

**МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА  
АВТОМАТИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 621.317

**А. С. ГЛИНЧЕНКО, М. К. ЧМЫХ**

*(Красноярск)*

**ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ  
В ЦИФРОВОЙ КОД**

Погрешность квантования цифровых измерительных приборов, использующих многократное несинхронизированное преобразование временных интервалов в код, существенно зависит от соотношения частот сигнала и квантования, от уровня флуктуаций фронтов временных интервалов и флуктуаций фазы (или периода) квантующих импульсов. Вопросам исследования погрешности квантования таких приборов посвящено достаточно много работ, позволяющих найти оценку погрешности для ряда частных случаев, наиболее интересных в практическом отношении. Однако эти работы опубликованы в разное время, в различных журналах и сборниках, что затрудняет оценку общего состояния вопроса, постановку новых, еще не решенных задач, приводит к дублированию уже известных решений.

В связи с этим в настоящей работе дается краткое изложение основных результатов теории погрешности многократного квантования временных интервалов, а также приводятся результаты новых исследований в этой области.

Одна из первых оценок погрешности многократного квантования временных интервалов, основанная на гипотезе статистической независимости квантования отдельных интервалов (модель независимых испытаний), получена в работах [1, 2]. В этом случае среднеквадратическая погрешность квантования априорно неизвестного интервала определяется выражением  $\sigma = t_0 / \sqrt{6K}$ ; погрешность квантования известного интервала (случай, представляющий интерес в основном в методическом плане) зависит от дробной части  $p$  отношения измеряемого интервала времени  $\tau$  к периоду следования квантующих (счетных) импульсов  $t_0 = 1/f_{кв}$ :

$$\sigma = t_0 \sqrt{p(1-p)/K},$$

где  $K$  — число усредняемых интервалов. Эти оценки вследствие своей простоты и по некоторым другим соображениям находят широкое практическое применение.

Началом более глубокого исследования погрешности квантования с учетом реально существующих ситуаций явились работы [3, 4], где методом статистического моделирования на ЭВМ исследована зависимость погрешности квантования от соотношения частот сигнала и квантования, решен ряд других вопросов более детального изучения погрешности квантования. Простое аналитическое решение этой задачи, но при довольно ограниченных условиях ( $\{f_{кв}/F\} = 1/S$ ,  $S \gg K$ ) получено

в [5], где  $\{f_{кв}/F\}$  — дробная часть отношения частот квантования  $f_{кв}$  и сигнала  $F$ ;  $S$  — целые числа. В более общем виде, дающем практически полное представление о характере зависимости погрешности квантования от соотношения частот, задача решена в [6], где снято ограничение  $S \geq K$ .

Наиболее общий алгоритм оценки погрешности квантования временных интервалов при наличии усреднения для произвольных соотношений частот сигнала и квантования, учитывающий флуктуации периода счетных импульсов и флуктуации начала и конца временных интервалов, получен в [7]. Сложность этого алгоритма затрудняет его практическое применение даже при использовании ЭВМ. Однако на основе его анализа можно в достаточно простом виде получить некоторые важные для практики частные результаты. Так, в работе [8], исходя из этого алгоритма, получены оценки усредненной по частоте (или априорной) погрешности квантования, найдены соотношения частот, соответствующие минимальным и максимальным значениям погрешности квантования, показаны наиболее общие условия оптимального квантования, изучен характер зависимости погрешности от соотношения частот (и их нестабильностей) вблизи точек целочисленного и оптимального соотношения частот. В частности, показано, что погрешность квантования, усредненная по частоте, совпадает с погрешностью модели независимых испытаний, приведенной выше.

Влияние конечной длительности квантовых импульсов, длительности фронтов временных интервалов, параметров схем совпадений и счетчика на погрешность квантования рассмотрено в работах [9, 10]. В статье [11] сделан анализ погрешности квантования при целочисленном соотношении частот для случаев модуляции частоты квантования по случайному и линейному законам, в [12, 13] — при наличии коррелированных и некоррелированных флуктуаций фронтов временных интервалов. В [14] исследовано влияние шумов на погрешность оптимального квантования. В ряде работ ([15, 16] и др.) рассматриваются погрешности квантования временных интервалов случайными потоками с ограниченным последствием.

В данной работе на основе общего выражения для погрешности квантования временных интервалов при использовании операции усреднения [7] получены простые результаты для оценки влияния нормально распределенных шумов, вызывающих флуктуации периодически следующих временных интервалов.

Для случая равных и независимых флуктуаций начала и конца квантуемых интервалов в отсутствие флуктуаций периода счетных импульсов аналитическое выражение для погрешности квантования в соответствии с [7] имеет вид

$$\frac{D}{t_0^2} = 2 \frac{\sigma_{\Phi}^2}{K t_0^2} + \frac{1}{K \pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left( 1 - \left| \tilde{\varphi}_y \left( \frac{2\pi n}{t_0} \right) \right|^2 \right) + \frac{1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left| \varphi_y \left( \frac{2\pi n}{t_0} \right) \right|^2 L_n(K, f_{кв}/F). \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_{\Phi}^2$  и  $\tilde{\varphi}_y(2\pi n/t_0)$  — дисперсия и характеристическая функция случайного процесса  $y(t)$ , определяющего флуктуации фронтов интервала в моменты времени, совпадающие с началом и концом интервала;  $L_n(K, f_{кв}/F) = [\sin(\pi K n f_{кв}/F) / K \sin(\pi n f_{кв}/F)]^2$ .

Если размах флуктуаций  $y(t)$  не превышает  $t_0$ , выражение для погрешности упрощается [7]:

$$\frac{D}{t_0^2} = \frac{|\tilde{\eta}|}{K} + \frac{1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left| \tilde{\varphi}_y(2\pi n/t_0) \right|^2 L_n(K, f_{кв}/F), \quad (2)$$

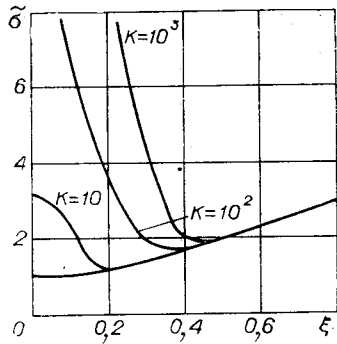


Рис. 1. Зависимость погрешности квантования при априорно-неизвестном (1) и целочисленном соотношениях частот сигнала и квантования от уровня флуктуаций.

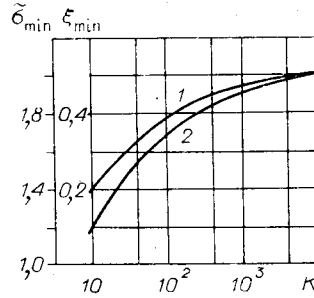


Рис. 2. Зависимость  $\xi_{\min}$  (1) и  $\sigma_{\min}$  (2) от числа усредняемых интервалов при целочисленном соотношении частот  $f_{\text{кв}}/F$ .

где  $|\bar{\eta}|$  — первый абсолютный момент разности двух независимых значений  $y(t)$ . Для независимых нормально распределенных флуктуаций характеристическая функция определяется выражением [17]  $\tilde{\varphi}_y(t) = e^{-\frac{1}{2}\sigma_\phi^2 t^2}$  а ее значение при  $t = 2\pi n/t_0$  равно  $\tilde{\varphi}_y\left(\frac{2\pi n}{t_0}\right) = e^{-2\pi^2 n^2 \xi^2}$ , где  $\xi = \sigma_\phi/t_0$ .

Характеристическая функция разности независимых значений  $y(t)$

$$\tilde{\varphi}_y(2\pi n/t_0, \tau) = |\tilde{\varphi}_y(2\pi n/t_0)|^2 = e^{-4\pi^2 n^2 \xi^2}.$$

Отсюда находим первый абсолютный момент разности двух независимых значений  $y(t)$ :  $|\bar{\eta}| = 2\sigma_\phi/\sqrt{\pi}$ . Исходя из этих соотношений, можно записать следующее выражение для погрешности квантования в случае нормально распределенных флуктуаций:

$$\begin{aligned} \frac{D}{t_0^2} = & \frac{1}{6K} - 2 \frac{\xi^2}{K} - \frac{1}{\pi^2 K^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-4\pi^2 n^2 \xi^2} + \\ & + \frac{1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-4\pi^2 n^2 \xi^2} L_n(K, f_{\text{кв}}/F). \end{aligned} \quad (3)$$

Для малых флуктуаций, удовлетворяющих условию  $6\sigma_\phi < t_0$ , выражение (3) имеет вид

$$\frac{D}{t_0^2} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\xi}{K} + \frac{1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-4\pi^2 n^2 \xi^2} L_n(K, f_{\text{кв}}/F). \quad (4)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи.

1. Погрешность, усредненная по достаточно широкому диапазону частот (априорная погрешность). В этом случае

$$\sigma = \sqrt{D} = (t_0/\sqrt{6K}) \sqrt{1+12\xi^2}. \quad (5)$$

С ростом флуктуаций фронтов эта погрешность возрастает и при  $\xi \geq 1$  практически определяется только флуктуациями фронтов:  $\sigma \approx \sqrt{2}\sigma_\phi/\sqrt{K}$ . Зависимость нормированной априорной погрешности  $\tilde{\sigma} = \sigma/(t_0/\sqrt{6K})$  от  $\xi$  показана на рис. 1 (кривая 1). Условие  $\xi \leq 1$  определяет целесообразные пределы повышения частоты квантования с целью уменьшения погрешности квантования.

2. Погрешность квантования при целочисленном соотношении частот ( $\{f_{кв}/F\}=0$ ). В этом случае

$$D/t_0^2 = 1/6K + 2\xi^2/K + \frac{K-1}{\pi^2 K} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-4\pi^2 n^2 \xi^2}. \quad (6)$$

При малых  $\xi$

$$D/t_0^2 = 2\xi/\sqrt{\pi K} + \frac{1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-4\pi^2 n^2 \xi^2}. \quad (7)$$

На рис. 1 показаны рассчитанные в соответствии с (6), (7) зависимости  $\sigma = \sigma/(t_0/\sqrt{6K})$  от  $\xi$  для различных значений  $K$ . С ростом флуктуаций погрешность уменьшается практически до априорной, а затем возрастает и при больших  $\xi$  определяется только флуктуациями фронтов. Найдем положения точек минимума погрешности путем дифференцирования (7) по  $\xi$ , при этом слагаемыми при  $n \geq 2$  ввиду их малости можно пренебречь:

$$dD/d\xi = 2t_0^2/\sqrt{\pi K} - 8\xi e^{-4\pi^2 \xi^2} = 0.$$

На рис. 2 (кривая 1) представлена зависимость  $\xi_{\min}$  от числа усредняемых интервалов. Значения  $\xi_{\min}$  для широких пределов изменения  $K$  составляют  $(0,2 \div 0,5)t_0$ . Для удобства расчетов на этом же рисунке (кривая 2) приведена зависимость погрешности в точках минимума  $\sigma_{\min}$  от  $K$ .

3. Погрешность оптимального квантования, удовлетворяющего условию

$$\{f_{кв}/F\} = a/K,$$

где  $a$  — целые числа, не кратные  $K$  [8]; выражение  $\{x\}$  соответствует дробной части числа  $x$ . При оптимальном квантовании имеет место минимальная погрешность квантования, определяемая при отсутствии шумов соотношением  $D_0 = t_0^2/(6K^2)$ . Для малых флуктуаций из (4) получаем следующее выражение для погрешности оптимального квантования:

$$D/t_0^2 = 2\xi/\sqrt{\pi K} + \frac{1}{\pi^2 K^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-4\pi^2 n^2 \xi^2}. \quad (8)$$

Результаты расчетов на основе (8) представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что при значениях  $\xi \geq 0,3/K$  дисперсия квантования практически прямо пропорциональна уровню флуктуаций и может быть найдена по формуле

$$D/t_0^2 = 1,12\xi/K. \quad (9)$$

Выражение (9) также можно представить в виде  $\sigma = kt_0/\sqrt{K}$ . Эта формула справедлива как для оптимального, так и для независимого квантования. Для оптимального квантования  $k_{\text{опт}} = 1,06\sqrt{\sigma_{\phi}/t_0}$ , для независимого —  $k_{\text{нез}} = 1\sqrt{6}$ . Понятно, что применение оптимального квантования целесообразно только при  $k_{\text{опт}} < k_{\text{нез}}$ . Эффективность применения оптимального квантования можно охарактеризовать отношением погрешности при оптимальном и независимом квантовании

$$\sigma_{\text{нез}}/\sigma_{\text{опт}} = 0,4/\sqrt{\sigma_{\phi}/t_0}.$$

Применение оптимального квантования дает выигрыш по сравнению с независимым квантованием лишь при  $\sigma_{\phi} \leq (10^{-2} \div 10^{-3})t_0$ . В этом

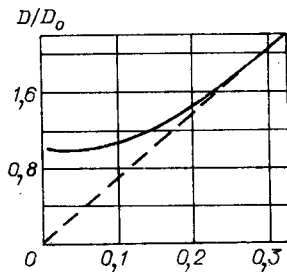


Рис. 3. Зависимость дисперсии погрешности оптимального квантования от уровня флуктуаций.

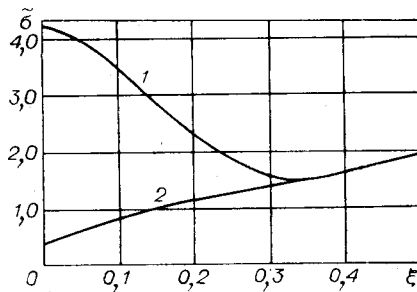


Рис. 4. Зависимость погрешности квантования для произвольных соотношений частот  $f_{кв}/F$  от уровня флуктуаций.

случае погрешность при оптимальном квантовании уменьшается в  $(4 \div 10)$  раз.

4. При произвольном соотношении частот, если погрешность квантования превышает априорную, флуктуации фронтов уменьшают ее практически до априорной, а затем погрешность возрастает с ростом флуктуаций. Если погрешность квантования при отсутствии флуктуаций меньше априорной, флуктуации увеличивают ее. Эти выводы подтверждают результаты расчетов, выполненных по формуле (3) для  $\{f_{кв}/F\} = 1/295$  (кривая 1) и  $\{f_{кв}/F\} = 1/425$  (кривая 2), представленные на графике рис. 4.

Влияние флуктуаций периода (фазы) квантуемых импульсов на погрешность квантования рассмотрено в [7] для случая стационарных флуктуаций, не превышающих  $2\pi$ , при времени корреляции, меньшем наименьшего значения квантуемого интервала. Показано, что в этом случае при независимых флуктуациях фронтов фазовых интервалов влияние флуктуаций периода (фазы) квантуемых импульсов и фронтов фазовых интервалов на погрешность квантования аддитивно. Для нормально распределенных флуктуаций фронтов интервалов и периода квантуемых импульсов вычисление результирующей погрешности квантования сводится к расчету погрешности квантования при наличии флуктуаций фронтов интервалов с дисперсией, равной сумме дисперсий флуктуаций фронтов и периода квантуемых импульсов  $\sigma_{\text{ФКВ}}^2 = \sigma_{\text{Ф}}^2 + \sigma_{\text{КВ}}^2$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Валитов Р. А., Вихров Г. П. Погрешность цифровых измерителей интервалов времени и повышение их точности методом усреднения.— «Измерительная техника», 1963, № 4, с. 44—47.
2. Сверкунов Ю. Д. Об одном методе кодирования фазы.— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. XII», 1962, вып. 11, с. 87—94.
3. Чмых М. К. Погрешности дискретного преобразования цифровых фазометров с время-импульсным кодированием и методы их уменьшения. Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Томск, 1970.
4. Чмых М. К. Применение метода статистического моделирования для расчета погрешности многократного квантования.— В кн.: Статистическое моделирование и аппаратура. М., «Наука», 1971.
5. Чмых М. К., Глинченко А. С. О зависимости погрешности квантования от соотношения частот квантуемых и квантуемых импульсов.— В кн.: Радиотехника, тонкие магнитные пленки, вычислительная техника. Т. 1. Красноярск, изд. ИФ СО АН СССР, 1973, с. 160—165.
6. Глинченко А. С., Чмых М. К. Ошибки цифрового измерения длительности периодически следующих импульсов.— «Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение», 1974, № 1, с. 22—27.

7. Ефимов В. М. Ошибки измерения интервалов времени при использовании операции усреднения.— «Автометрия», 1971, № 4, с. 21—25.
8. Глинченко А. С., Чмых М. К. Некоторые результаты исследования погрешности многократного несинхронизированного квантования от соотношения частот сигнала и квантования.— «Автометрия», 1976, № 2, с. 111—113.
9. Глинченко А. С., Чмых М. К., Кузнецкий С. С. Влияние параметров квантующих импульсов, импульсов фазовых интервалов и схемы совпадений на погрешность цифровых фазометров.— В кн.: Тонкие магнитные пленки, радиотехника, вычислительная техника. Т. 1. Красноярск, изд. ИФ СО АН СССР, 1972, с. 163—169.
10. Глинченко А. С., Чмых М. К., Кузнецкий С. С. Влияние конечной длительности квантующих импульсов на погрешность измерения цифровых фазометров с время-импульсным преобразованием.— В кн.: Тонкие магнитные пленки, радиотехника, вычислительная техника. Т. 1. Красноярск, изд. ИФ СО АН СССР, 1972, с. 170—176.
11. Чмых М. К. Погрешность квантования в цифровых фазометрах с модуляцией частоты счетных импульсов.— «Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника», 1973, № 2, с. 47—51.
12. Чмых М. К., Панько С. П. О случайной погрешности при цифровых измерениях интервалов времени.— «Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение», 1972, № 8, с. 15—19.
13. Панько С. П., Чмых М. К. Погрешность многократного квантования коррелированно флуктуирующих интервалов времени.— В кн.: Тонкие магнитные пленки, радиотехника, вычислительная техника. Т. 1. Красноярск, изд. ИФ СО АН СССР, 1971, с. 8—12.
14. Чмых М. К., Глинченко А. С. Ошибки цифрового измерения длительности с флуктуирующими фронтами при оптимальном квантовании.— «Метрология», 1975, № 11, с. 57—65.
15. Билинский И. Я., Микельсон А. К., Немировский Р. Ф. Применение случайных потоков с ограниченным последствием для квантования интервалов времени.— АВТ, 1974, № 6, с. 79—85.
16. Немировский Р. Ф. Коррелированное квантование повторяющихся интервалов времени случайными потоками с ограниченным последствием.— АВТ, 1975, № 2, с. 48—54.
17. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. М., Физматгиз, 1961.

*Поступила в редакцию 4 июля 1977 г.*

УДК 681.3.06 : 681.322

**А. Е. ПОДЗИН**

*(Кишинев)*

## ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТУРНЫМИ СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ

Традиционные методы решения задач управления процессами контроля электронной аппаратуры в автоматизированных системах на базе ЭВМ в настоящее время не всегда удовлетворяют требованиям производства. Если организацию аппаратуры таких систем по магистрально-модульному принципу можно считать установившейся, то программные средства (языки программирования и их реализации) еще находятся на стадии разработки и исследования. Трудности, связанные с созданием программного обеспечения, объясняются в первую очередь тем, что программно-управляемые блоки (модули) (ПБ) аппаратуры систем контроля выбираются в зависимости от характеристик объекта контроля (ОК), видов его испытаний и, как правило, требуют специализированных управляющих воздействий по обмену информацией с ЭВМ. Поэтому задача управления программно-управляемыми блоками систем и различными контрольно-измерительными приборами, включенными в состав систем, решается в основном на уровне языка Ассемблер используемых ЭВМ или на уровне Макроассемблеров, ориентированных на описание процессов управления в системах с заданной