

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КВАНТОВАННОГО СИГНАЛА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ БЕЗ УВЕЛИЧЕНИЯ РАЗРЯДНОСТИ АЦП

Кувшинов Г.И.

Донецкий национальный технический университет, факультет КИТА, кафедра ЭТ

Abstract

Kuvshinov G. I. Galvanic cardiogram signal quantization accuracy increasing without ADC word length increase. The point of this paper is the substantiation of the technique of the cardiogram irregular analog-digital conversion in order to decrease conversion error without ADC word length increase. This technique enables using of the single-ship microcontrollers with integrated multi-channel ADC. Parameters and coefficients for compander construction are determined.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими заданиями. Жизнедеятельность организма человека связана с постоянным обменом веществ, энергии и информации как в самом организме, так и между организмом и окружающей средой. Одним из множества процессов, протекающих в организме, точно характеризующий состояние сердечно-сосудистой системы и имеющий одно из первостепенных значений, есть электрокардиограмма (ЭКГ). ЭКГ также показывает физические нагрузки организма и действие химических препаратов на него.

Параметры ЭКГ могут быть измерены при помощи электронных устройств и систем, которые при наличии корреляции между измеренными расхождениями и заболеваниями дают возможность врачу или автоматизированной системе ставить обоснованный диагноз - классифицировать сигнал. ЭКГ - это процесс, имеющий как высокоамплитудные, так и низкоамплитудные составляющие, форма, амплитуда и временные параметры которых играют главную роль в его оценке; чем выше точность измерений и количество параметров, оценивающих его, тем выше вероятность точного диагноза. Динамический диапазон процесса ЭКГ может достигать 100 и более. Для понимания рассматриваемого процесса типичный сигнал ЭКГ приведен на рис. 1 [4].

В связи с появлением высокоточных датчиков ЭКГ, геля, уменьшающего сопротивление «кожа-датчик» и многоточечных способов измерения ЭКГ, то для исключения потерь информации современные методы диагностики требуют относительную погрешность измерения ЭКГ не более 0.05 % (или 2,5 μV).

Для повышения точности измерений обычно увеличивают разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В этом случае имеют место следующие негативные последствия: невозможность использования интегрированных в микроконтроллер многоканальных АЦП, не превышающих 8-10 разрядов; использование внешних высокоразрядных АЦП, усложняющих и удорожающих систему; увеличение габаритных размеров датчиков системы. Однако, существует способ неравномерного квантования, применение которого устраняет перечисленные выше недостатки, а именно, повысит точность квантованного сигнала без увеличения разрядности АЦП и существенного увеличения сложности и стоимости системы.

Целью данной работы является обоснование применения метода неравномерного аналого-цифрового преобразования электрокардиограммы для уменьшения погрешности преобразования без увеличения разрядности АЦП.

Изложение основного материала исследования. При представлении отсчетов дискретного сигнала в виде чисел с ограниченной разрядностью происходит их округление. Разность между исходным и округленным значениями представляет собой шум квантования. Уменьшение шума квантования - важная задача уменьшения погрешности преобразования аналогового сигнала. В настоящее время для уменьшения шума квантования увеличивают количество разрядов АЦП. Это ставит ряд дополнительных требований как к самой АЦП, к интерфейсу связи с остальной схемой, так и к микропроцессорным схемам обработки цифрового сигнала: увеличение разрядности микропроцессора или микроконтроллера, увеличение времени преобразования, усложнение принципиальной схемы, существенное удорожание цены на электронные средства, применяющие аналого-цифровое преобразование [1], [2].

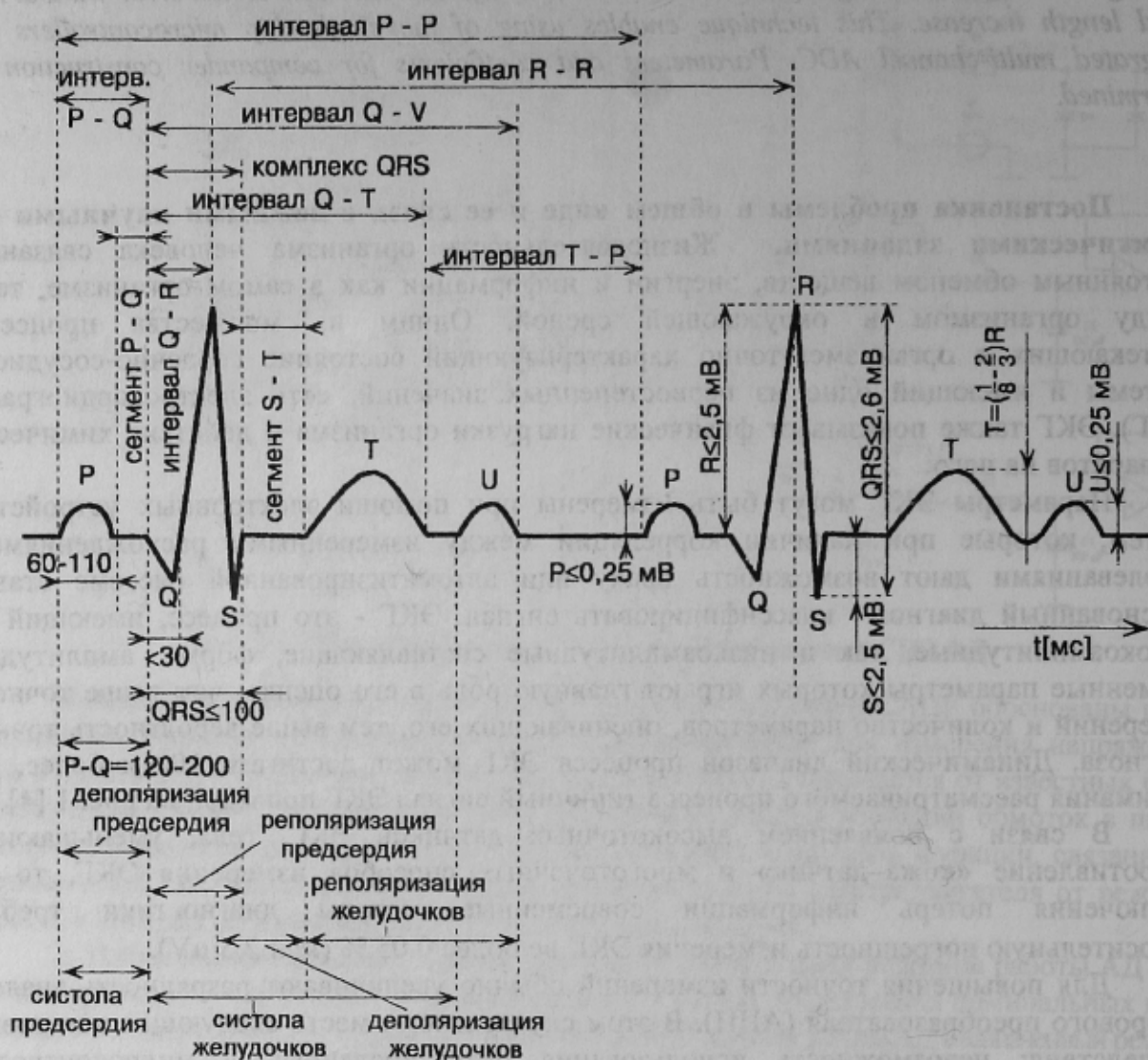


Рис.1. Типовой сигнал электрокардиограммы

Для нахождения пути решения данной проблемы проанализируем вопросы, связанные с шумами квантования и погрешностями за счет округления в цифровых системах обработки сигналов. В [1], [2] и [3] рассмотрено лишь несколько положений, связанных со следствием дискретизации аналогового сигнала - шумом квантования.

Процесс квантования гармонического сигнала $s(t)$ без дискретизации по времени, результат его квантования $s_k(t)$ и возникающий при этом шум $e(t) = s(t) - s_k(t)$ показаны на рис. 2. Очевидно, что значения шума квантования лежат в следующих пределах:

$$-\frac{\Delta}{2} \leq e(t) \leq \frac{\Delta}{2},$$

где Δ — расстояние между соседними уровнями квантования.

В большинстве случаев $e(t)$ - случайный процесс, имеющий равномерное распределение вероятности в указанных пределах. Такой случайный процесс имеет нулевое среднее значение и дисперсию $Dx = \Delta^2/12$.

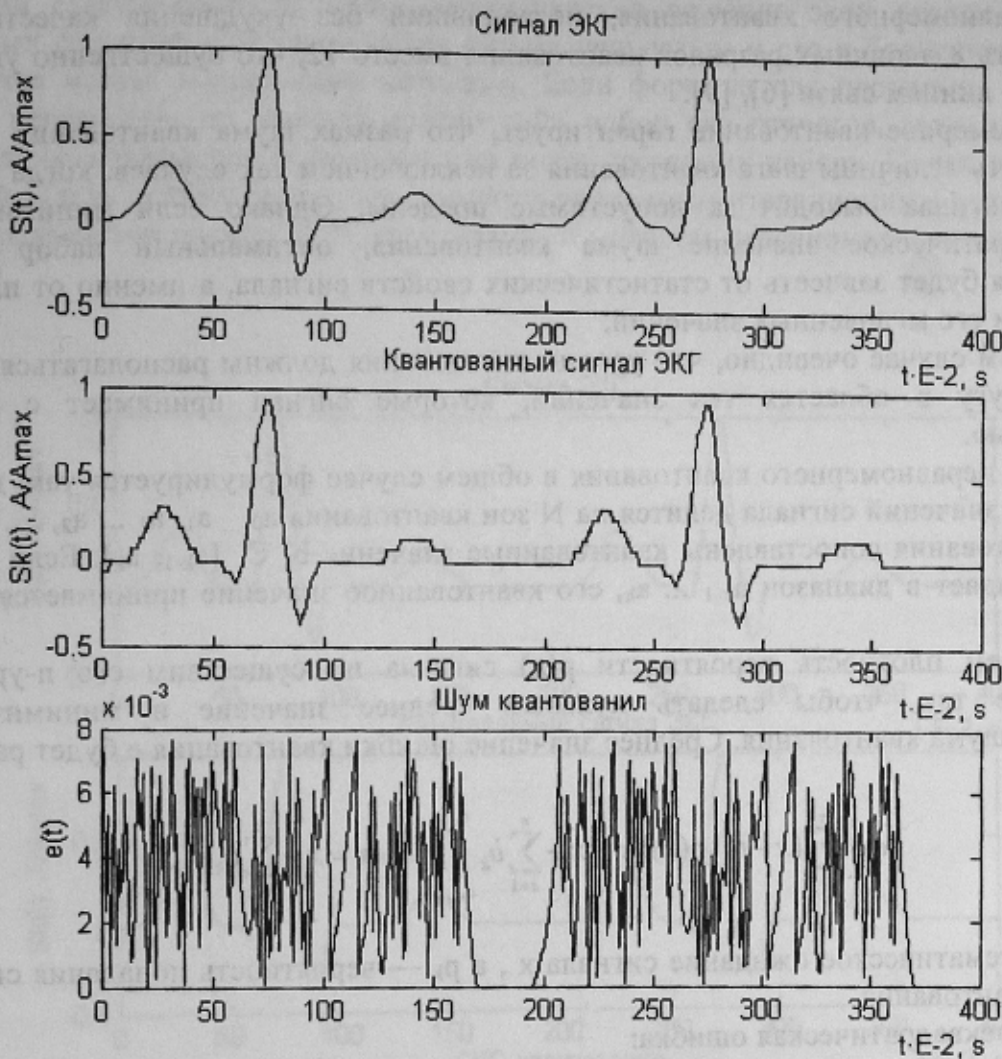


Рис.2. Квантование сигнала ЭКГ равномерным методом.

Искажения, вносимые квантователем, оценивают значением среднеквадратической ошибки. Среднеквадратическую ошибку (СКО) определяют как:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (S(i) - S_q(i))^2}, \quad (1)$$

где: S — сигнал на входе квантователя; S_q - сигнал на выходе квантователя.

Как следует из выражения (1) для снижения ошибки квантования необходимо снижать шаг квантования и соответственно увеличивать число уровней квантования. При

равномерном квантовании ошибка квантования наиболее заметна при малых уровнях сигнала.

Для достижения поставленной точности преобразования процесса ЭКГ при равномерном квантовании количество разрядов должно быть не менее 2000. То есть, применение однокристалльных микроконтроллеров при равномерном квантовании затруднительно [6], [8], [10], [11].

В современных системах используют неравномерное квантование, при котором малые уровни сигнала квантуют с меньшей ошибкой, чем большие. Изменяя шаг квантования пропорционально уровню входного сигнала, отношение сигнал-шум сохраняют постоянным при изменении уровня сигнала [1], [2], [3]. В телефонных сетях связи давно применяется метод неравномерного квантования, позволивший без ухудшения качества связи использовать 8 двоичных разрядов квантования вместо 12, что существенно увеличило трафик по линиям связи [6], [9].

Равномерное квантование гарантирует, что размах шума квантования не будет превосходить величины шага квантования за исключением тех случаев, когда значение входного сигнала выходит за допустимые пределы. Однако если минимизировать среднеквадратическое значение шума квантования, оптимальный набор уровней квантования будет зависеть от статистических свойств сигнала, а именно от плотности вероятности его мгновенных значений.

В этом случае очевидно, что уровни квантования должны располагаться плотнее друг к другу в областях тех значений, которые сигнал принимает с большей вероятностью.

Идея неравномерного квантования в общем случае формулируется так: диапазон возможных значений сигнала делится на N зон квантования $a_0 \dots a_1, a_1 \dots a_2, \dots, a_{n-1} \dots a_n$. Зонам квантования сопоставлены квантованные значения $b_k \in [a_{k-1}, a_k]$. Если входной сигнал попадает в диапазон $a_{k-1} \dots a_k$, его квантованное значение принимается равным b_k .

Примем плотность вероятности $p(x)$ сигнала и осуществим его n -уровневое квантование так, чтобы сделать нулевым среднее значение и минимизировать дисперсию шума квантования. Среднее значение ошибки квантования e будет равно:

$$\bar{e} = \sum_{k=1}^n (x - b_k) p(x) dx = \bar{x} - \sum_{k=1}^n b_k \int_{a_{k-1}}^{a_k} p(x) dx = \bar{x} - \sum_{k=1}^n b_k p_k,$$

где \bar{x} — математическое ожидание сигнала x , а p_k — вероятность попадания сигнала в k -ю зону квантования.

Среднеквадратическая ошибка:

$$\bar{e}^2 = \sum_{k=1}^n \int_{a_{k-1}}^{a_k} (x - b_k)^2 p(x) dx = \bar{x}^2 - 2 \sum_{k=1}^n b_k \int_{a_{k-1}}^{a_k} x p(x) dx + \sum_{k=1}^n b_k^2 \int_{a_{k-1}}^{a_k} p(x) dx.$$

Приравнивание к нулю частных производных этого выражения по a_k и b_k дает следующие соотношения для оптимальных параметров квантования:

$$b_k = \frac{\int_{a_{k-1}}^{a_k} xp(x)dx}{\int_{a_{k-1}}^{a_k} p(x)dx}, \quad a_k = \frac{b_{k-1} + b_k}{2} \quad (2)$$

Выполнение условий (2) автоматически обеспечивает также нулевое среднее значение шума квантования.

При известной плотности вероятности $p(x)$ (2) образует систему нелинейных уравнений относительно a_k и b_k . Аналитическое решение этой системы даже для несложных функций $p(x)$ оказывается весьма непростым и его в большинстве случаев приходится искать численными методами. Если формула для плотности вероятности сигнала неизвестна, но имеется «типичный» набор его отсчетов, можно произвести оптимизацию параметров квантования по этому тестовому набору. Поиск оптимальных значений a_k и b_k в этом случае производится численным итерационным методом [5]. На рис. 3 представлен сигнал ЭКГ, квантованный методом неравномерного квантования и его СКО.

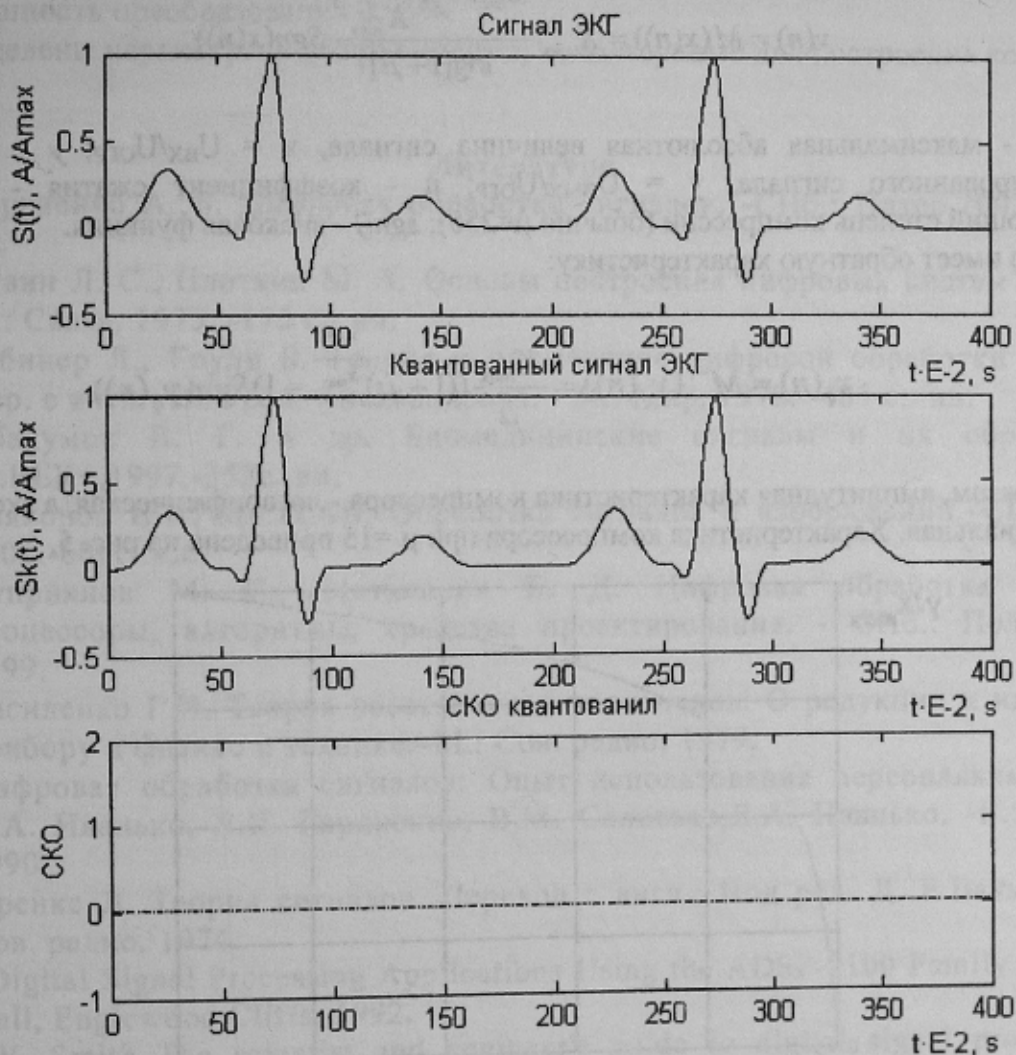


Рис. 3. Квантование сигнала ЭКГ неравномерным методом

Укрупненна структура каналу преобразования, використовуюча метод нерівномірного квантування, показана на рис. 4.

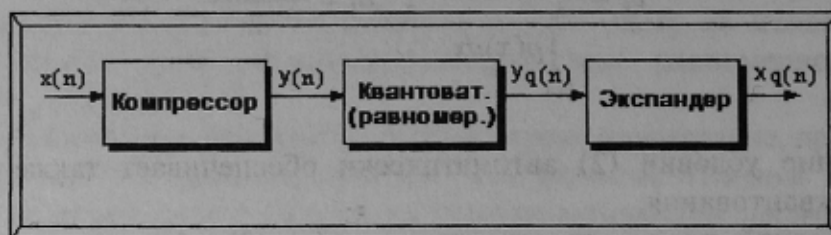


Рис. 4. Канал аналого-цифрового преобразования

Нерівномірне квантування сигналу дозволяє збільшити відношення сигнал/шум квантування для малих амплітуд за рахунок зменшення цього відношення для більших амплітуд сигналу. При цьому зберігається якість і зменшується кількість разрядів АЦП. Реалізують нерівномірне квантування сигналу з допомогою аналогових або цифрових компандерних пристроїв. Звичайно використовуються два закони компандування - μ -закон і A -закон. Амплітудна характеристика компресора для μ -закону визначається вираженням (3).

$$y(n) = M(x(n)) = X_{\max} \frac{\log[1 + \mu \frac{|x(n)|}{X_{\max}}]}{\log[1 + \mu]} \text{Sgn}(x(n)) , \quad (3)$$

де: X_{\max} - максимальна абсолютна величина сигналу, $x = U_{\text{ВХ}}/U_{\text{ОГР}}$; y - амплітуда компресорованого сигналу, $y = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ОГР}}$; μ - коефіцієнт стиснення - параметр, визначаючий ступінь компресії (звичайно $\mu=255$); $\text{sgn}()$ - знакова функція. Експандер має обернену характеристику:

$$x_q(n) = M^{-1}(y_q(n)) = \frac{X_{\max}}{\mu} ((1 + \mu)^{\frac{y_q(n)}{X_{\max}}} - 1) \text{Sgn}(y_q(n)) . \quad (4)$$

Таким чином, амплітудна характеристика компресора - логарифмічна, а експандера - експоненціальна. Характеристика компресора при $\mu = 15$ приведена на рис. 5.

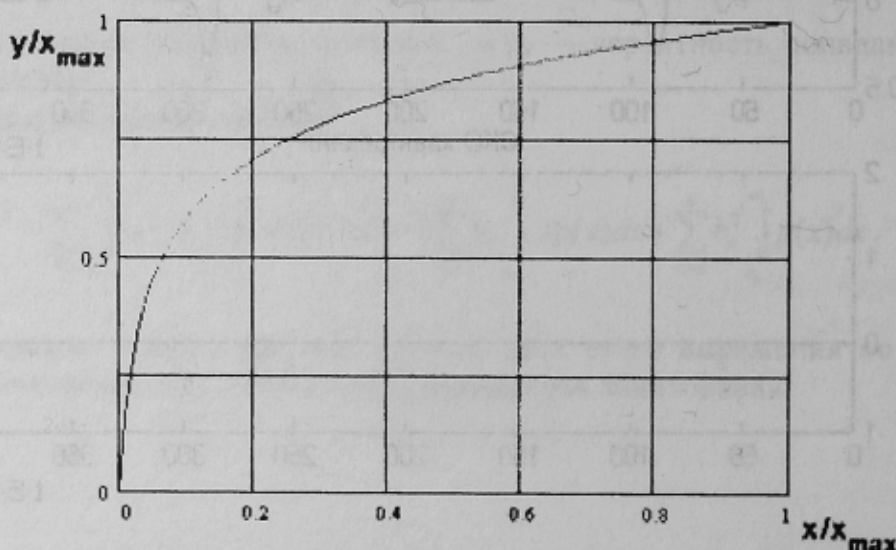


Рис. 5. Характеристика компресора

Отношение максимального шага квантования к минимальному тем заметнее, чем больше коэффициент сжатия. Увеличение коэффициента улучшает отношение сигнал/шум для малых амплитуд и ухудшает для больших амплитуд сигнала. Наилучшие компромиссные результаты квантования процесса ЭКГ с соблюдением установленной погрешности преобразования не более 0.05 % и количества разрядов - 8 получены при $\mu = 15$.

Выводы:

1. Метод равномерного квантования процесса ЭКГ, как показал анализ, с числом разрядов, не превышающим 8, вносит погрешность в виде шума квантования 0,39%, что больше установленных требований. Использование метода равномерного квантования требует уменьшать шум квантования увеличением количества разрядов АЦП до 12. Однокристалльные микроконтроллеры с интегрированным 12-разрядным АЦП в настоящий момент очень дорогостоящи; применение их в датчиках ЭКГ нерационально.
2. Применение неравномерного квантования процесса ЭКГ дает возможность не увеличивать разрядность АЦП более 8, используя для построения измерительных устройств широко распространенные однокристалльные микроконтроллеры с интегрированным многоканальным АЦП. При этом достигается требуемая погрешность преобразования 0,05%.
3. Определены параметры и коэффициенты, используемые для построения компандера.

Литература

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. -СПб.: Питер, 2002. -608 с.: ил.
2. Левин Л. С., Плоткин М. А. Основы построения цифровых систем передачи. М.: Связь, 1975. -176 с.: ил.
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. Пер. с англ.; Под ред. Александрова. - М.: Мир, 1978. -485 с.: ил.
4. Абакумов В. Г. и др. Биомедицинские сигналы и их обработка. - К.: ВЕК+, 1997. -352с., ил.
5. Дьяконов В.П. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. -СПб.: Питер, 2002. -608с.: ил.
6. Куприянов М. С., Матюшкин Б. Д. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. - СПб.: Политехника, 1999.
7. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов: О редукиции к идеальному прибору в физике и технике. -М.: Сов. радио, 1979.
8. Цифровая обработка сигналов: Опыт использования персональных ЭВМ / А.А. Иванько, В.И. Гордиенко, В.М. Соловьев, Я.А. Иванько. -К.: Техника, 1990.
9. Френкс Л. Теория сигналов. Перевод с англ.; Под ред. Д. Е.Вакмана. -М.: Сов. радио, 1974.
10. Digital Signal Processing Applications Using the ADSP-2100 Family. - Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1992.
11. W. Smith The scientist and engineer's guide to digital signal processing. - California Technical Publishing, 1997.