

УДК 621.315.375

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОАНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА МИКРОСХЕМАХ ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНОЙ ЛОГИКИ

*И. Г. Попова, В. С. Маширова*

Донской государственной технической университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

В работе проведен расчёт параметров цифроаналогового преобразователя, определены его заданные электрические характеристики на микросхемах транзисторно-транзисторной логики.

**Ключевые слова:** цифроаналоговый преобразователь, транзисторно-транзисторная логика, помехоустойчивость, цифровые схемы, светодиод, радиотехнические устройства, сигнал.

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS BASED ON TRANSISTOR LOGIC CHIPS

*I. G. Popova, V.S. Mashirova*

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

In this article the calculation of the digital-to-analog converter parameters is defined, the electrical characteristics of the digital-to-analog converter on transistor logic chips are determined.

**Keywords:** digital-to-analog converter, transistor logic, noise immunity, digital chips, LED, radio devices, signal.

**Введение.** Цифровая обработка сигналов помогает решать задачи в реальном времени приема, формирования, обработки и передачи информации. На её основе базируется развитие инфокоммуникационных технологий.

Радиотехнические устройства и совершенствование электронно-вычислительной техники определяются возможностями цифровых микросхем, все узлы которых содержат элементы цифровой техники, с их помощью осуществляются хранение информации и запоминание, управление вычислительным процессом, а также ввод и вывод информации. Применение цифровых интегральных схем в радиосвязи открывает новые возможности.

Высокая помехоустойчивость цифровых систем передачи информации, по сравнению с аналоговыми, стабильность электрических характеристик каналов связи, качество передачи сигнала, не зависящее от длины линии связи, объясняют широкое развитие таких систем.

Для развития цифровой радиоаппаратуры и техники в России необходима подготовка большого числа специалистов, отвечающих современным требованиям и имеющих необходимые знания в данной сфере.

Важнейшим методом изучения параметров, определения заданных электрических характеристик цифроаналогового преобразователя (ЦАП) на микросхемах транзисторно-транзисторной логики является натурное моделирование. Проведение экспериментальных исследований на реальной элементной базе с применением контрольно-измерительных приборов позволяет формировать необходимые навыки инструментальных измерений, используемых в области радиотехники и инфокоммуникационных технологий.

В ходе работы были проведены экспериментальные исследования ЦАП. Их цель — рассмотреть сопряжение ЦАП с визуальным проектированием в среде Electronics Workbench, определить его основные достоинства.

**Основная часть.** В рамках экспериментальных исследований цифроаналогового преобразователя на микросхемах транзисторно-транзисторной логики можно проводить изучение теоретических основ принципа действия и применения цифровых схем [1].

Цель экспериментальных исследований:

- приобрести практические навыки экспериментального исследования цифровых схем;
- способствовать развитию и закреплению навыков эксплуатации измерительных приборов.

В рамках программы экспериментальных исследований мы провели демонстрацию возможностей.

Ввод двоичного числа в параллельной форме.

Подаем на вход *PE* низкий уровень, соответствующий переключателям *SA5*. Переключателями *SA1–SA4* набираем двоичное четырехразрядное число. Подаем токовый импульс [2]. Проверяем индикацию введенного в счетчик *K155ИЕ7* числа светодиодами *HL1–HL4* в соответствии с набранным кодом. Схема электрическая принципиальная изображена на рис. 1.

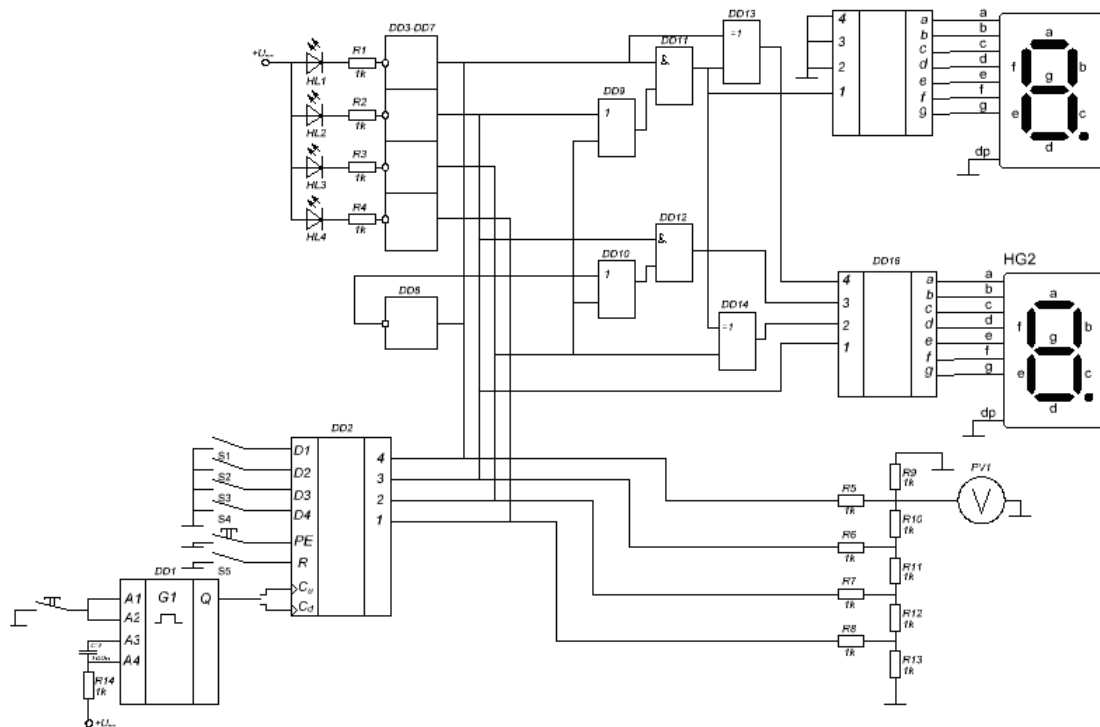


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

Сброс. Установка в нулевое состояние.

Кнопкой «Сброс» снимаем высокий уровень напряжения. Кнопка «Сброс» разнимает контакт 14 микросхемы *K155ИЕ7*, который до этого был подключен к общему проводу (рис. 2). Проверяем состояние светодиодов *HL1–HL4*. После нажатия кнопки «Сброс» все светодиоды должны быть погашены. На семисегментных индикаторах высвечиваются цифры 00 [3].

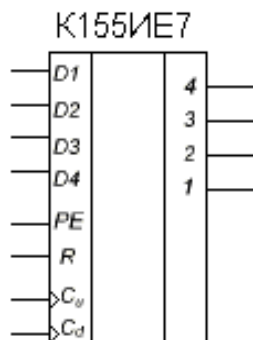


Рис. 2. Счетчик K155IE7

Увеличение двоичного числа на единицу (декремент).

Предварительно нажимаем кнопку «Сброс», переводим счетчик в нулевое состояние. Переключателем SA4 подаем на вход PE высокий уровень, отключив контакт 11 счетчика K155IE7 от общего провода. Переключателем SA6 подключаем задающий генератор DD1 K155IE7 к контакту C<sub>u</sub> счетчика [4–5].

Подаем одиночные импульсы выхода ждущего мультивибратора на вход C<sub>u</sub> счетчика. Фиксируем показатель светодиодов HL1–HL4 и семисегментных индикаторов HG1, HG2.

Уменьшение двоичного кода на единицу (декремент).

Предварительно нажимаем кнопку «Сброс», переводим счетчик в нулевое состояние. Переключателем SA4 подаем на вход PE высокий уровень, отключив контакт 11 счетчика K155IE7 от общего провода [6]. Переключателем SA6 переключаем задающий генератор DD1 K155AG1 к контакту 4 C<sub>p</sub> счетчика [7], представленному на рис. 3.

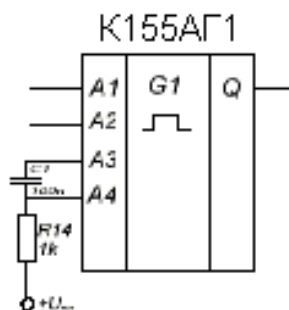


Рис. 3. Микросхема K155AG1

Результаты эксперимента заносим в табл. 1.

Таблица 1

Увеличение двоичного числа на единицу (инкремент)

Номер тактового импульса	Сброс	1	2	3	4	5	6	7
Двоичный код, HL1-HL4	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
Десятичный код, HG1, HG2	00	01	02	03	04	05	06	07

Номер тактового импульса	8	9	10	11	12	13	14	15
Двоичный код, <i>HL1-HL4</i>	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
Десятичный код, <i>HG1, HG2</i>	08	09	10	11	12	13	14	15

Семисегментные индикаторы *HG1, HG2* с выходов дешифраторов *DD15, DD16* 176ИД2 индуцируют двоичный код в десятичном виде. Семисегментный индикатор состоит из семи элементов индикации (сегментов), включающихся и выключающихся по отдельности. Сегменты обозначаются буквами от *A* до *G*. Это наиболее простая реализация индикатора, она представляет собой группу светодиодов, расположенных в определенном порядке и объединенных конструктивно [8]. Поэтому одновременно с экспериментом по увеличению и уменьшению состояния счетчика выполняется опыт по преобразованию двоичного кода в десятичный с использованием семисегментных индикаторов.

Подаем одиночные импульсы с выхода ждущего мультивибратора на вход  $C_p$  счетчика. Фиксируем показания светодиодов *HL1-HL4* и семисегментных индикаторов *HG1, HG2*. Результаты эксперимента заносим в табл. 2.

Таблица 2

## Уменьшение состояния счетчика на единицу (декремент)

Номер тактового импульса	Сброс	1	2	3	4	5	6	7
Двоичный код, <i>HL1-HL4</i>	0000	1111	1110	1101	1100	1011	1010	1001
Десятичный код, <i>HG1, HG2</i>	00	15	14	13	12	11	10	09

Номер тактового импульса	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Двоичный код, <i>HL1-HL4</i>	1000	0111	0110	0101	0100	0011	0100	0001	0000
Десятичный код, <i>HG1, HG2</i>	08	07	06	05	04	03	02	01	00

Цифроаналоговое преобразование двоичного кода в аналоговый сигнал применяется для связи цифровых управляющих систем с устройствами, которые управляются уровнем аналогового сигнала. ЦАП предназначен для преобразования числа определенного, в виде двоичного кода, в ток или в напряжение, которые пропорциональны значению цифрового кода. Подключаем постоянный вольтметр к выходу резистивной матрицы ЦАП  $R-2R$  на резисторах  $R6-R14$ . Установим состояние переключателей соответственно работе на увеличение состояния счетчика на единицу [9]. Подаем тактовые импульсы на вход  $C_u$  счетчика. Фиксируем показания

светодиодов, семисегментных индикаторов и вольтметра. Результаты эксперимента заносим в табл. 3.

Таблица 3

## Цифровое преобразование десятичного кода в аналоговый сигнал

Номер тактового импульса	Сброс	1	2	3	4	5	6	7
Показания светодиодов	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
Десятичный код	00	01	02	03	04	05	06	07
$U_{\text{ЦАП}}$ , В	0.2	0.44	0.68	0.92	1,16	1,40	1,64	1,88

Номер тактового импульса	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Показания светодиодов	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111	0000
Десятичный код	08	09	10	11	12	13	14	15	00
$U_{\text{ЦАП}}$ , В	2,12	2,36	2,60	2,84	3,08	3,32	3,56	3.8	0.2

По результатам выполненных измерений строим график выходного напряжения ЦАП, представленный на рис. 4.

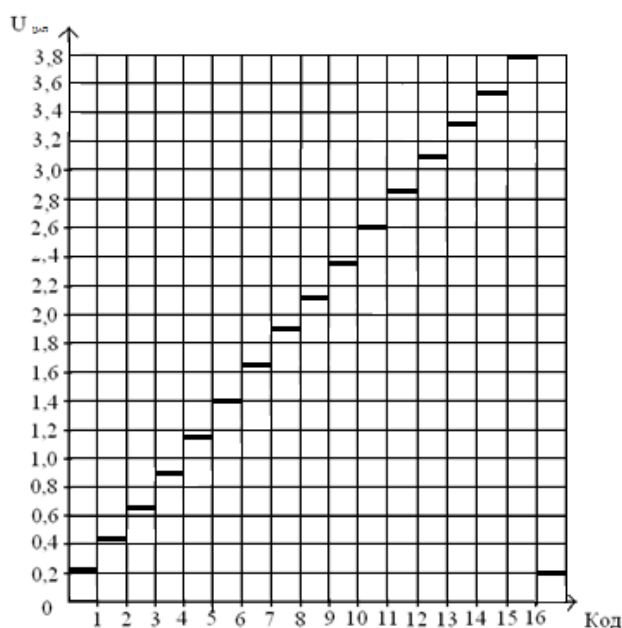


Рис. 4. Выходное напряжение ЦАП

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования разработанного цифроаналогового преобразователя на микросхемах транзисторно-транзисторной логики показали возможность наглядного получения теоретических знаний и формирования практических навыков [10].

Проведем компьютерное моделирование работы цифрового преобразователя в программе *Electronics Workbench*. Для наглядности ограничимся четырехразрядным двоичным кодом.

Формирование двоичного кода осуществляется переключателями. Индикаторы показывают двоичное число. В качестве буферных преобразовательных элементов использованы логические элементы ИЛИ, у которых на первый вход подается логический уровень с переключателя, а вторые выходы постоянно закреплены на корпус. При таком включении логический элемент ИЛИ выполняет роль повторителя. Работа показана в табл. 4.

Таблица 4

Работа логического элемента ИЛИ в качестве повторителя

Первый вход $X1$	Второй вход $X2$	Выход $Y$
0	0	0
1	0	1

После буферных элементов формируемая двоичная комбинация поступает на резистивную матрицу  $R-2R$ , к выходу которой подключен постоянный вольтметр. Схема виртуального эксперимента приведена на рис. 5.

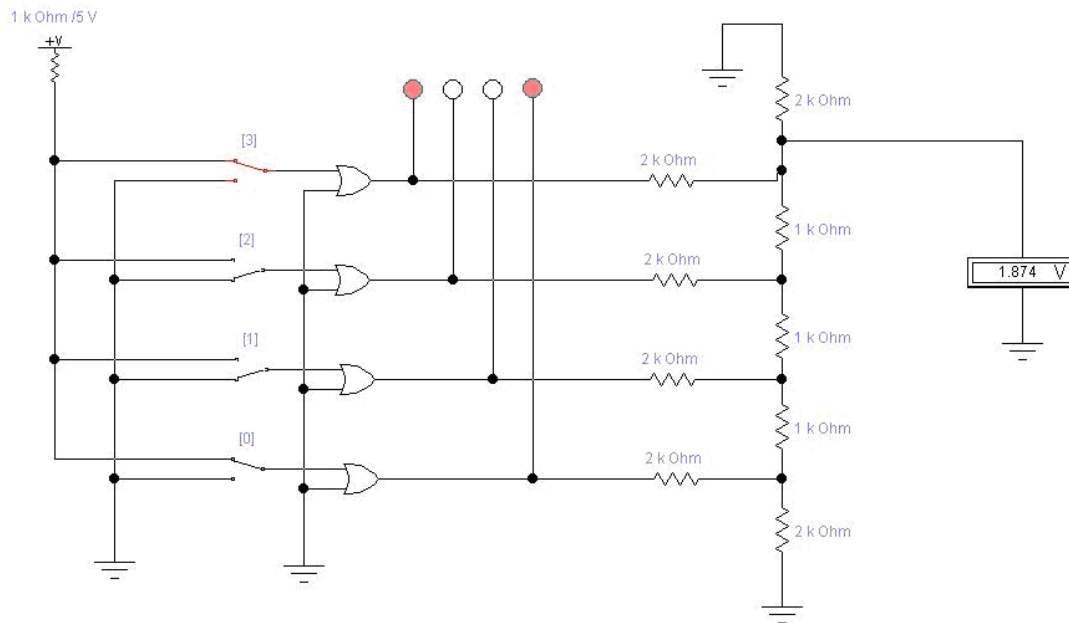


Рис. 5. Компьютерное моделирование ЦАП

При проведении компьютерного эксперимента набираем с помощью переключателей 0,1,2,3 двоичные кодовые комбинации. Результаты моделирования приведены в табл. 5 и представлены на рис. 6.

Таблица 5

Компьютерное моделирование ЦАП

Десятичный код	0	1	2	3	4	5	6	7
Двоичный код	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
Напряжение ЦАП, В	0	0,208	0,416	0,624	0,832	1,041	1,249	1,457
Десятичный код	8	9	10	11	12	13	14	15

Десятичный код	0	1	2	3	4	5	6	7
Двоичный код	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
Напряжение ЦАП, В	1,666	1,874	2,082	2,290	2,498	2,707	2,915	3,123

Результаты виртуального компьютерного моделирования работы ЦАП в системе *EWB* показали прямо пропорциональное соответствие между двоичными кодовыми комбинациями на входе резистивной матрицы  $R-2R$  и аналоговым напряжением на входе ЦАП, что соответствует теоретическим сведениям.

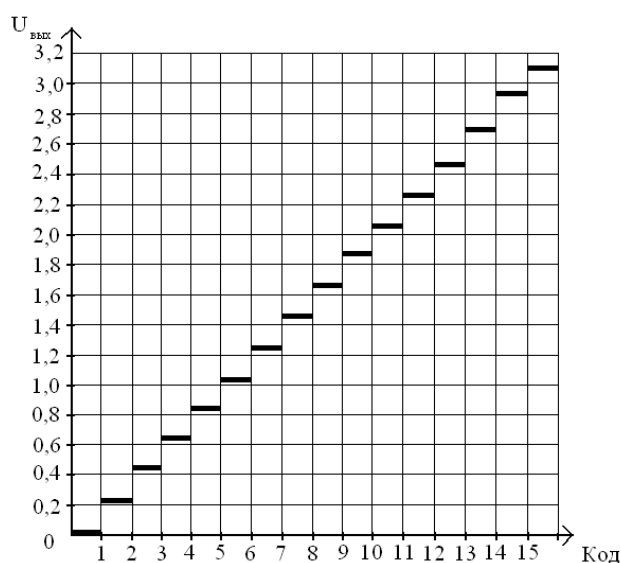


Рис. 6. Компьютерное моделирование ЦАП

Таким образом, представленная виртуальная компьютерная схема позволяет моделировать работу ЦАП в качестве демонстрационного и учебного макета.

Проведенные экспериментальные исследования разработанного цифроаналогового преобразователя на микросхемах транзисторно-транзисторной логики продемонстрировали возможность наглядного изучения теоретических знаний и формирования практических навыков.

Результаты проведенных экспериментальных исследований функциональных узлов цифровых устройств совпадают с теоретическими сведениями.

Анализ компьютерного программного комплекса *Electronics Workbench* в качестве электронной виртуальной лаборатории показал основные достоинства: программа использует стандартный интерфейс *Windows* и может рассматриваться как замена дорогостоящего оборудования. Следовательно, целесообразно проводить на его основе исследования компьютерных схем.

Представленная виртуальная компьютерная схема позволяет моделировать работу ЦАП в учебных целях в качестве демонстрационного и учебного макета.

**Заключение (выводы).** В результате проделанной работы были проведены экспериментальные исследования ЦАП. Рассмотрено сопряжение ЦАП с визуальным проектированием в среде *Electronics Workbench*. В указанной среде построены алгоритмы аналогоцифровых схем разной степени сложности. Интерфейс программы дает возможность

измерять комплекс параметров преобразователей, интерфейс позволяет наглядно представлять результаты моделирования.

Преимуществом разработки является возможность изменения цвета проводников, что позволяет сделать восприятие схем максимально наглядным.

Библиотека компонентов программы оснащена параметрами транзисторов, управляемых источников и переключателей, гибридных и пассивных элементов, индикаторов, логических элементов, триггерных устройств, специальных комбинационных и последовательных схем. Активные элементы моделируются как идеальными, так и реальными прототипами.

### Библиографический список

1. Калабеков, Б. А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы. / Б. А. Калабеков. — Москва : Горячая линия — Телеком, 2003. — С. 156–172.
2. Федорков, Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применением / Б. Г. Федорков, В. А. Телец. — Москва : Энергоиздат, 1990. — 320 с.
3. ГОСТ 30606-98 Преобразователи цифрового кода в напряжение или ток измерительные. Основные параметры. Общие технические требования. Методы испытаний [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200031270> (дата обращения: 11.08.2020).
4. Валах, В. В. Быстродействующие АЦП для измерения формы случайных сигналов / В. В. Валах, В. Ф. Григорьев // Приборы и техника эксперимента. — 1987. — № 4. — С. 86–90.
5. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров / А.-Й. К. Марцинкявичюс [и др.]. — Москва : Радио и связь. — 1988. — 224 с.
6. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. — Москва : Горячая линия — Телеком, 2000. — 768 с.
7. Цифровые интегральные микросхемы: справочник / П. П. Мальцев [и др.]. — Москва : Радио и связь, 1994. — 240 с.
8. Цифровые интегральные микросхемы: справочник / М. И. Богданович [и др.]. — Минск : Белорусь, 1991. — 492 с.
9. Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры: справочник / И. В. Новаченко [и др.]. — Москва : Радио и связь, 1989. — 382 с.
10. Шило, В. Л. Популярные цифровые микросхемы: справочник / В. Л. Шило. — Москва : Радио и связь, 1987. — 352 с.

*Об авторах:*

**Попова Инна Григорьевна**, доцент кафедры «Физика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, [inna111109@rambler.ru](mailto:inna111109@rambler.ru)

**Маширова Вероника Сергеевна**, студентка Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [veronika\\_mashirova@mail.ru](mailto:veronika_mashirova@mail.ru)

*Authors:*

**Popova, Inna G.**, associate Professor, Department of Physics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), [inna111109@rambler.ru](mailto:inna111109@rambler.ru)

**Mashirova, Veronika S.**, student, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), [veronika\\_mashirova@mail.ru](mailto:veronika_mashirova@mail.ru)