

блоках предусмотрены возможности линеаризации функций преобразования индуктивных преобразователей в процессе калибровки и расширения управляющих программ с целью получения дополнительной информации, результатом которых является повышение точности изготовления деталей.

Рассмотренные приборы могут легко перенастраиваться на различные типоразмеры изготавливаемых деталей. Все это открывает широкие перспективы в применении разработанного ряда приборов на шлифовальных станках с ЧПУ.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» (государственный контракт № 11411.1003704.05.003 от 20.09.2011 г.).

Л и т е р а т у р а

1. Григорьев С. Н., Телешевский В. И. Проблемы измерений в технологических процессах формообразования // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 3—7; Grigoriev S. N., Teleshevskii V. I. Measurement problems in technological shaping processes // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N. 7. P. 744—749.

2. Григорьев С. Н. и др. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 56—59; Grigoriev S. N. et al. Contemporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry // Measurement Techniques. 2013. V. 55. N. 11. P. 1311—1315.

3. Волосов С. С., Шлейфер М. Л., Рюмкин В. Я. Активный контроль размеров. М.: Машиностроение, 1984.

4. Высоцкий А. В. и др. Приборы автоматического управления обработкой на металлорежущих станках. М.: Машиностроение, 1995.

5. Соболев М. П., Этингер М. И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках. Смоленск: Изд-во «Ойкумена», 2005.

6. ГОСТ 8517—90. Приборы управляющие при шлифовании. Общие технические условия.

7. ГОСТ Р 8.671—2009. ГСИ. Приборы активного контроля линейных размеров. Методика поверки.

Дата принятия 20.02.2014 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

620.1.08

Идентификация и компенсация статических погрешностей фазовых координат элементов оптического энкодера

Е. В. КАПЛЯ

Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал)
Волжский, Россия, e-mail: ev-kaple@yandex.ru

Предложена методика экспериментально-теоретической идентификации и компенсации статических погрешностей фазовых координат элементов оптического энкодера. Разработанная методика применена для компенсации систематических погрешностей угловых измерений, выполненных с помощью современного оптического энкодера.

Ключевые слова: энкодер, датчик угла поворота, угловая скорость.

The technique experimental-theoretical identifications and compensations of static errors of phase coordinates of the elements optical encoder is offered. The developed technique is applied for a compensation of systematic errors of angular measurements which are carried out with the help of modern optical encoder.

Key words: encoder, rotation angle sensor, angular velocity.

Энкодер — современный датчик угла поворота [1], формирующий на своем выходе информационный сигнал в виде кодов Грея. Оптический энкодер содержит несколько элементов: излучатели, фотоприемники, диски и экран с отверстиями [2]. Экран с отверстиями разделяет плоскости излучателей и приемников и формирует плоскопараллельные пучки излучения источников, расположенных за ним. Опти-

ческие оси излучателей и фотоприемников попарно совпадают. Диск с отверстиями или штрихами вращается совместно с валом энкодера. Отверстия в диске или штрихи на поверхности диска инкрементального оптического энкодера, как правило, расположены с постоянным угловым шагом по окружности. Нарушения равенства угловых размеров отверстий (штрихов) и постоянства углового периода вызывают

появление систематических погрешностей при измерении угла поворота объекта, связанного с валом энкодера. Перечисленные механически неустраняемые нарушения в той или иной мере присутствуют в конструкции любого энкодера.

Статические погрешности фазовых координат элементов энкодера являются причиной систематических инструментальных погрешностей угловых измерений, выполняемых с помощью энкодера. Пользователь энкодера в большинстве случаев не может устранить внутренние конструктивные нарушения идеальности современного оптического энкодера. Повышение точности угловых измерений возможно в результате идентификации и компенсации статических погрешностей фазовых координат элементов энкодера.

Целью исследования являются: разработка методики идентификации и компенсации статических погрешностей фазовых координат оптических элементов инкрементального энкодера; определение диапазонов варьирования периода опроса и числа опросов датчика для измерения угловой скорости вращения вала и калибровки энкодера.

Методика идентификации и компенсации статических погрешностей. Наличие погрешностей фазовых координат оптических элементов энкодера выявляется экспериментально при постоянной скорости вращения вала энкодера. Вал энкодера с помощью муфты присоединяется к выходному валу мотор-редуктора. Идентификацию и компенсацию статических погрешностей фазовых координат оптических элементов энкодера следует выполнять по итогам двух этапов автоматизированного эксперимента.

Первый этап необходим для измерения угловой скорости вращения вала энкодера. Контроллер регистрирует количество изменений кода энкодера за интервал времени Δt с постоянным периодом опроса τ_a . Измерения повторяют n раз и образуют вектор $\{D_i\}_{i=1, \dots, n}$.

Второй этап необходим для вычисления статических погрешностей фазовых координат элементов энкодера. Выполняется опрос энкодера с постоянным периодом τ_b . Счетчик опросов Λ_g инкрементируется до тех пор, пока не произойдет смена (с номером g) кода на выходах энкодера. При регистрации изменения кода состояние счетчика Λ_g сохраняется в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) контроллера и затем обнуляется. Опрос датчика прекращается при достижении заданного количества k смен кода.

После завершения процедуры опроса осуществляется передача измерительной информации в ЭВМ. Обработка данных и вычисление поправок выполняются с помощью ЭВМ.

Измерение угловой скорости вращения вала инкрементального энкодера. Угловая скорость вращения ротора инкрементального энкодера определяется на основе данных счетчика изменений логических сигналов на выходах энкодера с помощью формулы [3]:

$$\omega_i = 2\pi D_i / (\Delta t q c), \quad (1)$$

где q — количество возможных комбинаций логических сигналов (количество используемых кодов Грея); c — количество циклов сигналов, соответствующее одному обороту вала; произведение $q c$ — угловое разрешение энкодера (число изменений сочетания логических сигналов на выходах за один оборот вала); i — номер измерения угловой скорости вращения вала (номер группы опросов энкодера); D_i — число изменений кода энкодера с периодом опроса τ_a за интервал времени Δt .

Результаты первого этапа эксперимента усредняются:

$$\bar{\omega} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i = \frac{2\pi}{\Delta t q c n} \sum_{i=1}^n D_i, \quad (2)$$

где n — количество групп опросов датчика на первом этапе.

Период τ_a на первом этапе выбирается [3] так, чтобы выполнялось неравенство:

$$\frac{1}{f_0} \leq \tau_a \leq \frac{2\pi}{q c \max \omega_p} \approx \frac{\min T_p}{q c}, \quad (3)$$

где f_0 — максимальная частота опросов измерительной системы; ω_p — угловая скорость вращения вала энкодера; T_p — продолжительность одного оборота вала энкодера.

Количество u опросов датчика в группе и ее продолжительность $\Delta t = u \tau_a$ имеют ограничения [3]:

$$\max D_i \leq u \leq \frac{2\pi \max D_i}{q c \tau_a \max \omega_p} \approx \frac{\min T_p \max D_i}{q c \tau_a};$$

$$\frac{\max D_i}{f_0} \leq \Delta t \leq \frac{\max D_i \min T_p}{q c},$$

где $\max D_i$ — максимально допустимое состояние счетчика.

Угловую скорость вращения ротора инкрементального энкодера можно определить по результатам второго этапа на основе конечного состояния счетчика опросов энкодера при смене комбинации логических сигналов на выходе энкодера:

$$\omega_g = \Delta \varphi / (\tau_b \Lambda_g) = 2\pi / (\tau_b q c \Lambda_g), \quad (4)$$

где $g = 1, 2, \dots, k$; k — количество зарегистрированных смен кода на выходах ($k > q c$); Λ_g — число опросов энкодера между моментами обновления кода энкодера; $\Delta \varphi = 2\pi / (q c)$ — угловой шаг энкодера в радианах.

При малой угловой скорости вращения вала возможно переполнение счетчика Λ_g , чтобы это исключить, необходимо ограничить τ_b . Максимальная продолжительность инкрементирования счетчика Λ_g должна быть не меньше максимального интервала времени между двумя ближайшими сменами кода. Следовательно, при выполнении второго этапа период опроса имеет дополнительное ограничение снизу:

$$\tau_b \geq \frac{\Delta \varphi}{\min \omega_p \max \Lambda_g} = \frac{2\pi}{q c \min \omega_p \max \Lambda_g} \approx \frac{\max T_p}{q c \max \Lambda_g}. \quad (5)$$

Идентификация погрешностей координат границ отверстий в экране. В качестве эталонного числа отсчетов Λ_g примем $\Lambda_{ЭТ}$, соответствующую $\bar{\omega}$:

$$\bar{\omega} = \Delta \varphi / (\tau_b \Lambda_{ЭТ}) = 2\pi / (q c \tau_b \Lambda_{ЭТ}). \quad (6)$$

Тогда из (6) получим

$$\Lambda_{ЭТ} = 2\pi / (\bar{\omega} q c \tau_b). \quad (7)$$

Формула (7) с учетом (2) примет вид

$$\Lambda_{ЭТ} = \Delta t n \left(\tau_b \sum_{i=1}^n D_i \right)^{-1}.$$

Теоретические значения конечных состояний счетчика Λ_g для всех g при постоянной угловой скорости вращения вала идеального энкодера должны быть равны эталонному $\Lambda_{\text{эт}}$. Нарушение фазовой координаты края отверстия в диске энкодера приводит к погрешности измерений Λ_g , проявляющейся один раз за оборот, а в экране — к погрешности, наблюдаемой периодически несколько раз за оборот.

Вычисление первичных поправок состояний счетчика Λ_g основано на методе наименьших квадратов. Минимизируемая целевая функция представляет сумму квадратов разности:

$$F(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q) = \sum_{g=1}^k (\tilde{\Lambda}_g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q) - \Lambda_{\text{эт}})^2, \quad (8)$$

где

$$\tilde{\Lambda}_g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q) = \Lambda_g + \lambda_{\text{mod}(g-1, q)+1}, \quad (9)$$

$\text{mod}[\dots]$ — функция, возвращающая остаток от деления первого аргумента на второй.

Минимизация целевой функции (8) приводит к оптимальному вектору $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q\}$ первичных поправок конечных состояний счетчика Λ_g опросов энкодера. Из экспериментальной последовательности $\{\Lambda_g\}_{g=1, \dots, k}$ в соответствии с (9)

получаем последовательность $\{\tilde{\Lambda}_g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q)\}_{g=1, \dots, k}$, ко-

торая характеризуется меньшей дисперсией по сравнению с $\{\Lambda_g\}_{g=1, \dots, k}$ при постоянной угловой скорости вращения вала энкодера.

С целью универсализации поправок необходимо пере-
нумеровать элементы вектора λ в соответствии с нумерацией кодов Грея. Каждому коду Грея G_r на выходе энкодера ставится в соответствие величина $\hat{\lambda}_r$, где $r = 1, 2, \dots, q$. Вектор

$\hat{\lambda}$ получается из λ в результате циклического сдвига элемен-

тов вправо. Величина сдвига не превышает q . Вектор $\hat{\lambda}$ обладает свойством инвариантности относительно начального углового положения вала энкодера.

Измеренные Λ_g отличаются от эталонного $\Lambda_{\text{эт}}$. Основная причина этого — погрешности фазовых координат границ элементов энкодера. Эталонное состояние счетчиков представляется суммой измеренного Λ_g и соответствующего компонента $\hat{\lambda}_r$ вектора поправок. Из (6) следует

$$\bar{\omega}\tau_b(\Lambda_g + \hat{\lambda}_r) = \Delta\varphi, \quad (10)$$

где g, r — корни уравнения $\text{mod}(g, q) + 1 = r$.

При отсутствии первичных поправок $\hat{\lambda}_r$ на основе (10) составим уравнение

$$\bar{\omega}\tau_b \Lambda_g = \Delta\varphi - \Delta\psi_r, \quad (11)$$

где $\Delta\psi_r$ — абсолютные погрешности разности фазовых координат границ отверстий в экране энкодера.

Вычитая (11) из (10), получаем

$$\Delta\psi_r = \bar{\omega}\tau_b \hat{\lambda}_r, \quad (12)$$

т. е. абсолютные погрешности $\Delta\psi_r$ пропорциональны соответствующим компонентам вектора поправок $\hat{\lambda}_r$. Формула (12) позволяет вычислить компоненты вектора $\Delta\psi_r$.

Идентификация погрешностей координат границ элементов диска. Идентификация и компенсация статических погрешностей координат границ отверстий в диске (или штрихов на поверхности диска) инкрементального энкодера возможна при наличии на диске референтного маркера. Компоненты вектора вторичных поправок, компенсирующих погрешности координат границ элементов диска, можно принять равными $\varsigma_{\bar{g}} = \tilde{\Lambda}_{\bar{g}}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q) - \Lambda_{\text{эт}}$, где $\bar{g} = 1, 2, \dots, qc$.

Воспроизводимость вектора вторичных поправок $\varsigma_{\bar{g}}$ обеспечивается нумерацией $\bar{g}$ смен кода относительно фронта референтного сигнала.

Компенсация статических погрешностей координат элементов энкодера. При соединении вала энкодера с ведущим валом, вращающимся с переменной угловой скоростью, целесообразно использовать счетчик опросов при смене кода на выходах энкодера. Конечное состояние счетчика Λ_g более чувствительно к изменениям угловой скорости вала по сравнению с конечным состоянием D_i . Подключив энкодер к валу какого-либо устройства, необходимо измерить Λ_g . Компенсация погрешностей фазовых координат всех оптических элементов энкодера может выполняться внесением поправок к конечным состояниям счетчика опросов по формуле

$$\hat{\Lambda}_g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q; \varsigma_1, \varsigma_2, \dots, \varsigma_{g \cdot c}) = \Lambda_g + \hat{\lambda}_r + \varsigma_{\text{mod}(g-1, q \cdot c)+1}, \quad (13)$$

если $Q_g = G_r$, где Q_g — код Грея на выходах энкодера сразу после смены с номером g относительно фронта референтного сигнала.

Если измеряемая на практике угловая скорость ω' во много раз отличается от $\bar{\omega}$ вала мотор-редуктора, использованного при калибровке энкодера, то опрос энкодера необходимо выполнять с другим периодом τ' . При $\omega' > \bar{\omega}$ период опроса следует уменьшить: $\tau' < \tau_b$, чтобы получаемые конечные состояния Λ'_g не стремились к нулю. При $\omega' < \bar{\omega}$ период опроса следует увеличить: $\tau' > \tau_b$, чтобы Λ'_g не превысило $\max(\Lambda'_g)$, т. е. не произошло переполнение счетчика. При измерении ω' нужно выполнить перенормировку компонентов векторов поправок:

$$\hat{\lambda}'_r + \varsigma'_{\bar{g}} = \Lambda'_g \left[2\pi / \left\{ qc \bar{\omega} \tau_b (\hat{\lambda}_r + \varsigma_{\bar{g}}) \right\} - 1 \right]^{-1}, \quad (14)$$

где $\hat{\lambda}'_r, \varsigma'_{\bar{g}}$ и $\hat{\lambda}_r, \varsigma_{\bar{g}}$ — векторы поправок, соответствующие τ' , ω' и $\tau_b, \bar{\omega}$.

Формула (14) позволяет нормировать векторы поправок при изменении периода опроса энкодера. Значения $\hat{\Lambda}'_g$, найденные по (13), (14), подставляются в (4) вместо Λ_g .

В результате внесения поправок существенно уменьшается дисперсия значений ω_g .

Структура экспериментальной установки изображена на рис. 1. Разработанное программное обеспечение контроллера ПО-1 имеет две подпрограммы ПП-1 и ПП-2, содержащие счетчик смен кода и счетчик опросов энкодера, соответственно. Визуальный контроль за процессом работы подпрограмм выполняется с помощью светодиодных индикаторов И1, И2. С помощью ЭВМ и программного обеспечения ПО-2 осуществляется программирование контроллера, а ПО-3 реализует считывание измерительной информации из ОЗУ контроллера, вычисление поправок и компенсацию статических погрешностей фазовых координат оптических элементов энкодера.

Выбор двигателя при калибровке энкодера. В качестве двигателя при калибровке целесообразно использовать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа обладают сравнительно стабильной угловой скоростью вращения ротора. Двигатели постоянного тока и шаговые двигатели создают пульсирующее вращение, поскольку имеют явно выраженные полюса, а некоторые содержат постоянные магниты.

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором характеризуются высокими частотами вращения вала в режиме холостого хода. При калибровке инкрементального энкодера его вал должен вращаться с частотой порядка 1 об/с. Столь малая частота обоснована следующими требованиями к измерительной системе:

в процессе опроса энкодера необходимо обеспечивать последовательную регистрацию (без пропусков) всех изменений кода на его выходах при одном или нескольких полных оборотах вала энкодера. Поэтому период τ_a опроса энкодера должен быть меньше продолжительности неизменности кода;

частота опросов τ_a^{-1} ограничена сверху возможностями контроллера измерительной системы.

Описание эксперимента. В конструкции экспериментальной установки применен асинхронный конденсаторный электродвигатель Д-32 с редуктором. Номинальная частота выходного вала редуктора составляет $f_n = 24$ об/мин при номинальном моменте $M_n = 0,16$ Н·м. В режиме холостого хода частота достигает $f_{max} = 30$ об/мин.

При проведении эксперимента использован инкрементальный оптический энкодер ENT1D-D28-L00100L с $q = 4$, $s = 100$ [4]. Энкодеры семейства ENT имеют две оптические пары и два информационных выхода. Основой разработанной измерительной системы является микроконтроллер PIC18F452, содержащий таймеры, выполняющие отсчет времени независимо от выполняемых процедур опроса. Опрос энкодера начинается после окончания разгона электродвигателя при достижении постоянной угловой скорости вращения вала. На первом этапе $n = 600$ измерений. Продолжительность измерения $\Delta t \approx 0,287$ с. Каждое измерение состояло из $u = 25000$ опросов энкодера с периодом опроса

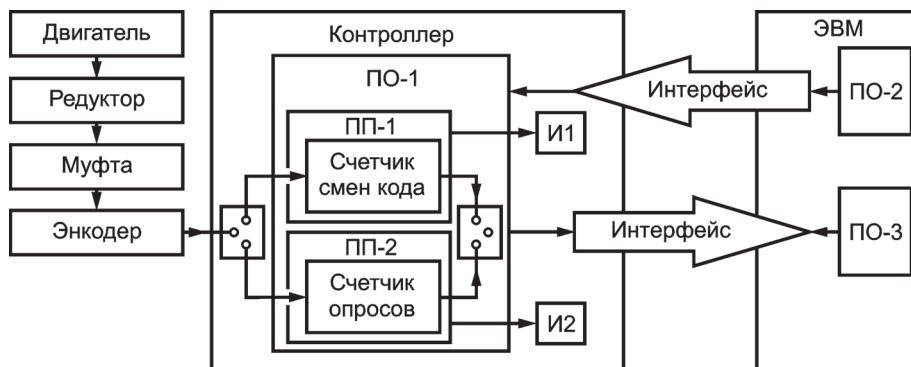


Рис. 1. Структура измерительной системы:

ПО-1, 2, 3 — программное обеспечение контроллера; ПП-1, 2 — подпрограммы; И1, И2 — индикаторы

$\tau_a = 11,5$ мкс. По окончании первого этапа была построена последовательность $\{D_{ji}\}_{j=1, \dots, n}$ (рис. 2, а), найдено ее среднее арифметическое значение D_c . По формулам (1), (2) вычислена угловая скорость $\bar{\omega} \approx 3,058$ рад/с вращения вала энкодера. Номинальной частоте вращения выходного вала мотор-редуктора соответствует $\omega_n \approx 2,513$ рад/с, режиму холостого хода — $\omega_{xx} \approx 3,142$ рад/с. Оптический энкодер создает сравнительно малый момент сопротивления [5], поэтому величина $\bar{\omega}$ близка к ω_{xx} . Экспериментальное значение $\bar{\omega}$ хорошо согласуется с ω_{xx} и ω_n , что подтверждает корректность измерений.

Второй этап содержал 750 смен сочетания логических сигналов на выходе энкодера. С учетом ограничений (3), (5) выбран период опроса датчика $\tau_b = 34,5$ мкс. Продолжительность опроса соответствует двум неполным оборотам вала энкодера. Результаты измерений $\{\Lambda_g\}_{g=1, \dots, k}$ представлены на рис. 2, б. Каждое четвертое измерение привело к малому значению Λ_g относительно $\Lambda_{ЭТ}$ и Λ_c . Периодичность «провалов», соответствующая $q = 4$, свидетельствует о нарушении фазовой координаты границы одного из отверстий во внутреннем экране энкодера.

С помощью предлагаемой методики найдены компоненты вектора первичных поправок: $\hat{\lambda}_1 = -2,628$, $\hat{\lambda}_2 = -4,394$, $\hat{\lambda}_3 = -41,179$, $\hat{\lambda}_4 = 4,819$ (рис. 3). После их внесения получена последовательность исправленных конечных состояний счетчика $\{\tilde{\Lambda}_g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q)\}_{g=1, \dots, k}$, показанная на рис. 4.

Диск использованного энкодера не имеет референтного маркера, поэтому компенсация погрешностей фазовых координат его элементов осуществляется внесением только первичных поправок.

Анализ результатов эксперимента. Среднее квадратическое отклонение (СКО) $\tilde{\Lambda}_g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q)$ от $\Lambda_{ЭТ}$ определяется формулой

$$\tilde{\sigma}_\Lambda(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{g=1}^k (\tilde{\Lambda}_g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q) - \Lambda_{ЭТ})^2}. \quad (15)$$

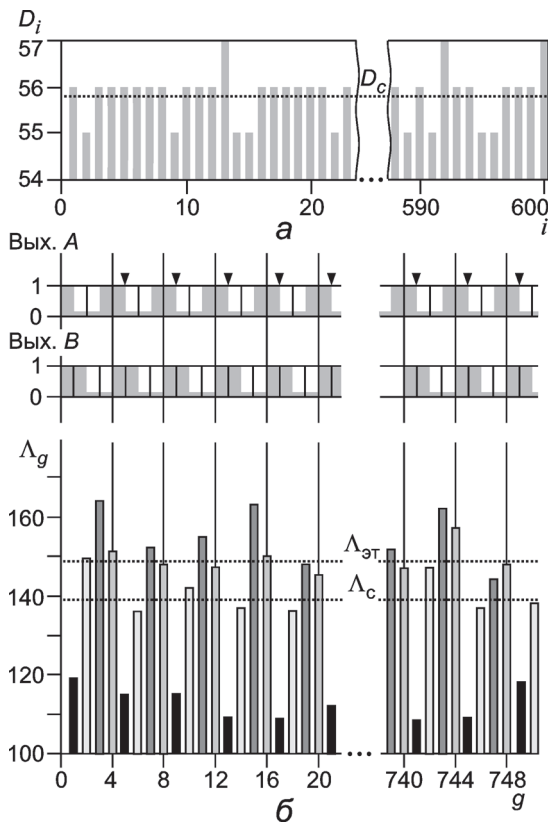


Рис. 2. Экспериментальные последовательности $\{D_i\}_{i=1,\dots,n}$ на первом этапе (а) и $\{\Lambda_g\}_{g=1,\dots,k}$ на втором этапе (б); i — номер группы опросов энкодера; g — номера смены кода на выходах энкодера

СКО исходных (экспериментальных) Λ_g от $\Lambda_{\text{эт}}$ и среднего арифметического значения последовательности $\{\Lambda_g\}_{g=1,\dots,k}$:

$$\sigma'_\Lambda = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{g=1}^k (\Lambda_g - \Lambda_{\text{эт}})^2}; \quad \sigma''_\Lambda = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{g=1}^k \left(\Lambda_g - \frac{1}{k} \sum_{g=1}^k \Lambda_g \right)^2}. \quad (16)$$

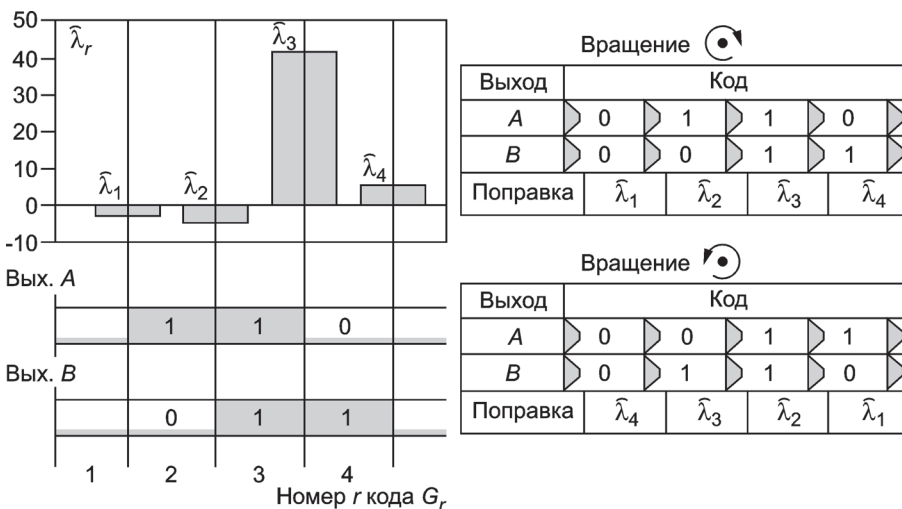


Рис. 3. Гистограммы выходных сигналов энкодера и вектора поправок

После обработки результатов измерений по (15), (16) получены следующие СКО: $\tilde{\sigma}_\Lambda(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4) \approx 5,665$, $\sigma'_\Lambda \approx 21,681$, $\sigma''_\Lambda \approx 19,347$. В итоге корректировки результатов измерений СКО конечных состояний счетчика от эталонного значения уменьшилось в 3,8 раза.

С помощью (12) найдены абсолютные погрешности разности фазовых координат границ элементов энкодера: $\Delta\psi_1 \approx -2,773 \cdot 10^{-4}$ рад, $\Delta\psi_2 \approx -4,635 \cdot 10^{-4}$ рад, $\Delta\psi_3 \approx 4,344 \cdot 10^{-3}$ рад, $\Delta\psi_4 \approx 5,083 \cdot 10^{-4}$ рад. Наибольшая погрешность $\Delta\psi_3$ соответствует наибольшей компоненте $\hat{\lambda}_3$ вектора поправок.

Максимальная относительная статическая погрешность фазовых координат границ отверстий в экране энкодера

$$\varepsilon = (\max|\Delta\psi_r|)/\Delta\varphi \approx (\max|\Lambda_g - \Lambda_{\text{эт}}|)/\Lambda_{\text{эт}}, \quad (17)$$

где $\max|\Delta\psi|$ — соответствующая максимальная абсолютная погрешность.

Максимальная относительная погрешность разности фазовых координат границ отверстий в диске (границ штрихов на его поверхности) составляет

$$\tilde{\varepsilon} = (\max|\Delta\gamma|)/\Delta\varphi \approx (\max|\tilde{\Lambda}_g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q) - \Lambda_{\text{эт}}|)/\Lambda_{\text{эт}}, \quad (18)$$

где $\max|\Delta\gamma|$ — соответствующая максимальная абсолютная погрешность.

Величины ε , $\tilde{\varepsilon}$ равны погрешностям угловых измерений соответственно до и после внесения первичных поправок, компенсирующих статические погрешности фазовых координат границ отверстий в экране. На основе результатов эксперимента с энкодером ENT1D-D28-L00100L, предлагаемой методики и формул (17), (18) найдены $\varepsilon \approx 36,2\%$, $\tilde{\varepsilon} \approx 10,9\%$. Таким образом, в результате использования предложенной методики максимальная относительная погрешность угловых измерений уменьшилась в 3,3 раза.

Выводы. Предложенная методика позволяет идентифицировать и компенсировать статические погрешности фазовых координат элементов энкодера. Определены диапазоны варьирования периодов τ_a , τ_b и числа u опроса датчика для измерения угловой скорости вращения вала и калибровки инкрементального энкодера. Методика апробирована на экспериментальной установке, оснащенной измерительной системой. Вычислены величины поправок, компенсирующих статические погрешности фазовых координат элементов энкодера ENT1D-D28-L00100L. Реализована компенсация погрешностей на примере указанного энкодера. Определена максимальная относительная статическая погрешность фазовых координат элементов этого оптического энкодера.

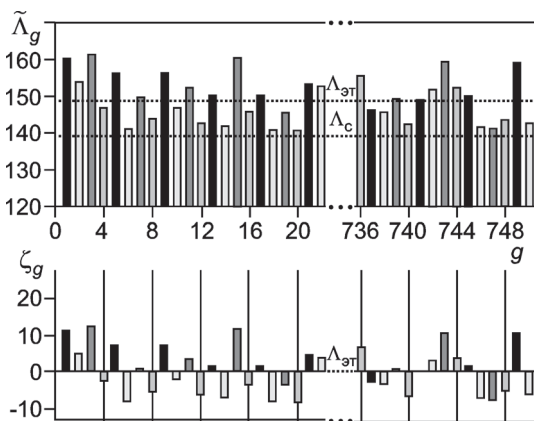


Рис. 4. Последовательность $\{\tilde{\Lambda}_g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q)\}_{g=1, \dots, k}$ после компенсации погрешностей фазовых координат границ отверстий в экране

Литература

1. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005.
2. Webster J. G. Measurement, instrumentation, and sensors handbook: CRC Press LLC, 1999.
3. Капля Е. В. Методика определения функциональной зависимости установившейся угловой скорости вращения ветроколеса от угла установки лопастей // Измерительная техника. 2012. № 6. С. 26—29; Kaplya E. V. A techniques of determining the functional dependence of the steady-state angular spin rate of a windwheel on the pitch angle of the blades. 2012. V. 55. N. 6. P. 630—636.
4. Bourns. [Офиц. сайт]. Specifications EN-Rotary optical encoder Rev.02-12 (Дата обращения 17.12.2013 г.).
5. Капля В. И., Капля Е. В. Идентификация динамических характеристик энкодера // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 49—53.

Дата принятия 11.02.2014 г.

681.2.082

Определение коэффициентов преобразования многоэлементного устройства для измерений пространственно-энергетических характеристик лазерных пучков

А. М. РАЙЦИН

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия,
e-mail: arcadiyram@rambler.ru

Рассмотрены два основных способа оценки коэффициентов преобразования многоэлементного измерительного преобразователя. Исследованы их статистические характеристики и проведено сравнение.

Ключевые слова: лазерное излучение, мощность, энергия, распределение, моменты распределения.

Two main ways to assess the transformation coefficients multi-element transducer. The statistical characteristics of the methods are presented and compared.

Key words: laser light, power, energy, distribution, moments of the distribution.

В соответствии со стандартом [1] измерения пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения (ПЭХЛИ) основаны на использовании начальных моментов распределения интенсивности излучения, определяемых с помощью многоэлементных измерительных преобразователей (МИП). Точность измерений ПЭХЛИ зависит от погрешности определения и учета коэффициентов преобразования многоэлементного устройства.

Для нахождения коэффициентов преобразования МИП в области линейности применяют поверочные установки, в состав которых входит устройство формирования равномерного распределения интенсивности излучения в поперечном сечении пучка и ослабители излучения [2]. Вычисляют данные коэффициенты двумя основными способами [3, 4].

Первый — определение коэффициентов преобразования каждого элемента МИП, второй — среднего коэффициента.

Современная элементная база позволяет оперативно реализовывать оба способа. При этом может быть поставлена задача анализа погрешностей, обусловленных применением этих способов для измерений моментов распределения, и условий, при которых предпочтителен первый или второй способ. В настоящей статье предложено решение и дан ответ на поставленную задачу.

Рассмотрим прямоугольный МИП размером $T_x \times T_y$. Для простоты анализа будем считать, что его центральный элемент расположен в начале декартовой системы координат, а стороны ориентированы параллельно соответствующим координатным осям. Число элементов в строке $N = 2n + 1$, а