

ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРИКЛАДНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Цыганенко В.Н., Белик А.Г.

Введение

В основе дискретизации непрерывных сигналов лежит принципиальная возможность представления их в виде взвешенных сумм:

$$x(t) = \sum_j a_j f_j(t), \quad (1)$$

где a_j - некоторые коэффициенты или отсчеты, характеризующие исходный сигнал в дискретные моменты времени; $f_j(t)$ - набор элементарных функций, используемых при восстановлении сигнала по его отсчетам.

В общем случае выбор частоты дискретизации будет зависеть также от используемого в (1) вида функции $f_j(t)$ и допустимого уровня погрешностей, возникающих при восстановлении исходного сигнала по его отсчетам [1].

Вышесказанное характерно для случая дискретизации в системах передачи данных с последующим восстановлением исходного сигнала. В измерительно-вычислительных системах (ИВС) и системах интеллектуального анализа оцифрованная информация используется в дальнейших вычислениях. При этом становится очевидным, что, несмотря на полезность принятой методологии в системах связи, к которым метрологические требования не предъявляются, в ИВС она часто не приемлема, поскольку в этой области проявляется ряд её недостатков [2].

Процессы обработки измерительной информации могут носить нелинейный характер, а результатом обработки является не восстановленный первичный сигнал, а результат оценки некоторого обобщенного вычисляемого параметра состояния процесса, явления или технологического оборудования. Таким образом, современные методы и технологии цифровой обработки сигналов, применяемые в системах связи для целей передачи информации, не могут быть применены в системах обработки измерительной информации без применения специальных методов, обеспечивающих точность и достоверность представления выходных данных. Широко распространенные методы «обработки» результатов измерений типа наименьших квадратов, максимальной энтропии и т.п., часто не могут служить основой таких алгоритмов, поскольку не могут гарантировать максимальной точности ИВС как средства измерения [3] вследствие отсутствия семантической связи между цифровыми оценками измеряемых величин и функциональными требованиями объективной истины.

Одним из методов обеспечения максимальной достоверности вычисляемой выходной информации является прикладное функциональное моделирование [4],

Предлагается использование принципов прикладной функциональности при дискретизации измерительных сигналов как механизма оценивания непрерывной величины, заданной на временном интервале. Представлены принципиальные схемы АЦП с реализацией цифровых прикладных функциональных оценок, которые могут быть использованы в широком классе информационных и измерительных систем контроля технологических параметров производственных объектов и управления технологическими процессами.

которое представляет механизм оценивания непрерывной величины, заданной на некотором пространственно-временном интервале.

Постановка задачи

Пусть подлежащая дискретизации непрерывная величина $y(t)$ используется при вычислении некоторой обобщенной аналитической величины:

$$Z = k_p k_a \int_{t_0}^{t_n} G(y(t)) dt \quad (2)$$

где k_p - коэффициент пропорциональности, $0 < k_a \leq 1$ - некоторый коэффициент усреднения. При арифметическом усреднении

$$k_a = \frac{1}{t_n - t_0}.$$

Достоверность вычисляемой величины Z на временном интервале от t_0 до t_n при дискретном представлении сигнала $y(t)$ будет определяться совокупностью интерпретаций $\tilde{Y} = \{y_i\}, i = 1..n$, $n = (t_n - t_0) \Delta t$, полученных с использованием некоторого оператора P : $\tilde{Y} = P[y(t), \Delta t]$. Вид данного оператора должен определяться исходя из применяемого функционального преобразования G .

Пусть требуется выполнить равномерную дискретизацию с шагом Δt . Выбор дискретного значения y_i , соответствующего моменту времени t_i , где $i = 1..n$, будем осуществлять на основании равенства:

$$Z = k_p k_a \Delta t \sum_{i=1}^n G(y_i), \quad (3)$$

т.е. интегральная сумма, вычисляемая по полученной выборке \tilde{Y} дискретных значений, должна точно соответствовать абсолютному значению измеряемой величины Z .

Функциональные оценки дискретного сигнала

Пусть для каждого момента времени t_i вычисляется интегральная оценка:

$$W_i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} G(y(t)) dt, \quad (4)$$

которая используется для определения функционально-го дискретного значения:

$$y_{fi} = G^{-1}\left(\frac{W_i}{\Delta t}\right), \quad (5)$$

обеспечивая, таким образом, выполнение условия (3) вследствие равенств

$$\int_{t_0}^{t_n} G(y(t))dt = \sum_{i=1}^n W_i = \Delta t \sum_{i=1}^n G(y_{fi}).$$

Использование прикладных функциональных оценок (5) в процессах формирования первичной измерительной информации в цифровом виде позволит полностью устранить неопределенность, вызываемую заменой непрерывных значений дискретными, и повысить достоверность измерения вычисляемых величин обобщенного вида (2). При этом устраняются ограничения, накладываемые теоремой Уиттекера-Шеннона-Котельникова на выбираемую частоту дискретизации, что позволит осуществлять ее выбор исходя из технических требований к представлению расчетных данных в измерительно-вычислительных и аналитических системах различного назначения.

Пример. Приведем расчет дискретных значений произвольного сигнала $y = g(t)$, где величина y используется для вычисления величины:

$$Z = R \int_0^T y^2 dt.$$

В данном случае усреднение не применяется, т.е. $k_a = 1, k_p = R$.

Прототипом можно считать вычисление количества электрической энергии, рассеиваемой на сопротивлении R при стабилизированном напряжении по непрерывным показаниям амперметра.

С целью сравнительного анализа проведем оценивание дискретных значений с использованием мгновенных значений $y_i = g(t_i)$, средних значений

$$y_{ci} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(t)dt$$

и прикладных функциональных величин y_{fi} . Прикладная функциональная оценка на i -м шаге дискретизации вычисляемая на основании (5) определяется следующим образом:

$$y_{fi} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{W_i}{\Delta t}}, \text{ где } W_i = R \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} g^2(t)dt.$$

Результаты расчетов для тестовой бигармонической функции:

$$g(t) = 0,4 + 0,25 \cos(2,75t) + 0,04 \cos(9t + 1) \quad (6)$$

при $R = 1, T = 120, \Delta t = 15$ приведены на рис.1. Представленные графики могут быть использованы только для анализа точности самой величины y , в то время как прикладная функциональная величина используется с целью достоверного вычисления значения (2).

Более информативным с точки зрения анализа достоверности вычисляемой оценки Z является представление исследуемого процесса дискретизации для интегральной величины вида

$$z(\tau) = R \int_0^{\tau} f^2(t)dt, \quad Z = z(T).$$

При этом дискретные мгновенные, средние и прикладные функциональные значения будут представлены следующими функциями накопленных сумм:

$$Y_{\tau}(\tau) = R \sum_{j=0}^m y_j^2, \quad Y_{c\tau}(\tau) = R \sum_{j=0}^m y_{cj}^2, \quad Y_{f\tau}(\tau) = R \sum_{j=0}^m y_{fj}^2,$$

где $m = [\tau / \Delta t], y_0 = y_{c0} = y_{f0} = 0$.

Эти зависимости приведены на рис. 2 на примере тестовой функции (6).

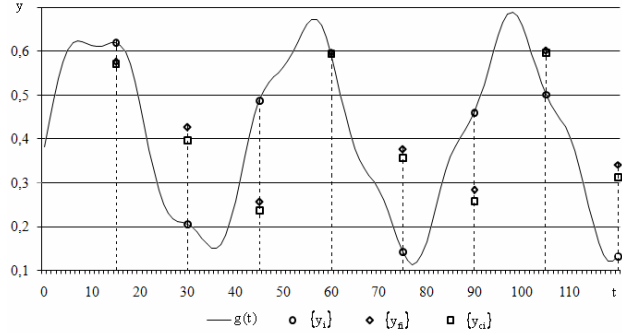


Рис. 1. Дискретизация непрерывного сигнала с мгновенным, средним и прикладным функциональным оцениванием.

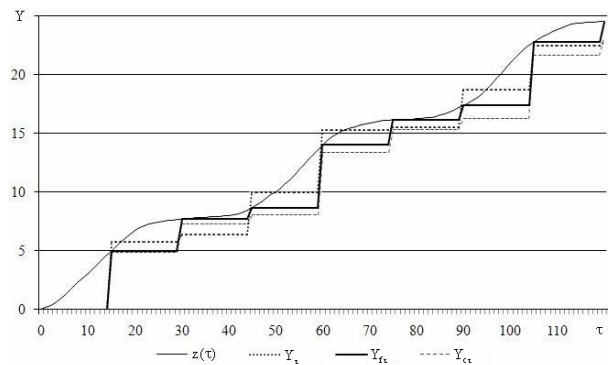


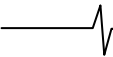
Рис. 2. Представление процесса дискретизации непрерывного сигнала накопленными суммами.

Приведенные расчеты показали, что традиционная равномерная дискретизация по мгновенным значениям y_i приводит к появлению преимущественно случайной погрешности вычисления величины Z . Значение этой погрешности в относительном выражении находится в пределах $\pm 5\%$ при соблюдении условия выбора периода дискретизации согласно теореме Уиттекера-Шеннона-Котельникова. Применение средних оценок y_{ci} характеризуется примерно тем же уровнем погрешностей, которые имеют преимущественно систематический характер.

Представленные на рис. 2 зависимости подтверждают, что применение прикладного функционального оценивания позволяет полностью устранить неопределенность, вызванной заменой непрерывных значений дискретными. Это позволяет существенно повысить методическую точность измерения вычисляемых величин, например при выполнении косвенных измерений.

Прикладные функциональные АЦП

Применение принципов прикладного функционального моделирования, как показано выше, обеспечивает повышение достоверности измерительной информации в случае, когда оценивание исходного сигнала, непре-



ровного во времени или пространстве, рассматривается исходя из прикладного характера вычисляемых результатов. Это определяет необходимость разработки новых устройств преобразования непрерывных сигналов в цифровую форму с использованием этих принципов. Нелинейная функциональная зависимость результата вычислений Z от исходных величин, получаемых в результате измерений, должна учитываться и при проведении процедуры дискретизации, которая, как правило, сочетается с квантованием по уровню в аналого-цифровых преобразователях [5]. Отличием принципов аналого-цифрового преобразования традиционного типа от преобразования с использованием ПФМ, заключается лишь в том, что при дискретизации по времени необходимо обеспечить вычисление оценок, определяемых в общем случае преобразованием (5). Это преобразование может быть реализовано как аппаратно, с использованием аналоговых или цифровых вычислительных устройств, так и программно.

Ключевыми преобразованиями для формирования из непрерывного сигнала последовательности прикладных функциональных оценок в числовом виде являются интегрирование, дискретизация и квантование. Наиболее простым решением для построения АЦП с ПФМ может быть использование интегрирующего АЦП, совмещающего в себе эти преобразования. Структурная схема АЦП с ПФМ на основе интегрирующего АЦП в составе одноканальной измерительной системы представлена на рис. 3.

Исходный непрерывный сигнал $y(t)$ после прохождения вторичного прибора ВП, осуществляющего аналоговое функциональное преобразование $G(y)$, преобразуется интегрирующим АЦП в цифровую последовательность чисел, соответствующих оценкам (4), которые на цифровом вычислителе ВУ1 преобразуются в функциональные оценки (5). Полученные значения обрабатываются основным устройством обработки информации измерительной системы ВУ2, включая окончательное вычисление $G(y_f)$, и (или) накапливаются в устройстве хранения данных УХ.

Другим вариантом построения АЦП с ПФМ является схема с использованием аналогового интегрирующего элемента и неинтегрирующего АЦП (параллельного или последовательного типа), приведенная на рис. 4.

Этот вариант использует аналоговый вычислительный канал, включающий вторичные приборы ВП1 и ВП2, выполняющие прямое G и обратное G^{-1} преобразования, управляемый переключатель и интегратор. В результате одного такта преобразования формируется накапливающийся непрерывный сигнал $y_f(t)$, который в конце такта преобразуется АЦП в дискретизированный цифровой код. Устройство синхронизируется управляющей последовательностью тактовых импульсов ТИ.

Третий тип АЦП с ПФМ основан на применении цифрового канала обработки информации и быстродействующего АЦП, также неинтегрирующего. Структурная схема устройства представлена на рис. 5. В этом преобразователе обработка снимаемых с АЦП цифровых кодов производится программируемыми блоками ВУ1, ВУ2 и сумматором. Управление частотой формирования функциональных оценок Y_f , объемом

обрабатываемых сумматором выборок промежуточных значений, а также выбираемыми видами функций $G(Y)$ и $G^{-1}(W)$ осуществляется устройством управления УУ. Программный способ организации АЦП с ПФМ придает им полную универсальность, обеспечивая возможности управления – как параметрами преобразования, так и его видом.

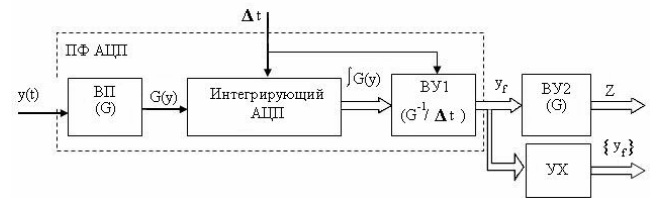


Рис. 3. Одноканальный прикладной функциональный АЦП.

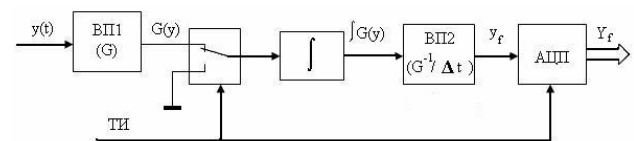


Рис. 4. Прикладной функциональный АЦП с аналоговым интегратором.

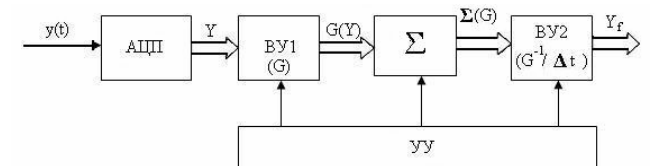


Рис. 5. Универсальный прикладной функциональный АЦП с программной обработкой информации.

Заключение

Применение системы прикладных функциональных операторных преобразований ориентировано в первую очередь на решение задачи выбора значений первичной измеряемой величины при ее дискретизации или передискретизации. Они могут быть использованы в широком классе информационных и измерительных систем контроля технологических параметров производственных объектов и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности.

Литература

1. Басараб М.А., Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Яковлев В.П. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера-Котельникова-Шеннона. – М.: Радиотехника, 2004. – 72 с.
2. Григоренко А.М. Некоторые вопросы теории технической информации. – М.: Юбекс, 1998. – 112 с.
3. Пытьев Ю.П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. – М.: Физматлит, 2004. – 400 с.
4. Чуканов С.Н., Цыганенко В.Н., Белик А.Г. Прикладное функциональное моделирование количественных величин в информационных и измерительных системах // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 1.3. – С. 402 – 408.
5. Ратхор Т.С. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. – М.: Техносфера, 2006. – 392 с.