

В. Э. ПАШКЕВИЧ, Г. И. ГРИЦКЕВИЧ, Ю. А. СМОЛКИН, Р. С. ЖУК, А. С. ЛЕШКО

АБСОЛЮТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЛИНЕЙНЫЙ ЭНКОДЕР ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрена архитектура абсолютного оптического линейного энкодера с гибридной шкалой, сочетающей 8-битный код Грея для грубого позиционирования и синусно-косинусные дорожки для точной интерполяции. Выполнен расчет параметров, показана возможность достижения разрешения 0,8 мкм при рабочем ходе 200 мм. Для экспериментальной проверки разработан тестовый шаблон 100×100 мм с 4-битным кодом Грея и \sin/\cos -дорожками с периодом 500 мкм. Определены требования к технологии изготовления шкалы. Актуальность работы обусловлена потребностью в доступных прецизионных средствах обратной связи электроприводных устройств с программным управлением, в том числе зондовых установок и лабораторного оборудования линейного перемещения.

Современные зондовые установки для тестирования микроэлектронных компонентов требуют высокой точности позиционирования, достигающей 10 мкм и лучше. В современных прецизионных системах позиционирования наибольшее распространение получили два типа приводов: шаговые двигатели и серводвигатели. Использование шаговых двигателей в разомкнутом контуре не обеспечивает требуемой точности, поскольку пропуски шагов приводят к накоплению погрешности позиционирования. Серводвигатели с обратной связью решают эту проблему, но существенно дороже. Оптимальным решением является применение шаговых двигателей с внешней обратной связью по положению, реализуемой на базе линейного энкодера. Разрабатываемый энкодер предназначен для использования в системе обратной связи зондовой установки, обеспечивающей прецизионное тестирование микроэлектронных компонентов с требуемой точностью 10 мкм.

Энкодер – это электромеханическое устройство, преобразующее механическое перемещение (вращение или линейное движение) в электрический сигнал, позволяющий определить положение, направление и скорость движения объекта. По принципу действия датчики перемещений разделяются на: потенциометрические, емкостные, магнитострикционные, оптические, ультразвуковые, вихретоковые, на основе эффекта Холла [2]. Магнитные энкодеры, использующие датчики Холла или магниторезистивные элементы, устойчивы к загрязнениям, но подвержены влиянию внешних магнитных полей от двигателей [1]. Индуктивные датчики отличаются точностью, надежностью и стабильностью, однако имеют ряд недостатков: трудность получения нулевого значения выходного напряжения при нейтральном положении якоря, возможность работы только на переменном токе, ограниченный диапазон линейности статической характеристики (вследствие насыщения магнитопровода), зависимость коэффициента преобразования от частоты и амплитуды питающего напряжения, а также необходимость экранировки обмотки. Емкостные энкодеры, напротив, обладают низким энергопотреблением и компактны, но чувствительны к загрязнителям воздуха, влияющим на диэлектрическую проницаемость среды [3].

Оптические энкодеры обеспечивают наивысшее разрешение – менее 1 мкм. Это достигается благодаря возможности изготовления шкал с периодом до нескольких десятков микрометров (до 20 мкм) и интерполяции аналоговых сигналов (с помощью специализированных интерполяторов и цифровых алгоритмов), а также отсутствию влияния магнитных полей на процесс измерения. Для задач, требующих точности 10 мкм и лучше, оптический принцип является наиболее подходящим.

Анализ промышленных решений показал, что оптимальной для прецизионных измерений является гибридная архитектура, сочетающая две шкалы: грубую – для абсолютного позиционирования, и точную – для уточнения положения внутри шага путем интерполяции [4]. Такой подход позволяет достичь высокого разрешения.

Кодовые шкалы классифицируются по типу кодирования на инкрементальные и абсолютные. Инкрементальные шкалы содержат равномерную последовательность штрихов. Они просты в изготовлении, но требуют процедуры поиска нуля при каждом включении питания, что неприемлемо для систем, критичных к безопасности, таких как зондовые установки, где при потере позиции щуп может повредить исследуемый образец. Абсолютные шкалы содержат уникальный код для каждой позиции, что позволяет мгновенно определять положение при включении. В двоичном коде при переходе между соседними позициями может изменяться несколько соседних значений, что при неидеальной синхронизации приводит к ошибкам, связанным с считыванием промежуточного состояния.

Код Грея, в котором при переходе к соседней позиции изменяется только один бит, исключает ошибки считывания на границах. Для достижения микрометровой точности грубая шкала дополняется точной, реализованной на основе \sin/\cos -дорожек. Они формируют следующие сигналы: $A = A_0 \cdot \sin(2\pi x/P)$ и $B = B_0 \cdot \cos(2\pi x/P)$, где P – период шкалы. Положение внутри периода определяется как $\varphi = \arctan(A/B)$, что позволяет делить период на множество частей путем интерполяции.

Ключевая трудность при изготовлении оптических энкодеров – ограничение минимального периода шкалы технологией печати. Даже фотовывод с разрешением 12000 dpi позволяет получить линии шириной лишь 20 мкм, что соответствует периоду 40 мкм. Для достижения требуемой точности 10 мкм необходимо дополнительное повышение разрешения – интерполяция.

Интерполяция представляет собой математическую обработку сигналов с \sin/\cos -дорожек. Среди существующих методов – цифрового, табличного и аналогового – для данной работы выбран цифровой метод на базе аппаратного CORDIC-модуля микроконтроллера STM32. Данный подход обеспечивает высокую скорость вычислений (один такт на определение арктангенса), детерминированность временных характеристик, критически важную для замкнутого контура управления, а также низкую нагрузку на основную вычислительную систему, обеспечивающую работу зондовой установки.

В данной работе выбрана комбинация двух шкал. Грубая шкала представляет собой 8-битный код Грея, обеспечивающий 256 уникальных позиций. При рабочем ходе 200 мм шаг грубой шкалы составляет $P_{coarse} = 200/256 = 0,78$ мм. Точная шкала выполнена в виде \sin/\cos -дорожек с периодом $P_{accurate} = 40$ мкм, что является стандартным значением для прецизионных энкодеров. Применяя интерполяцию с коэффициентом $N = 50$, получаем разрешение $\Delta = P_{accurate} / N = 40 / 50 = 0,8$ мкм. Такое сочетание позволяет сохранить преимущества абсолютного кодирования и достичь микрометрового разрешения без увеличения числа дорожек.

Для обеспечения четкости границ элементов минимального размера (ширина линии 20 мкм для \sin/\cos -дорожек, размер элемента кода Грея 0,78 мм) требуется разрешение фотовывода не менее 12000 dpi. Шкала предполагается к выполнению на стеклянной подложке с хромовым покрытием. Такой выбор обусловлен термической стабильностью стекла и высоким контрастом, его оптическая плотность $D > 3,0$, также коэффициент теплового расширения $\alpha_T = 8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ близок к коэффициенту расширения гранитного основания зондовой установки, что минимизирует температурные погрешности. Для минимизации чувствительности к загрязнениям предусмотрен защитный кожух, закрывающий шкалу по всей длине.

Для проверки гипотезы предполагается разработка тестового образца, состоящего из следующих частей: юстировочный узел, считывающая головка и шкала с периодом 500 мкм.

Считывающая головка включает инфракрасный светодиод, щелевую маску для формирования лучей, матрицу из шести фотоприемников (для сигналов \sin , \cos и четырёх дорожек кода Грея), а также предварительные усилители и фильтры. Аналоговые сигналы с фотодиодов поступают на усилители, затем на АЦП микроконтроллера STM32, где реализована цифровая обработка: фильтрация, декодирование кода Грея и интерполяция \sin/\cos -сигналов с использованием аппаратного CORDIC-модуля. Результирующее значение абсолютной позиции передаётся по интерфейсу SPI на одноплатный компьютер Orange Pi, который отвечает за общее управление установкой. Структурная схема обработки сигналов приведена на рисунке 1.

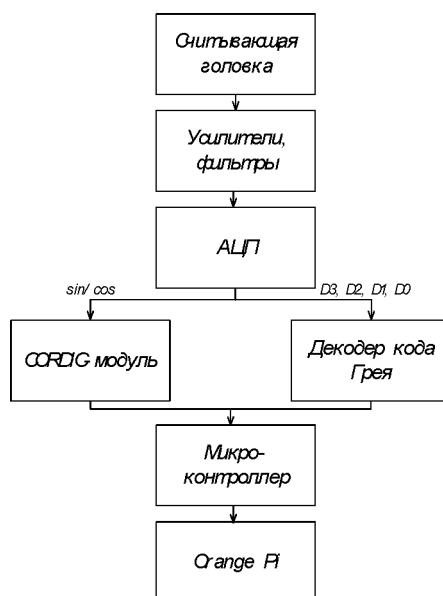


Рисунок 1 – Структурная схема обработки сигналов

Для первоначальной настройки взаимного положения считывающей головки и шкалы при сборке предусмотрен юстировочный узел с пятью степенями свободы. Он позволяет выставить рабочий зазор и обеспечить параллельность головки шкале, что крайне важно для получения сигнала с требуемой амплитудой. После настройки положение фиксируется.

Для экспериментальной проверки предложенных решений разработан тестовый шаблон размером 100×100 мм, содержащий 4-битный код Грея (16 позиций) и \sin/\cos -дорожки с увеличенным периодом 500 мкм. Уменьшение числа бит и увеличение периода по сравнению с финальной версией (8 бит, 40 мкм) упрощает изготовление и позволяет провести первичную отладку алгоритмов без использования сложного оборудования. Внешний вид шаблона показан на рисунке 2.

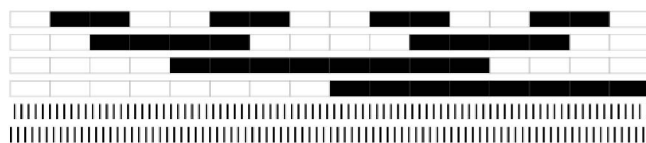


Рисунок 2 – Тестовый шаблон

Предложенная архитектура абсолютного оптического энкодера сочетает преимущества абсолютного кодирования (мгновенное определение позиции при включении, безопасность для исследуемых образцов) и высокого разрешения, достигаемого интерполяцией \sin/\cos -сигналов. Научная новизна работы заключается в адаптации промышленной гибридной архитектуры к условиям лабораторного изготовления с сохранением точностных характеристик, а также в разработке конструктивных решений (юстировочный узел, защитный кожух), направленных на преодоление основных трудностей. Определены требования к технологии фотовывода (разрешение 12000 dpi), обеспечивающие достижение целевого разрешения 0,8 мкм при рабочем ходе 200 мм. Для экспериментальной проверки создан тестовый шаблон, позволяющий отработать алгоритмы интерполяции и декодирования.

Список литературы

1. Сысоева, С. Датчики магнитного поля: ключевые технологии и новые перспективы. Ч. 1. Датчики холла / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2014. – № 1.
2. Шерстобитова, А. С. Датчики физических величин / А. С. Шерстобитова. – СПб. : Университет ИТМО, 2017. – 57 с.
3. Рогова, М. В. Датчики электрических систем автоматического управления : учеб. пособие / М. В. Рогова. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. – 88 с.
4. Comparison of the principle error between two fine code waveform interpolation methods of photoelectric encoders / Y. Feng, Q. Wan, C. Song [et al.] // Infrared and Laser Engineering. – 2014. – Vol. 43, No. 7.

The article considers the architecture of an absolute optical linear encoder with a hybrid scale combining 8-bit Gray code for coarse positioning and sine-cosine tracks for fine interpolation. The parameters are calculated, and the possibility of achieving 0.8 μm resolution with a 200 mm travel range is demonstrated. A 100×100 mm test pattern with 4-bit Gray code (16 positions) and sin/cos tracks with a period of 500 μm has been developed for experimental verification. Requirements for scale manufacturing technology, including the need for photoplotting with 12000 dpi resolution, are defined. The relevance of this work is due to the need for affordable precision feedback devices for program-controlled electric drive devices, including probe systems and laboratory equipment for linear motion.

Пашкевич Валерия Эдуардовна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, pashkevitch.lera@gmail.com.

Грицкевич Григорий Ильич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь.

Смолкин Юрий Александрович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, alikkoval375@gmail.com.

Жук Роман Сергеевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, dyzeex64b@gmail.com.

Лешко Александр Сергеевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, leshhko05@gmail.com.

Научный руководитель – *Ловшенко Иван Юрьевич*, старший преподаватель кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, lovshenko@bsuir.by.