

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ АНАЛОГОВОЙ И ЦИФРОВОЙ ПОДСИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФА

**Штепа А.А.**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра электронной техники

E-mail: kaf-et@kita.dgtu.donetsk.ua

### *Abstract*

*Shtepa A.A. The inaccuracies of electrocardiograph analog and digital data acquisition subsystems. The comparative analysis of the inaccuracies occurring in analogue and computer electrocardiography are presented.*

**Постановка проблемы и ее актуальность.** Для повышения качества диагностики заболеваний сердца на ранней стадии необходимо, в частности, увеличивать точность измерения электрокардиосигнала. О возможностях электрокардиографии высокого разрешения сообщалось в [1, 5, 7, 8]. В ЭКГ высокого разрешения при регистрации используется одна из ортогональных схем отведений. Метод основан на цифровом усреднении ЭКГ сигнала. В результате получается один сердечный цикл с высоким отношением сигнал-шум. Проводя дальнейшую частотную фильтрацию и нормализацию получают кривую пригодную для количественного анализа на предмет наличия в сердце зон повреждения по методу Симсона (Simpson). Альтернативный метод с более высокой чувствительностью — преобразование сигнала для анализа в частотно-временной области, например, на основе волнового преобразования (Wavelet transformation). Последнее также применяется при анализе ВСР. Методы реализуемы только на цифровых электрокардиографах. Существуют рекомендации Американской Сердечной Ассоциации (American Heart Association) по применению метода [7, 8]

**Анализ известных решений** Обычные аналоговые электрокардиографы представляют собой электронно-механические системы. Напряжение, наведённое на электроды в результате сердечной деятельности, усиливается электронным усилителем и регистрируется на бумажной ленте при помощи механического самописца.

К усилителю предъявляются жёсткие требования по линейности, отношению сигнал/шум, дрейфу нуля, равномерности амплитудно-частотной характеристики и т.д. В то же время самописцу, как и всем механическим системам присущ ряд недостатков, связанных с подверженностью износу, необходимостью периодического технического обслуживания, погрешностью изготовления. А значит, в процессе эксплуатации характеристики самописца меняются, и запись ЭКГ становится менее достоверной.

Сам самописец обладает постоянной времени. Учитывая всё это, в технической документации прилагаемой к кардиографу, заводом-изготовителем указывается реальная погрешность измерения порядка 10–20%. Для диагностики, например, некоторых нарушений ритма сердца нужна длительная запись потенциалов сердца. Однако при длительном мониторинге длина ленты может выражаться десятками метров, и обработка ЭКГ становится неудобной. Имеется ещё ряд задач в кардиологии, когда аналоговая регистрация становится тормозом.

**Постановка задачи исследований.** Учитывая изложенное, целесообразно отказаться от механического звена в цепи обработки ЭКГ и записывать потенциалы сердца в память компьютера в цифровой форме.

При этом открываются большие возможности по автоматизации анализа кардиограмм. Точность записи и разрешающая способность метода компьютерной ЭКГ позволяют получить большую информацию, и тем самым увеличить достоверность диагноза на ранней стадии заболевания, по сравнению с традиционной ЭКГ.

Переход от аналоговой регистрации сигналов к цифровой, позволяющей применить широкий спектр методов фильтрации, коррекции и другой апостериорной обработки, требует анализа влияния такого перехода на погрешности измерительной системы.

**Формулирование целей статьи.** Целью данной работы является сравнительный анализ точности, обеспечиваемой аналоговым электрокардиографом и его цифровым вариантом, а также выделение основных составляющих погрешности цифрового электрокардиографа.

**Основной материал исследований.** Проведем сравнительную оценку погрешностей серийного одноканального электрокардиографа ЭК1Т-03-М2 с цифровым электрокардиографом, в котором аналоговый сигнал подвергается дискретизации при помощи устройства выборки и хранения (УВХ) и оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Частота дискретизации, задаётся тактовым генератором и составляет 1200 Гц. В устройстве применён 10-ти разрядный АЦП, т.е. выходной цифровой сигнал имеет  $2^{10} = 1024$  дискретных уровня.

Квантование измеряемой или воспроизводимой величины выполняется обязательно при любом измерении, поскольку значение величины всегда выражается числом с конечным количеством значащих цифр (с этой точки зрения регистрация осциллограммы без ее «оцифровки» не является законченным измерением). При измерениях с помощью стрелочного прибора получаемый результат квантует человек, считывающий показания, поэтому погрешность, вызванная квантованием, не является характеристикой прибора. Цифровые измерительные приборы и другие АЦ преобразователи выполняют квантование без участия человека, и связанная с этим погрешность квантования является одной из составляющих погрешности этих устройств.

Различают квантование равномерное (при котором все кванты номинально одинаковы) и неравномерное (при котором размер кванта зависит от квантуемой величины). При равномерном квантовании характеристика преобразования АЦ преобразователя вписывается в полосу постоянной ширины, и удобно причислить погрешность квантования, являющуюся формально нелинейной составляющей суммарной погрешности, к аддитивным составляющим.

При неравномерном квантовании зависимость погрешности квантования от квантуемой величины может быть приближена к мультипликативной, что с метрологических позиций выгоднее; однако по ряду соображений в измерительной технике реализуется (по крайней мере в пределах каждого диапазона многодиапазонного АЦ преобразователя) равномерное квантование. В многодиапазонных преобразователях и приборах по мере переключения диапазонов изменяется размер кванта, что в какой-то степени напоминает неравномерное квантование.

Как и всякую другую составляющую погрешности средства измерений, погрешность квантования следует отнести к тем или иным классификационным группам по ряду различных признаков. Один такой признак уже встретился выше: погрешность квантования, являясь, строго говоря, нелинейной составляющей погрешности, на практике рассматривается как аддитивная составляющая, поскольку хорошо вписывается в аддитивную полосу. Столь же парадоксальной оказывается и ее классификация по другим признакам.

По вопросу о том, является ли погрешность квантования методической или инструментальной, имеются две точки зрения. Есть специалисты, относящие ее к методическим составляющим на том основании, что она не зависит от качества элементов АЦ преобразователя и поддается оцениванию моделированием или расчетом без реального эксперимента. Другие считают ее инструментальной, так как

она присуща самому средству измерений и вносится в его паспорт наряду с другими инструментальными составляющими погрешности. Наиболее интересен и требует подробного анализа вопрос о том, является ли погрешность квантования систематической или случайной.

Если имеется АЦП с биполярной характеристикой, и эта характеристика не меняется на протяжении серии запусков АЦП, то при измерении строго постоянной величины и будет каждый раз получаться один и тот же отсчет  $N$ , а, следовательно, и одна и та же погрешность квантования  $q = Nq - u$ . Такое поведение, характерно для систематической погрешности.

Но в реальных системах редко используют АЦП в режиме преобразования строго постоянных величин. Если же преобразуемая величина на протяжении серии запусков АЦП изменяется случайным образом, то погрешность квантования, являясь неслучайной функцией случайной преобразуемой величины, сама ведет себя как случайная величина, и можно говорить о законе ее распределения.

Математическое ожидание погрешности при симметричном квантовании равно нулю, предельное значение составляет  $\pm 1/2q$ , где  $q$  — собственно значение одной ступени квантования, то есть квант. Среднеквадратичное отклонение для равномерного распределения

$$\sigma_q = \frac{q}{\sqrt{12}}.$$

При квантовании с недостатком или с избытком распределение погрешности квантования смещается соответственно в отрицательную или в положительную сторону, так что математическое ожидание погрешности отклоняется от нуля, а предельное значение доходит до целого кванта. Поэтому, если не придерживаться методики точной установки нуля АЦП, а удовлетвориться тем, что он дает нулевое показание при нулевом входном сигнале, предельное значение абсолютной погрешности квантования может составлять

$$\Delta q = \pm q.$$

Отнеся это значение к диапазону преобразуемых величин  $(2^n - 1)q$ , получаем предельное значение приведенной погрешности

$$\gamma_q = \pm 100 / (2^n - 1) \%.$$

В табл. 1 даны значения  $\gamma_q$  для наиболее обычных разрядностей АЦП. При погрешностях, меньших примерно 0,01 %, запись в процентах плохо читается, и для лучшей наглядности довольно часто переходят к записи в миллионных долях — ppm (английское сокращение, расшифровываемое как part per million).

Таблица 1 — Предельное значение приведенной погрешности квантования для наиболее обычных разрядностей АЦП

n	$ \gamma_q $
8	$1/255 \approx 0,4 \% = 4000 \text{ ppm}$
10	$1/1023 \approx 0,1 \% = 1000 \text{ ppm}$
12	$1/4095 \approx 0,024 \% = 240 \text{ ppm}$
14	$1/16383 \approx 0,006 \% = 60 \text{ ppm}$
16	$1/65535 \approx 0,0015 \% = 15 \text{ ppm}$

Приведенными в табл. 1 (в обеих используемых относительных единицах) приближенными значениями погрешности обычно используются для оценивания необходимой разрядности АЦП при проектировании канала АЦ преобразования, выбирая эту разрядность так, чтобы погрешность квантования составляла примерно 0,2 ... 0,5 от суммарной допускаемой погрешности канала.

Если выбрать разрядность слишком высокой, то последние знаки результата будут недостоверными, а АЦП неоправданно дорогим; при слишком низкой разрядности останется малый запас на другие составляющие погрешности, снижение которых может обойтись дороже, чем повышение разрядности АЦП.

При рассмотрении реальных операций получения информации о сигнале, вводится термин — обращение к сигналу, под которым имеют в виду взаимодействие АЦП с источником сигнала, в результате которого АЦП, обычно в дискретные моменты времени, получает информацию о состоянии сигнальной функции. По характеру обращения к сигналу, необходимого для получения очередного кодового результата, АЦП различных принципов действия ведут себя по-разному.

Существуют АЦП, требующие однократного обращения к сигналу в predetermined момент. К ним относятся, например, АЦП считывания. Эти наиболее быстродействующие АЦП содержат «линейку» компараторов, число которых равно требуемому числу кодовых переходов на характеристике преобразования.

Компараторы одновременно сравнивают преобразуемое напряжение с множеством напряжений, соответствующих точкам кодовых переходов. Как правило, на АЦП считывания подают непрерывную последовательность тактовых импульсов, и определенный перепад каждого из этих импульсов «защелкивает» кодовую комбинацию на выходе компараторов, которая затем преобразуется в комбинацию выходного кода. Таким образом, этот перепад играет роль сигнала запуска, с которым по времени совпадает (с точностью до задержки в компараторах) обращение к сигналу.

Известны АЦП, выполняющие однократное обращение к сигналу в момент времени, который нельзя указать заранее. Таков редко применяемый сейчас время-импульсный АЦП с разверткой.

Ясно, что каждый кодовый результат соответствует состоянию сигнальной функции не в момент запуска (например,  $t_j$ ), а в момент сравнения (соответственно  $t_{dj}$ ), сдвиг которого по отношению к моменту запуска зависит от преобразуемого напряжения и заранее не определен. Для АЦП с такими свойствами уместно ввести понятие погрешность датирования. Эта погрешность определяется как интервал времени между моментом запуска, которым кодовый результат датируется, и моментом, которому он фактически соответствует (в данном случае это момент сравнения).

Погрешность датирования переходит в погрешность по размеру измеряемой величины вследствие изменения последней за время преобразования. Термин «погрешность датирования» введен сравнительно недавно; в литературе, особенно переводной, встречается более старый термин «апертурное время» с тем же значением. Полезно помнить также, что систематическая составляющая погрешности датирования ранее называлась апертурной задержкой, а случайная составляющая — апертурной дрожью (aperture jitter).

Имеется третья группа АЦП, представители которой осуществляют в течение цикла преобразования несколько обращений к сигналу в различные моменты времени, причем обработка результатов этих обращений не сводится к линейной фильтрации (простому или весовому усреднению). В этой группе наиболее известны АЦП последовательных приближений, у которых для получения каждого двоичного разряда требуется новое обращение к сигналу.

Еще один неприятный эффект, свойственный АЦП последовательных приближений при работе в динамическом режиме: если преобразуемое напряжение в течение времени преобразования растет, кодовые комбинации чаще заканчиваются последовательностями нескольких единиц; аналогично, если преобразуемое напряжение падает, более вероятно появление на концах кодовых комбинаций нескольких нулей подряд. Это дублирование значений разрядов равносильно уменьшению разрядности АЦП.

Чтобы избежать вредных эффектов, вызванных изменением входного напряжения АЦП последовательных приближений в течение времени преобразования, это напряжение перед каждым циклом преобразования запоминают на конденсаторе. АЦП обращается к уже запомненному, постоянному напряжению, и описанные выше неприятности исчезают. Такие аналоговые запоминающие устройства обычно называют устройствами выборки/хранения — УВХ.

Наконец, еще одна группа АЦП отличается тем, что ее представители имеют свойства фильтров — это, например, АЦП двухтактного интегрирования или АЦП с  $\Sigma\Delta$ -модуляторами.

Так как цифровые фильтры в АЦП этого последнего типа прореживают первоначально получаемые цифровые данные, то применительно к таким АЦП используют термин «передискретизация»: обращение к сигналу происходит с частотой, обычно намного превышающей частоту выдачи кодовых комбинаций. В АЦП же двухтактного интегрирования обращение к сигналу происходит непрерывно в течение довольно длительного времени его интегрирования.

Диапазон регистрируемых сигналов серийного кардиографа колеблется от 0.03 до 5 мВ, эффективная ширина записи канала — 40 мм. При наиболее часто устанавливаемой чувствительности 10 мм/мВ максимальный регистрируемый сигнал составляет 4 мВ, что соответствует 40мм на бумажной ленте. Эти величины логично принять в качестве  $U_{max}$ .

На графике (рис. 1), иллюстрирующем зависимость  $\epsilon(U)$  отмечены некоторые характерные точки.

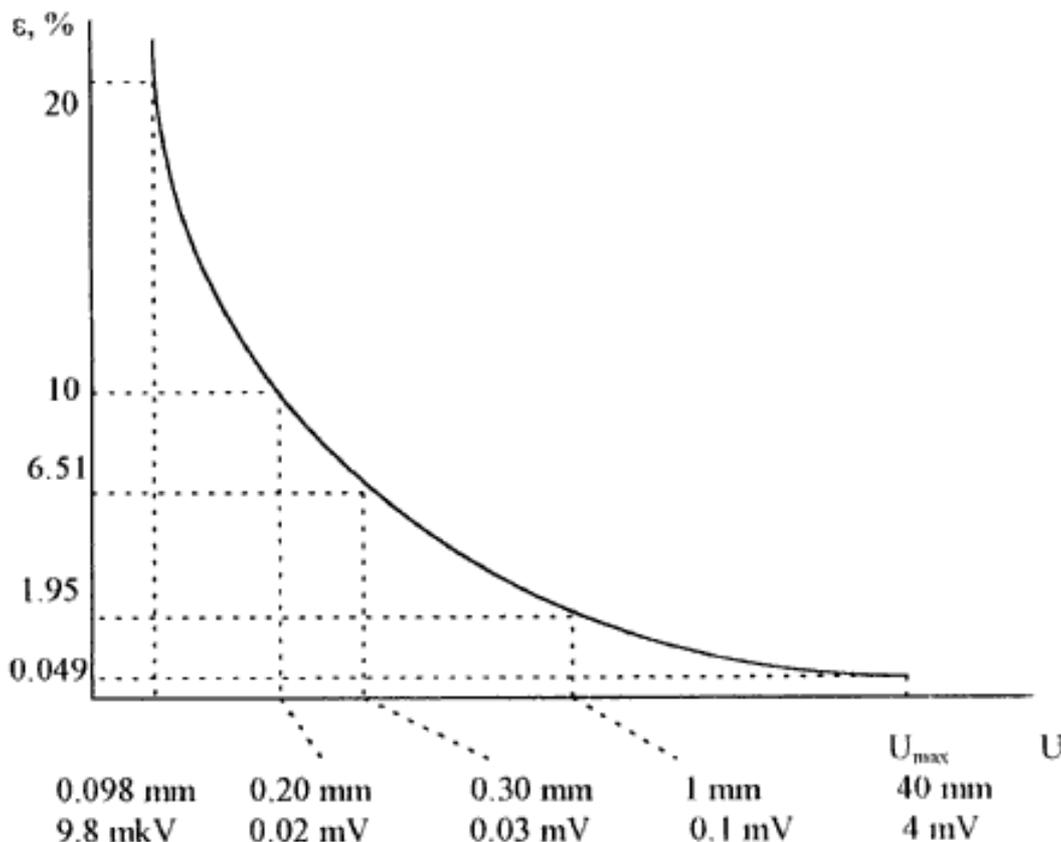


Рисунок 1 — Зависимость относительной ошибки измерения напряжения от амплитуды входного сигнала

Видно, что во всём рабочем диапазоне входных сигналов относительная ошибка квантования, вносимая АЦП, не превосходит 6.5%, в то время как паспортная погрешность измерения напряжения аналогового ЭКГ-сигнала (табл. 2) составляет не более 20% в диапазоне от 0.1 до 0.5 мВ и 10% в диапазоне от 0.5 до 4.0 мВ.

Генератор тактовых импульсов, управляющий УВХ, стабилизирован кварцевым резонатором, поэтому его относительная нестабильность частоты оценивается как 10 в минус четвертой степени. Относительная же погрешность скорости движения ленты аналогового электрокардиографа по паспорту составляет  $\pm 5\%$  [8].

Оценка разрешающей способности прибора по времени, если принять следующие допущения: разрешающая способность человеческого глаза при анализе ЭКГ, записанной на бумаге, равна толщине линии самописца. Толщина линии самописца равна 0.2 мм. При скорости протяжки ленты равной 50 мм/с ( $\pm 2.5$  мм/с) на бумаге записывается

50/0.2=250 "толщин" (4 мс), в то же самое время в память компьютера записывается 1200 отсчётов ЭКГ (0.83 мс). Таким образом, представление ЭКГ на экране монитора эквивалентно увеличению скорости протяжки ленты в 4.8 раза.

Таблица 2 — Сравнение разрешающей способности серийного аналогового и компьютерного электрокардиографов

Относительная погрешность измерения амплитуды сигнала	Электрокардиограф	
	Серийный ЭК1Т-03-М2	Цифровой
Рабочий диапазон от 0.03 до 4 mV	—	< ±6.5%
от 0.1 до 0.5 mV	< ±20%	< ±2%
от 0.5 до 4 mV	< ±10%	< ±0.4%
Разрешающая способность по времени	±4 мс	±830 мкс
Относительная погрешность измерения временных интервалов в диапазоне от 0.1 до 1 s	< ±5%	< ±0.1%

**Выводы.** В ходе анализа результатов исследования, для регистрации ЭКГ проводимой электромеханическим самописцем (аналоговая ЭКГ) и микропроцессорным модулем с 10-разрядным АЦП (цифровой кардиограф) были получены следующие выводы:

1. Основные погрешности аналоговой регистрации ЭКГ значительно выше, чем при компьютерной регистрации.

2. Компьютерная регистрация позволяет применить современные технологии обработки ЭКГ и получить большое количество новых характеристик (спектр ЭКГ [1, 7], фазовый портрет сердца [4, 5] и другие данные).

3. Структура составляющих погрешности цифрового электрокардиографа заметно отличается от таковой в аналоговом варианте того же прибора. При проектировании измерительной системы основными критериями для оценивания необходимой разрядности АЦП являются его погрешности квантования и датирования

### Литература

1. Latfullin I. A., Teptin G. M., Terzy V. F. Multidimensional dynamic electrocardiography. V.F. // Environ. Radioecol. And Appl Ecol — Vol. 1. — P. 18–24.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы, — М.: Высшая школа, 1988. — С. 34–39.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. — СПб.; Питер, 2003. — 604 с.
4. Латфуллин И. А., Тептин Г. М. Возможности электрокардиографии высокого разрешения. — Казанский медицинский журнал, 1998, 79, 2 — С. 23–28.
5. Степура О. Б., Остроумова О. Д., Курильченко И. Т., Мартынов А. И. Клиническая значимость сигналусреднённой электрокардиографии. — Российские Медицинские Вести N1, 1997. — С. 43–49.
6. W. Smith The scientist and engineer's guide to digital signal processing. — California Technical Publishing, 1998. — 220 p.
7. Medical electrical equipment, Part 3, Particular requirement for the essential performance of recording and analysing electrocardiographs. // IEC. — Geneva. — 1996. — 75 p.
8. Тептин, Г. М., Контуров, С. В., Латфуллин, И.А. Сравнительный анализ погрешностей в аналоговой и компьютерной электрокардиографии. — Вестник аритмологии №13, 1999. — С. 54–58.