

УДК 621.3.084.2

В. Я. ХОРОЛЬСКИЙ, М. С. БОНДАРЬ, А. В. ЕФАНОВ

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД – МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

*В статье процесс аналого-цифрового преобразования представлен операциями предварительной обработки сигналов, преобразования аналоговой величины в код и последующей коррекции погрешностей. Показана необходимость применения системного подхода при решении задач повышения точности и метрологической надежности средств аналого-цифрового преобразования.*

**Ключевые слова:** аналого-цифровое преобразование, системный подход, погрешности, коррекция.

*In article process of analogue-digital transformation is presented by operations of preliminary processing of signals, transformations of analogue size to a code and the subsequent correction. Necessity to apply the system approach is shown at the solving a problem of increasing of accuracy and metrological reliability of analogue-digital transformation means.*

**Key words:** analogue-digital transformation, the system approach, errors, correction.

Анализ состояния и перспектив развития современных измерительных систем показывает все возрастающую тенденцию к их цифровизации, осуществление которой невозможно без предварительного аналого-цифрового преобразования сигналов. В связи с этим отмечается возрастание роли применяемых в них аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

Важность аналого-цифровых преобразователей обусловлена тем, что они являются единственным видом измерительных преобразователей, обеспечивающих непосредственную связь и передачу измерительной аналоговой информации от объекта измерений в вычислительное или управляющее цифровое устройство. При этом достоверность информации о значениях измеряемых величин, а, следовательно, и результативность принимаемых на их основе решений или качество управления процессами определяются свойствами используемых АЦП и, прежде всего, их точностью и быстродействием.

Среди разработчиков прикладных систем существует заблуждение, связанное с тем, что они рассматривают АЦП как "черный ящик" и недооценивают его роль в измерительной системе. Упускается из вида то, что ошибки, допущенные на стадии аналого-цифрового преобразования, в дальнейшем становятся неотличимы от преобразованного сигнала и при последующей цифровой обработке не могут быть полностью устранены. Причина этого в том, что реальный АЦП является нелинейным устройством, и вносимые таким устройством погрешности не аддитивно складываются с реальным сигналом. Поэтому при работе с АЦП с его максимальными возможностями недостаточно правильно включать микросхемы согласно их описанию. Необходимо также исследовать реальные характеристики преобразователей и проанализировать факторы, влияющие на эти характеристики, а также вести целенаправленный поиск по повышению качества работы АЦП.

На практике наиболее часто для решения задач повышения точности аналого-цифрового преобразования используют только высокоточные АЦП. Современные фирмы-разработчики электронных компонентов занимаются совершенствованием и созданием различных видов АЦП, пытаясь достичь компромисса между их высокой разрядностью и быстродействием. Однако только применение высокоточных АЦП полностью не решает указанную задачу по нескольким причинам.

Во-первых, высокие точностные характеристики современных микросхем АЦП еще не являются гарантией того, что в условиях воздействия внешних факторов (температурных, электрических, механических, а также помех и шумов), данный АЦП будет все также точен. Согласно ГОСТ 14014-82, на точность аналого-цифрового преобразования влияют не только изначально присущие такому преобразователю основные погрешности, но и значительные дополнительные погрешности, которые согласно ГОСТ 8.009-84 и РД 50-453-84

суммируются с основными, и тем самым значительно снижают общую точность аналого-цифрового преобразования.

Во-вторых, необходимо учитывать, что традиционно под аналого-цифровым преобразованием подразумевают операцию, выполняемую непосредственно самим АЦП. Однако в современных условиях, характеризующихся усложнением измерительных задач и требований, предъявляемым к метрологическим характеристикам преобразователей, справедливо говорить уже о процессе или системе аналого-цифрового преобразования, так как теперь для качественного выполнения преобразования микросхемы АЦП нуждаются в дополнительных устройствах.

В связи с этим, процесс аналого-цифрового преобразования предусматривает, кроме операции непосредственного аналого-цифрового преобразования, осуществляемой АЦП, выполнение ряда сопутствующих операций: выборки и хранения, формирования абсолютных значений сигналов, а также коррекции погрешностей АЦП (рисунок 1).

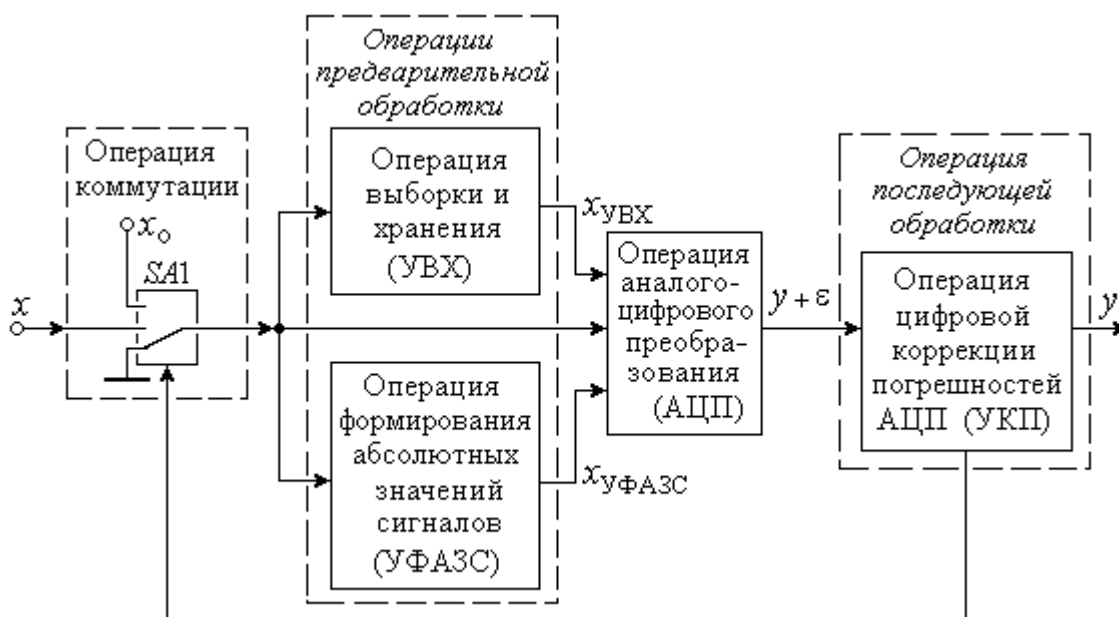


Рисунок 1 – Обобщенный процесс аналого-цифрового преобразования

Следует отметить, что параллельно с совершенствованием микросхем АЦП наибольшее развитие в трудах отечественных и зарубежных ученых получило направление коррекции погрешностей преобразования. Вместе с тем, как видно из рисунка 1, аналого-цифровому преобразованию с последующей возможной коррекцией обычно предшествуют операции выборки и хранения и/или формирования абсолютного значения сигналов (применяемые в зависимости от особенностей и областей применения АЦП), в значительной степени влияющие на общую точность аналого-цифрового преобразования. Следовательно, каким бы точным не был АЦП, пусть даже снабженный устройством коррекции, но если не обеспечивать точность выполнения операций предварительной обработки, то нельзя гарантировать достоверность результатов аналого-цифрового преобразования.

Так, например, известные ученые – основатели направления коррекции погрешностей АЦП – Алиев Т. М., Сейдель Л. Р., Тер-Хачатуров А. А., Шекиханов А. М., Андрианова Л. П. и другие занимались разработкой и совершенствованием итерационных методов коррекции, не учитывая тот факт, что работа по повышению точности только одних АЦП малоэффективна без учета влияния погрешностей устройств предварительной обработки (выборки и хранения, формирования абсолютного значения сигналов) на конечный результат аналого-цифрового преобразования.

Проведенный аналитический обзор показал, что хотя устройствам выборки и хранения, формирования абсолютного значения сигналов и коррекции погрешностей АЦП в

литературе по отдельности уделено должное внимание, нигде не встречается тезис о том, что все эти операции и реализующие их устройства необходимо рассматривать комплексно, в общей системе. Ведь только так можно оценить, в конечном итоге, влияние каждого из них на точность получаемых результатов аналого-цифрового преобразования.

В технической литературе недостаточно освещены вопросы исследования физических процессов, происходящих в таких устройствах, и оценки их влияния на конечную точность аналого-цифрового преобразования. Это свидетельствует о необходимости проведения дополнительных исследований в данной области.

В связи с этим к процессу аналого-цифрового преобразования целесообразно применять системный подход, согласно которому необходимо учитывать взаимодействие и взаимное влияние отдельных частей (подсистем), выполняющих в составе измерительной системы определенные функции, вытекающие из общей цели ее функционирования [1]. Основой системного подхода является принцип иерархичности. Он предполагает декомпозицию системы (или процесса) на ряд подсистем (операций) с тем, чтобы проанализировать причины, снижающие его точность (то есть решить задачу анализа), и затем определить возможные пути уменьшения их влияния (то есть решить задачу синтеза) [2, 3].

Очевидно, что причины снижения точности процесса аналого-цифрового преобразования, учитывая его сложность, связаны с сопутствующими операциями. А именно, они обусловлены методическими погрешностями известных методов, лежащих в основе сопутствующих операций, и инструментальными погрешностями устройств их реализации. В связи с этим задача повышения точности процесса аналого-цифрового преобразования должна решаться комплексно, с учетом входящих в него подсистем.

Одним из путей повышения точности АЦП является применение известных способов компенсации аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности.

Для коррекции аддитивной погрешности цикл аналого-цифрового преобразования разделяют на два такта одинаковой длительности. В первом такте кодируется суммарное значение входной величины и начального смещения  $X + X_{см}$ , и на выходе АЦП формируется первый код  $Y_1 = K_{пр}(X + X_{см})$ , который запоминается в регистре памяти. Во втором такте вход устройства через аналоговый ключ SA1 подключается к нулевой цепи, и начальное смещение  $X_{см}$  преобразуется в цифровую форму. При этом на выходе АЦП получается код поправки  $\varepsilon = K_{пр}X_{см}$ , который вычитается из первого кода для получения результата преобразования  $Y = Y_1 - \varepsilon = K_{пр}X$ , не зависящего от начального смещения  $X_{см}$ .

Для компенсации мультипликативной составляющей инструментальной погрешности аналого-цифрового преобразования используют третий такт. В течение этого такта на вход устройства через переключатель SA1 подается образцовый сигнал  $X_0$ , и с помощью АЦП получается номинальный код  $Y_{ном} = K_{пр}(X_0 + X_{см})$ . Затем из этого номинального кода вычитается код смещения  $\varepsilon$ , после чего вычисляется калибровочный коэффициент  $K_{клб} = Y_{клб} / (Y_{ном} - \varepsilon)$  по отношению калибровочного кода  $Y_{клб}$ , соответствующего образцовому сигналу  $X_0$ , к полученной разности номинального кода и кода смещения.

После записи в регистр памяти АЦП цифровых значений кода смещения  $\varepsilon$  и калибровочного коэффициента  $K_{клб}$  можно реализовать автоматическую коррекцию результатов преобразования: вычитать из каждого последующего кода  $Y_k$  значение кода поправки  $\varepsilon$  и умножить эту разность на калибровочный коэффициент:  $Y = (Y_k - \varepsilon)K_{клб}$ .

Такие сравнительно простые вычислительные операции позволяют скомпенсировать влияние постоянных значений аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности аналого-цифрового преобразования.

Также установлено, что основным направлением совершенствования устройств выборки и хранения является улучшение их выходных характеристик, определяемых параметрами элементов, входящих в них (конструктивный подход). При этом в качестве

варьируемых выходных величин устройства выборки и хранения следует рассматривать параметры используемых операционных усилителей и конденсатора хранения, а также учитывать принцип перезаряда емкости конденсатора хранения.

Операция формирования абсолютных значений сигналов обычно основывается на принципах инвертирования отдельных участков сигнала, без учета величин фазовых сдвигов. Это приводит к значительным искажениям формы выходного сигнала, и в связи с этим, к необходимости разработки нового метода формирования абсолютных значений входных биполярных сигналов, подаваемых на вход АЦП.

Наряду с технологическим и конструктивным направлениями улучшения метрологических характеристик АЦП, перспективным является структурный подход. Такой подход направлен на линейризацию функции преобразования АЦП и обеспечение ее стабильности при воздействии разных возмущающих факторов, за счет коррекции возникающих погрешностей преобразования. Совершенствование операции коррекции погрешностей АЦП также выделяется в самостоятельную задачу и требует разработки новых и более эффективных методов, характеризующихся снижением аппаратной сложности и повышением скорости сходимости операции коррекции.

Таким образом, необходимость рассмотрения процесса аналого-цифрового преобразования как сложной технической системы указывает на то, что задача повышения его точности может быть решена на основе применения системного подхода. При этом возможные пути совершенствования отдельных подсистем процесса аналого-цифрового преобразования диктуют важность проведения всесторонних теоретических и практических исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Окунев Ю. Б., Плотников В. Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи. – М.: Связь, 1976. – 184 с.
2. Борисов Ю. П., Цветнов В. В. Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.
3. Розенберг В. Я. Введение в теорию точности измерительных систем. – М.: Советское радио, 1975. – 304 с.

### **Хорольский Владимир Яковлевич**

Невинномысский технологический институт (филиала) ГОУ ВПО "Северо-Кавказский государственный технический университет"

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем электропривода и автоматики

Тел. 8-(8652)-23-25-52

### **Ефанов Алексей Валерьевич**

Невинномысский технологический институт (филиала) ГОУ ВПО "Северо-Кавказский государственный технический университет"

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем электропривода и автоматики

Тел. 8-(8654)-7-03-84

E-mail: kea@nti.ncstu.ru

### **Бондарь Мария Сергеевна**

Ставропольский военный институт связи