

Аналого-цифровые преобразователи составляющих перемещения с применением микроэлектронных синусно-косинусных магнитных энкодеров

Ю. С. СМЕРНОВ, Т. А. КОЗИНА, Е. В. ЮРАСОВА, А. В. СОКОЛОВ

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия, e-mail: urasova2004@gmail.com

Рассмотрены особенности выполнения циклических и следящих преобразователей перемещения на основе однокристалльной интегральной микросхемы синусно-косинусного магнитного энкодера. Предложены пути построения на его основе самоорганизующегося преобразователя с переменной и многокомпонентной структурой, обеспечивающими посредством аналого-цифрового интегрирования цифровые эквиваленты ускорения и скорости перемещения.

Ключевые слова: синусно-косинусные датчики угла, циклические и следящие преобразователи перемещения, синусно-косинусный магнитный энкодер, калибровка датчиков.

The features of design of the cyclic and tracking displacement converters based on a single-crystal integrated circuit of sine-cosine magnetic encoder are considered. The ways of building on its base the self-organizing converter with variable and multi-component structure ensuring by means of analog-digital integration the digital equivalents of displacement and acceleration — are suggested.

Key words: sine-cosine angle-data transmitters, cyclical and tracking transmitters, sine-cosine magnetic encoder, sensors calibrate.

В [1] представлены возможности структурного и алгоритмического повышения эффективности аналого-цифровых преобразователей (АЦП) составляющих перемещения на основе электромеханических первичных синусно-косинусных датчиков угла (СКДУ). Выявлены ограничения, связанные с их применением в электромехатронных преобразователях (ЭМТП). Дальнейшее повышение эффективности ЭМТП предусматривает электронизацию их структуры, чему способствует конвергенция нанотехнологий в мехатронику [2]. В этом плане особый интерес представляет переход в ЭМТП от кинематических первичных СКДУ [3] к генераторным синусно-косинусным магнитным энкодерам (СКМЭ) [4], основанным на эффектах Холла или гигантского магниторезонанса (ГМР) [5].

Одно из применений датчиков Холла — измерение угла поворота. В этом случае система измерения угла будет со-

держивать датчик Холла и расположенный над ним диаметрально поляризованный магнит. Вращение вала с установленным на нем магнитом изменяет магнитную индукцию над датчиком Холла, и по напряженности магнитного поля можно судить об угле поворота вала. Для обеспечения устойчивости результатов необходимо использовать четыре датчика Холла, расположенные парами под углом 90° относительно оси вращения. При небольших смещениях магнита в горизонтальной плоскости падение сигнала на одном датчике будет компенсироваться ростом сигнала на противоположном.

В случае, когда не требуется формировать составляющие скорости и ускорения перемещения, СКМЭ можно применять в качестве циклического преобразователя перемещения (ЦПП), формирующего только цифровой эквивалент его величины. Функциональная схема разомкнутого ЦПП представлена на рис. 1.

На четырех датчиках Холла $H1—H4$, расположенных на кристалле радиусом 1,1 мм, фиксируется напряженность H поля магнита. Переменный электрический сигнал от датчиков, пропорциональный H , поступает на дифференциальные усилители $ДУ1$ (от $H1$ и $H3$) и $ДУ2$ (от $H2$ и $H4$). Сигналы с датчиков $H1$ и $H3$ определяют вектор синуса ($\sin$), а сигналы с датчиков $H2$ и $H4$ — вектор косинуса ($\cos$). Выходные сигналы от $ДУ1$ и $ДУ2$ поступают в $АЦП1$ и $АЦП2$, а затем в цифровой сигнальный процессор $ЦСП$, в котором по проекциям составляющих рассчитываются абсолютный угол поворота α и амплитуда H по зависимостям [6]:

$$H_1 = A \sin \alpha; H_2 = A \sin(\alpha + 90^\circ) = A \cos \alpha;$$

$$H_3 = A \sin(\alpha + 180^\circ) = A(-\sin \alpha), H_4 = A \sin(\alpha + 270^\circ) = A(-\cos \alpha),$$

где A — амплитуда сигнала с МДХ; $\alpha = \arctg[(H_1 - H_3)/(H_2 - H_4)]$.

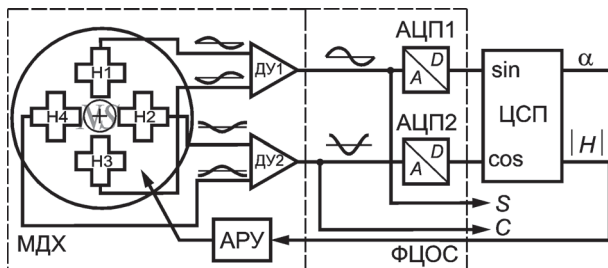


Рис. 1. Функциональная схема циклического преобразователя перемещения:

МДХ — массив датчиков Холла $H1—H4$ с дифференциальными усилителями $ДУ1$, $ДУ2$; ФЦОС — формирователь цифровой ортогональных составляющих перемещения; $АЦП1$, $АЦП2$ — аналого-цифровые преобразователи; $ЦСП$ — цифровой сигнальный процессор; $АРУ$ — цепь автоматической регулировки усиления

С аналогового выхода ЦСП сигнал поступает на вход автоматической регулировки усиления АРУ, которая в определенной степени компенсирует изменение сигнала с датчиков $H1—H4$ при вариациях магнитной индукции, изменениях температуры или расстояния между магнитом и микросхемой.

Разомкнутый циклический преобразователь перемещения (см. рис. 1) отличается от аналога с АЦП отношения напряжений и арктангенсным постоянным запоминающим устройством (ПЗУ) [1] тем, что в нем аналого-цифровое преобразование сигналов СКМЭ выполняется отдельно для каждой проекции H и путем арктангенсного преобразования формируется цифровой эквивалент угла α . Информационная емкость преобразования сигналов МДХ оказывается ниже, чем в варианте [1], в котором один АЦП формирует код арктангенса преобразуемого угла в октанте и его идентификация в пределах оборота позволяет получить три дополнительных старших по весу разряда кода угла α .

Скорость вращения магнита, достигающая 30000 мин^{-1} , влияет на точность измерения угла, так как для получения результатов необходимо время, в течение которого вращающийся магнит займет новое положение. Поэтому для минимизации погрешности, возникающей при вращении магнита, необходимо обеспечить минимальные задержки в измерительной цепи. Для цифрового преобразования сигналов (см. рис. 1) используют быстродействующие АЦП1 и АЦП2 с временем выборки $1,15 \text{ мкс}$. Однако из-за низкочастотных фильтров на входах АЦП появляется дополнительная задержка $15,6 \text{ мкс}$, вносящая погрешность при определении угла. При увеличении скорости вращения магнита погрешность определения угла увеличивается линейно на $0,175 \%$ на каждые 1000 мин^{-1} [6].

Устройство СКМЭ производства Austriamicrosystems [6] — однокристалльная микросхема с размером корпуса $5,3 \times 6,2 \text{ мм}$ и магнит диаметром 6 и высотой 2,5 мм (рис. 2). Основными типами сплавов, применяемых для изготовления магнитов, являются AlNiCo , SmCo и NdFeB . При выборе магнита руководствуются требованиями к техническим характеристикам, условиям эксплуатации и стоимости. В большинстве случаев достаточно использовать магниты NdFeB с защитным покрытием от коррозии. Поскольку определение угла происходит бесконтактно, такая конструкция имеет повышенную надежность благодаря исключению движущихся частей и идеально подходит для применения в неблагоприятных условиях эксплуатации (вибрации, загрязнения) на высоких скоростях вращения (до 30000 мин^{-1}), что многократно превышает предельные скорости электромеханических первичных преобразователей [1].

Несомненные достоинства СКМЭ снижаются из-за его низкой точности (8—10 разрядов) [6]. Это ограничивает применение СКМЭ в ЭМТП, где требуется информационная способность выше 10 разрядов [3].

Эффективным способом снижения статической погрешности преобразования является калибровка выходных результатов СКМЭ в статике на автоматизированном стенде (см. рис. 2). Стенд является безредукторным, прецизионным ЭМТП. Время калибровки СКМЭ составляет 12 с при средней скорости вращения вала волнового шагового электродвигателя 30° с^{-1} .

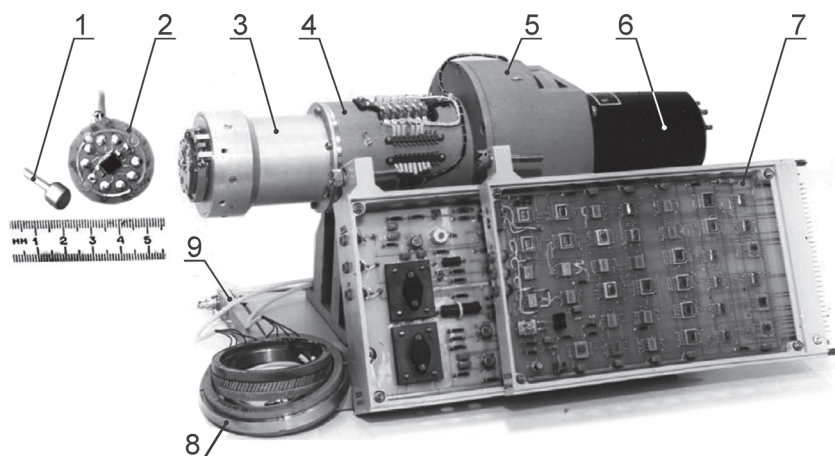


Рис. 2. Автоматизированный стенд калибровки СКМЭ:

1 — насадка с магнитом; 2 — плата с микросхемой; 3 — оправка с СКМЭ; 4 — узел сопряжения; 5 — корпус установки статора двухотсчетного прецизионного вращающегося трансформатора 8 типа ВТ-100; 6 — волновой шаговый электродвигатель; 7 — полифункциональный преобразователь; 9 — микроконтроллер

тродвигателя 30° с^{-1} . Калибровка СКМЭ проводится методом обучения, ее результаты в цифровом виде заносятся в память микроконтроллера 9 через интерфейс RS-485 или SSI. Более точный полифункциональный преобразователь 7 [7], формирующий из выходных сигналов СКВТ цифровые эквиваленты ортогональных составляющих перемещения, скорости и ускорения, обучает более совершенный СКМЭ.

Снижение погрешности за счет автокалибровки достигается в СКМЭ на основе ГМР квантомеханического эффекта. Он наблюдается в тонких металлических пленках, чередующихся ферромагнитных и проводящих немагнитных слоях. Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоев. Направлением намагниченности можно управлять, например, приложением внешнего магнитного поля. В основе эффекта лежит рассеяние электронов, зависящее от направления спина.

Компания Infineon Technologies выпускает СКМЭ типа TLE5012, определяющий угол в диапазоне 360° по изменению направления магнитного поля. Измерение проводится с использованием встроенных ГМР-элементов, соединенных в мостовую схему, сопротивление которых меняется в зависимости от направления магнитного поля. Датчик содержит встроенные АЦП и цифровой сигнальный процессор для тригонометрических расчетов. Предусмотрена возможность измерения угловой скорости магнита, что позволяет компенсировать динамическую составляющую погрешности преобразования перемещения.

Следует отметить, что рассмотренные варианты калибровки приводят к незначительному снижению погрешности преобразования перемещения в цифровой эквивалент. Однако их применение требует использования прецизионной аппаратуры, дополнительных устройств памяти, микроконтроллера с соответствующим интерфейсом.

Для более эффективного снижения статической и динамической составляющих погрешности преобразования, расширения функциональных возможностей целесообразно перейти к самоорганизующимся структурам преобразования, сочетающим достоинства циклических и следящих структур [1]. При этом структурные изменения происходят на основе оцен-

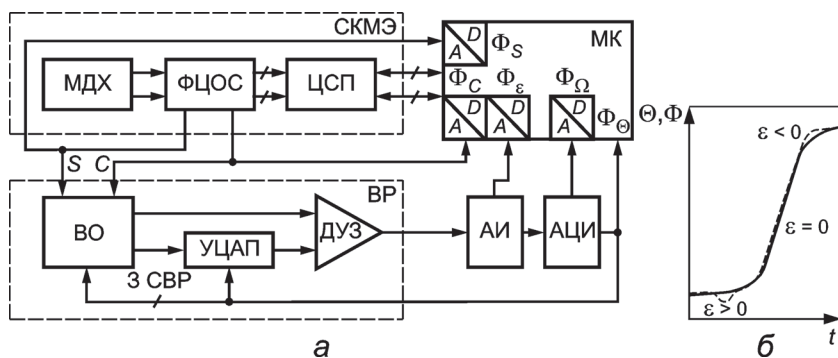


Рис. 3. Функциональная схема самоорганизующегося преобразователя с СКМЭ и МК (а) и его переходная характеристика (б):

ВО — выявитель октанта; УЦАП — умножающий цифроаналоговый преобразователь; ВР — выявитель рассогласования; 3 СВР — три старших по весу разряда; СКМЭ — синусно-косинусный магнитный энкодер; АИ, АЦИ — аналоговый и аналого-цифровой интеграторы; МК — микроконтроллер. Остальные обозначения как на рис. 1. Для подключения СКМЭ к МК служит SSI-интерфейс

ки координат преобразователя, т. е. составляющих перемещения Φ_{Θ} , скорости Φ_{Ω} , и ускорения Φ_{ε} .

Преобразователь должен быть многокомпонентным [7] и иметь функции, необходимые и достаточные для выбора алгоритма преобразования. Это свойство должно сохраняться под воздействием как внутренних, так и внешних факторов, т. е. преобразователь должен обладать адаптацией. Она реализуется в замкнутых структурах, которые отличаются большей устойчивостью по сравнению с разомкнутыми. Это обстоятельство является решающим при проведении дальнейших исследований по снижению погрешности и повышению эффективности АЦП на основе СКМЭ.

Функциональная схема замкнутого самоорганизующегося преобразователя с СКМЭ и МК представлена на рис. 3, а, переходная характеристика следящего преобразователя перемещения (СПП) — на рис. 3, б.

Выявитель рассогласования ВР (см. рис. 3, а) предназначен для формирования сигнала ошибки в замкнутой электронной следящей системе (ЭСС), которая содержит выявитель октантов ВО, идентифицирующий код октанта, умножающий цифроаналоговый преобразователь УЦАП и два включенных последовательно интегратора: аналоговый АИ и аналого-цифровой АЦИ. Особенности работы ЭСС отражены в [1]. В отличие от электромеханического СКДУ микроэлектронный СКМЭ формирует ортогональные составляющие перемещения без частотной модуляции опорным напряжением. Поэтому АИ не содержит демодулятора, необходимого при использовании СКДУ в качестве первичного преобразователя перемещения [1].

Если первичным преобразователем служит СКМЭ на основе ГМР, то в функциональной схеме самоорганизующегося преобразователя (см. рис. 3, а) произойдут некоторые изменения. Это связано с тем, что в отличие от рассматриваемого ранее варианта СКМЭ с МДХ (см. рис. 1) в датчике с ГМР ортогональные составляющие перемещения оказываются доступны в цифровой форме. Поэтому формирователь цифровых ортогональных составляющих ФЦОС исключается (см. рис. 3, а). Аналоговые сигналы S, C должны формироваться при помощи ЦАП, имеющихся в МК. Тогда отпадает необходимость использования в МК двух АЦП, формирующих цифровые эквиваленты Φ_S , Φ_C ортогональных составляющих перемещения.

Синергетический эффект от перехода к самоорганизующейся структуре отсчетной части АЦП составляющих перемещения (см. рис. 3, а) проявляется в использовании цифровых эквивалентов ускорения ε и скорости Ω . Эти составляющие не только дополняют друг друга, но и образуют самоорганизующуюся структуру, которая повышает достоверность формирования цифрового эквивалента перемещения Θ при входных воздействиях и внешних возмущениях, т. е. улучшают адаптивность преобразования благодаря интеллектуальным возможностям структуры.

Первая составляющая синергетического эффекта обеспечивается формированием цифрового эквивалента ускорения: $\dot{\Phi} \sim U_{\varepsilon} \sim \varepsilon$. Известно [7], что в установившемся режиме, когда $\varepsilon = 0$ (см. рис. 3, б), погрешность определения скорости Ω в следящем преобразователе перемещения близка к нулю; ее динамическая погрешность возрастает в периоды изменения, т. е. когда $\varepsilon \neq 0$.

Снижение динамической погрешности, обеспечиваемое самоорганизующейся структурой, оказывается особенно важным при преобразовании знакопеременных воздействий [8]. Для коррекции динамической погрешности в ЭСС следует перейти от пропорционального управления к релейному, при котором преобразователь функционирует в циклическом режиме. При этом отклонение цифрового эквивалента перемещения от входного воздействия устраняется в ускоренном темпе. Интервал времени устранения этого отклонения сокращается на три порядка по сравнению со следящим режимом при пооктантном разбиении полного диапазона преобразования.

Вторая составляющая синергетического эффекта обеспечивается формированием цифрового эквивалента скорости: $\dot{\Phi} \sim U_{\Omega} \sim \Omega$. Преобразователь (см. рис. 3, а) позволяет минимизировать упомянутую выше динамическую составляющую погрешности формирования цифрового эквивалента перемещения Φ_{Θ} . Этот процесс реализуется в цифровом сигнальном процессоре ЦСП благодаря непрерывной автоматической коррекции Φ_{Θ} с учетом текущего значения Φ_{Ω} . Полученный эффект позволяет рассматривать самоорганизующийся вариант преобразователя в качестве устройства с техническим интеллектом, направленным на самосовершенствование.

Опыт разработки и внедрения свидетельствует о целесообразности перехода в отсчетной части преобразователей от ЦСП к использованию преобразователей на интегральных АЦП, ЦАП и ПЗУ с тригонометрическими прошивками в сочетании с МК [8]. Это устранило методическую погрешность при тригонометрических вычислениях в ЦСП по приближенным зависимостям и временную задержку при оцифровке сигналов, поступающих от МДХ на входы АЦП1 и АЦП2 (см. рис. 1).

Усложнение функциональной схемы преобразователя на рис. 3, а по сравнению со схемой на рис. 1 обосновывается повышением его функциональных и метрологических возможностей. Последующая конвергенция нанотехнологий в микроэлектронный компонент ЭМТП приведет к уменьшению размеров устройства при применении в элементах памяти и преобразования структур графена. Исследователям из США удалось разместить 10000 графеновых транзисто-

ров на подложке из карбида кремния 5×5 мм. Соединив графен и молибденит, ученые Федерального политехнического института Лозанны (EPFL) получили новый прототип перспективной флеш-памяти [9].

Природный полупроводник и распространенный в природе минерал молибденит (дисульфид молибдена MoS_2), как и графен, обладает слоистой структурой. В отличие от объемных кристаллов кремния, основного материала современной электроники, слои молибденита двумерны, что позволяет создавать более миниатюрные, по сравнению с кремниевыми, транзисторы. Ученые пошли дальше, разработав прототип флеш-памяти, объединяющий свойства молибденита и высокой проводимости графена. Этот прототип состоит из нескольких слоев, центральный выполнен не из кремния, а из сульфида молибдена. Электроды (нижний слой), прилегающие к молибдениту, изготовлены из графена, как и многослойная структура собственно элементов памяти (верхний слой). Комбинируя эти два материала, можно добиться значительного прогресса в миниатюризации элементов электроники. Кроме того, такой подход может помочь в создании гибких наноэлектронных устройств. Как и обычный элемент энергонезависимой флеш-памяти, молибденитовый хранит один бит информации, но поскольку он тоньше и чувствительнее к заряду, он компактен и меньше потребляет.

Изложенное выше позволяет рассчитывать на существенное повышение функциональных возможностей ЭМТП путем создания на основе генераторных первичных преобразователей, использующих эффект Холла или ГМР, многокомпонентных [7], полифункциональных [8] и самоорганизующихся структур АЦП составляющих перемещения с высокими информационными показателями в статике и динамике.

Литература

1. Смирнов Ю. С., Козина Т. А., Серебряков П. Б. Аналого-цифровые преобразователи составляющих перемещения на основе электромеханических первичных преобразователей // Измерительная техника. 2013. № 9. С. 40—43.
2. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 2—10.
3. Смирнов Ю. С., Соколов А. В., Лысов А. Н. Дискретные преобразователи перемещения с кинестетическими датчиками положения // Вестник Ю.-Урал. гос. ун-та. Энергетика. 2012. Вып. 17. С. 37—41.
4. Воронников С. А. Информационные устройства робототехнических систем: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.
5. Janich J. Understanding Integrated Hall Effect Rotary Encoders. Analog Devices. Nov. 1. 2006.
6. Щерба А. Магнитные энкодеры производства Austriamicrosystems // Компоненты и технологии. 2008. № 7. С. 50—52.
7. Домрачев В. Г., Матвеевский В. Р., Смирнов Ю. С. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений. М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Домрачев В. Г., Смирнов Ю. С. Цифроаналоговые системы позиционирования. М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Технопарад: Идеальный союз // Популярная механика. 2013. № 7. С. 26.

Дата принятия 15.04.2013 г.

ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ

351.821

Прецизионное измерение массы газов

А. А. БЕГУНОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт жиров Российской академии сельскохозяйственных наук, С.-Петербург, Россия, e-mail: begunov38@mail.ru

Рассмотрен метод прямого измерения массы газов и приведена конструкция необходимого для этого измерительного сосуда. Проведен анализ источников погрешности результата измерений.

Ключевые слова: масса газов, прецизионные измерения, конструкция сосуда.

This article concerns the methods and techniques of the direct precision measurement mass of gas. Detail recommendation on the vehicle construction are given. All main error sources are also mentioned and discussed.

Key words: mass of gas, precision measurements, vehicle construction.

Масса является одной из важнейших физических величин в аналитических измерениях прежде всего потому, что она составляет основу всех характеристик состава материалов и веществ [1]. Известны методы Барда, Гаусса, Менделеева для точного взвешивания [2—4]. Однако при прецизион-

ных измерениях веществ и материалов с низкой плотностью в этих методах не учтены многие источники погрешности, что при решении определенных научно-исследовательских задач (измерение плотности газообразных веществ, синтез газовых смесей заданного состава, анализ состава газооб-