

Аналог тензорезистивного преобразователя на эффекте Холла

Александр Драпезо, Вячеслав Ярмолович, Алексей Лосев, Игорь Буслов, Валерий Бауткин (Москва)

Проанализировано современное состояние измерительных преобразователей как неотъемлемых элементов информационно-измерительных систем и автоматизированных систем управления технологическими процессами. Описан миниатюрный механоэлектрический преобразователь с использованием эффекта Холла.

В последние годы большое внимание уделяется созданию механоэлектрических преобразовательных устройств в миниатюрном исполнении с использованием эффекта Холла. Их преимуществом является отсутствие механического контакта между объектом контроля или измерения и органом преобразования, что значительно повышает надёжность таких систем. Принцип действия – бесконтактное превращение индукции магнитного поля в электрический выходной сигнал, его преобразование и обработка. Создание таких устройств позволяет осуществить групповое изготовление миниатюрных элементов Холла стандартными методами микроэлектроники (фотолитография, скрайбирование, приварка контактов, герметизация), использовать взаимозаменяемые группы источников магнитных полей и малогабаритных корпусов, унифицированные платы усиления и обработки сигнала.

В качестве источников магнитного поля применяются миниатюрные системы постоянных магнитов из редкоземельных материалов. Магниточувствительные элементы Холла выполняются из гетероэпитаксиальных структур антимолибдита индия на полупроводнике арсениде галлия с высокой подвижностью носителей заряда n -типа. Эти мини-устройства могут объединяться в двухкомпонентные или трёхкомпонентные магниточувствительные зонды и собираться в матрицы.

При изготовлении двухкомпонентных зондов элементы Холла располагаются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, а в трёхкомпонентных зондах соответственно в трёх. Такие зонды широко используются в различных отраслях – от устройств

контроля в автоматике и автомобильном транспорте до разработок в медицине и лечебных технологиях – и предназначены для измерения магнитной индукции в диапазоне от 0,001 до 10 000 мТл в узких зазорах (>100 мкм) при температуре от 1,5 до 473 К. Зонды могут применяться для проведения уникальных научных исследований и при создании малогабаритных (активная область 100×100 мкм) электронных преобразователей механических величин в электрический сигнал.

Современное развитие и совершенствование измерительных преобразователей как неотъемлемых элементов информационно-измерительных систем и автоматизированных систем управления технологическими процессами определяет новые задачи, в том числе и перед разработчиками первичных преобразователей физических величин.

Одним из видов первичных преобразователей являются упругие механические преобразователи, которые в настоящее время получили широкое распространение в качестве первичных преобразовательных элементов датчиков различных физических величин (веса, нагрузки, вибрации и др.). В таких измерительных устройствах контролируемым параметром, как правило, является деформация определённого элемента конструкции объекта.

При проектировании и последующей эксплуатации элементов силовых конструкций не допускаются большие величины их деформации, что приводит к малым значениям выходных перемещений элементов преобразователя. Вследствие этого, в качестве первичных преобразователей для квазистатических деформаций, на практике применяются в основном тензорезистивные преобразователи.

Однако при больших импульсных нагрузках ударного характера или циклических с большим количеством циклов применение тензопреобразователей затруднено или практически невозможно из-за их временной нестабильности, в основном связанной с проблемой крепления тензорезисторов к деформируемому элементу и необратимыми изменениями электрических свойств материала тензорезистора. Обычно максимальное количество циклов срабатывания тензорезисторов ограничено числом $10^7 \dots 10^8$.

В процессе выполнения работ по повышению точности измерения и надёжности работы первичных преобразователей физических величин авторами статьи предложено решение, альтернативное традиционному. В разработанной конструкции датчиков произведена замена тензорезистивных преобразователей на механоэлектрические преобразователи перемещений (МЭПХ), состоящие из миниатюрных преобразователей Холла и высокоградиентных магнитных систем на основе миниатюрных постоянных магнитов (например, из самарий-кобальтовых сплавов).

Современные магниты имеют острую магнитную индукцию более 1,3 Тл. Это позволяет создавать в миниатюрных магнитных системах, таких как квадрупольная магнитная линза, в узком зазоре градиент магнитной индукции, превышающий 2,0 Тл/мм. С использованием прецизионных миниатюрных преобразователей Холла МПХ ШИЯБ.007.00.000 (разработка ООО «Вист групп сенсор»), размещённых в узком зазоре 130 мкм, обеспечивается разрешающая способность преобразователей перемещений не менее чем 0,005 мкм, что позволяет использовать их вместо тензорезисторов.

На сегодняшний день широко доступны датчики Холла других фирм могут функционировать в зазорах, на порядок превышающих указанный, что влечёт за собой требования к использованию существенно больших магнитных систем для получения ана-

логичных характеристик преобразователей перемещений.

Главное преимущество МЭПХ перед тензорезисторами заключается, прежде всего, в бесконтактном съёме информации о перемещении контролируемого объекта посредством измерения величины индукции магнитного поля преобразователем Холла. При этом количество циклов срабатывания ограничивается только стабильностью и воспроизводимостью упругих деформаций в контролируемом объекте. МЭПХ не боится импульсных (ударных) нагрузок и других механических воздействий, не приводящих к возникновению остаточной деформации контролируемого силового элемента. Простота конструкции обеспечивает высокую надёжность и долговечность МЭПХ.

В качестве примера практического использования МЭПХ можно привести разработанные, изготовленные и прошедшие дорожные испытания весоизмерительные системы для контроля груза большегрузных карьерных самосвалов. Реализован проект по внедрению миниатюрной измерительной системы в тело (конструкцию) несущей

детали автомашины (ось, применяемая в автомобилестроении для соединения кузова с шасси). В этом случае обеспечено требование контроля загрузки автосамосвала не только в статике, но и в динамике. Решить подобную задачу, используя тензопреобразователи, невозможно, поскольку упругий элемент конструкции машины постоянно подвергается критическим нагрузкам.

Реализованная измерительная система представляет собой стержень из немагнитного материала, на котором жёстко закреплена магнитная система. Стержень вкручен в тело оси таким образом, что малейший прогиб оси приводит к перемещению магнитной системы. В свою очередь, миниатюрный преобразователь Холла жёстко крепится на торце оси и позиционируется в узком зазоре высокоградиентной магнитной системы. Таким образом, с использованием конструктивной особенности детали (ось прогибается под нагрузкой) практически без изменения её конструкции и технических характеристик реализована измерительная система, надёжность которой зависит только от надёжности самой детали,

при этом не требуются изменения в документации по установке, обслуживанию и ремонту узла автосамосвала.

На рисунке 1 представлены реальные графики работы большегрузного автомобиля БелАЗ, сформированные в системе контроля загрузки (СКЗ). График зависимости веса, перевозимого самосвалом, от времени (погрузка, перевозка, разгрузка, холостой пробег автосамосвала) представляет собой обработанные по определённому алгоритму данные, полученные при помощи описанной выше измерительной системы. Сопоставление данных, полученных с весоизмерительной системы, с величиной расхода топлива и скоростью движения автосамосвала позволяет выработать рекомендации по экономии топлива и оценить качество вождения автосамосвала каждым водителем, а также сократить простой и оптимизировать скоростной режим движения без ущерба безопасности движения.

График зависимости количества топлива в баке от времени также сформирован на основании данных, полученных от датчика уровня топлива УТ-90, в основе функционирования которого

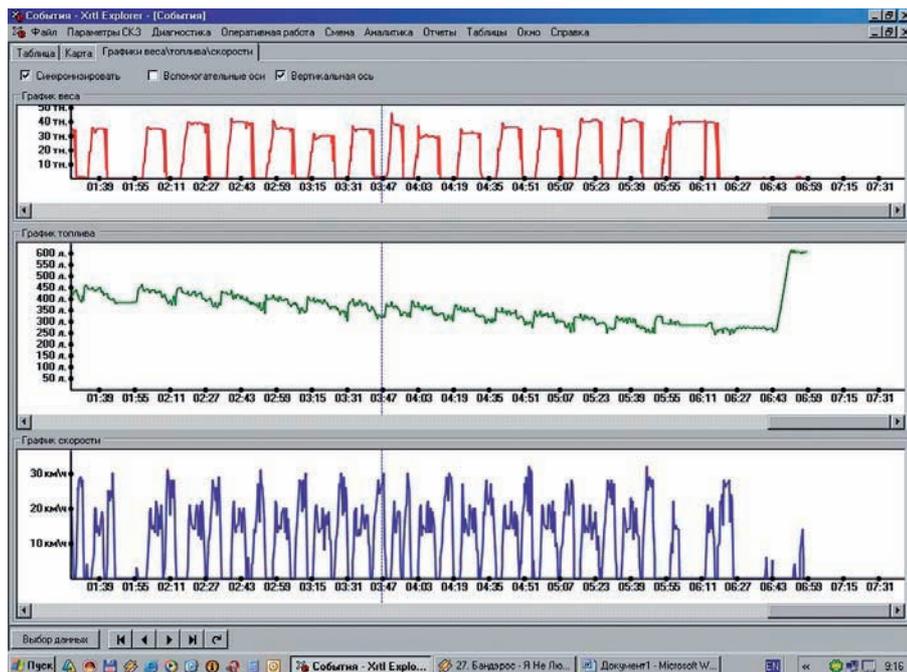


Рис. 1. Реальные графики работы большегрузного автомобиля

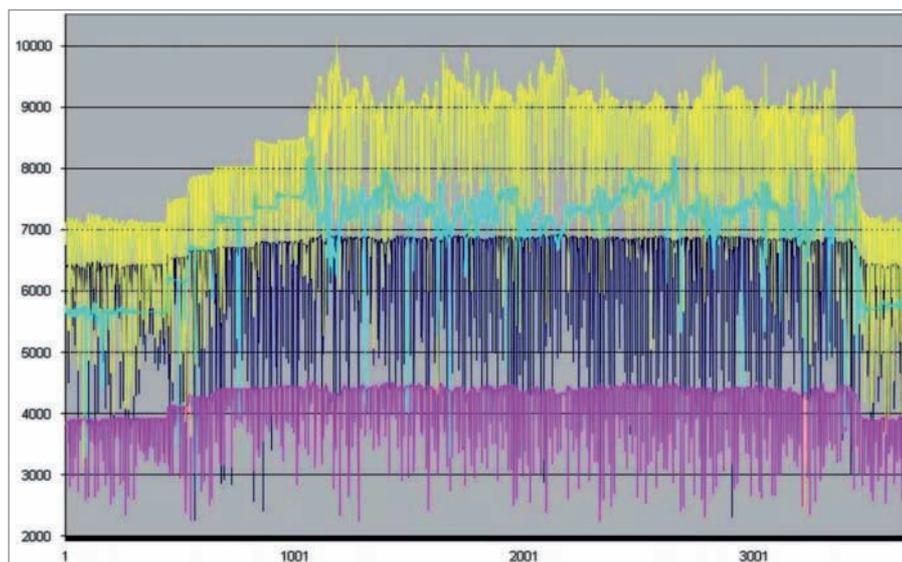


Рис. 2. Графики показаний с четырёх МЭПХ большегрузного автомобиля

лежит угловой преобразователь поворота штанги с поплавком на эффекте Холла, что подтверждает возможность использования эффекта Холла для измерения различных физических величин.

Точные измерения веса перевозимого груза невозможно получить по данным с одного МЭПХ, поскольку упругий прогиб различных частей контролируемых конструкций отличается из-за сложной эпюры распределения деформаций. Следовательно, целесо-

образно применять измерения деформации (прогиба) в 4 – 6 точках. Затем с использованием микропроцессорной обработки можно вычислить величину загрузки кузова с относительной погрешностью не более 5%. На рисунке 2 приведены временные графики показаний с четырёх МЭПХ большегрузного автосамосвала.

Весоизмерительные системы могут быть построены по принципу контроля минимальных деформаций в несущих конструкциях, таких как шасси автомобиля, железнодорожный рельс и т.д. Особенностью таких систем является обязательное разнесение точек крепления двух конструктивных деталей (рычагов). На одной из деталей располагается высокоградиентная

магнитная система, на другой – элемент Холла. Высокая точность и надёжность системы достигается путём расчёта длины каждого из рычагов в зависимости от условий эксплуатации, а также определения зазора между магнитами и расположением в нём элемента Холла. Общий вид такого датчика деформаций приведён на рисунке 3, а его конструкция представлена на рисунке 4.

Основными механическими частями датчика деформации являются два пластика 1 и 4, приваренные, например, к надрамнику автомобиля или к несущей раме. Магнитная система 2, состоящая из двух постоянных противоположно намагниченных магнитов из SmCo_5 и создающая необходимый градиент магнитного поля по оси X, размещена на жёстком кронштейне 3. Миниатюрный преобразователь Холла 5 на латунном держателе совмещён с электронной платой 6 и располагается в зазоре магнитной системы с возможностью перемещения по оси X в вертикальной плоскости. Чувствительным механическим элементом, воспринимающим нагрузку, является надрамник, который работает на изгиб и обеспечивает линейное перемещение магнитной системы относительно ПХ на величину $\Delta x = 45 \dots 50$ мкм при величине загрузки в $P_{\text{max}} = 30$ т. Перемещение магнитной системы относительно преобразователя Холла вызывает линейное изменение наведённой э.д.с. Холла, т.к. в рабочей области перемещений индукция магнитного поля имеет постоянный градиент. Преобразование э.д.с. Холла осуществляется простой электронной схемой.

Повышенная надёжность и стабильность работы механоэлектрических преобразователей обуславливается тем, что связь между первичным датчиком и подвижными механическими частями осуществляется по магнитному полю. Миниатюрность элементов Холла позволяет оснащать устройства дублирующими каналами измерений. Датчики изготавливаются по групповой технологии микроэлектроники, что значительно уменьшает их стоимость. Блоки усиления сигналов и обработки информации создаются по модульному принципу и являются взаимозаменяемыми. Кроме того, проектирование механоэлектрических преобразователей, а также их оптимизация выполняются с привлечением теории решения изобретательских задач и функционально-стоимостного анализа.



Рис. 3. Внешний вид датчика деформаций

Начиная с 1990-х годов, интенсивно проводятся работы в области создания прецизионных механоэлектрических преобразователей для контроля положения подвижных исполнительных механизмов сканирующих систем космической аппаратуры. Многолетний опыт сотрудничества с Институтом космических исследований РАН показал высокую перспективность использования эффекта Холла для изготовления прецизионных механоэлектрических преобразователей. Разработанные устройства хорошо себя зарекомендовали, например, на стадии предполётных испытаний в космическом аппарате «Марс-96», в реальном полёте «Марс-экспресс». Их уникальность проявилась в точном соблюдении всех технических характеристик на протяжении длительной эксплуатации в сложных космических условиях. Изделия прошли опытные испытания в вакууме и при сверхнизких температурах. Использование миниатюрных магнитных систем на основе редкоземельных магнитов позволило значительно уменьшить массу и габариты устройств контроля положения подвижных исполнительных механизмов космической аппаратуры. Сочетание микроминиатюрности датчиков с микромагнитными системами для них дало возможность получить новое качество приборов контроля – высокую разрешающую способность. Для достижения высокой временной стабильности технических характеристик была разработана специальная технология магнитной стабилизации микромаг-

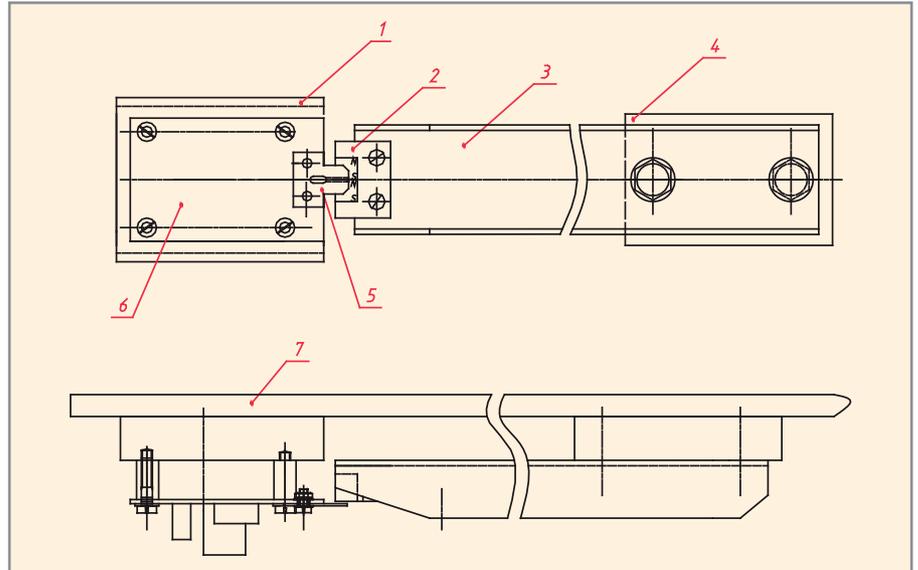


Рис. 4. Конструкция датчика деформации

1 – пластик, 2 – магнитная система, 3 – кронштейн, 4 – пластик, 5 – ПХ, 6 – электронная плата, 7 – надрамник автомобиля

тов с помощью термообработки в печи и трёхкратной циклической выдержки при заданной температуре, зависящей от химического состава магнитов, с последующим медленным охлаждением. Таким образом, данный комплекс технологических операций обеспечивает высокую точность определения положения подвижных исполнительных механизмов космической аппаратуры.

Прибор «Омега» с механоэлектрическими преобразователями положения более четырёх лет успешно функционирует на марсианской орбите в составе научного комплекса европейского космического аппарата «Марс-экспресс». Датчики обеспечили полу-

чение большого объёма научной видеоинформации высокого качества, что позволило изучить ряд новых явлений в составе атмосферы и в геологии поверхности планеты.

В настоящее время идёт разработка прецизионных механоэлектрических преобразователей положения исполнительных механизмов для ряда приборов, которые планируется устанавливать в российских космических аппаратах, а именно: датчиков положения сканирующих узлов для геостационарных спутников, датчиков положения исполнительных органов измерительных приборов для научных программ «Фобос», «Меркурий» и др. ©

Новости мира News of the World Новости мира

Новое поколение дешёвой и компактной памяти на мультиферроиках

Команда французских исследователей продемонстрировала новый способ создания компактной цифровой памяти для портативной электроники, потребляющей меньше энергии. Это стало возможным благодаря мультиферроикам – классу материалов, комбинирующих необычные электрические и магнитные свойства.

На микроскопическом уровне атомы и молекулы генерируют электрические и магнитные поля. В большем масштабе в случае многих кристаллов эти свойства частиц сводят на нет действия друг друга. Но иногда в определённых составах, известных как ферромагнетики, магнитные свойства существуют на макроскопическом уровне и превращают материалы в магниты. Реже встречается элек-

трическая упорядоченность в ферроэлектриках. И совсем особый случай – комбинация электрических и магнитных характеристик, как в мультиферроиках. Более того, в этих материалах поля взаимодействуют, что предоставляет способ контролировать спины атомов посредством электрического поля. Это открывает новые перспективы, особенно в хранении информации.

Исследователи из Лаборатории физики твёрдого тела (Laboratoire de Physique des Solides) и других научных организаций синтезировали состав со свойствами мультиферроика BiFeO_3 и продемонстрировали взаимодействие между его электрическими и магнитными свойствами. Затем был создан материал из одного слоя BiFeO_3 и ферромагнитной плёнки, на котором учёные показали возможность манипулировать ориентацией намагничивания частиц

путём приложения электрического поля. Результаты подтверждают концепцию хранения и записи «магнитных» данных.

В сегодняшних жёстких дисках биты записываются определяющим намагничивание магнитным полем. Два возможных состояния обозначают 1 и 0. В случае мультиферроика каждый элемент памяти может находиться в четырёх состояниях (два в соответствии с электрической поляризацией и ещё два – с намагниченностью). Возможность записывать и стирать данные электрическим полем имеет ключевой характер для развития мобильной электроники по двум причинам. Во-первых, генерирование такого поля требует меньше энергии, а значит, аккумуляторы прослужат дольше. Во-вторых, оно более локально, т.е. на единице площади может быть размещено больше элементов памяти.

physorg.com