

Интеллектуальные автомобильные датчики положения и скорости. Методы оптимизации

(часть 1)

Светлана Сысоева (Москва)

В статье представлено математическое обоснование методов оптимизации, используемых в интеллектуальных автомобильных датчиках скорости и положения.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно недавнему (2007 г.) исследованию консалтинговой фирмы Frost&Sullivan, сфокусированному на европейском рынке автомобильных датчиков давления, положения и температуры, автомобильные датчики представляют собой динамичный рынок, ведомый растущим количеством электронных модулей для различных применений – контроля двигателя и трансмиссии, шасси, комфорта и безопасности (см. <http://www.automotive.frost.com>). В декабре 2006 г. аналогичное исследование было проведено для североамериканского рынка автомобильных датчиков положения. С состоянием и тенденциями рынка датчиков для систем Powertrain можно ознакомиться в [1].

Новые исследования показали, что рост рынка датчиков давления и положения обусловлен влиянием директивных документов, требующих снижения эмиссии CO₂, наличием TPMS (системы контроля давления и температуры в шинах) и индикаторов переключения передачи. Отмечено, что рост европейского рынка датчиков обусловлен увеличением объёма управляющей электроники, а не технологиями. Повышение сложности электронных блоков, требований к системной надёжности и точности предъявляют новые требования к характеристикам датчиков.

Обеспечение требований к надёжности, точности и быстродействию устройств обусловлено ростом «интеллектуальности» электронных систем и сенсорных устройств. Какие

датчики называются интеллектуальными? К сожалению, общепринятого определения интеллектуальности не существует.

Так, интеллектуальные датчики обычно ассоциируются со встроенными микроконтроллерными ядрами, ЦОС и ПЗУ, которые могут обрабатывать первичную информацию, например, магнитный и электрический сигнал положения, выполнять функции калибровки и компенсации перед вычислением и передачей выходного сигнала в соответствии с заданным выходным протоколом, передавать сигнал проводным или беспроводным способом или визуализировать информацию на дисплее (в контрольно-измерительной технике).

Блок-схема такого современного устройства включает дифференциальный сенсорный элемент (Холла, АМР, ГМР, пьезорезистивный датчик давления), схему обработки сигнала (например, мультиплексор, АЦП, ЦОС, ЦАП), средства статической и динамической калибровки (ППЗУ, начальная самокалибровка, АКУ). В перспективе возможно добавление модулей беспроводной двунаправленной связи датчик-процессор для уменьшения числа проводных соединений и развитие режимов энергосбережения (спящий режим и опрос данных по требованию).

Основная идея интеллектуальности состоит в том, чтобы обеспечить способность датчика реагировать на статические и динамические изменения внешней среды и изменять свои функциональные характерис-

тики таким образом, чтобы минимизировать погрешность. Приспособление к конкретным условиям работы – вторичный признак интеллектуальности, частично отменяющий наработанные годами концепцию ASIC (специализированных ИС).

Так, в работах [2–5] показано, что одни и те же кодирующие датчики положения могут использоваться для измерения скорости, абсолютного положения, уникального положения для инкрементных применений или цифровой точечной индикации, в качестве датчиков направления, счётчиков оборотов и положений для многооборотных измерений, а также датчиков положения/переключения трёхфазных бесколлекторных двигателей.

Поэтому в данной статье будут рассматриваться именно такие датчики положения/скорости/направления, которые настраиваются на конкретное применение, т.е. интеллектуальные датчики.

Предполагается, что одно интеллектуальное устройство, изменяя свои функциональные характеристики, может использоваться для широкого круга применений с различными условиями работы и внешней среды.

К долговременным статическим изменениям внешней среды относятся: различия в диапазонах основных измеряемых параметров (например, магнитных полей), воздействующих параметров окружающих рабочих условий – внешних механических или климатических воздействий (в первую очередь температур), требования выходного интерфейса (минимальные и максимальные уровни напряжения или рабочего цикла, среднеквадратическое значение напряжения или скважность импульсов), сте-

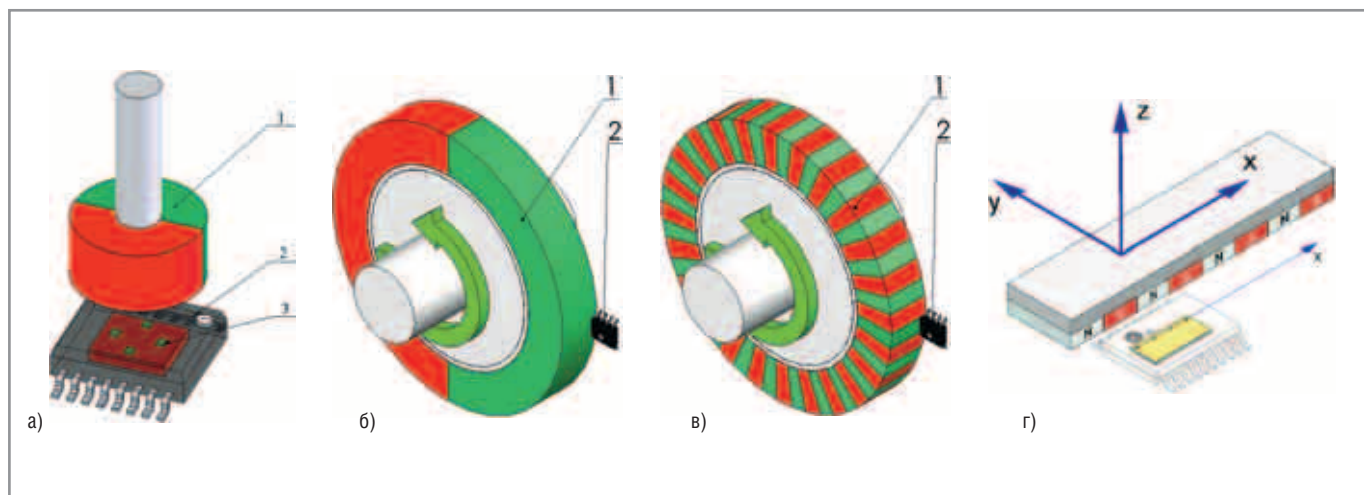


Рис. 1. Сопоставление наиболее перспективных вариантов детектирования абсолютного углового положения в пределах 360° диаметрально намагниченного магнитного ротора с целью их использования для измерения скорости/комбинирования функций

(а) Пример схемы с цилиндрическим дипольным магнитом, размещённым на торце вала и вращающимся параллельно поверхности ИС (с ИМК или без такового): 1 – дипольный магнитный ротор с цилиндрическим основанием; 2 – магнитоуправляемая ИС – двухосевой датчик Холла, в данном примере перпендикулярного поля (без ИМК); 3 – планарные элементы Холла (крестообразный массив);

(б) схема с многополюсным кольцевым магнитом, магнитное поле которого при вращении параллельно поверхности ИС (с ИМК): 1 – кольцевой многополюсный магнитный ротор; 2 – магнитоуправляемая ИС – двухосевой датчик Холла с ИМК, детектирующая радиальные и тангенциальные компоненты поля;

(в) схема с дипольным кольцевым магнитом, магнитное поле которого при вращении параллельно поверхности ИС (с ИМК): 1 – кольцевой дипольный магнитный ротор; 2 – магнитоуправляемая ИС – двухосевой датчик Холла с ИМК, детектирующая радиальные и тангенциальные компоненты поля;

(г) измерительная схема линейного датчика iC-ML

пень удалённости датчика от электронного управляющего устройства, ожидаемое воздействие электромагнитной интерференции и конструктивные ограничения.

«Интеллектуальность» измерений проявляется в длительной статической адаптации: автомобильные сенсорные модули строятся в соответствии с одно- или двухуровневой архитектурой, в которой для микроконтроллерной обработки сигнала используют постоянные предустановленные коэффициенты, записанные в ПЗУ. В датчиках положения статические коэффициенты позволяют учитывать механические и магнитные рабочие условия (зазор, магнитный диапазон) и типичные ограничения – высокие температуры, уровень шума, вибраций, а также требования выходного протокола.

Динамические изменения окружающих условий вызывают перепады рабочего магнитного сигнала (например, вследствие вибрации). Любые системные изменения основных и вспомогательных параметров – долговременные или кратковременные – механические (зазор, вибрации, удар), магнитные (смещения, шумы, интерференции), электрические (помехи в

электрических цепях), электромагнитные (помехи) могут быть обнаружены и зарегистрированы интеллектуальным устройством. Различаются долговременные и кратковременные изменения, а их детерминированная часть отделяется от стохастической.

Признаком интеллектуальности датчика также является избыточность, обеспечивающая восприятие, переработку дополнительной информации и самодиагностики, т.е. самостоятельного определения отказов, отключение или подачу сигнала тревоги, что позволяет повысить достоверность и надёжность передаваемой информации.

Интеллектуальность датчика, таким образом, предполагает включение и дальнейшее развитие любого из перечисленных выше признаков, позволяющих добиться повышения надёжности, точности, быстродействия, достоверности, стабильности или других полезных эксплуатационных характеристик датчика.

Основным направлением дальнейшего развития датчиков положения, скорости и направления является именно повышение «интеллектуальности» устройств. Пути её развития предполагают поиск схем и способов

конструктивной, схемотехнической и алгоритмической оптимизации, а также выявление и устранение проблем и ограничений.

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ

Конструктивные схемы, помогающие повысить надёжность и точность датчиков положения, достаточно хорошо проработаны, и предложить что-то новое практически невозможно [2–13]. Однако в процессе написания этой статьи у автора возникли новые идеи, которые должны быть проработаны перед их обсуждением.

Действительно, в большинстве случаев для измерительных целей может использоваться малый дипольный магнит (см. рис. 1а), размещённый на торце вала; многополюсный магнит является альтернативой для повышения механического разрешения положения и скорости в линейных или угловых системах и повышения измеряемой длины линейного хода (см. рис. 1б–1в). Известно, что кольцевой дипольный магнит с размещённым на периферии датчиком с ИМК позволяет определять абсолютное положение в диапазоне углов 360° и сочетается с многооборотными измерениями (см. рис. 1г). Далее мы будем рас-

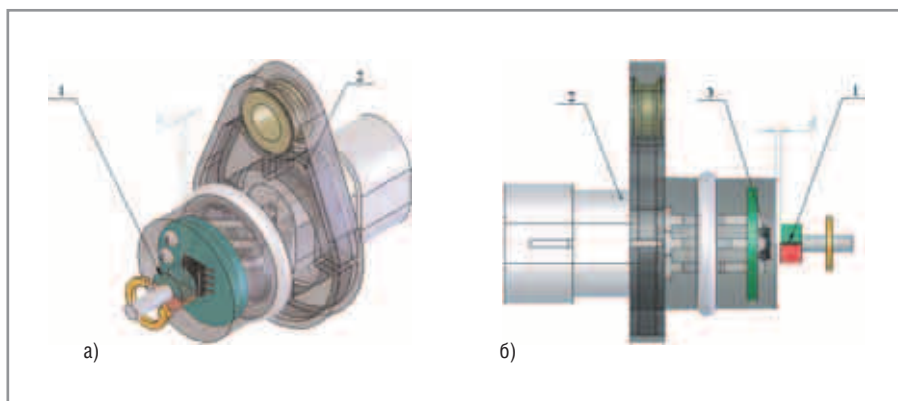


Рис. 2. Датчик положения и (или) скорости дипольного магнитного ротора

(а) Внешний аксонометрический вид устройства; (б) основные функциональные элементы. 1 – ротор, 2 – статор или бесконтактный магнитоуправляемый датчик в отдельном корпусе, d – воздушный зазор между ротором и статором, 3 – магнитоуправляемая ИС – датчик

смазывать такие кодирующие устройства – с быстропеременным бегущим магнитным полем, создаваемым двух- или многополюсным угловым ротором или линейкой.

Новые проблемы обусловлены тем, что устройства с рекомендованными производителями ИС первоначально разрабатывались для размещения в одном корпусе автомобильного датчика с малым дипольным магнитом и рассчитаны на небольшие зазоры. Такая схема позволила упростить конструкцию корпуса до типичной конструкции датчика скорости (см. рис. 2), вынести магнит во внешний ротор, но приобрела типичные недостатки датчиков скорости. Во-первых, радиальные и осевые статические смещения становятся более вероятными. В динамике свойства такой системы в большей степени ухудшаются из-за вибраций, перемещений вследствие неоптимального крепления, радиальных и осевых биений ротора, что приводит к значительному изменению воздушного зазора и увеличению радиального эксцентриситета.

Дифференциальная конфигурация, которая используется для вычисления строковых сигналов в ИС с массивом ортогональных элементов Холла, позволяет вдвое повысить крутизну синусного или косинусного сигнала; функция арктангенса уже предполагает при вычислении положения независимость от воздушного зазора, величины рабочего поля, температуры и допусков. Но крутизна первичного сигнала чувствительного элемента зависит от воздушного зазора и радиальных смещений полюсов, а различная крутизна синусно-косинусных сигналов в кодирующей сис-

теме может повлиять на точность вычисления положения и формирования импульсов. Известно также, что абсолютные значения рабочего поля могут изменяться из-за его неоднородностей, различных отклонений в геометрии, допусках и помех, возникающих, например, вследствие непредвиденного эксцентриситета вращения ротора («шатаний») при его износе или под влиянием внешних электромагнитных полей.

Необходимо также учитывать, что при измерении скорости в условиях осевых или радиальных биений ротора должна быть получена скважность сигнала, близкая к двум, и одновременно снижен фазовый дрейф точек переключения. Например, при наличии магнитных сдвигов (сигнал дифференциального выходного напряжения сдвинут относительно уровня среднего арифметического его порогов переключения) формирование импульсов будет давать непредсказуемые результаты. Уменьшению влияния неоднородностей роторного магнита способствует тонкий металлический носитель на рабочей поверхности.

Чтобы повысить интеллектуальность такой системы, необходимо рассмотреть и аспекты функциональности, т.е. схемотехнику устройства.

ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ И СТРУКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ

Интеллектуальный датчик положения в самом общем исполнении будет обеспечивать выполнение следующих функций:

- сбор первичной информации;

- изучение рабочих условий и начальную калибровку передаточной характеристики: пользовательскую в имитируемых рабочих условиях и (или) автоматическую (самокалибровка);
- программирование и перепрограммирование передаточной характеристики и корректирующих коэффициентов с помощью ППЗУ;
- возможность представления выходных данных в любом формате (аналоговом или цифровом) с целью унификации датчиков для различных систем и паспортизации устройств;
- возможность передачи данных по радиоканалу, накопления данных в пакеты и привязки ко времени передачи по запросу с целью повышения информативности и экономии мощности передачи.

(Последняя функция относится к TPMS, а к датчикам положения относятся первые три.)

Применение интеллектуальных датчиков позволяет значительно повысить число вариантов настройки датчика и расширить применимость одного и того же устройства, т.е. с одним унифицированным устройством пользователю предоставляется возможность создания «собственной» ASIC.

Воздействие отрицательных факторов на синусно-косинусные дифференциальные сигналы можно представить как паразитную амплитудную, частотную или фазовую модуляцию, искажающую основной сигнал или смещающую его относительно нулевого уровня.

В динамике избавиться от паразитной амплитудной модуляции сигнала скорости и положения помогает схема динамического АКУ и начальная и повторная калибровка или динамическая самокалибровка. Для будущих датчиков перспективно сочетание ППЗУ, АКУ и коррекции нулевого уровня. Для датчиков положения интегральным оценочным критерием воздействия отрицательных факторов является абсолютная нелинейность.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА СКОРОСТИ, ПОЛОЖЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ

Одноосевой датчик скорости

Датчик скорости автомобиля преобразует абсолютный магнитный

Датчики для любых Ваших Решений

датчики расхода газа

датчики контраста

датчики угла

датчики давления

датчики положения объекта

датчики усилия

датчики влажности

датчики температуры

датчики магнитного поля

датчики цвета

www.sensorica.ru



Москва 1-й Щемилловский пер., д. 16, стр. 2
Тел./факс: 495 223 0038
E-mail: info@sensorica.ru

Реклама

**Обратный звонок:
оставьте на сайте ваши
координаты
и мы вам перезвоним
www.sensorica.ru/contact.html**

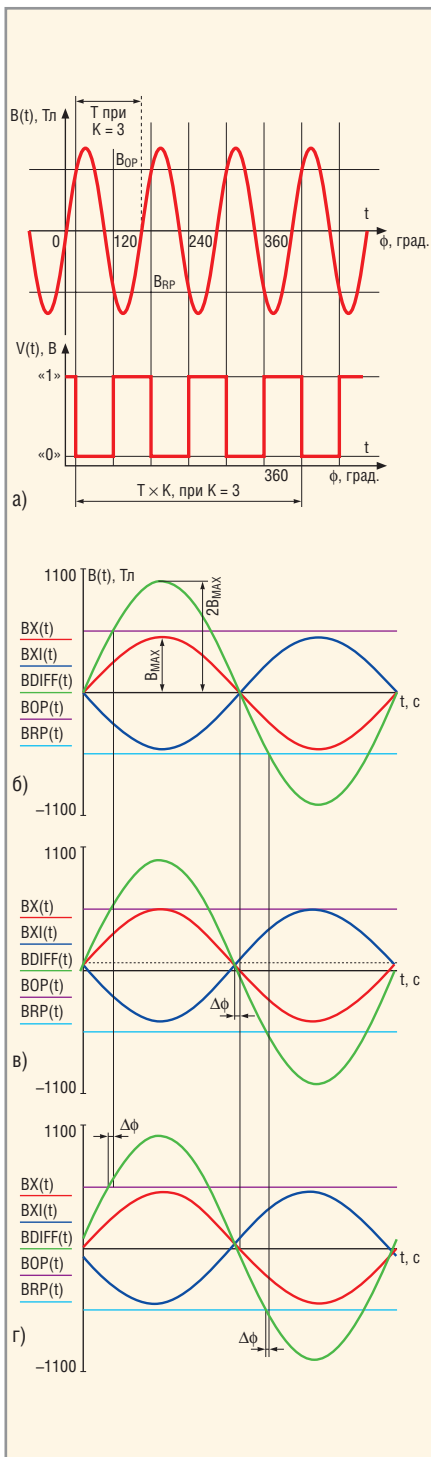


Рис. 3. Временные диаграммы первичных и выходных характеристик датчиков Холла
 (а) $B(t)$ – первичная магнитная индукция поля магнита; B_{OP} , B_{RP} – пороги переключения компаратора/триггера Шмитта; $V(t)$ – импульсное выходное напряжение; ϕ – угол электрического/ магнитного периода сигнала; T – магнитный период; (б – г) иллюстрация влияния магнитных смещений и фазового смещения сигнала на фазовый дрейф точек переключения в пределах периода T : б – идеальное переключение при $B_{OFF_X} = 0$; в – переключение в неидеальных условиях при $B_{OFF_X} \neq 0$; г – переключение в неидеальных условиях при $\phi_0 \neq 0$ для одного из сигналов; $\Delta\phi$ – фазовый дрейф точек переключения

сигнал в аналоговый абсолютный сигнал напряжения (на уровне первичного преобразователя), а затем переводит этот сигнал в цифровую форму (см. рис. 3а). За один оборот на 360° , который совершает ротор с числом K кодовых элементов (поллюсов магнитов, зубьев и впадин), каждый первичный магнитоуправляемый датчик, реагирующий на переходы зуб-впадина или полюс-полюс, формирует последовательность из K чередований аналоговых импульсов с периодом T . Магнитный период T в пределах механического оборота в 360° зависит от числа кодовых элементов K :

$$T = \frac{360^\circ}{K}$$

Магнитная индукция поля вдоль оси X изменяется в пределах периода T по гармоническому синусоидальному закону:

$$B(x) = B_{X_MAX} \sin(x) + B_{OFF_X}$$

где B_{X_MAX} – амплитудное значение магнитного поля; B_{OFF_X} – ненулевое смещение поля; $x = \omega t + \phi_0 = \phi + \phi_0$ – приведённая независимая переменная, т.е. значение изменяющейся величины угла ϕ (либо искомого параметра линейного перемещения s) в данный момент времени; ω – угловая скорость колебаний магнитного сигнала (искомый параметр); t – независимая переменная (время); ϕ , s – фазовый сдвиг магнитного поля от нулевой отметки ϕ_0 (начала отсчёта периода T); ϕ_0 – координата нулевой плоскости в полярной или линейной системе отсчёта.

Частота изменения магнитной индукции – это величина, обратная периоду:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{K}{360^\circ}$$

Циклическая частота изменения магнитного периода $\omega = 2\pi f$; циклическая частота механического вращения магнитного ротора в K раз меньше $\Omega = 2\pi F$, где $F = f/K$ – частота оборотов ротора.

В пределах магнитного периода магнитная индукция изменяется в соответствии с выражением $B_X(t) = B_{X_MAX} \sin(\phi_0 + 2\pi FKt) + B_{OFF_X}$, формируя абсолютный магнитный сигнал для датчика Холла.

Для дипольного датчика $K = 1$, $F = f$. Обычно B_{X_MAX} , B_{OFF_X} считаются постоянными и, в первом приближении, не зависящими от угла поворота и времени, полностью детерминированными и некоррелированными; ϕ_0 принимается одинаковым для обоих сигналов либо равным нулю.

Добавляя второй сенсорный элемент, смещённый в пределах T по фазе на 180° , можно получить дифференциальный датчик частоты и скорости (см. рис.3б):

$$B_{-X}(t) = B_{X_MAX} \sin(\phi_0 + \pi + 2\pi ft) + B_{OFF_X} \\ = -B_{MAX} \sin(\phi_0 + 2\pi ft) + B_{OFF_X}$$

Сложение абсолютных значений двух сигналов (метод вычитания посредством дифференциального усилителя) позволяет удвоить амплитуду результирующего сигнала до $2B_{MAX}$, при этом считается, что B_{X_MAX} и B_{-X_MAX} равны:

$$B_{DIFF}(t) = B_X(t) - B_{-X}(t) = 2B_{MAX} \sin(\phi_0 + 2\pi ft)$$

Интересно отметить, что смещения B_{OFF_X} и B_{OFF_X} , которые по оси X считаются постоянными и определёнными, могут полностью компенсироваться (см. рис. 3в) и не вызывать временной и фазовый дрейф точек переключения на фиксированных порогах (кроме нулевого переключения). В действительности смещения B_{OFF_X} и B_{OFF_X} – более сложные функции, требующие детального анализа определяющих аргументов, включая магнитные, механические допуски и помехи, и вместо компенсации при вычитании они могут, например, удваиваться, если знак смещения совпадает с полярностью поля:

$$B_X(t) - B_{-X}(t) = 2B_{MAX} \sin(\phi_0 + 2\pi ft) + B_{OFF_X} + B_{OFF_X} = 2B_{MAX} \sin(\phi_0 + 2\pi ft) + B_{OFF}$$

Неодинаковое и ненулевое фазовое смещение одного сигнала относительно другого, например, вследствие допусков сборки, эксцентриситета или вибрации, вызывает соответствующий дрейф точек переключения, показанный на рисунке 3г как $\Delta\phi$.

Напряжения V_X и V_{-X} пропорциональны абсолютным магнитным сигналам B_X и B_{-X} . Очевидно, что усиление лучше осуществлять одновременно либо вслед за вычитанием, чтобы минимизировать искажение B_{OFF} . Таким образом, в рассматриваемой одноосевой модели датчика погрешности сигнала определяются магнитными смещениями, обозначенными как B_{OFF_X} и B_{OFF_X} для синусного сигнала либо B_{OFF_Y} и B_{OFF_Y} для косинусного сигнала, если в кодирующем устройстве добавляется таковой.

Найти текущее значение f в данный момент времени t на основании измерений в пределах одного магнитного периода можно, используя выражение:

$$\begin{aligned} & \arcsin(\sin(2\pi ft + \varphi_0)) = \\ & = \arcsin\left(\frac{B_{DIFF}(t) - B_{OFF}}{2B_{MAX}}\right). \end{aligned}$$

При $\varphi_0 = 0$ искомая частота в данный, ненулевой момент времени t выразится как:

$$f = \frac{1}{2\pi t} \arcsin\left(\frac{B_{DIFF}(t) - B_{OFF}}{2B_{MAX}}\right).$$

При ненулевом результирующем для дифференциального сигнала φ_0 , например, вследствие эксцентриситета, f будет равняться:

$$\begin{aligned} f & = \frac{1}{2\pi \cdot t} \times \\ & \times \left[\arcsin\left(\frac{B_{DIFF}(t) - B_{OFF}}{2B_{MAX}}\right) - \varphi_0 \right]. \end{aligned}$$

Эта формула иллюстрирует влияние точности измерения t и $B(t)$ в каждой точке на правильность частотных измерений и в дальнейшем приводит нас к рассмотрению частоты как функции времени t .

Например, при $t = T/4 \times \arcsin(1) = 90^\circ$, или $\pi/2$ и при идеальных условиях f составит $1/T$. В неидеальных условиях частота будет определяться выражением:

$$f = \frac{2}{\pi T} \left[\arcsin\left(1 - \frac{B_{OFF}}{2B_{MAX}}\right) - \varphi_0 \right].$$

Хотя многие ИС датчиков используют фиксированные пороги переключения, в передовых датчиках скорости уже используется многократная оцифровка магнитного или

электрического сигнала методом выборки.

Продифференцировав выражение для дифференциального сигнала, можно получить скорость гармонического колебания магнитной индукции и показать, что она также зависит от амплитуды первичного сигнала и пропорциональна искомой частоте:

$$\begin{aligned} v(t) & = \frac{dB_{DIFF}(t)}{dt} = 2B_{MAX} \times \\ & \times 2\pi f \cos(\varphi_0 + 2\pi ft). \end{aligned}$$

Известно, что для нахождения абсолютного положения и направления посредством расчёта функции арктангенса необходимо добавить косинусное уравнение (для второго или третьего датчика или второй пары дифференциальных элементов, смещённой относительно первой на 90°):

$$B_Y(t) = B_{Y_MAX} \cos(\varphi_0 + 2\pi ft) + B_{OFF_Y}.$$

Косинусный сигнал приводит нас к дипольной двухосевой модели датчика скорости/положения/направления, которая рассматривается далее. В одноосевой конфигурации также может получаться косинусное уравнение для анализа фазовой разницы, сложения и деления сигналов друг на друга. Арктангенс угла можно извлекать в процессе деления выражений для дифференциальных сигналов, т.е. (без учёта смещения нуля и фазы):

$$\arctg(\varphi(t)) = \frac{v(t)}{2\pi f B_{DIFF}(t)}.$$

Однако этот метод, требующий сопутствующих вычислений, не будет столь эффективен, как рассматриваемый ниже.

Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. Сусоева С. Новые тенденции и перспективные технологии автомобильных датчиков систем Powertrain и контроля эмиссии. Часть 1. Состояние и перспективы рынка датчиков положения, скорости, датчиков концентрации кислорода (газа), массового расхода воздуха и давления. Компоненты и технологии. 2006. № 7. С. 86-94.
2. Сусоева С. Рекомендации производителям автомобильных цифровых датчи-

ков скорости и положения. Часть 1. Постановка задач и общие конструкторские рекомендации. Компоненты и технологии. 2006. № 9. С. 46-52.

3. Сусоева С. Рекомендации производителям автомобильных цифровых датчиков скорости и положения. Часть 2. Новые рекомендации по разработке датчиков с магнитным ротором. Компоненты и технологии. 2007. № 2. С. 23-28.
4. Сусоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 14. Итоговый сравнительный анализ. Выводы и обновление. Компоненты и технологии. 2006. № 7. С. 40-53.
5. Сусоева С. Сравнительный анализ возможностей применения датчиков Холла в автомобильных системах электрического рулевого управления. Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 36-44.
6. Сусоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 5. Новые перспективы бесконтактных угловых измерений в диапазоне угла 360?: снова датчики Холла – угловые магнитные энкодеры. Компоненты и технологии. 2005. № 6. С. 34-41.
7. Сусоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 6. Концепции создания магнитных угловых энкодеров на основе эффекта Холла. Компоненты и технологии. 2005. № 7. С. 28-35.
8. Сусоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 7. MLX90316 Melexis – первый магнитный угловой энкодер Холла на базе технологии TriadisPhi. Компоненты и технологии. 2005. № 8. С. 24-28.
9. An ultra-miniature rotary encoder, based on magnetic microsystems technology. Steele C., Rossmann S. Austria Microsystems AG. Published at Sensors Expo, US, 2002. www.sensorsmag.com. March, 2003.
10. http://www.techt.ch/michel/pro/these_2844.pdf.
11. Hiligsmann V.M. Melexis Microelectronic Systems. 360° Rotary Position Sensing with Novel Hall Effect Sensors. Sensors, March 2006.
12. Lin D. iC-Haus GmBH. One-chip Linear Position Measurement with Hall Sensors. Sensors, Aug 2006.
13. http://www.movingmagnet.com/MM102_sensor2007.pdf.
14. http://www.movingmagnet.com/MM111_sensor2007.pdf.

