (смотри рисунок 5) состоит из двух узлов: резистивной схемы (матрицы) на резисторах R1—R4 и суммирующего усилителя (ОУ с резистором обратной связи R<sub>o</sub>).

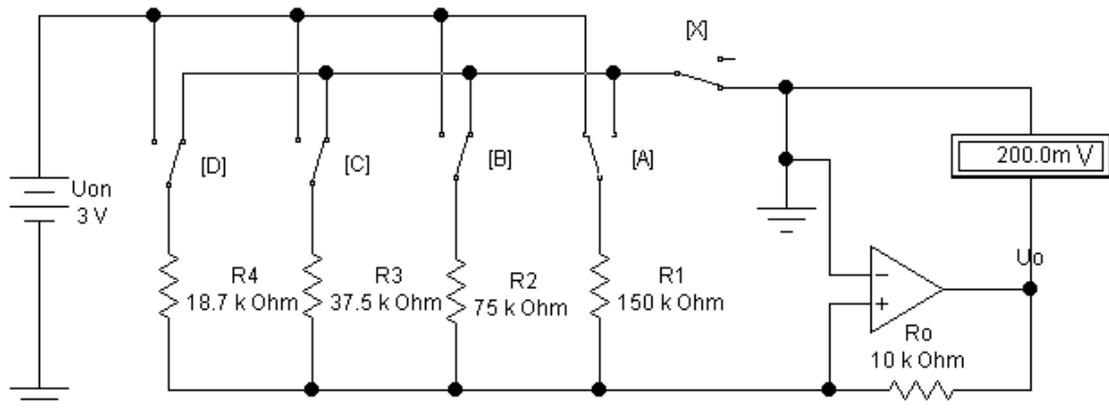


Рисунок 5 - ЦАП с весовыми резисторами

Опорное напряжение  $U_{on} = 3\text{В}$  подключается к резисторам матрицы переключателями D, C, B и A, управляемыми одноименными клавишами клавиатуры и имитирующими преобразуемый код. Ключ X позволяет имитировать два режима работы «кодовых» ключей: в верхнем положении, показанном на рисунке 1, имитируется двухполюсный режим, в нижнем положении — трехполюсный. В первом случае отключенные от  $U_{on}$  резисторы «висят» в воздухе, во втором — заземляются. Если все переключатели замкнуты на «землю», то напряжение на вход ходе ОУ равно 0 В.

**Переключатель А установлен в положение, соответствующее логической 1.**

Тогда на вход ОУ через резистор R1 подается напряжение 3В.

Коэффициент усиления напряжения рассчитывается по формуле:

$$K = R_o/R_1 = 10000/150000 = 0,066 \quad (8)$$

Выходное напряжение

$$U_o = 0,066 \cdot 3 = 0,2В = 200мВ \quad (9)$$

соответствует двоичной комбинации 0001 на входе ЦАП.

Полученное значение  $U_o$  является «ценой» младшего разряда (МР), используемой для оценки многих параметров ЦАП.

**Переключатель В установлен в положение, соответствующее логической 1.**

На вход ОУ через резистор R2 подается напряжение 3В.

Коэффициент усиления напряжения  $K = R_o/R_2 = 10000/75000 = 0,133$ .

Выходное напряжение  $U_o = 0,133 \cdot 3 = 0,4В = 400мВ$  соответствует двоичной комбинации 0010 на входе ЦАП.

### **Задание к лабораторной работе**

1 Рассчитать коэффициент усиления напряжения ОУ и выходное напряжение ЦАП для случая, когда в положение, соответствующее логической единице, установлен только переключатель С. Результаты расчета проверить на модели.

2 Получить выражение для расчета выходного напряжения ЦАП в общем виде и проверить его на модели.

### **Контрольные вопросы**

1 Назначение цифро-аналогового преобразователя?

2 По какому закону выбираются сопротивления в ЦАП с весовыми резисторами?

## ЦАП лестничного типа

Схема ЦАП такого типа (смотри рисунок 6) состоит из резистивной матрицы  $R-2R$ , напоминающей лестницу, и суммирующего усилителя.

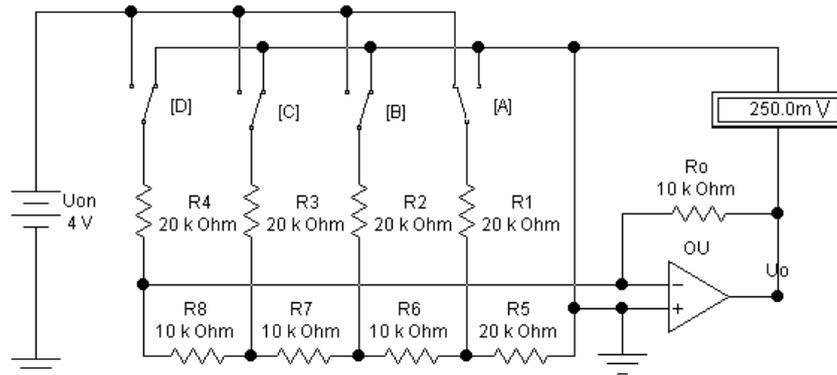


Рисунок 6 - ЦАП лестничного типа

Преимущество использования матрицы состоит в том, что в ней используются резисторы только двух номиналов. Сопротивление каждого из резисторов  $R_1—R_5$  равно  $20\text{ кОм}$ , а резисторов  $R_6—R_8$ ,  $R_o$  —  $10\text{ кОм}$ . Из приведенных данных видно, что сопротивление вертикально расположенных резисторов «лестницы» ровно в 2 раза больше сопротивлений горизонтальных.

## Моделирование работы ЦАП

В рассматриваемом примере схемы используется опорное напряжение  $4\text{В}$ . Переход к каждой следующей двоичной последовательности на входах приводит к увеличению аналогового выходного сигнала на  $0,25\text{В}$ .

Выходное напряжение ЦАП на рисунке 1 определяется формулой:

$$U_o = U_{on} \cdot R_o [S_{n-1} 2^{n-1} + \dots + S_{n-i} 2^{n-i} + \dots + S_1 2^1 + S_0 2^0] / R \cdot 2^n, \quad (10)$$

где  $S_i$  - значение цифрового сигнала (0 или 1) на  $i$ -м входе,

$n$  — число разрядов преобразования,  $n = 4$ ,

$R$  — сопротивление резистора матрицы  $R-2R$ ,  $R = 10\text{ кОм}$ .

## Задание к лабораторной работе

С помощью формулы (10) рассчитать выходное напряжение ЦАП для всех 16 комбинаций переключателей А, В, С, D и сравнить полученные результаты с результатами моделирования.

## Контрольные вопросы

1 К какому типу ЦАП относится ЦАП лестничного типа?

2 Чем отличается ЦАП лестничного типа от ЦАП с весовыми резисторами?

## Список использованных источников

1 **Келим, Ю. М.** Типовые элементы систем автоматического управления: учебное пособие для студентов учреждений среднего профессионального образования / Ю.М. Келим. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. - 384 с. - ISBN 5-8199-0043-X (ФОРУМ), ISBN 5-16-000989-2 (ИНФРА-М).

2 **Иващенко, Н.Н.** Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учеб. для вузов / Н.Н. Иващенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.

3 **Прянишников, В.А.** Электроника: полный курс лекций. – 4-е изд. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 416 с., ил. - ISBN 5-7931-0018-0;

4 **Карлащук, В.И.** Электронная лаборатория на IBM PC: лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB / В.И. Карлащук. – 5-е изд. — М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с. - ISBN 5-98003-151-0.