ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 82, № 2, 2021, с. 121–134

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 82, No. 2, 2021, pp. 121–134

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION MEASUREMENT DEVICES AND SYSTEMS

УДК 621.3.088.7+621.373.52 DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-121-134

Реализация метода адаптивного квантования в измерительных генераторах с цифровым управлением*

М.М. БАБИЧЕВ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

babichev@corp.nstu.ru

Измерительные генераторы с цифровым управлением, в частности, генераторы (калибраторы) фиктивной мощности, применяемые для поверки счетчиков электроэнергии, содержат цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), преобразующий отсчеты формируемого сигнала в напряжение. Отсчеты сигнала хранятся в памяти генератора. В связи с дискретизацией (квантованием) во времени и по уровню отсчетов сигнала в ЦАП возникает методическая погрешность дискретности (шум квантования). Относительное значение шума квантования зависит от амплитуды формируемого сигнала (сравнительно опорного напряжения ЦАП): чем больше амплитуда, тем больше старших разрядов ЦАП принимает участие в процессе преобразования и тем меньше относительное значение шума. В генераторах, где амплитуда выходного сигнала меняется в широких пределах (большой динамический диапазон) путем изменения цифровых отсчетов сигнала, шум квантования при малых амплитудах сигнала может стать недопустимо большим. Такая ситуация может наблюдаться в генераторе фиктивной мощности. В нем выходной ток меняется в сотни раз, поскольку погрешность поверяемого счетчика электроэнергии нормируется в широком диапазоне протекающего через него тока.

Предлагается новый алгоритм формирования отсчетов синусоидального сигнала в измерительных генераторах с цифровым управлением, называемый адаптивным квантованием. Адаптивное квантование способно существенно улучшить один из выбранных параметров сигнала (так называемый критерий оптимальности), например, снизить погрешность воспроизведения первой гармоники или уменьшить значение высших гармонических составляющих. Кроме того, предлагаемый алгоритм уменьшает зависимость выбранного параметра от частоты отсчетов и от количества используемых разрядов ЦАП, что позволяет расширить динамический диапазон генератора (в канале тока) без использования дополнительных усилителей с программируемым коэффициентом усиления. Исследования, проведенные при помощи компьютерного моделирования, подтвердили работоспособность алгоритма адаптивного квантования.

* *Статья получена 24 декабря 2020 г.*

Ключевые слова: счетчик электроэнергии, калибратор фиктивной мощности, измерительный генератор, цифро-аналоговый преобразователь, погрешность квантования, адаптивное квантование, критерий оптимальности, гармоники, коэффициент гармоник, динамический диапазон

ВВЕДЕНИЕ

Современные статические (т. е. электронные, а не индукционные) счетчики электрической энергии классов точности 0.5S и 0.2S работают в широком диапазоне изменения тока, протекающего через них, а соответственно, и в широком диапазоне мощности нагрузки, включенной на выходе счетчика. Согласно ГОСТу, основная инструментальная погрешность счетчика нормируется при изменении тока от $0.01I_{\text{ном}}$ до $I_{\text{макс}}$ [1, с. 4]. С учетом того, что номинальный ток $I_{\text{ном}}$ обычно выбирается равным 1/2 … 2/3 максимального тока $I_{\text{макс}}$, кратность тока, протекающего через счетчик, достигает 200. Также ГОСТ задает стартовый ток, равный $0.001I_{\text{ном}}$ [1, с. 7], это повышает кратность тока счетчика до 2000.

Для поверки счетчиков электрической энергии используют поверочные установки, в состав которых входят измерительные генераторы – калибраторы фиктивной мощности (power calibrators) [2, с. 9], далее ГФМ. ГФМ состоит из двух синхронизированных каналов: источника переменного напряжения и источника переменного тока. В качестве примера уже существующего и широко использующегося на производстве ГФМ можно привести КФМ-06 [3]. ГФМ должны обеспечивать изменение выходного тока в широких пределах, соответствующих приведенной выше кратности тока счетчика.

В генераторах сигналов с цифровым управлением (генераторах сигналов произвольной формы, или AWG [12, с. 17]) применяются цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), преобразующие цифровые коды, записанные в памяти генератора, в отсчеты аналогового сигнала, который затем усиливается / ослабляется, фильтруется и подается на выход генератора. Увеличить динамический диапазон генератора можно изменением кодов, подаваемых на вход ЦАП (чтобы уменьшить сигнал в 10 раз, уменьшают значение цифрового кода в 10 раз, округляя его, если нужно), либо управлением усилителями с программируемым коэффициентом усиления (PGA) [15], переключая обмотки в выходных трансформаторах тока / напряжения, и иными способами.

Способ с изменением кодов проще в реализации и позволяет упростить и удешевить схему генератора. Однако в этом случае при уменьшении выходного сигнала снижается разрешающая способность ЦАП (уменьшается количество двоичных разрядов, работающих в процессе преобразования), что увеличивает относительное значение шума квантования в выходном сигнале. Так, при шести двоичных разрядах младший разряд имеет значение 1.56 % от полной шкалы ЦАП, а при 16 разрядах – только 0.0015 % [4, p. 2.13]. Прочие способы усложняют конструкцию ГФМ и вносят дополнительные инструментальные погрешности за счет PGA или ключей. В настоящей статье рассматривается вопрос уменьшения шума квантования в широком диапазоне выходных сигналов при формировании сигнала с помощью ЦАП без использования PGA или переключаемых обмоток.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сигнал на выходе ЦАП является ступенчатой функцией, имеющей конечное число уровней напряжения (уровней квантов). Переход от одного уровня к другому осуществляется в фиксированные (дискретные) моменты времени. Таким образом, сигнал на выходе ЦАП подвергается округлению и по уровню, и по времени.

В отличие от непрерывного («аналогового») сигнала, получаемый с помощью ЦАП сигнал содержит погрешность квантования, которая по своему происхождению является методической, то есть зависит не от инструментальных погрешностей используемого ЦАП, а от его количества двоичных разрядов, частоты отсчетов и от используемого способа квантования (округления) отсчетов выходного сигнала. Как было обнаружено в ходе моделирования процесса цифро-аналогового преобразования кодов, описывающих синусоидальный сигнал, погрешность квантования также существенно меняется при изменении количества отсчетов на период формируемого сигнала даже на единицу [9].

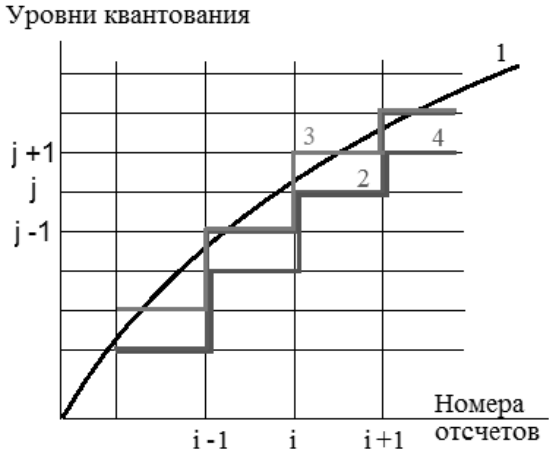


Рис. 1. Иллюстрация основных способов округления сигнала по уровню

Fig. 1. Illustration of the main methods of signal quantization by level

В ЦАП, по аналогии с АЦП, могут использоваться три способа [5] округления по напряжению отсчетов выходного сигнала (рис. 1): до соседних верхних (график *3*), до соседних нижних (график *4*) и до ближайших (график *2*) уровней квантования, относящихся к значениям сигнала без округления *1*, который нужно получить в идеале. Поскольку при округлении до ближайших уровней шум квантования минимален (не превышает по модулю 1/2 уровня кванта), этот способ округления в настоящее время используется чаще всего. Он взят за основу предлагаемого в данной статье алгоритма.

При цифро-аналоговом преобразовании кодов сигнала, форма которого заранее неизвестна (например, аудиосигнала) ЦАП просто преобразует имеющиеся цифровые коды сигнала в соответствующие им уровни аналогового сигнала, осуществляя округление сигнала единственным по сути доступным

способом. Однако в цифровых генераторах, формирующих известные сигналы (например, синусоиду заданной амплитуды и частоты), создание кодов генерируемого сигнала и запись их в память генератора осуществляются заранее. Это позволяет округлять формируемый сигнал разными способами, то есть приводить каждый код формируемого сигнала к любому уровню кванта (относительно уровня идеального неокругленного сигнала): к верхнему $j + 1$, к нижнему j, к ближайшему j (для i-го отсчета на рис. 1), а возможны и другие варианты. Руководствуясь некоторыми соображениями, о них речь пойдет ниже. Назовем такой рациональный процесс априорного формирования кодов сигнала, впоследствии подаваемых на ЦАП, **адаптивным квантованием** сигнала.

Следует заметить, что термин «адаптивное квантование» уже давно известен. Под ним обычно понимают квантование в АЦП с переменным шагом по времени или по уровню (нелинейное квантование). Например, если известно, что преобразуемый сигнал большую часть времени имеет уровень, находящийся в определенном достаточно узком диапазоне (плотность вероятностей сигнала максимальна в диапазоне), то в этом диапазоне сетка уровней квантов может быть более частой, чем в других диапазонах. Таким образом, без увеличения количества двоичных разрядов АЦП / ЦАП можно более точно описывать форму сигнала, снизив шум квантования, либо уменьшить количество передаваемых (сохраняемых) данных. Примеры применения адаптивного квантования: измерения в области технической защиты информации, касающиеся разборчивости речевого сигнала [6], сжатие изображений, получаемых при радиолокации [13], сжатие аудиосигналов [14].

В настоящей статье под адаптивным квантованием подразумевается только цифро-аналоговое преобразование с постоянным шагом по времени и по уровню кодов заранее известного сигнала. Эти коды до подачи в ЦАП подвергаются модификации (адаптации или адаптивному квантованию) с той целью, чтобы аналоговый сигнал на выходе ЦАП с модифицированными кодами был лучше (по некоторому критерию) сигнала с немодифицированными кодами. При адаптации кодов выходного сигнала алгоритм адаптивного квантования допускает смещение отдельных отсчетов выходного сигнала на целое число уровней квантования вверх или вниз относительно уровней отсчетов немодифицированного (неадаптированного) сигнала.

Возникает вопрос: может ли адаптивное квантование быть полезным на практике? Чтобы дать на него ответ, зададимся критерием оптимальности квантования. Это может быть любой измеряемый и выражаемый в числовой форме параметр формируемого сигнала, который нужно оптимизировать. Для генератора синусоидального сигнала критерием оптимальности может быть погрешность воспроизведения основной (первой) гармоники, значение N-й высшей гармонической составляющей сигнала ($N \geq 2$), среднее квадратическое значение нескольких высших гармонических составляющих и так далее. В случае, если критерием выбрана погрешность основной гармоники или значение высшей гармонической составляющей, улучшение критерия оптимальности означает уменьшение модуля его значения.

Далее следует провести эксперимент и определить, насколько адаптивное квантование способно улучшить данный критерий. Поскольку шум квантования является методической погрешностью, целесообразно экспериментировать с моделью «идеального ЦАП», который не будет искажать резуль-

таты эксперимента своими инструментальными погрешностями. Таким образом, для данных исследований целесообразно использовать компьютерное моделирование.

2. АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО КВАНТОВАНИЯ

Алгоритм адаптивного квантования сигнала описан в патенте [7]. Он состоит из нескольких последовательных этапов.

1. Производится округление отсчетов генерируемого сигнала до ближайших уровней квантования (график *2* на рис. 1), и такой сигнал считается исходным.

2. Вычисляется и запоминается значение критерия оптимальности исходного сигнала. Переходят к произвольному отсчету сигнала i, с которого начнется оптимизация (поскольку сигнал периодический, начинать оптимизацию можно с любого его отсчета).

3. На текущем отсчете сигнала направление округления изменяют на противоположное. Это значит, что если на i-м отсчете сигнала график *2* был округлен до уровня j и был выше графика *1*, то устанавливается уровень $j - 1$; если же график *2* был ниже графика *1*, то устанавливается уровень $j + 1$.

4. Снова вычисляют значение критерия оптимальности сигнала. Если полученное значение лучше ранее запомненного, то изменение направления округления сигнала сохраняют, значение полученного критерия оптимальности также запоминают. Если же полученный критерий не лучше исходного, направление округления текущего отсчета сигнала и значение критерия оптимальности оставляют прежними.

5. Переходят к следующему отсчету сигнала, повторяют п. 3 и 4 (если дошли до последнего отсчета сигнала, то переходят к первому), и так далее, вплоть до того момента, когда окажется, что любое изменение направления округления любого отсчета сигнала не улучшает значение критерия оптимальности. На этом адаптивное квантование сигнала завершается.

Алгоритм адаптивного квантования, по сути, можно отнести к генетическим алгоритмам оптимизации [8]. Поиск оптимального варианта осуществляется путем перебора на каждом шагу нескольких возможных вариантов («мутаций») сигнала и «селекцией» наилучшего варианта. Далее «гены» выбранного варианта сигнала сохраняются и используются для формирования дальнейших «мутаций», из которых снова осуществляется «селекция», и так до того момента, когда любые последующие «мутации» будут получаться не лучше предыдущих. На этом процесс завершают.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложенный способ адаптивного квантования реализован в виде компьютерной модели идеального N-разрядного ЦАП, формирующего периодический дискретный сигнал, имеющий M отсчетов на период, в котором шум квантования определяется только процессами дискретизации и квантования [4, p. 2.37], а не инструментальными погрешностями преобразователя.

На начальном этапе моделирования процесса адаптивного квантования был сформирован дискретный синусоидальный сигнал с малым, для наглядности, количеством уровней квантов, соответствующим 4-разрядному (включая знаковый разряд) ЦАП. Количество отсчетов на период сигнала также невелико – 16 (рис. 2). Белые столбцы на графике – отсчеты сигнала, соответствующие кодам, рассчитанным так, чтобы они были ближе всего к соответствующим отсчетам идеальной неокругленной синусоиды (округление до ближайших уровней квантов), т. е. исходный сигнал. Черные столбцы – отсчеты исходного сигнала, подвергнутого адаптивному квантованию по такому критерию оптимальности, как минимум погрешности основной гармоники. Видно, что в процессе адаптации программа модифицировала отсчеты номер 3, 4, 8 и 16, поменяв направление округления как в большую, так и в меньшую стороны.

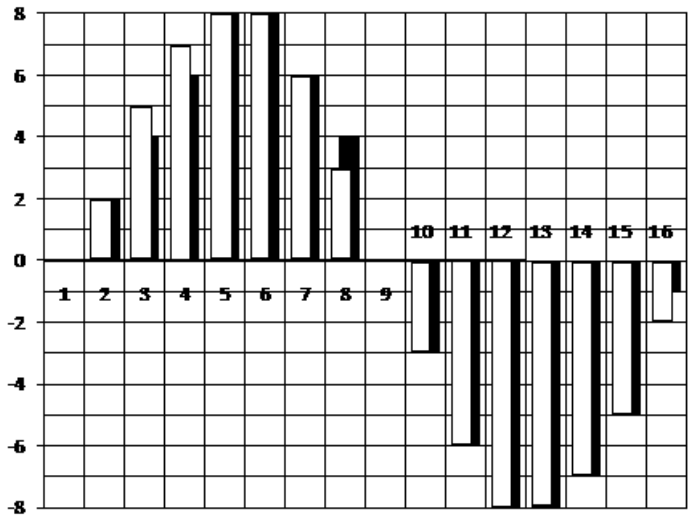
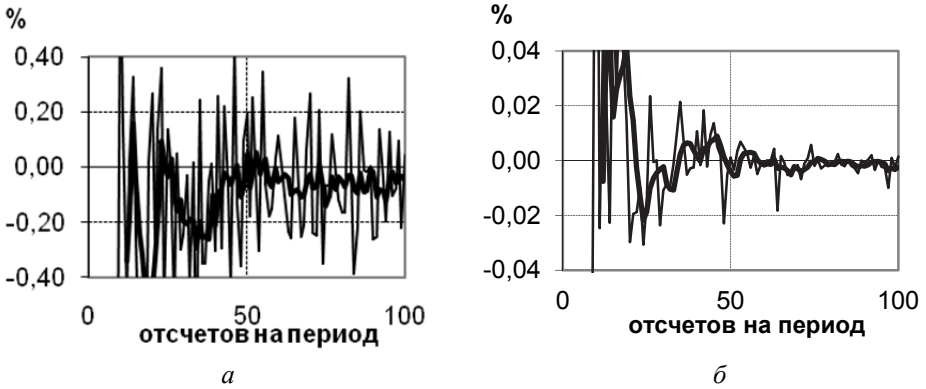


Рис. 2. Пример реализации алгоритма адаптивного квантования

Fig. 2. An example of the implementation of the adaptive quantization algorithm

Многочисленные эксперименты с программной моделью алгоритма адаптивного квантования показали, что «адаптация» сигнала обычно требует 2-3 перебора всех отсчетов сигнала, но в некоторых случаях процесс оптимизации затягивается до пяти проходов.

Рисунок 3 показывает зависимость относительной погрешности воспроизведения основной гармоники (выраженной в процентах от значения основной гармоники) от числа дискретных отсчетов на периоде для сигнала, формируемого идеальным ЦАП с шестью двоичными разрядами. При этом график на рис. 3, *а* показывает кривую погрешности для сигнала, сформированного из кодов, рассчитанных с округлением до ближайших уровней квантов. График на рис. 3, *б* демонстрирует тот же результат для сигнала, сформированного путем адаптивного квантования по критерию погрешности основной гармоники. Для выявления интегральной зависимости погрешностей от количества отсчетов на графиках сформирована жирная линия – скользящее среднее по пяти отсчетам.



а *б*

Рис. 3. Адаптивное квантование с оптимизацией погрешности основной гармоники

Fig. 3. Adaptive quantization with optimization of the fundamental error

Следует обратить внимание, что вертикальный масштаб на рис. 3, *б* в 10 раз меньше, чем на рис. 3, *а*. Без использования адаптивного квантования (рис. 3, *а*) погрешность основной гармоники сильно зависит от частоты дискретизации сигнала. Малейшее изменение частоты формируемого сигнала за счет изменения количества отсчетов на период сигнала (при неизменном шаге дискретизации), например с 47 до 48, зачастую вызывает существенное изменение погрешности, в том числе смену ее знака, как было отмечено еще в работе [9]. Используя метод адаптивного квантования, можно значительно уменьшить амплитуду колебаний графика погрешности, как видно на рис. 3, *б*.

Вторым важным преимуществом адаптивного квантования является то, что оно снижает погрешность воспроизведения основной гармоники сигнала более чем на порядок при условии, что отсчетов на период не менее 25 – эффективность алгоритма повышается с ростом количества отсчетов. Это можно объяснить тем, что при большем количестве отсчетов увеличивается количество вариантов, которые алгоритм может перебирать в процессе оптимизации.

Было обнаружено, что многократное уменьшение погрешности воспроизведения основной гармоники может достигаться ценой ухудшения некоторых других параметров сигнала, прежде всего гармонических составляющих. На рис. 4 показана часть спектра (гармоники со 2-й по 10-ю) двух сигналов, сформированных из кодов, округленных до ближайших уровней квантов (косые штриховые линии) и адаптированных согласно критерию погрешности основной гармоники (горизонтальные штриховые линии). Такая форма спектра соответствует ЦАП с шестью разрядами, частота дискретизации соответствует 50 точкам на период синусоиды. Масштаб вертикальной оси на рис. 4 соответствует процентам от значения основной гармоники.

В некоторых случаях бывает целесообразно уменьшить значение одной из высших гармонических составляющих сигнала на низкой частоте (2-я, 3-я, 5-я, 7-я, 9-я гармоники), если она относительно велика, что позволит упростить фильтрацию сигнала с выхода ЦАП и снизить коэффициент гармоник сигнала на выходе генератора [10]. Коэффициент гармоник в измерительных генераторах нормирован, в том числе в генераторах фиктивной мощности,

используемых для поверки счетчиков электрической энергии, где он не должен превышать 5 % [2, с. 9]. На рис. 5 показано применение адаптивного квантования, для которого в качестве критерия оптимальности выбрано значение 3-й гармоники. По вертикальной оси – значение 3-й гармоники сигнала (в процентах от амплитуды 1-й гармоники), ЦАП 12-разрядный. На рис. 5, *а* показано округление до ближайшего уровня, на рис. 5, *б* – адаптивное.

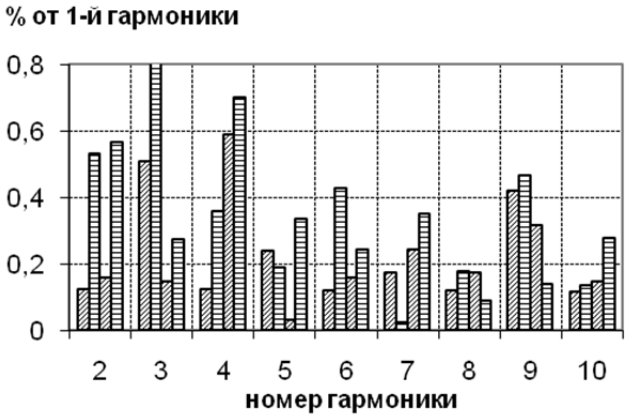
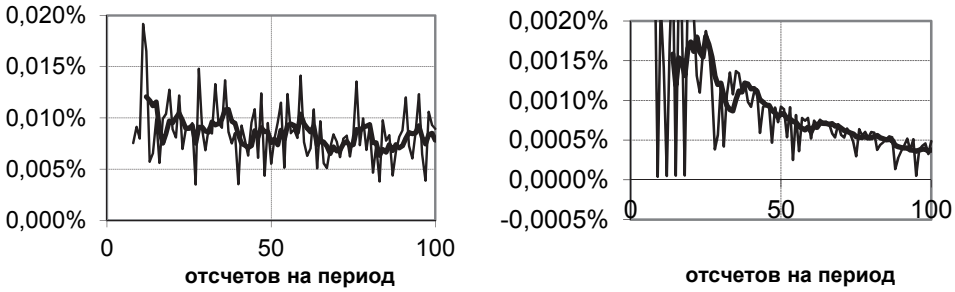


Рис. 4. Сравнение гармонических составляющих двух сигналов: обычного и адаптированного по минимуму погрешности 1-й гармоники

Fig. 4. Comparison of harmonic components of two signals: conventional and adapted for the minimum error of the fundamental



а *б*

Рис. 5. Адаптивное квантование с оптимизацией 3-й гармоники

Fig. 5. Adaptive quantization with the 3rd harmonic optimization

На рис. 6 показана часть спектра синусоиды, воспроизводимой ЦАП при округлении отсчетов до ближайших уровней (наклонная штриховка) и с адаптацией (горизонтальная штриховка) по минимуму 3-й гармоники. ЦАП имеет 12 разрядов, период синусоиды содержит 55 отсчетов. Ценой увеличения 2-й, 4-й, 5-й… гармоник достигается уменьшение значения 3-й гармоники в несколько раз.

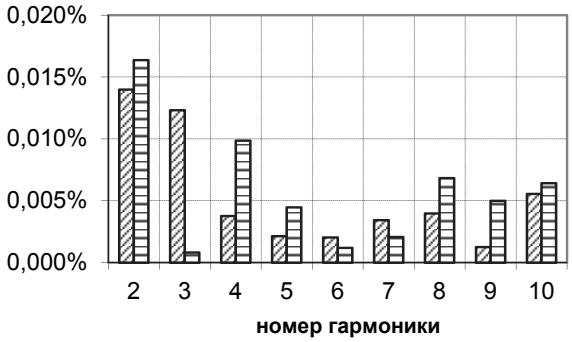


Рис. 6. Сравнение гармонических составляющих двух сигналов: обычного и адаптированного по минимуму 3-й гармоники

Fig. 6. Comparison of harmonic components of two signals: conventional and adapted by the minimum of the 3rd harmonic

На рис. 7 показано отношение между значениями 3-й гармоники без адаптивного квантования и с использованием адаптивного квантования, подавляющего эту гармонику. Этот пример относится к 12-разрядному ЦАП. Для лучшего понимания закономерностей на графике приведено скользящее среднее (по пяти точкам) для отношения – жирная кривая. Можно сделать вывод, что подавление 3-й гармоники улучшается с ростом количества отсчетов на период. Ослабление 3-й гармоники не менее четырех раз при 40 отсчетах на период и не менее восьми раз при 80 и более отсчетах на период.

Рис. 7. Уменьшение значения 3-й гармоники при адаптации сигнала (критерий оптимальности – 3-я гармоника)

Fig. 7. Reduction the value of the 3rd harmonic decreases by adaptive quantization (the criterion of optimality is the 3rd harmonic)

Метод адаптивного квантования позволяет также уменьшать одновременно две или три гармоники сигнала. Так, на рис. 8 изображен пример (55 отсчетов на период, 9 разрядов ЦАП) спектров синусоиды, квантованной до ближайшего уровня (наклонная штриховка), и адаптивно с подавлением 2-й

и 3-й гармоник (горизонтальная штриховка). В качестве критерия оптимальности использовался минимум корня из суммы квадратов 2-й и 3-й гармоник сигнала.

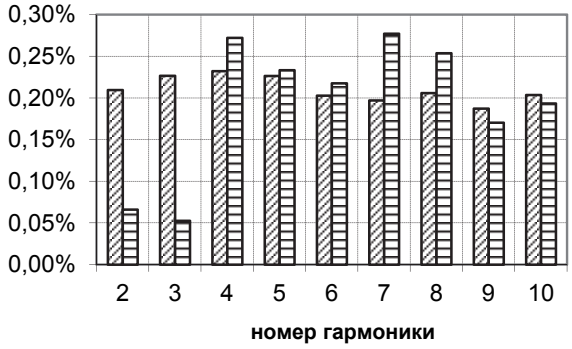


Рис. 8. Сравнение гармонических составляющих двух сигналов: обычного и адаптированного по минимуму корня из суммы квадратов 2-й и 3-й гармоник

Fig. 8. Comparison of harmonic components of two signals: normal and adapted by the minimum of the root of sum of squares of the 2nd and 3rd harmonics

На рис. 9 показано, во сколько раз в зависимости от числа отсчетов на период сигнала метод адаптивного квантования минимизирует более сложный критерий оптимальности – корень из суммы квадратов двух гармоник сигнала (2-й и 3-й). Было обнаружено, что одновременное подавление двух гармоник производится с меньшей эффективностью, чем ослабление одной гармоники. Однако при 60 и более отсчетах на период всё же удается достичь суммарного подавления двух гармоник в 4–8 раз, тогда как при меньшем количестве отсчетов на период существенного ослабления двух гармоник не получается.

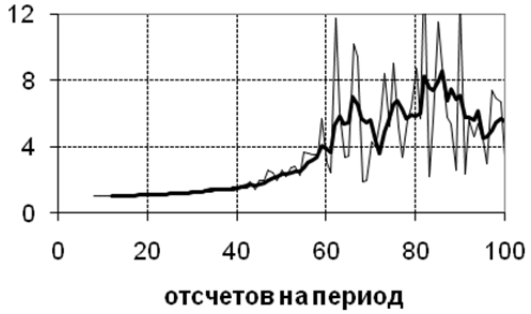


Рис. 9. Уменьшение корня из суммы квадратов 2-й и 3-й гармоник при адаптации сигнала (критерий оптимальности – 2-я и 3-я гармоники)

Fig. 9. Reduction the root of the sum of the squares of the 2nd and 3rd harmonics decreases when adapting the signal (the optimality criterion is the 2nd and 3rd harmonics)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый алгоритм адаптивного квантования, описанный в виде способа округления кодов функции [7] и испытанный на компьютерной модели, применим для формирования заранее известных периодических сигналов в генераторах произвольных сигналов, например, генераторах фиктивной мощности с цифровым управлением (на основе ЦАП). Метод адаптивного квантования с последовательным подбором уровней квантов на каждом отсчете сигнала улучшает так называемый критерий оптимальности (оптимизируемый параметр). В некоторых случаях критерий улучшается на порядок и более. После этого коды «адаптированного» сигнала записываются в память генератора и в дальнейшем им воспроизводятся.

В качестве критериев оптимальности можно привести минимум погрешности основной гармоники синусоиды либо минимум одной или двух гармонических составляющих синусоиды по выбору. Минимизация 2-й, 3-й, 4-й, 5-й… гармонических составляющих позволяет улучшить фильтрацию сигнала на выходе ЦАП простым ФНЧ низкого порядка (использование фильтров высокого порядка, вносящих значительные амплитудные и фазовые погрешности, в генераторах фиктивной мощности нежелательно).

Следует отметить, что улучшение выбранного критерия оптимальности неизбежно сопровождается ухудшением некоторых иных свойств сигнала. Так, адаптивное квантование отсчетов синусоиды для 10-разрядного ЦАП позволяет в несколько раз уменьшить относительную погрешность воспроизведения основной гармоники (при условии, что на один период синусоиды приходится не менее 40 отсчетов сигнала) ценой некоторого увеличения коэффициента гармоник.

Дополнительным эффектом от применения адаптивного квантования в генераторах сигналов является уменьшение зависимости оптимизируемого параметра от числа дискретных отсчетов на период сигнала. Это позволяет менять в небольших пределах частоту формируемого сигнала (либо частоту дискретизации сигнала той же частоты) без значительного ухудшения оптимизируемого параметра.

Все это позволяет, в частности, расширить диапазон амплитуд выходного сигнала генератора, обеспечиваемый только сменой кодов в ЦАП, до 1000 без использования управляемых усилителей PGA. Для этого нужно оптимизировать отсчеты синусоиды, как минимум, для 6-разрядного ЦАП, что будет соответствовать минимальному уровню сигнала. При этом будут задействованы 6 младших разрядов 16-разрядного ЦАП. Максимальный (в 1000 раз больше) уровень сигнала при этом будет получаться при использовании всех 16 разрядов ЦАП ($2^{10} = 1024 \approx 1000$), а такая разрядность легко достижима на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31819.22–2012. Статические счетчики активной энергии классов точности 0,2 S и 0,5 S. – М.: Стандартинформ, 2013. – 15 с.

2. ГОСТ 8.584–2004. Счетчики статические активной электрической энергии переменного тока. Методика поверки: введ. 2005–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 14 с.

3. *Пасынков Ю.А., Савиных М.А.* Технологический контроль метрологических характеристик счетчиков электроэнергии на производстве // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 177–188. – DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188.

4. Analog-digital conversion / ed. by W. Kester. – Analog Devices Inc., 2004. – ISBN 0-916550-27-3.

5. Основы метрологии и электрические измерения: учебник для вузов / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; под ред. Е.М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

6. *Продеус А.Н., Дидковский В.С., Гавриленко А.В.* Расчет и измерение разборчивости речи при малых отношениях сигнал–шум. Ч. 1. Корректное измерение функции распределения речевого сигнала // Электроника и связь. – 2007. – № S1: Тематический выпуск «Проблемы электроники». – С. 137–141.

7. Патент № 2420799 Российская Федерация, МПК G 06 F 17/7. Способ округления кодов функции / М.М. Бабичев, Ю.А. Пасынков. – Заявл. 27.05.2009; опубл. 10.06.2011.

8. *Mitchell M.* An introduction to genetic algorithm. – Cambridge, MA: MIT Press, 1996. – 205 p.

9. *Babichev M.M., Pasynkov Yu.A.* Error estimators of discreteness while gaging the RMS of periodic signals // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014): труды XII международной конференции, 2–4 октября 2014 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 1. – С. 286–289.

10. *Вакулин А.А., Беляков В.В., Бабичев М.М.* Улучшение фильтрации синусоидального сигнала на выходе измерительного генератора путем выбора критерия оптимальности адаптивного квантования // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 3–7 декабря 2018 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 1. – С. 10–12. – ISBN 978-5-7782-3734-6.

11. *Babichev M.M., Vakulin A.A.* Features of the application of adaptive quantization in generators with digital control // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018): труды 14 международной конференции, Новосибирск, 2–6 октября 2018 г. – Новосибирск, 2018. – Т. 1, ч. 2. – С. 18–21. – ISBN 978-5-7782-3614-1.

12. Генераторы сигналов от А до Я: учебное пособие. – Tectronix, 2008. – URL: https://doc.platan.ru/docs/pdf/generatory-signalov.pdf (дата обращения: 12.12.2020).

13. *Нестеров И.М.* Влияние сжатия данных на качество радиолокационных изображений // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 8. – URL: http://jre.cplire.ru/jre/aug16/5/text.html (дата обращения: 25.11.2020).

14. *Поров А.В.* Адаптивное скалярное квантование спектральных коэффициентов для систем сжатия аудиосигналов: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01 / А.В. Поров. – СПб., 2009. – 136 с.

15. *Шерри А*. Усилитель с программируемым коэффициентом усиления (PGA) в Сигма-Дельта АЦП: AN-610R. Руководство по применению. – 2011. – URL: https://www.analog.com/media/ru/technical-documentation/application-notes/41175119575886AN610R.pdf (дата обращения: 10.11.2020).

Бабичев Михаил Михайлович, старший преподаватель кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – измерения интегральных характеристик периодических сигналов, измерения в электроэнергетике, способы уменьшения погрешности дискретности в генераторах фиктивной мощности. Является автором 27 публикаций, включая 2 учебных пособия, одну статью в ведущих научных отечественных и зарубежных издательствах; 4 публикации, входящие в систему Scopus, одного патента на способ. E-mail: babichev@corp.nstu.ru

Babichev Mikhail M., lecturer at the Department of Information Security in the Novosibirsk State Technical University. The main areas of his scientific interests are measurements of integral characteristics of periodic signals, measurements in the electric power industry, and methods of reducing the discreteness error in power calibrators. He is the author of 27 publications, including 5 papers in leading scientific domestic and foreign journals among them 4 publications in the Scopus data base system, as well as 2 textbooks and 1 patent for the method. E-mail: babichev@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-121-134

Implementation of the adaptive quantization method in digitally controlled measuring generators *

M.M. BABICHEV

Novosibirsk State Tehcnical University, 20 K Marx Prospekt, Novosibirsk, 630119, Russian Federation

babichev@corp.nstu.ru

Abstract

Measuring generators with digital control, in particular power calibrators, used to calibrate electricity meters, contain a digital-to-analog converter (DAC) that converts codes of the generated signal into voltage. Signal codes are stored in the generator memory. A truncation discreteness error (quantization noise) arises caused by sampling (quantization) in time and by the level of signal samples in the DAC. A relative value of the quantization noise depends on the amplitude of the generated signal (relative to the reference voltage of the DAC): the larger the amplitude, the more significant bits of the DAC are involved in the conversion process, and the less the relative value of the noise. In generators, where the amplitude of the output signal changes over a wide range (high dynamic range) by changing the digital samples of the signal, the quantization noise at low signal amplitudes can become unacceptably large. This situation occurs in power calibrators where the output current changes hundreds of times since the error of the verified electricity meter is normalized in a wide range of current flowing through it.

A new algorithm for generating samples of a sinusoidal signal in measuring generators with digital control called adaptive quantization is proposed. Adaptive quantization can significantly improve one of the selected signal parameters (the so-called optimality criterion), for example, reduce the error in reproduction of the first harmonic, or reduce the value of higher harmonic components. In addition, the proposed algorithm reduces the dependence of the selected parameter on the sampling frequency and on the number of DAC bits used, which makes it possible to expand the dynamic range of the generator (in the current channel) without using additional amplifiers with programmable gain (PGA). Studies carried out using computer simulation have confirmed the efficiency of the adaptive quantization algorithm.

Keywords: electricity meter, power calibrator, measuring generator, digital-to-analog converter, quantization error, adaptive quantization, optimality criterion, harmonics, THD, dynamic range

REFERENCES

1. GOST 31819.22–2012. *Staticheskie schetchiki aktivnoi energii klassov tochnosti 0,2S i 0,5S* [State standard 31819.22–2012. Static meters for active energy (classes 0,2S и 0,5S)]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 15 p.

2. GOST 8.584–2004. *Schetchiki staticheskie aktivnoi elektricheskoi energii peremennogo toka. Metodika poverki* [Alternating current static meters for active energy. Methods of verification]. Moscow, Standards Publ., 2004. 14 p.

3. Pasinkov Y.A., Savinykh M.A. Tekhnologicheskii kontrol' metrologicheskikh kharakteristik schetchikov elektroenergii na proizvodstve [Technological control of metrological characteristics of electricity meters during production]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 177–188. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188.

4. Kester W., ed. *Analog-digital conversion*. Analog Devices Inc., 2004. ISBN 0-916550-27-3.

5. Dushin E.M., ed. *Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniya* [Fundamentals of metrology and electrical measurements]. 6th ed., rev. and add. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1987. 480 p.

6. Prodeus A.N., Didkovskii V.S., Gavrilenko A.V. Raschet i izmerenie razborchivosti rechi pri malykh otnosheniyakh signal-shum. Ch. 1. Korrektnoe izmerenie funktsii raspredeleniya rechevogo

* *Received 24 December 2020.*

signala [Calculation and measurement of speech intelligibility at low signal-to-noise ratios. Pt. 1. Correct measurement of the speech signal distribution function]. *Elektronika i svyaz' = Electronics and communication*, 2007, no. S1, pp. 137–141.

7. Babichev M.M., Pasynkov Yu.A. *Sposob okrugleniya kodov funktsii* [Method of rounding function codes]. Patent RF, no. 2420799, 2011.

8. Mitchell M. *An introduction to genetic algorithm*. Cambridge, MA, MIT Press, 1996. 205 p.

9. Babichev M.M., Pasynkov Yu.A. Error estimators of discreteness while gaging the RMS of periodic signals. *Aktual'nye problemy elektronnogo priborostroeniya, APEP-2014: trudy XII mezhdunarodnoi konferentsii* [12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2014: Proceedings], Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014, vol. 1, pp. 286–289.

10. Vakulin A.A., Belyakov V.V., Babichev M.M. [Improving the filtering of a sinusoidal signal at the output of the measuring generator by choosing the criterion of optimality of adaptive quantization]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii*: sbornik nauchnykh trudov [Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers]. Novosibirsk, December 3–7, 2018, pt. 1, pp. 10–12. ISBN 978-5-7782-3734-6.(In Russian).

11. Babichev M.M., Vakulin A.A. Features of the application of adaptive quantization in generators with digital control. *Aktual'nye problemy elektronnogo priborostroeniya, APEP-2018: trudy XIV mezhdunarodnoi konferentsii* [14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2014: Proceedings], Novosibirsk, October 2–6, 2018, vol. 1, pt. 2, pp. 18–21. ISBN 978-5-7782-3614-1.

12. *Generatory signalov ot A do Ya* [Signal generators from A to Z]. Tectronix, 2008. Available at: https://doc.platan.ru/docs/pdf/generatory-signalov.pdf (accessed 12.12.2020).

13. Nesterov I.M. Vliyanie szhatiya dannykh na kachestvo radiolokatsionnykh izobrazhenii [Influence of data compression on the quality of radar images]. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*, 2016, no. 8. Available at: http://jre.cplire.ru/jre/aug16/5/text.html (accessed 25.11.2020).

14. Porov A.V. *Adaptivnoe skalyarnoe kvantovanie spektral'nykh koeffitsientov dlya sistem szhatiya audio signalov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Adaptive scalar quantization of spectral coefficients for audio signal compression systems. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2009. 136 p.

15. Sherri A. The PGA on Sigma-Delta ADCs: AN-610. Application Note. (In Russian). Available at: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-610.pdf (accessed 10.11.2020).

Для цитирования:

Бабичев М.М. Применение адаптивного квантования в измерительных генераторах с цифровым управлением // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 2 (82). – С. 121–134. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-121-134.

For citation:

Babichev M.M. Primeneniye adaptivnogo kvantovaniya v izmeritel'nykh generatorakh s tsifrovym upravleniyem [Implementation of the adaptive quantization method in digitally con-trolled measuring generators]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 2 (82), pp. 121–134. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-121-134.