



УДК 621.317.49, 621.3.084.2

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.551.555

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ МИКРОСХЕМЫ МАГНИТНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОПОЛЮСНОЙ МАГНИТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

DEVELOPING A SPECIALIZED MICROCIRCUIT FOR MAGNETIC PRECISION POSITION SENSOR BASED ON MULTIPOLAR MAGNETIC TECHNOLOGY

ПРОКОФЬЕВ Г. В.^{2,3}
prokofiev@idm-plus.ru

PROKOFIEV G. V.^{2,3}
prokofiev@idm-plus.ru

СТАХИН ВЕНИАМИН ГЕОРГИЕВИЧ^{1,3}

STAKHIN VENIAMIN G.^{1,3}

КОСОЛАПОВ М. А.^{1,2}

KOSOLAPOV M. A.^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1
²АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
³ООО «ИДМ-Плюс»
г. Москва, г. Зеленоград

¹National Research University of Electronic Technology
1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
²Zelenograd Nanotechnology Center JSC
6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia
³IDM-Plus LLC
Moscow, Zelenograd

В статье представлена разработка абсолютного датчика положения с использованием многополюсной двухтрековой магнитной системы и специализированной микросхемы обработки сигнала. Конструкция датчика основывается на нониусном принципе получения кода абсолютного положения от магнитной сенсорной системы на эффекте Холла со следящими преобразователями угол-код. Представлены результаты исследования макета разработанной системы, которые подтвердили ее работоспособность.

Ключевые слова: датчик положения; энкодер; преобразователь угол-код.

The article presents the development of an absolute position sensor using a multipolar two-track magnetic system and a specialized signal processing chip. The sensor design is based on the nonius principle of obtaining the absolute position code from the magnetic sensor system on the Hall effect with tracking angle-code converters. The results of studying the developed system model have been presented, confirming its operability.

Keywords: position sensor; encoder; angle to code converter.

ВВЕДЕНИЕ

Создание прецизионных, но в то же время относительно дешевых и надежных датчиков положения (энкодеров) является актуальной задачей для многих областей промышленности. Создание прецизионных датчиков положения на магнитном эффекте является перспективным направлением, так как магнитная технология обеспечивает ряд преимуществ [1, 2]:

- 1) датчики на магнитном эффекте имеют простую конструкцию, а значит, надежные и дешевы в производстве;
- 2) магнитные датчики устойчивы к наличию загрязняющих примесей, таких как водяной пар, масла, нефтепродукты и другие оптически активные примеси;
- 3) магнитные датчики имеют небольшие габариты.

Ключевым элементом в магнитных датчиках положения является специализированная микросхема, содержащая магниточувствительную сенсорную систему с аналоговой обработкой, преобразователь угол-код и схемы интерфейса.

Разработкой микросхем магнитных датчиков положения занимаются такие компании, как iC-Naus (Германия), AMS (Австрия), Infineon (Германия), Melexis (Бельгия). Достигнутый уровень по разрешению составляет до 15 бит для однополюсных систем и до 18 бит для многополюсных систем.

В настоящем проекте стоит задача создания встраиваемого магнитного датчика абсолютного положения с внеосевым расположением сенсорной системы с программируемым разрешением преобразования до 18 бит. Одно из основных приложений — встраиваемый в вентильный двигатель датчик положения ротора с цифровым выходом для применения в автоэлектронике.

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ДАТЧИКА И МИКРОСХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Целевое назначение датчика положения (встраиваемый датчик), а также высокие требования по разрешению диктуют использование многополюсной конструкции с двойной магнитной шкалой, обеспечивающей в пределах оборота нарастающий фазовый сдвиг (нониусная шкала) с последующей сшивкой данных с двух шкал и получения кода абсолютного положения высокого разрешения [3].

Рассмотрим систему из двух магнитных шкал мастер-трека и нониус-трека, состоящую из четырех и трех пар полюсов соответственно, рис. 1. Шкалы имеют совмещенную нулевую точку, однако количество пар полюсов, укладываемых на один период измерений, отличаются на 1.

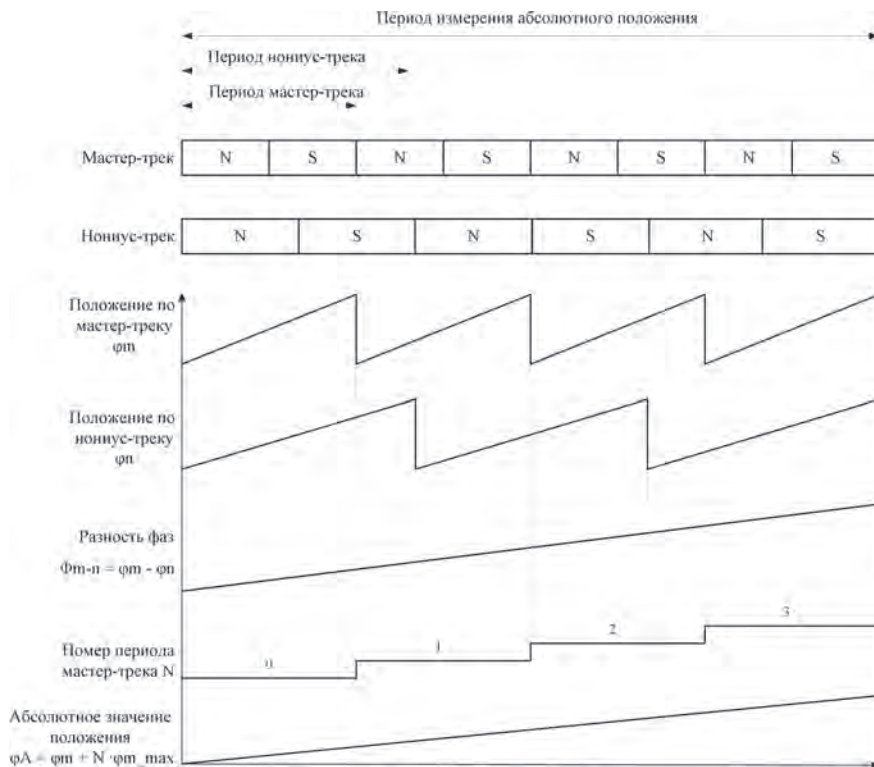


Рис. 1. Пояснение к концепции разрабатываемого магнитного датчика положения

Значения положения ϕ_m и ϕ_p мастер-трека и нониус-трека соответственно определяются независимо друг от друга. Так как количество периодов мастер- и нониус-треков отличается на 1, то разность положений $\Phi_{m-p} = \phi_m - \phi_p$ на период измерения абсолютного положения представляет собой линейную функцию. По разности фаз Φ_{m-p} однозначно определяется номер текущего периода мастер-трека N . Это, в свою очередь, позволяет определить текущее абсолютное положение ϕ_A как

$$\phi_A = \phi_m + N \cdot \phi_{m_max}, \tag{1}$$

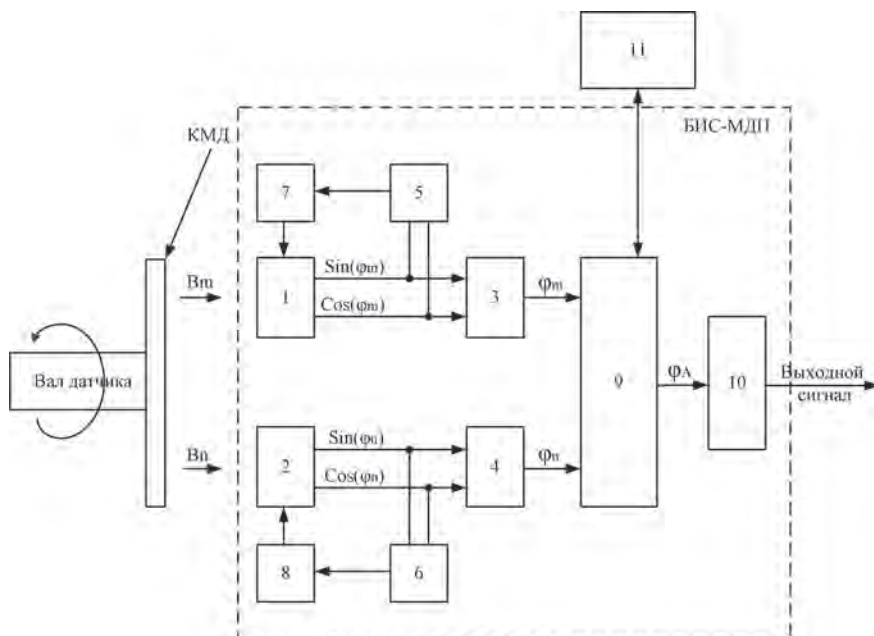


Рис. 2. Функциональная схема разрабатываемого магнитного датчика положения

где ϕ_{m_max} — максимальное значение периода мастер-трека (общее количество дискретов мастер-трека, определяемое разрешением преобразования соответствующей сенсорной системы и преобразователя угол-код).

Если система преобразования для мастер-трека имеет разрешение 4096 отсчетов на период, то рассмотренная на рис. 1 система имеет общее разрешение преобразования в $4 \cdot 4096 = 16384$ отсчета, что соответствует разрешению преобразования 14 бит. Таким образом, разрешение преобразования нониусной системы определяется как

$$N_A = m \cdot N_M, \tag{2}$$

где N_A — количество отсчетов на всю шкалу; m — количество периодов мастер-трека; N_M — количество отсчетов на один период мастер-трека.

Из формулы (2) следует, что максимально достижимая ошибка преобразования, выраженная в градусах, для предложенного алгоритма составляет

$$\text{ErrT} = 360 / (m \cdot N_M). \tag{3}$$

Описанная концепция позволяет создать датчик положения с высоким разрешением, значение которого ограничивается в первую очередь технологическими факторами, связанными с производством кодового магнитного диска с требуемым размером полюсов. В качестве базового принят размер полюса мастер-трека в 2 мм. Максимальное количество пар полюсов на кодовом магнитном диске (КМД) может достигать 64, что обеспечивает разрешение преобразования датчика до 18 бит на оборот (или линейный период в случае датчика линейного перемещения).

На рис. 2 показана функциональная схема разрабатываемого датчика положения. Датчик включает кодовый магнитный диск с нониусной шкалой и микросхему преобразователя (БИС-МДП), содержащую сенсорную систему мастер-трека 1, сенсорную систему нониус-трека 2, следящий преобразователь угол-код мастер-трека 3, следящий преобразователь угол-код нониус-трека 4, амплитудные детекторы мастер- и нониус-треков 5, 6, блоки регулировки тока через элементы Холла 7, 8, блок сшивки и формирования абсолютного кода положения 9, блок выходного интерфейса датчика 10, внешнюю микросхему для хранения коэффициентов настройки 11.

Датчик работает следующим образом. Кодовый магнитный диск установлен на роторе. Диск имеет две линии

намагниченности, соответствующей нониусному алгоритму. Микросхема обработки содержит две сенсорные системы 1 и 2, преобразующие магнитные поля треков намагниченности V_m и V_n в синусно-косинусные сигналы с фазами, соответствующими длине полюсной пары мастер- и нониусного треков. Синусно-косинусные сигналы сенсорных систем преобразуются в коды фазы φ_m и φ_n мастер- и нониусного треков следящими преобразователями угол-код 3 и 4. Использование следящих преобразователей предпочтительно в связи с высокой скоростью изменения положения внутри каждой полюсной пары при вращении ротора и, соответственно, с высокими требованиями к скорости аналого-цифрового преобразования и дальнейшей обработки.

Каждый из каналов также содержит независимую систему регулировки усиления, обеспечивающую поддержание амплитуды сигнала на входе преобразователя угол-код в определенном диапазоне вне зависимости от индукции магнитного поля. Такая система автоматической регулировки усиления обеспечивает постоянство ошибки преобразования вне зависимости от изменений расстояния между кодовым магнитным диском и поверхностью микросхемы, которые объективно возможны в процессе работы датчика (влияние вибрации, погрешности механической сборки).

Для «сшивки» данных со следящих преобразователей по нониусному алгоритму используется цифровой блок обработки. Полученный после «сшивки» абсолютный код положения φ_A преобразуется блоком интерфейса 10 в нужный вид и поступает на выход датчика.

На основе данной функциональной схемы проведена разработка микросхемы магнитного датчика положения.

Основной вопрос при разработке преобразователя магнитного поля — выбор типа чувствительных элементов и сенсорной системы. Была выбрана сенсорная система на основе элементов Холла. Такой выбор определяется двумя факторами:

1) возможностью интеграции сенсорных элементов Холла в стандартный технологический маршрут изготовления КМОП-микросхем;

2) уровнем индукции магнитного поля кодового магнитного диска порядка 15–50 мТ в максимуме, что является оптимальным для элементов Холла.

Была разработана сенсорная система микросхемы, состоящая из 16 элементов Холла, расположенных вдоль грани кристалла. Микросхема преобразователя включает в себя две такие сенсорные системы — для мастер- и нониус-треков, разнесенные по противоположным сторонам кристалла.

Сигнал с элементов Холла усиливается с использованием технологии вращения тока [4] для устранения остаточного напряжения и путем суммирования преобразуется в синусно-косинусный сигнал, фаза которого пропорциональна положению пары полюсов относительно сенсорной системы.

После усиления и демодуляции синусно-косинусный сигнал с элементов Холла обрабатывается следящими преобразователями угол-код. Разработана конструкция преобразователя угол-код, обеспечивающая преобразование с разрешением 12 бит на период сигнала и временем слежения не более 60 нс, что соответствует скорости изменения полюсных пар эквивалентной скорости вращения более 240 тыс. об/мин. Это соответствует скорости вращения ротора для магнитного кольца из 64 пар полюсов, обеспечивающего максимальное разрешение 18 бит в 3800 об/мин.

Микросхема содержит блок сшивки данных с двух следящих преобразователей угол-код и формирования выходного кода абсолютного положения с разрешением до 18 бит. После сшивки код положения поступает на блок коррекции нелинейности преобразования, обеспечивающий устранение основного тренда ошибки преобразования.

Скорректированный код положения выдается потребителю по интерфейсам SSI, ШИМ и инкрементальному интерфейсу.

Микросхема разработана с использованием серийной КМОП-технологии с проектными нормами 180 нм.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОЙ КОНЦЕПЦИИ ДАТЧИКА НА МАКЕТЕ

Для обоснования предложенной концепции, алгоритма сшивки и коррекции кода положения был разработан и изготовлен макет датчика положения. Макет включал плату с размерами под установку в целевой вентильный двигатель с двумя сенсорными микросхемами, формирующими синусно-косинусный сигнал и кодовый магнитный диск с количеством пар полюсов мастер/нониус-треков, равным 24/23, внешний диаметр кодового диска 40 мм, рис. 3.

Макет датчика устанавливался на специализированный стенд для исследования датчиков положения с прецизионным приводом и эталонным датчиком. Расстояние между поверхностью КМД и микросхемой составляло около 1 мм. Специальных мероприятий по прецизионному механическому совмещению деталей макета не проводилось.

Выход платы макета подключался к плате обработки, рис. 4. В плате обработке на базе ПЛИС Virtex-5 реализовывался тракт преобразования, соответствующий тракту преобразования микросхемы БИС-МДП. Разрядность каждого преобразователя угол-код макета составляла 12 бит.

Проведены исследования макета, которые показали полную работоспособность представленной концепции магнитного датчика положения. На рис. 5 показаны результаты работы макета датчика: выходы преобразователей мастер- и нониус-треков, разность фаз между ними и абсолютный код положения после сшивки. Выходной код после сшивки имеет информационную емкость в 98304 отсчетов, что соответствует (2).

Также на макете была проверена работоспособность разработанного алгоритма коррекции ошибки преобразования. На рис. 6 показаны графики ошибки преобразования до и после коррекции для отдельного кодового магнитного диска.



Рис. 3. Макет датчика: слева плата, справа кодовый магнитный диск, внешний диаметр диска 40 мм

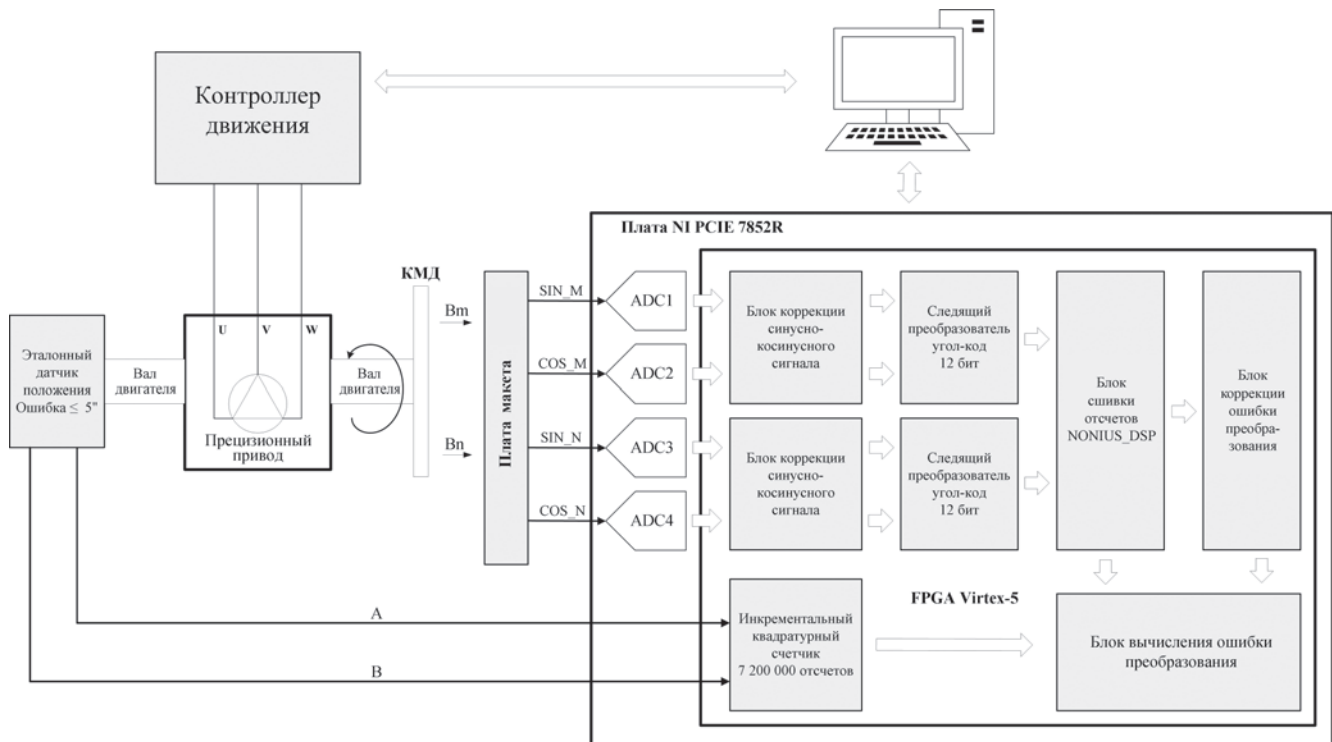


Рис. 4. Макет датчика: слева плата, справа кодовый магнитный диск, внешний диаметр диска 40 мм

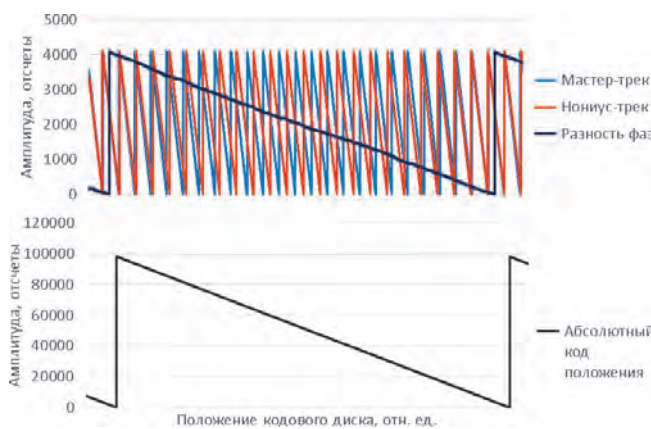


Рис. 5. Графики работы макета

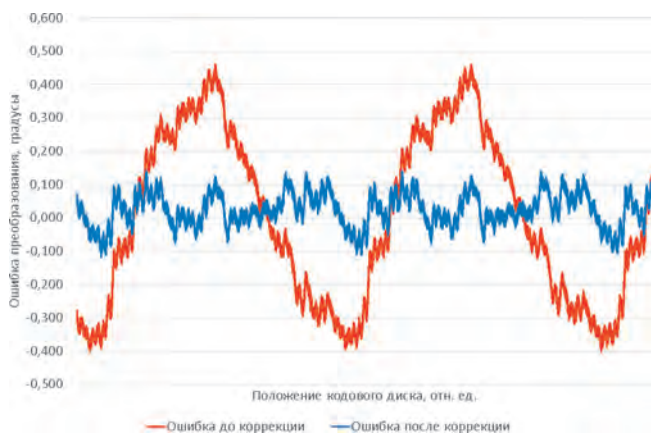


Рис. 6. Ошибка преобразования макета до и после коррекции

Как видно из рис. 6, ошибка преобразования до коррекции составляет $0,86^\circ$, а после коррекции уменьшилась до значения порядка $0,2^\circ$, т. е. в 4 раза.

Измерения были проведены для нескольких образцов кодовых магнитных дисков и показали аналогичный результат.

Разработанный макет был интегрирован в вентильный двигатель фирмы Nides. Исследования макета в составе двигателя показали отсутствие заметного влияния полей ротора двигателя и обмоток на формируемые данные углового положения.

Выводы

Исследования макета энкодера подтвердили работоспособность разработанной конструкции абсолютного магнитного датчика положения. С использованием кодового магнитного диска с количеством пар полюсов мастер-трека в 24, линейными сенсорными системами на эффекте Холла и следящими преобразователями угол-код с разрешением 12 бит достигнута информационная емкость, соответствующая расчетной в 93804 отсчета на оборот, и ошибка преобразования в $0,2^\circ$ без использования прецизионной механической подстройки датчика. Исследования макета датчика в составе работающего двигателя показали отсутствие влияния внутренних полей ротора и обмоток на показания датчика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция абсолютного магнитного датчика положения с использованием многополюсной двухтрековой нониусной магнитной системы, разработана специализированная микросхема преобразователя, содержащая сенсорные системы на основе эффекта Холла, преобразователи угол-код, цифровые модули сшивки и коррекции кода положения. Проведены исследования разработанной системы на макете. Исследования показали работоспособность разработанной конструкции. Достигнутые значения по разрешению и точности достаточны для использования по целевому назначению — в качестве



встраиваемого датчика положения ротора вентильного двигателя электроусилителя руля.

Полученные значения разрешения и точности будут улучшены после изготовления однокристалльной микросхемы магнитного энкодера положения и кодового магнитного диска с большим числом полюсов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А. А. Скуридину и В. Н. Милову (ООО «Валтар») за проведение работ по изготовлению кодового магнитного диска и В. В. Мизевичу и Б. Л. Кривцу (АО «Автоэлектроника») за поддержку данной работы.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России и АО «Автоэлектроника», г. Калуга, проект № 03.G25.31.0223.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gauthier S. *Developing a High-Accuracy Multipole Strip Magnet for Noncontact Linear and Rotary Position Measurement* // URL: <https://www.sensorsmag.com/embedded/developing-a-high-accuracy-multipole-strip-magnet-for-noncontact-linear-and-rotary> (дата обращения: 24.06.2018).
2. Прокофьев Г. В., Стахин В. Г., Германов Р. В. Малогабаритные датчики углового положения на основе микросхемы однокристалльного магнитного энкодера // Современная электроника, 2016. — № 8. — С. 50–55.
3. Quasdorf J. *The Vernier Scale Goes Digital* // URL: <https://www.sensorsmag.com/components/vernier-scale-goes-digital> (дата обращения: 24.06.2018).
4. Bilotti A., Monreal G., Vig R. *Monolithic Magnetic Hall Sensor Using Dynamic Quadrature Offset Cancellation* // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1997. V. 32. № 6. P. 829–836.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 840 руб.

ДАТЧИКИ

В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой,
Г. Г. Ишанин, И. Г. Минаев, А. С. Совлуков

Под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 624 с.
ISBN 978-5-94836-316-5

В книге изложены теоретические основы, принципы действия, описаны конструкции и характеристики датчиков физических величин. Сборник написан коллективом авторов и состоит из 24 глав. В конце каждой главы приведена обширная библиография, а также сайты предприятий – разработчиков и изготовителей.

В главе 1 вводятся основные понятия, обсуждаются термины и определения, приводятся классификации датчиков, а также описания некоторых физико-технических эффектов, используемых в датчиках.

В главах 2 и 3 приведены элементы общей теории датчиков, описан метод электромеханических аналогий, статические, динамические и метрологические характеристики датчиков, а также типовые динамические звенья.

В главах 4, 5, 6 описаны наиболее часто используемые для датчиков электронные устройства, а также упругие и оптические элементы датчиков.

В главах 7–10 описаны резистивные, емкостные, пьезоэлектрические и электромагнитные датчики, а в главах 11–19 – применение датчиков для измерения различных физических величин.

В главах 20–24 описаны электрохимические, биохимические и радиоволновые датчики, а также применение датчиков для измерения расхода и количества жидкостей, в охранной сигнализации, в летательных аппаратах.

Книга предназначена для научных работников, студентов, аспирантов, специалистов в области разработки датчиков, измерительных приборов, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosfera.ru, sales@technosfera.ru