

# ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОЦЕССАХ УПРАВЛЕНИЯ

## ОЦИФРОВКА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

Получено: 28.01.2021    Поступило после рецензирования: 24.02.2021    Принято: 01.03.2021

УДК 681.518.5    JEL O30, O31, O33    DOI 10.26425/2658-3445-2021-4-1-13-19

### Зайцев Алексей Викторович

Старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», г. Москва, Российская Федерация

ORCID: 0000-0001-5196-4908

e-mail: ip62951413@yandex.ru

### АННОТАЦИЯ

Мы живем в мире цифровых технологий: у каждого есть цифровой телефон, телевидение перешло полностью на цифровой формат вещания, цифровые процессоры стоят без преувеличения в каждом бытовом приборе, начиная от утюга и заканчивая компьютером, на котором и была написана представленная статья. Цифровые технологии упрощают нашу жизнь, берут на себя некоторые операции, выполнение которых человеком потребовало бы больших материальных затрат (например, написание текста на печатной машинке и компьютере сильно разнятся). Выигрыш компьютера особенно очевиден при редактировании текста. Они принесли нам комфорт – как приятно, когда процессор, следящий за температурой в доме, увеличил теплоподачу при похолодании или сократил ее в целях экономии при отсутствии людей в доме.

Чтобы цифровая система могла выполнить то или иное действие, ей нужна команда, исходящая от датчика. Это может быть датчик температуры, влажности, давления, а может быть и микрофон, применяемый в системах голосового управления. Все эти датчики дают аналоговый сигнал, который меняет свое значение во времени. К такому сигналу цифровая система не чувствительна, она его «не понимает». Решением вопроса занимаются аналогово-цифровые преобразователи. Они имеют различную структуру, различной степени сложности устройство в зависимости от параметров оцифровываемого сигнала. Например, температура в доме меняется очень медленно. Требования к быстродействию аналогово-цифрового преобразователя для датчика температуры очень низкие. Напротив, для получения голосовых команд применяют микрофон. Чтобы различать голоса людей, требуется обработка спектра сигнала шириной в килоггерцы – значит уровень сигнала будет меняться с частотой тысячи раз в секунду. Это весьма высокое требование. О различных типах аналогово-цифровых преобразователей, их устройстве и применении и пойдет речь в данной статье.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Цифровые технологии, аналогово-цифровые преобразователи, аналоговый датчик, цифровой датчик, параметры АЦП, последовательные АЦП, параллельные АЦП, умный дом

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Зайцев А.В. Оцифровка аналоговых сигналов//E-Management. 2021. Т. 4, № 1. С. 13–19.

© Зайцев А.В., 2021.

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0. всемирная.



# INSTRUMENTAL AND MATHEMATICAL METHODS IN MANAGEMENT PROCESSES

## DIGITIZATION OF ANALOG SIGNALS

Received: 28.01.2021    Revised: 24.02.2021    Accepted: 01.03.2021

JEL O30, O31, O33

**Alexey V. Zaitsev**

Senior lecturer, State University of Management, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-5196-4908

e-mail: ip62951413@yandex.ru

### ABSTRACT

We live in the world of digital technologies – everyone has a digital phone, television has switched to a digital broadcasting format as it is more noise-immune, digital processes are literally in every household appliance, from the iron to the computer on which this article was written. Digital technologies simplify our lives, some operations performed by humans require large material costs, for example, writing text on a typewriter and computer vary greatly. The gain of the computer is especially evident when editing the text. They brought us comfort – how nice it is when the processor that monitors the temperature in the house increased the heat supply during a cold snap or reduced it in order to save money in the absence of people in the house.

But in order for the digital system to perform this or that action, it needs a command coming from the sensor. It can be a temperature, humidity, pressure sensor. Or maybe a microphone used in voice control systems. All these sensors, without which the operation of a digital system is impossible, give an analog signal that changes its value over time. The digital system is not sensitive to such a signal. It “does not understand” the signal. The problem is solved by ADC (analog-to-digital converters). They have a different structure, varying degrees of complexity, the device, depending on the parameters of the digitized signal. For example, the temperature in the house changes very slowly, even when warming up or when the heating is turned off in frost, the temperature rises or, accordingly, does not fall faster than one degree per hour. The ADC speed requirements for the temperature sensor are very low. Instead, a microphone is used to receive voice commands. In order to distinguish the voices of people and to carry out the commands of some people and not to carry out commands from others, processing of the signal spectrum with a width of kilohertz is required - which means that the signal level will change at a frequency of thousands of times per second. This is a very high demand. The different types of ADCs, their design and application will be discussed in this article.

### KEYWORDS

Digital technologies, analog-to-digital converters, analog sensor, digital sensor, ADC parameters, serial ADCs, parallel ADCs, smart home

### FOR CITATION

Zaitsev A.V. (2021) Digitization of analog signals. *E-Management*, vol. 4, no. 1. pp. 13–19. DOI 10.26425/2658-3445-2021-4-1-13-19

© Zaitsev A.V., 2021.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация в экономике открыла второе дыхание, стали возможны новые направления, которые ранее были совершенно недоступны. Очень важно, что применение цифровых технологий оказалось доступно не только крупным организациям, но и, без преувеличения, каждому желающему. К примеру, система «Умный дом» предназначена для установки в частный дом или квартиру и в базовой комплектации вполне по карману человеку со средним заработком. При этом возможно постепенно усложнить систему, доверяя ей все больше и больше процессов в жилище. Проникая во все уголки частного дома, квартиры или офиса, система позволяет сделать очень простым управление системами безопасности и комфорта, будь то: включение света или его автоматическое отключение по истечении времени, если человек забыл это сделать; управление отоплением в зависимости от присутствия в помещении людей, времени суток и температуры воздуха внутри и снаружи помещения; слежение за протечками воды из системы водопровода или отопления, утечками газа, проникновением в помещение дыма при наличии котла; подача сигнала тревоги при возгорании. В последнем случае возможна подача сигнала сразу на пульт пожарной охраны на самых ранних этапах развития пожара, когда хозяева помещения еще, возможно, пожар не заметили [Тесля, 2008]. Эта система уже спасла не одну жизнь, не говоря о материальных ценностях.

Все перечисленные возможности – а перечислены далеко не все – наглядно иллюстрируют, что система «Умный дом» принесет своему владельцу ощутимую экономию.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим чуть подробнее, что из себя представляет эта система и насколько она сложна, если обладает такими замечательными возможностями. Центральное место занимает процессор – устройство, которое принимает, обрабатывает и отдает информацию. Возможности процессора в основном определяют параметры всей системы. Информацию процессор получает от датчиков, речь о которых пойдет ниже, а отдает – исполнительным устройствам через цепи согласования (усилители тока, реле и т.д.). Могут быть задействованы GSM, Wi-Fi, Bluetooth модули, позволяющие передавать информацию на телефоны владельцам, жидкокристаллические экраны, пульты спецслужб по радиоканалу без применения проводов.

В свободной продаже есть огромный ассортимент микроконтроллеров (процессоров) фирм Atmel, Pic, Semiconductor. При своей очень низкой цене (порядка 200 рублей) эти процессоры весьма функциональны. Например, процессор Atmega 328 фирмы Atmel [Евстифеев, 2007] при стоимости 235 рублей (цена начала 2021 г.) имеет в своем арсенале внутрисистемно программируемую флеш-память на 32 Кбайт, шесть десятиразрядных аналогово-цифровых преобразователей (далее – АЦП) и работает на тактовой частоте до 20 МГц.

Столь высокое отношение параметров к цене позволило любителям электроники и программирования создавать свои собственные системы, которые зачастую имеют весьма высокие технические характеристики. Одну такую разработку выполнили воспитанники кружка Kompeltktriks при Жуковском техникуме, создавшие на базе процессора Atmega 328А производства фирмы Atmel, робота-поисковика, который управляется по Bluetooth с мобильного телефона, и передает видеоизображение с камеры на очки виртуальной реальности.

В качестве исполнительных устройств выступает все многообразие бытовой техники, применявшейся раньше: осветительные приборы, утюги, электроплиты, электродвигатели привода штор, вентиляции, открытия ворот, – одним словом, все, что работает от электричества.

Особое внимание хотелось бы уделить датчикам – именно они «глаза и уши» всей цифровой системы. От них система получает информацию от окружающего мира. Все датчики можно разделить на две большие категории: аналоговые и цифровые. Информация, поступающая с цифрового датчика, уже находится в виде, пригодном для подачи на процессор, так как состоит из нулей и единиц – сигналов низкого и высокого уровня соответственно. Примером таких датчиков могут быть датчики включения/выключения света, датчики протечки, датчики задымления. Они дают всего два вида сигналов: нет срабатывания – «0», есть срабатывание – «1» [Кашкаров, 2013].

В отличие от них, аналоговые датчики дают информацию об уровне сигнала, как например: датчики температуры, давления, влажности. В их основе заложен элемент, меняющий свое электрическое сопротивление при изменении измеряемого параметра. Как следствие, меняется напряжение на выходе датчика. Что бы процессор мог обработать информацию, представленную в таком виде (аналоговом), ее необходимо оцифровать –

представить в виде кода из нулей и единиц. В составе процессора Atmega 328 уже есть шесть независимых АЦП разрешением 10 бит. Это значит, что входной сигнал напряжением от 0 до 5 В будет разбит на  $2^{10} = 1024$  уровня и будет измеряться с точностью, превышающей  $\pm 5$  мВ. Это вполне достаточная точность для реализации большинства проектов. Более высокая разрядность может понадобиться для оцифровки музыки или каких-либо специфических сигналов, встречающихся весьма редко.

Но тут чаще всего поджидает проблема – далеко не все аналоговые датчики выдают диапазон напряжений от 0 до 5 В. Чаще всего напряжение заметно меньше, например, от 0 до 0,1 В. Это приведет к тому, что

будут использоваться не все разряды АЦП, и число разбиений сигнала будет не 1024, а в  $\frac{5}{0,1} = 50$  раз меньше, то есть  $\frac{1024}{50} = 20,48$ , что приведет к росту погрешности в те же 50 раз. Понятно, что допустить то, что

больше 1000 уровней из 1024 не будут использоваться, – самое настоящее расточительство. Но если оставшаяся точность вполне устраивает, а стоимость устройства для согласования уровней напряжения датчика и процессора весьма велика, то на фоне низкой цены самого процессора описанное расточительство вполне оправданно. В противном случае, если все же необходимо задействовать всю возможность АЦП, то применяют операционные усилители постоянного тока – устройства, которые могут усиливать очень медленно меняющиеся сигналы – от 0 Гц. Если усилить сигнал в 0,1 В в 50 раз, то как раз получится нужное напряжение в 5 В. Тем более что коэффициент усиления операционных усилителей можно менять, изменяя параметры резисторов, задающих режим работы операционного усилителя [Волович, 2018].

В том случае, если напряжение, идущее с датчика, оказывается выше 5 В, применяют обычный резисторный делитель напряжения, работающий на основе закона Ома, известного еще с уроков физики восьмого класса [Перышкин, 2013].

С экономической точки зрения чаще всего бывает оправдано совмещать аналоговый датчик и АЦП на одной плате. Плюс такого симбиоза в том, что еще на заводе подбираются необходимые параметры АЦП конкретно для этого датчика, под его параметры. Например, если используется датчик температуры, которая не может меняться с большой скоростью, то в быстродействующем АЦП нет необходимости и можно обойтись менее быстродействующим. К тому же сокращается расстояние между датчиком и АЦП, что приводит к уменьшению помех, к которым аналоговый сигнал более чувствителен, чем цифровой, который обладает более широким спектром. Правда, можно добавить, что ширина цифрового спектра бесконечна, так как конечна ширина импульсов сигнала [Гоноровский, 2006].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим несколько примеров датчиков.

*Датчик атмосферного давления BMP280.* Это цифровой измеритель давления, у которого датчик интегрирован в микрочип. Выпускается фирмой BOSH. Позволяет измерять атмосферное давление в пределах от 300 мм рт. ст. до 1100 мм рт. ст. и потребляет при этом ток всего 2,7 мкА при частоте опроса 1 Гц. В промежутках между опросами датчика микрочип спит для экономии электроэнергии. Информация в процессор передается от датчика с помощью интерфейса обмена данными SPI и I2C.

*Датчик температуры и влажности HTU-21 (GY-21).* Этот датчик обладает высокой точностью измерения температуры, погрешность не превышает 0,4 % в рабочем диапазоне, который составляет  $-40 \dots +125^\circ\text{C}$ . Рабочий диапазон измерения влажности 0–100 %, относительная погрешность не превышает  $\pm 3$  %. Ток потребления в режиме измерения – 300 мкА, в режиме ожидания еще в две тысячи раз меньше – 0,15 мкА такое значение сравнимо с током саморазряда питающей батарейки.

*Датчик интенсивности света GY-302 (BH1750).* Человеческий глаз имеет феноменальный динамический диапазон чувствительности к свету, поэтому датчики освещенности так же должны обладать большим диапазоном (но даже самые дорогие и сложные из них с глазом не сравнятся). Как следствие, АЦП таких датчиков должен обладать повышенной разрядностью. Датчик GY-302 оснащен шестнадцатиразрядным АЦП, из-за чего чувствительность имеет 65536 градаций. Освещенность измеряется датчиком в люксах, и информация о ней передается по I2C. Размеры датчика порядка  $2 \times 2$  см.

Рассмотрим теперь параметры, характеризующие АЦП [Бахтиаров и др., 1980].

Разрядность АЦП – важнейший параметр, который влияет на отношение сигнал/шум, которое можно оценить по формуле:

$$SNR = 6,02N + 1,76 \text{ [дБ]}. \quad (1)$$

Быстродействие АЦП – максимальная частота, на которой происходит дискретизация. При этом величины погрешностей не выходят за заданные пределы. Измеряется в мегагерцах или операциях в секунду (англ. samples per second, SPS).

С ростом количества разрядов АЦП снижается его быстродействие – растет время смены значения на выходе. Таким образом, увеличение разрядности и быстродействия – две взаимопротиворечащие задачи.

Рассмотрим некоторые виды АЦП.

*Последовательные АЦП [Гольденберг Л.М., 2009].*

*АЦП последовательного счета.* При поступлении на вход аналогового сигнала, подается импульс запуска. Этот импульс дает старт генератору тактовых импульсов ГТИ, которые поступают на счетчик. Сигнал со счетчика поступает на вход АЦП, с которого уже аналоговый сигнал идет на компаратор, где сравнивается с входным сигналом. Когда сигналы сравниваются, работа ГТИ прекращается, а сигнал со счетчика поступает на выход АЦП. Проще говоря, когда на АЦП приходит аналоговый сигнал, АЦП начинает формировать цифровой сигнал, соответствующий самому низкому возможному сигналу, то есть нулю. Далее значение цифрового сигнала растет до тех пор, пока не станет соответствовать измеряемому сигналу. Достоинством этого метода очевидно является его простота.

Нетрудно заметить, что чем больше уровень сигнала, тем дольше идет его обработка. Время преобразования сигнала:

$$t_{nc} = \frac{(2^N - 1)}{f_{макт}}, \quad (2)$$

где  $f_{макт}$  – частота тактовых импульсов.

*АЦП последовательного приближения.* В основе работы данного АЦП лежит принцип дихотомии – последовательного сравнения измеряемой величины с  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$  и так далее от ее возможного максимального значения.

Данный метод можно сравнить с методом деления отрезка пополам – численным методом решения уравнений. Полагая, что напряжение оцифровываемого сигнала лежит в пределах от нуля до  $U_{макс}$ , в АЦП формируется сигнал равный половине максимального значения:

$$U_{сформ} = \frac{U_{макс} - 0}{2}. \quad (3)$$

Далее напряжение на входе сравнивается со сформированным напряжением. Если измеряемое напряжение ниже сформированного, то формируется новое напряжение, равное половине сформированного на предыдущем шаге. В случае, если напряжение сигнала превысит сформированное, новое сформированное напряжение будет равно среднему значению между ранее сформированным и максимальным, то есть  $\frac{3}{4}U_{макс}$ . Далее вновь сформи-

рованное напряжение сравнивается с измеряемым и принимается решение о формировании нового напряжения.

За время преобразования одного цикла, напряжение входного сигнала несколько изменяется. Чтобы это не мешало работе АЦП, на входе устройства ставится дополнительный блок, который запоминает значение измеряемого сигнала и сохраняет его на протяжении всего цикла.

Данный вид АЦП обладает неоспоримым выигрышем во времени, и чем больше величина измеряемого сигнала, тем более этот выигрыш сказывается. К примеру, при измерении напряжения близкого к максимальному с помощью десятиразрядного АЦП последовательного счета, устройство проделает порядка тысячи циклов. В то время как АЦП последовательного приближения проделает не более десяти циклов. Но АЦП последовательного приближения имеет более сложную схему, а потому более дорогое. Если разрядность не велика,

а быстродействие не самый важный параметр, то АЦП последовательного счета вполне оправдывают свое применение. К тому же они вполне могут быть реализованы на дискретных элементах.

*Параллельные АЦП.* В параллельных АЦП сигнал подается сразу на несколько компараторов, на которые подано опорное напряжение, отличающееся на двух соседних компараторах на одну и ту же величину. Это достигается с помощью резистивного делителя напряжения. Сигнал от всех компараторов подается на приоритетный шифратор [Микушин и др., 2010].

Приоритетный шифратор играет очень важную роль. Так как время срабатывания компараторов хотя бы сколько-то отличается, то при быстром нарастании сигнала возможно отставание компараторов младших разрядов от компараторов старших разрядов. Приоритетный шифратор не обращает внимания на нули в младших разрядах при наличии единиц в старших разрядах [Фролкин, Попов, 1992].

Наличие триггера на входе необходимо для устранения возможных ошибок определенного типа.

Неоспоримым достоинством параллельных АЦП является их быстродействие – самое большое среди всех АЦП и достигающее значения в миллиард отсчетов в секунду. Но при этом есть серьезный недостаток – сложность конструкции, которая очень быстро нарастает с ростом разрядности. Так, например, для десятиразрядного АЦП нужно  $2^{10} - 1 = 1\,023$  компаратора 1 024 резистора. Разумеется, это негативно сказывается на стоимости устройства. Да и тепловая мощность, рассеиваемая резисторами, принимает весьма высокие значения.

## ВЫВОДЫ

Время идет, делаются открытия. Постепенно открытое вчера и способное нас удивлять своей необычностью, сегодня становится привычным, а завтра обыденным и повседневным, работающим на благо людей. Это происходит и с цифровыми технологиями. За несколько десятилетий устройства для преобразования аналогового сигнала в цифровой существенно увеличили свое разнообразие как по параметрам, так и по принципу решения поставленной задачи. Сейчас это уже маленькая ячейка в сложном устройстве, выполняющая свою важную функцию. С развитием технологий АЦП становились все меньше по размеру и цене, что дало возможность применять в недорогих датчиках преобразователи с весьма высокими параметрами. Это расширяет сферу применения, дает возможность для любителей электроники создавать устройства, способные конкурировать с промышленными образцами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахтиаров Г.Д., Малинин В.Д., Школин В.П. (1980). Аналого-цифровые преобразователи / под ред. Г.Д. Бахтиарова. М.: Советское радио. 280 с.
- Волович Г.И. (2018). Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых устройств. М.: ДМК-Пресс. 636 с.
- Гольденберг Л.М. (2009). Импульсные и цифровые устройства: учебник. М.: Радио и связь. 495 с.
- Гоноровский И.С. (2006). Радиотехнические цепи и сигналы: учебное пособие. М.: Дрофа. 720 с.
- Евстифеев А.В. (2007). Микроконтроллеры AVR семейства Mega: руководство пользователя. М.: Додека. 592 с.
- Кашкаров А.П. (2013). Датчики в электронных схемах: от простого к сложному. М.: ДМК-Пресс. 199 с.
- Микушин А.В., Сажнев А.М., Сединин В.И. (2010). Цифровые устройства и микропроцессоры: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург. 832 с.
- Перышкин А.В. (2013). Физика. 8 класс: учебник для общеобразовательных учреждений. М.: Дрофа. 237 с.
- Тесля Е.В. (2008). Умный дом своими руками. Строим интеллектуальную цифровую систему в своей квартире. СПб.: Питер. 195 с.
- Фролкин В.Т., Попов Л.Н. (1992). Импульсные и цифровые устройства: учебное пособие. М.: Радио и связь. 335 с.

## REFERENCES

- Bakhtiarov G.D., Malinin V.D. and Shkolin V.P. (1980), *Analog to digital converters*, Sovetskoe radio, Moscow, USSR. (In Russian).
- Evstifeev A.V. (2007), *AVR microcontrollers of the Mega family: user's guide*, Dodeka, Moscow, Russia. (In Russian).

- Frolkin V.T. and Popov L.N. (1992), *Pulse and digital devices: tutorial*, Radio i svyaz', Moscow, Russia. (In Russian).
- Goldenberg L.M. (2009), *Pulse and digital devices: textbook*, Radio i svyaz', Moscow, Russia. (In Russian).
- Gonorovskii I.S. (2006), *Radio engineering circuits and signals: tutorial*, Drofa, Moscow, Russia. (In Russian).
- Kashkarov A.P. (2013), *Sensors in electronic circuits. From simple to complex*, DMK-Press, Moscow, Russia. (In Russian).
- Mikushin A.V., Sazhnev A.M. and Sedinin V.I. (2010), *Digital devices and microprocessors: tutorial*, BKhV-Peterburg, St. Petersburg, Russia. (In Russian).
- Peryshkin A.V. (2013), *Physics. Eighth form: textbook for general education institutions*, Drofa, Moscow, Russia. (In Russian).
- Teslya E.V. (2008), *Smart home with your own hands. We build an intelligent digital system in our apartment*, Piter, St. Petersburg, Russia. (In Russian).
- Volovich G.I. (2018), *Circuitry of analog and analog-digital devices*, DMK-Press, Moscow, Russia. (In Russian).