

**МЕТОД ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ ДАТЧИКОВ
С КВАДРАТУРНЫМИ СИГНАЛАМИ****Д. Э. Денк***Институт автоматки и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: dima@iae.nsk.su*

Проведен анализ ошибок квадратурного сигнала при интерполяции. Дана количественная оценка влияния шума и искажения формы квадратурного сигнала. Предложен метод оценки погрешности датчиков с квадратурными сигналами.

Введение. Для решения различных задач в современных системах измерения и управления используются датчики с квадратурными сигналами, преобразующие угловое положение, линейное перемещение, скорость, ускорение и другие физические величины в электрический квадратурный сигнал. Квадратурный сигнал состоит из двух периодических сигналов, сдвинутых по фазе относительно друг друга на 90° . Эти сигналы часто обозначают через A и B , и в общем виде они могут быть записаны как

$$A = \sin \varphi; \quad B = \sin(\varphi + 90^\circ) = \cos \varphi. \quad (1)$$

Основное отличие квадратурного сигнала от однофазного периодического заключается в том, что он дает возможность определять не только значение измеряемой величины, но и знак ее изменения [1].

Наиболее широкое распространение получили датчики линейных перемещений и углового положения [2, 3]. При их применении в прецизионных системах [4] возникает необходимость повышения разрешающей способности. Для этого используется метод интерполяции, описанный в [5–7]. Интерполяция квадратурного сигнала осуществляется специальным устройством, которое, как правило, реализуется на базе специализированных сигнальных процессоров [5, 8]. Блок интерполяции состоит из двухканального квантователя, преобразующего сигналы A и B в цифровой вид, и вычислительного устройства, которое реализует алгоритм расчета амплитуды квадратурного сигнала R , нормировки и вычисления угла ϕ из квадратурных составляющих A и B по формулам

$$R = \sqrt{A^2 + B^2}; \quad \phi = \arctan(A/B). \quad (2)$$

Реальный квадратурный сигнал отличается от «идеального». Это обусловлено наличием погрешности датчика, свойственной любому измерительному прибору, неточностью его настройки, ошибками измерительной цепи, преобразующей сигнал датчика (емкостного, магнитного, оптического и т. д.) в электрический. Реальный квадратурный сигнал можно записать как

$$A = k_A \sin \varphi + A_0; \quad B = k_B \cos(\varphi + \varphi_0) + B_0, \quad (3)$$

где k_A, k_B – масштабные коэффициенты усилителей; A_0, B_0 – смещения уровня нуля; φ_0 – ошибка относительного фазового сдвига.

Измерительная цепь также вносит собственный шум в составляющие сигнала, что способствует снижению точности конечной системы.

На практике при настройке датчиков с квадратурными сигналами применяется ряд методов [9] компенсации искажений квадратурного сигнала. Для этого требуется предварительная оценка погрешностей, влияющих на форму квадратурного сигнала и определяющих точность конкретного датчика.

Целью данной работы является количественная оценка этих погрешностей. Кроме того, предлагается метод оценки погрешности датчиков по отклонению расчетной амплитуды квадратурного сигнала.

Влияние шума на погрешность датчика. Рассмотрим идеальный квадратурный сигнал, т. е. когда амплитуда сигналов A и B одинакова, фаза между ними составляет 90° . Разрешающая способность в таком случае будет ограничиваться только шумовой составляющей сигналов A и B : δ_A и δ_B .

При оценке погрешности расчета угла φ в качестве δ_A и δ_B можно использовать как эффективное δ , так и пиковое δ_{\max} значения уровня шума. Эффективное значение уровня шума для сигнала $A(t)$ за период T определяется как

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (A(t) - \bar{A})^2 dt}, \quad (4)$$

где \bar{A} – среднее значение сигнала за период.

Для дискретного случая можно воспользоваться следующей формулой:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=0}^{m-1} (A_{i+1} - A_i)^2 / (2(m-1))}, \quad (5)$$

где m – размер выборки, A_i – значение сигнала.

Пиковый уровень шума связан со среднеквадратичным посредством пик-фактора, который, в свою очередь, зависит от доверительной вероятности. Обычно считается, что шум имеет гауссово распределение и для перехода между пиковым и среднеквадратичным уровнями используется пик-фактор, равный 3:

$$\delta_{\max} = 3\delta. \quad (6)$$

Для того чтобы не учитывать в дальнейших расчетах амплитуду квадратурных составляющих A_A и A_B , введем относительный коэффициент ошибки сигналов A и B , или коэффициент шума,

$$K_0 = \delta_A / A_A = \delta_B / A_B = A_0 = B_0. \quad (7)$$

Определим погрешности расчета угла $\delta\varphi$. Следует обратить внимание на две группы точек квадратурного сигнала. Первая группа находится на осях, что соответствует углам $0, 90, 180$ и 270° . В этом случае погрешность определяется только шумовой составляющей одного квадратурного сигнала, перпендикулярного оси, на которой лежит точка, и, таким образом, является минимально возможной: $\delta\varphi_{\min} = \arctan(K_o)$. Вторая группа точек соответствует углам $45, 135, 225$ и 315° . В этих точках погрешность определяется сигналами A и B и является максимальной: $\delta\varphi_{\max} = \arctan(\sqrt{2}K_o)$. Все остальные значения находятся между этими двумя значениями.

Исходя из погрешности расчета угла φ , можно выразить максимальное количество разбиений квадратурного круга

$$N = 2\pi/\delta\varphi \quad (8)$$

и относительную погрешность

$$K'_o = 1/N. \quad (9)$$

Если в (8) подставить максимальную погрешность $\delta\varphi_{\max}$, то получим минимальное гарантированное число разбиений квадратурного круга.

Отношение сигнал/шум ψ , которое определяется как отношение полного размаха сигнала U_s к эффективному значению шума δ , также может быть пересчитано в относительный коэффициент ошибки и далее использоваться в расчетах: $K_o = 2/\psi_A = 2/\psi_B$.

На рис. 1 приведена зависимость числа разбиений N от коэффициента шума K_o , выраженного в процентах. Пунктирная линия соответствует $\delta\varphi_{\min}$, сплошная – $\delta\varphi_{\max}$. По графику легко определить число значимых разбиений в системе интерполяции.

Разрядность квантователя n , используемого в системе интерполяции, можно найти исходя из ошибки квантования. Будем считать, что составляющие A и B квадратурного сигнала имеют амплитуду, равную половине вход-

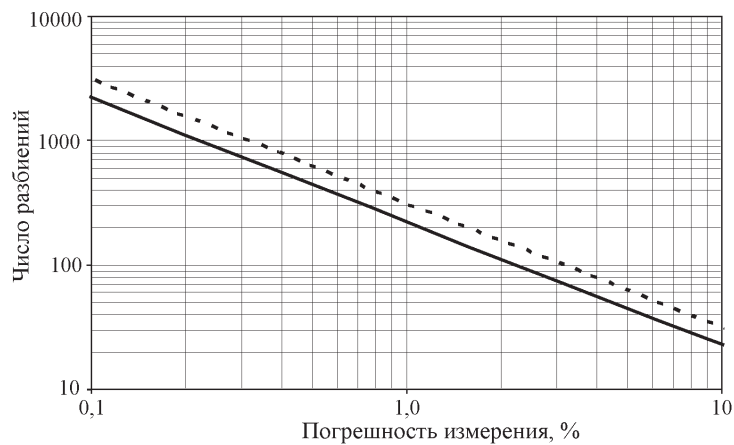


Рис. 1

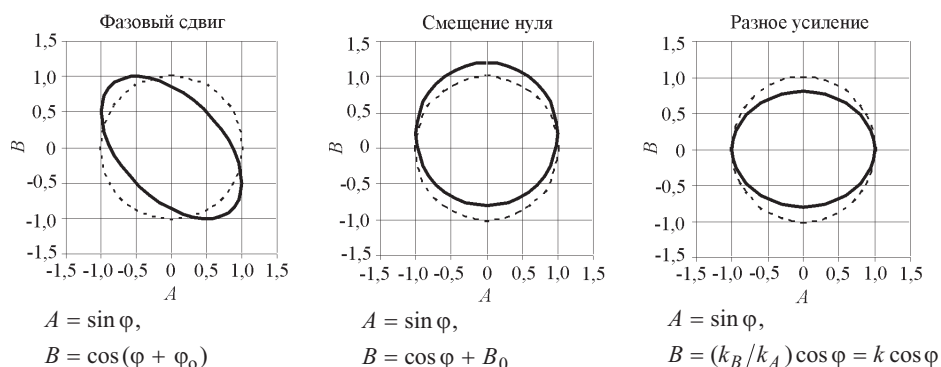


Рис. 2

ного диапазона квантователя, а погрешность квантователя составляет один разряд. В этом случае относительная ошибка квантователя вычисляется как

$$K_0'' = 1/2^{n-1} \quad (10)$$

и должна быть меньше, чем уровень шума: $K_0'' < K_0$.

Например, если необходимо интерполировать квадратурный сигнал на 1000, то уровень шума должен быть менее 0,2%, а разрядность квантователя – не менее 10 бит.

Ошибки формы квадратурного сигнала. Поскольку форма квадратурного сигнала определяется составляющими A и B , то и ошибки формы определяются ошибками этих составляющих. Условно ошибки можно разделить на три вида: дополнительный фазовый сдвиг между A и B , ошибка масштабного коэффициента и смещение нуля. Графическое отображение каждой из ошибок представлено на рис. 2. Пунктирной линией обозначен идеальный квадратурный сигнал, сплошной линией – ошибочный.

Для определения погрешности промоделируем работу интерполятора. Будем рассчитывать квадратурные составляющие согласно формулам (3), затем на их основании производить интерполяцию (расчет угла ϕ и амплитуды R) в соответствии с формулой (2). По полученным данным рассчитаем для каждого значения угла ϕ , заданного на интервале от 0 до 2π , относительную ошибку расчета угла

$$K\phi_0 = (\phi - \phi_0)/(2\pi) \quad (11)$$

и относительную ошибку расчета амплитуды

$$KR_0 = 1/(R - 1). \quad (12)$$

Графики, полученные в результате моделирования для разных типов ошибок квадратурного сигнала, приведены на рис. 3. Пунктирной линией показана ошибка расчета амплитуды, сплошной – ошибка расчета угла. По оси абсцисс графики пронормированы на 2π . Из графиков видно, что, исходя из качественной оценки ошибки амплитуды, можно определить вид искажения квадратурного сигнала.

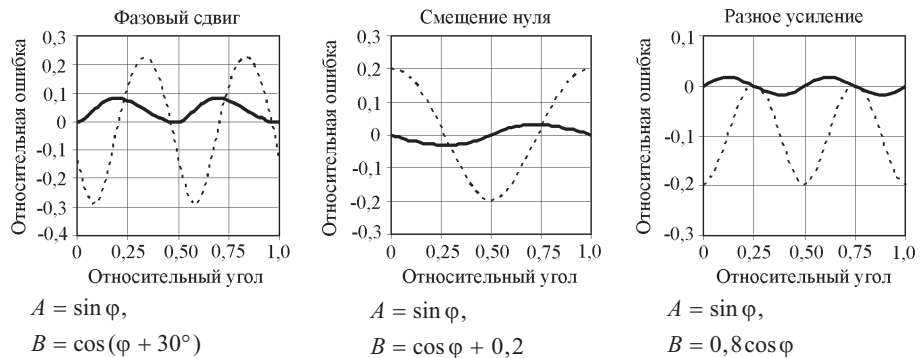


Рис. 3

Используя формулу (11), определим максимальную $pv(K\varphi_0)$ и среднеквадратическую $rms(K\varphi_0)$ ошибки расчета угла φ :

$$pv(K\varphi_0) = \max(|K\varphi_0|), \quad (13)$$

$$rms(K\varphi_0) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\varphi - \Delta\varphi i}{2\pi} \right)^2} / m, \quad (14)$$

где $\Delta\varphi = 2\pi/m$ – шаг расчета по углу.

Зависимости максимальной и среднеквадратической относительной ошибок расчета угла от максимального отклонения относительной ошибки расчета амплитуды представлены на рис. 4 (кривая 1 – ошибка при фазовом сдвиге, 2 – ошибка при смещении нуля, 3 – ошибка коэффициентов усиления).

Из графиков видно, что максимальный вклад ошибки дает дополнительное смещение фазы. Максимальная ошибка любого из графиков не превышает среднеквадратическую более чем в 1,7 раза.

Эксперимент. В качестве эксперимента был проведен анализ погрешности датчика линейных перемещений системы CLWS-300 [4]. Датчик пред-

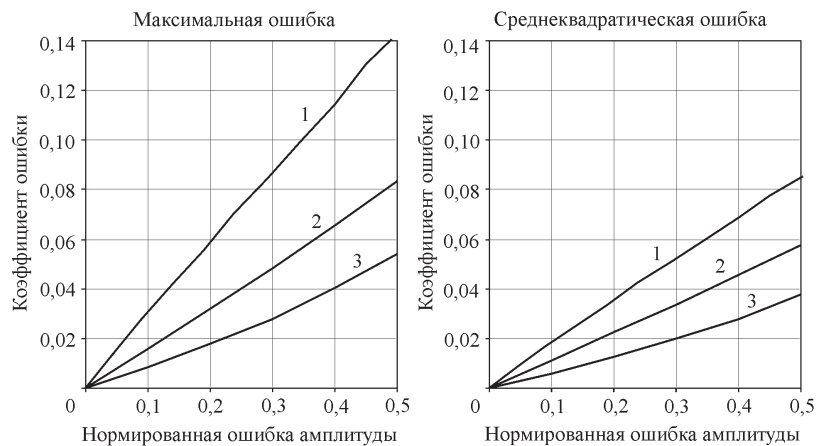


Рис. 4

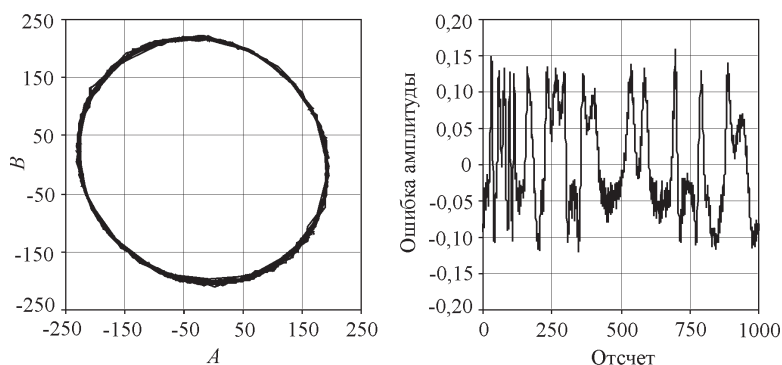


Рис. 5

ставляет собой линейный измеритель перемещений четвертого поколения [2], построенный на базе двухпроходного лазерного интерферометра перемещений. В интерферометре используется He–Ne-лазер с длиной волны $\lambda = 632,99088$ нм.

При оценке системы измерений необходимо разделять точность датчика и системную точность. Даже если датчик имеет высокую точность, то она может быть существенно снижена погрешностями системы измерения, и наоборот, имея «идеальную» систему измерений, можно получить большую ошибку интерполяции ввиду плохо настроенного датчика. Следовательно, оценка вклада погрешностей системы измерений и датчика должна производиться отдельно.

Сначала определяются значения уровня шума и смещения нуля схемы измерения и уровень шума датчика. Для этого требуется провести два измерения. Первое проводится с отключенным датчиком, второе – с подключенным. Во втором случае положение объекта измерений должно быть зафиксировано. Число разбиений определяется по графику на рис. 1. Далее необходимо получить диаграмму, по меньшей мере, одного полного квадратурного сигнала, что соответствует одному полному периоду сигналов A и B , и вычислить максимальное отклонение рассчитанной амплитуды квадратурного сигнала от средней величины. Диаграммы измеренного квадратурного сигнала и относительной ошибки расчета амплитуды для нашего случая показаны на рис. 5.

Форма искажения квадратурного сигнала обусловлена дополнительным фазовым сдвигом составляющей A относительно B . Пересчитав результаты измерений в абсолютную погрешность интерполяции, получим $\delta I_{\text{rms}} \approx 4,7$ нм и $\delta I_{\text{pv}} \approx 7,9$ нм.

Результаты расчета погрешностей и максимального числа разбиений квадратурного круга приведены в таблице.

Источник погрешности	$\text{rms}(K_0)$	N_{rms}	$\text{pv}(K_0)$	N_{pv}
Интерполятор	0,00583	390	0,01748	130
Сигналы датчика	0,01221	180	0,03663	60
Настройка датчика	0,03000	33	0,05000	20

В данном случае погрешность системы интерполяции в несколько раз меньше погрешности самого датчика. Это означает, что параметры интерполятора выбраны правильно и он не ограничивает разрешающую способность системы в целом. Также нужно отметить, что основной вклад в ошибку интерполяции вносит погрешность настройки самого датчика.

Заключение. Расчеты, представленные в данной работе, позволяют оценить качество настройки датчика с квадратурным сигналом, а также определить его погрешность. Для этого необходимо знать только относительное отклонение амплитуды квадратурного сигнала и форму ошибки, а если ошибка мала, то только отклонение амплитуды, что дает возможность производить оперативный контроль квадратурного сигнала без использования больших вычислительных ресурсов непосредственно в вычислительном устройстве или интерполяторе. В самом простом случае вычисленное по формуле (2) значение амплитуды квадратурного сигнала может быть пронормировано на среднее значение за период, а затем сравнено с пороговым значением, которое соответствует максимально допустимой ошибке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кеннет Дж. К.** Декодер квадратурных сигналов: Пер. с англ. // Электроника. 1992. № 1112.
2. **Кирьянов В. П., Коронкевич В. П.** Лазерные интерферометры перемещений // Автометрия. 1998. № 6. С. 65.
3. **Жданкин В. К.** Поворотные шифраторы: основные типы и некоторые особенности применения // Современные технологии автоматизации. 2001. № 2.
4. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. 38, N 8. P. 1295.
5. **Pat. 5066953 US.** Position measuring apparatus with a subdivision circuit for subdividing sinusoidal scanning signals /H. Lengenfelder, R. Wasthuber. Publ. November, 1991.
6. **Emura T., Wang L.** A high-resolution interpolator for incremental encoders based on the quadrature PLL method // IEEE Trans. Ind. Electron. 2000. 47, N 1. P. 84.
7. **Tan K. K., Zhou H. X., Lee T. H.** New interpolation method for quadrature encoder signals // IEEE Trans. Instrum. and Meas. 2002. 51, N 5. P. 1073.
8. **Кирьянов В. П., Кокарев С. А.** Лазерно-интерферометрический преобразователь перемещений с субнанометровым разрешением // Автометрия. 1998. № 2. С. 3.
9. **Hagiwara N., Suzuki Y., Murase H.** A method of improving the resolution and accuracy of rotary encoders using a code compensation technique // IEEE Trans. Instrum. and Meas. 1992. 41, N 1. P. 98.

Поступила в редакцию 12 марта 2007 г.