

# Новые горизонты функциональной и системной интеграции датчиков механического движения

**В статье представлены новые идеи по осуществлению функциональной интеграции и микроминиатюризации измерительных технологий датчиков механического движения, ставшие результатом объединения двух ключевых направлений исследовательской работы автора — макро- и микротехнологий датчиков положения/скорости и МЭМС. Бесконтактный датчик механического движения ротора с коррекцией влияния дестабилизирующих факторов, представленный в этой публикации, — первая из вновь разрабатываемых моделей.**

Светлана СЫСОЕВА  
Dr.Gold@sysoeva.com

## Введение

МЭМС — ключевая современная технология датчиков механического движения, к которым относятся акселерометры, гироскопы, мультисенсорные блоки инерциальных измерений (IMU и другие) [1]. МЭМС-датчики отличаются высокой надежностью и низкой ценой, что допустило их широкое распространение в различных сегментах рынков — от Low-End до High-End. Одно из важнейших преимуществ МЭМС — это возможность микроминиатюризации устройств и технологий, известных из макромира.

Вследствие наиболее массовой коммерциализации МЭМС датчики движения достигли и наивысшей степени функциональной и системной интеграции, при этом цена устройств неуклонно снижается [2].

Доступность технологий МЭМС создает новые возможности для генерации и воплощения новых идей.

Одной из первых появилась на свет идея разработки концепции бесконтактного дат-

чика механического движения или датчика перемещения/положения/скорости/ускорения — на основе модели, описанной в [3], с добавлением функциональности измерения ускорения. Вслед за ней родилась идея микроминиатюризации до уровня МЭМС разработанных в прежние годы измерительных концепций магниточувствительных датчиков [4]. Следующая идея — несколько частного масштаба — состояла в применении МЭМС-датчиков в научных исследованиях для изучения влияния вибрации/ударов/наклона и других механических дестабилизирующих факторов на работу вновь разрабатываемых датчиков положения/скорости. Но в дальнейшем именно эта идея непосредственно подвела к созданию более ширококомасштабной концепции бесконтактного датчика механического движения ротора с коррекцией влияния дестабилизирующих факторов. Это устройство высокого уровня функциональной интеграции становится первым примером бесконтактного датчика механического движения, способного детектировать как

положение и скорость, так и ускорение или наклон.

## Предыстория

Довольно обширная группа бесконтактных датчиков механического движения включает: датчики скорости, положения, приближения, наклона, расстояния, уровня, угла, ускорения, гироскопы и некоторые другие [1, 3]. В этой группе выделяются две основные категории устройств (рис. 1):

- Датчики, активируемые внешним ротором, — датчики положения/скорости/приближения и т. д. (рис. 1а).
  - Датчики, закрепленные на объекте, движение которого детектируется, и активируемые тем, что в конструкции датчика искусственно моделируется процесс, подобный детектируемому движению, — датчики ускорения, угловой скорости, вибрации, наклона и т. д. (рис. 1б).
- Им соответствуют следующие перспективные технологии современных датчиков движения:

- интегральные CMOS ASIC магнитоуправляемые датчики [5];
- МЭМС (CMOS MEMS) [1].

И те, и другие относятся к бесконтактным измерительным технологиям, что подразумевает отсутствие в измерительном процессе физического контакта датчика с детектируемым объектом — на макро- и микроуровнях. В первом случае датчик является статором, а подвижная часть (ротор) механически связана с объектом, параметры движения которого детектируются (рис. 1а). Во втором случае ротор и статор на макроуровне не выделяются, а подвижный элемент, перемеще-

## Приглашение к сотрудничеству

Автор приглашает к сотрудничеству российское предприятие, заинтересованное в получении и практическом использовании результатов исследований, которые явно необходимы для верификации и дальнейшей проработки его новых идей. На первом этапе сотрудничества от предприятия ожидается привлечение его материальных, производственных и других ресурсов для:

- изготовления экспериментальной установки (частичного изготовления по чертежам автора);
- изготовления и тестирования прототипов датчиков.



ние которого детектируется, встроен в датчик (рис. 16). Степень бесконтактности МЭМС определяется отсутствием контактирующих частей в микромеханической структуре датчика. Преимущества бесконтактных технологий — отсутствие износа механических частей, высокий и теоретически бесконечный срок службы, упрощение конструкций и методов монтажа.

Общее между ними и то, что многие из них выполнены по технологии микросистем и представляют собой результат системной интеграции на одном общем носителе измерительных элементов и микроэлектронных схем. Микросистемная технология MST — более широкое понятие, чем MEMS, оно обобщает как CMOS MEMS, так и CMOS ASIC [1].

Эволюция технологий повсеместно привела к 3D интегральным измерительным системам, в которых обозначенные выше перспективные технологии датчиков механического движения отличает самая высокая степень функциональной интеграции.

В частности, посредством одного многофункционального МЭМС-модуля, например IMU strapdown типа (жестко закрепленного на объекте), на основе достаточного набора входных данных об ускорении могут быть вычислены скорость (посредством однократного интегрирования) и координаты объекта (посредством двойного интегрирования) в глобальной координатной системе. Гироскопы определяют угловые скорости объекта по осям, сигналы гироскопов после однократного интегрирования дают данные об ориентации, которые используются для проецирования измерительных осей акселерометров на глобальные координатные оси. IMU интегрируются с АМР — магнитометрами, отслеживающими положение объекта в магнитном поле Земли, GPS-ресиверами, датчиками Солнца [2, 7].

Все это показывает, что на современном уровне развития сенсорных технологий можно измерить, пересчитать и скорректировать все параметры механического движения объекта — посредством только одного многофункционального сенсорного блока. Этим объектом может быть ротор, активирующий бесконтактный магнитоуправляемый датчик в системе, аналогичной той, что показана на рис. 1а.

Объединение датчиков скорости, положения, направления и приближения в многофункциональный сенсорный блок уже было выполнено на концептуальном уровне в предыдущих публикациях автора [3]. Но скорость, положение, направление — это не все параметры движения ротора, которые должны и могут быть учтены. Например, измерение ускорения в системе зубчатого ротора могло бы позволить с более высокой точностью собирать в реальном времени данные о частоте вращения и положении. Ускорение и угловая скорость/частота вращения также могут быть добавлены в многофункциональный сенсорный блок.

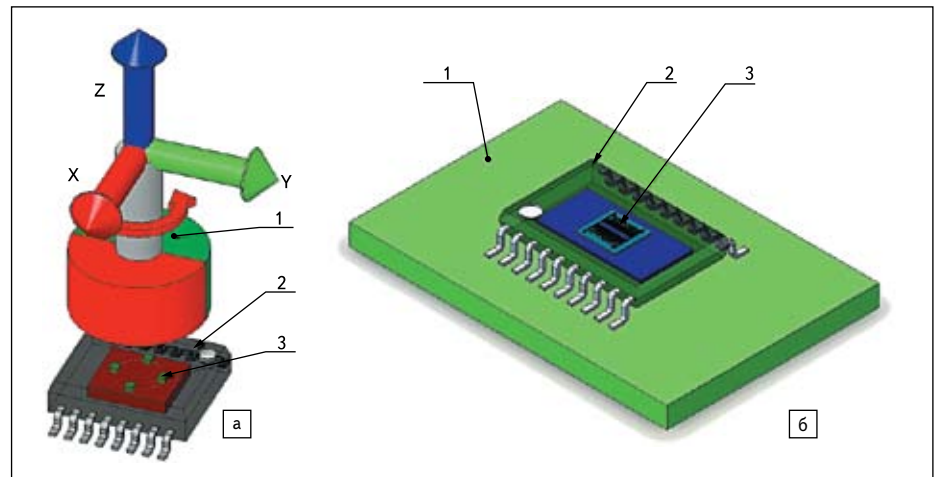


Рис. 1. Классические примеры двух основных категорий бесконтактных датчиков механического движения:

а) датчики, активируемые внешним ротором, — магнитоуправляемые датчики положения/скорости:

1 — дипольный магнитный ротор;

2 — датчик Холла: двухосевой дифференциальный энкодер перпендикулярного магнитного поля типа AS504x компании Austriamicrosystems без интегрированного магнитного концентратора (ИМК);

3 — планарные элементы Холла (крестообразный массив);

б) МЭМС-датчики ускорения, закрепленные на объекте, движение которого детектируется, активируемые тем, что в конструкции датчика искусственно моделируется процесс, подобный детектируемому движению:

1 — объект; 2 — МЭМС-акселерометр; 3 — интегрированная МЭМС-структура

В [6] была высказана еще одна идея, состоящая в том, что посредством акселерометров возможна корректировка измерений основных кинематических параметров, детектируемых датчиками положения и скорости, — с учетом, например, вибрации (детектируемой акселерометром). Назначение многих акселерометров и гироскопов как раз и состоит в компенсации и стабилизации основных измерений (компенсация гравитации в навигации, компенсация измерений уровня, стабилизация видеокамер и т. д.). С акселерометрами и гироскопами, закрепленными на объекте (объектах) ротора и статора, линейное и угловое положение (линейная и угловая скорость) может и корректироваться — на основе данных об ускорении в системе, и вычисляться — по данным об ускорении ротора.

Несомненно, проще произвести подобный расчет, когда изменение параметра происходит по определенному периодическому (синусоидальному) закону, и механическая система прецизионно выверена и статически откалибрована — как системы «ротор — статор» магнитоуправляемых датчиков.

Однократное интегрирование ускорения возвращает скорость объекта, двойное может дать информацию о положении, перемещении, координатах. Угловую скорость ротора можно даже измерять непосредственно — посредством гироскопа, который в этом случае должен быть закреплен на объекте, движение которого детектируется.

Таким образом, мысль об объединении в одном устройстве измерительных принципов макротехнологий и МЭМС возникла у автора этой статьи давно. Но идея долгое время была коммерчески малоинтересной по следующим причинам.

Идея детектирования угловой скорости ротора, вибрации и ударов в машинной системе посредством МЭМС-датчиков на практике могла оказаться несостоятельной, в частности, в связи с тем, что МЭМС-устройство должно работать в сложных условиях внутри объекта, то есть при высокой рабочей температуре и высоком уровне шума.

Размещение МЭМС-датчика в высокотемпературной рабочей зоне с температурами порядка 125...150 °C и выше потребовало бы применения высокотемпературных материалов типа карбида кремния (SiC) и для МЭМС, и для электроники обработки сигнала. На данном этапе подобные материалы недоступны, и заказ такого решения все еще интересен только для High-End техники.

Следующая проблема — в осуществлении электрического интерфейса встраиваемой МЭМС. Вариант коммуникации МЭМС с ASIC и обрабатывающим блоком, питания CMOS по беспроводному каналу сейчас представляет значительный интерес, но все это стало реальным только в последние годы. Альтернативный метод электрического интерфейса — с помощью проводов, но они могут мешать нормальной работе механической системы, причем в ряде случаев эти провода имеют значительную длину (в сложных условиях они могут стать источниками сигнальных шумов). Для сравнения, встраиваемый дизайн позволял довольно гармонично вписывать бесконтактные магнитоуправляемые датчики в мехатронную систему и беспрепятственно выполнять их проводное электрическое подключение с внешней стороны картера, торца вала и т. д.

В итоге МЭМС-акселерометры широко применяются для детектирования положе-

ния/ориентации телефонов, стабилизации платформ, но только в последние два года приблизились к машинным системам. Была выявлена и еще одна возможность для реализации объединения имеющихся макротехнологий и МЭМС — микроминиатюризация макротехнологий до уровня МЭМС.

Например, ротор и датчик Холла могут быть изготовлены по технологиям микропроизводства и включены в состав ASIC, в которой параллельно реализован блок измерения ускорения. Задача состоит в том, чтобы привести в движение ротор, для чего можно использовать МЭМС-актюаторы и двигатели. Применять эти устройства можно в МЭМС приводах устройств, например объективов, приводов дисков, вентиляторов электронных чипов и блоков. В общем, эта идея также была далека от классических машинных приводов.

Но в связи с развитием и технологий, и инфраструктуры разработки, производства, тестирования МЭМС ситуация в корне меняется.

В настоящее время уже не представляется делом далекого будущего помещение МЭМС-акселерометра на ротор и осуществление беспроводной связи с внешним трансивером-статором по радиоканалу. По мере коммерциализации High-End технологий ожидается коммерческая доступность высокотемпературных МЭМС-чипов — на основе материала SiC или других. Ожидается и миниатюризация самих приводов одновременно с увеличением их числа. Так, для управления отдельными узлами и агрегатами в автомобиле или летательном аппарате используется большое число вспомогательных двигателей и приводов, генераторов, требующих контроля.

В этих системах скорость и положение могут интегрироваться из параметра ускорения. Все же технологии измерений скорости, положения посредством магниточувствительных датчиков — Холла и других (оптических, индуктивных энкодеров) — являются более известными и проработанными [8–9]. МЭМС-датчики можно использовать для коррекции и стабилизации работы этих приборов в режиме online, или на стадии калибровки, или еще ранее — на стадии научных исследований и разработки прототипов устройств.

Поэтому первым шагом в продвижении работы автора в этом направлении стала разработка прецизионной установки для точного исследования влияния вибрации на функциональные свойства перспективных магнитоуправляемых датчиков Холла [10].

В предыстории концепции бесконтактного датчика механического движения ротора с коррекцией влияния дестабилизирующих факторов возвращение к идее возобновления экспериментальных исследований сыграло особую роль.

Несколько ранее была разработана установка для исследования статических эффектов: погрешностей крепления, влияния частоты

вращения ротора, обратного смещения [11]. Установка для исследования виброустойчивости датчиков скорости автомобиля была разработана еще в 2002 году и опубликована в статье [12]. В этой установке исследуемый бесконтактный магнитоуправляемый датчик частоты вращения ротора подвергался воздействию вибрации вдоль одной из трех его осей, а ротор и контрольный датчик оставались в статическом состоянии. Смена осей воздействия вибрации обеспечивалась за счет трех разных вариантов крепления датчика на вибростенде и позиционирования ротора. Для контроля вибрации был предназначен пьезоэлектрический акселерометр.

Для нового проекта установки была взята та же схема. В первую очередь нужно было исследовать поведение в условиях вибрации магнитоуправляемых датчиков положения дипольного ротора, активируемых двумя типами двигателей (шаговым и двигателем постоянного тока) — посредством подходящих датчиков Холла.

Новый проект предполагает значительную миниатюризацию установки, описанной в [12]. Так, вместо пластины для крепления датчика Холла было решено использовать печатную плату с двумя запаяными на ней датчиками — Холла и МЭМС-акселерометром, вместе с выводами к анализатору сигналов на ПК. Это решение непосредственно повело к модели бесконтактного датчика механического движения с коррекцией влияния вибрации. Затем вновь разработанная модель была расширена до концепции бесконтактного датчика механического движения ротора с коррекцией влияния многих (механических, температурных и других) дестабилизирующих факторов.

### **Модель бесконтактного датчика механического движения ротора с коррекцией влияния дестабилизирующих факторов**

Эта концепция представлена на рис. 2. На рис. 2а и б показано аксиальное исполнение прототипа вновь разрабатываемого устройства (патент № 2312363) [9–10]. На рис. 2в и г можно видеть новое исполнение того же датчика, но дополненного МЭМС-акселерометром и интерфейсной ASIC, которые размещены на печатной плате устройства. По результатам «примерки» типичных корпусов магнитоуправляемых датчиков и электроники (SOIC-8) на малую круглую плату оптимальный вариант размещения компонентов дал некоторое смещение магнитного центра относительно центральной оси корпуса статора датчика. Как вспомогательное средство для точного взаимного позиционирования ротора и статора в донной части корпуса был обозначен круглый паз (рис. 2д).

Подобное смещение осей ротора и статора допустимо, но далеко не для любых систем — и это притом, что размеры корпусов микро-

схем были ограничены до минимальных. Данный пример явно иллюстрирует необходимость дальнейшей миниатюризации устройства. Это достижимо на следующем уровне функциональной интеграции — с одним заказным ASIC-решением.

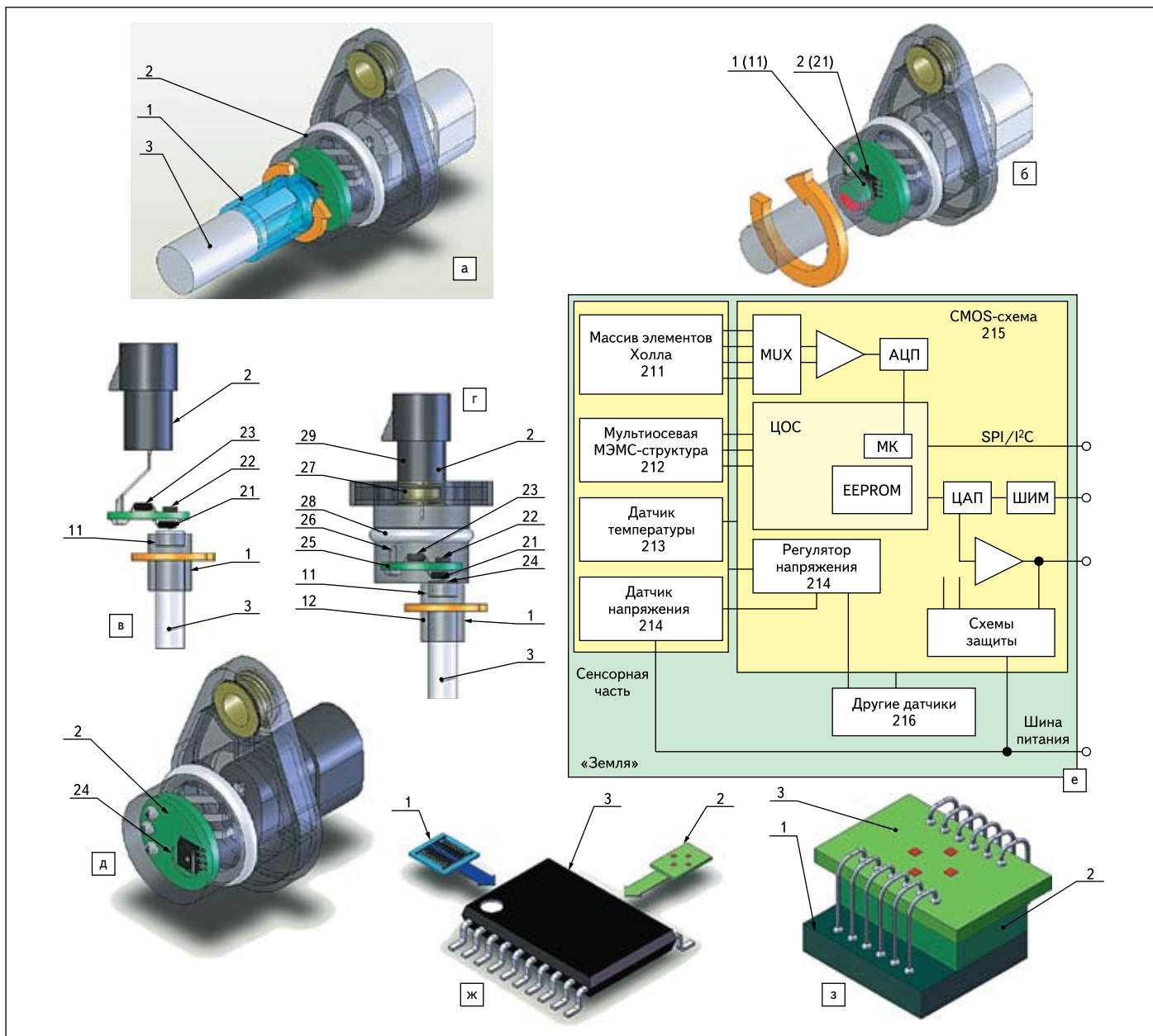
Схема вновь разработанного устройства более высокого уровня функциональной интеграции представлена на рис. 2е. Акселерометр в этой схеме может детектировать не только вибрацию, но и толчки, удары, наклоны — любые ускорительные воздействия, дестабилизирующие работу системы. Также очевидно, что одна ASIC не может одинаково успешно измерять ускорения low-g и high-g уровней, низко- и высокочастотную вибрацию, наклоны, удары и другие ускорительные воздействия. Необходим тщательный анализ применения, выявление наиболее опасных дестабилизирующих факторов, согласование возможного решения с системной ценой. Разработанная концепция предполагает ее масштабируемость для различных задач, что реализуется посредством применения той или иной измерительной технологии (датчиков вибрации или наклона) и специальных (например, высокотемпературных) материалов.

Стоит заметить, что многие современные CMOS датчики Холла и МЭМС-акселерометры оснащаются интегрированными датчиками температуры, схемами защиты от перенапряжений, напряжения питания обратной полярности и короткого замыкания выхода. Все эти схемы (без избыточности) должны быть перенесены и в объединенное многофункциональное устройство, которое тогда вместо датчика с коррекцией влияния только механических дестабилизирующих факторов можно будет классифицировать как устройство с возможностью коррекции многих дестабилизирующих факторов. Хотя все сенсорные технологии измерения (датчики Холла, температуры, напряжения) интегрируются со CMOS, сенсорная часть на рис. 2ж специально отделена от CMOS ASIC — чтобы подчеркнуть возможность не только полностью однокристалльного дизайна, но и возможность мульткристалльной компоновки датчиков.

Какому из вариантов дизайна при исполнении ASIC (одно-, двухкристалльному, стекированному (рис. 2ж, з)) отдать предпочтение, на данном этапе будет зависеть исключительно от технологических возможностей изготовителя, но будущее — за 3D ASIC (рис. 2з) [1, 13].

### **Литература**

1. Сысоева С. МЭМС-системы в корпусе // Sovtest ATE, 2010 — [www.sovtest.ru](http://www.sovtest.ru)
2. Сысоева С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Инерциальные системы — от low-end до high-end // Компоненты и технологии. 2010. № 5.



**Рис. 2.** Развитие концепции бесконтактного датчика механического движения ротора с коррекцией влияния дестабилизирующих факторов:

а, б) базовые механические и функциональные компоненты и элементы встраиваемого цифрового датчика положения / скорости — прототипа нового устройства (патент № 2312363):  
 а) основные механические компоненты в торцевом исполнении прототипа: 1 — ротор (сборочная единица роторного узла); 2 — статор; 3 — вал;  
 б) базовые функциональные компоненты бесконтактного программируемого датчика-прототипа:  
 1 (11) — дипольный магнит; 2 (21) — магниточувствительный датчик высокого уровня интеграции (ИС Холла MLX90316 Melexis);

в—д) базовые компоненты /элементы вновь разработанного бесконтактного датчика механического движения ротора для коррекции влияния механических дестабилизирующих факторов на дискретах высокого уровня интеграции:  
 в) ключевые функциональные компоненты вновь разработанного устройства: 1 — ротор (сборочная единица роторного узла); 2 — статор; 3 — вал; 11 — дипольный магнит-ротор; 21 — магниточувствительный интегральный датчик (ИС Холла MLX90316) (статор); 22 — датчик ускорения /вибрации /ударов /наклона статора; 23 — электроника для цифровой обработки сигналов /слияния данных двух датчиков и формирования выходного сигнала;  
 г) все электрические /электронные и механические компоненты /элементы интерфейса нового датчика:  
 1 — ротор; 2 — статор; 3 — вал; 11 — дипольный магнит-ротор; 12 — втулка для крепления магнита на роторе;  
 21 — магниточувствительный интегральный датчик (ИС Холла MLX90316) (статор); 22 — датчик ускорения /вибрации /ударов /наклона статора;  
 23 — электроника для цифровой обработки сигналов /слияния данных двух датчиков и формирования выходного сигнала;  
 24 — паз для точного позиционирования магнита относительно статора;  
 25 — печатная плата с размещенными на ней датчиками (21, 22), электроникой (23) и запаянными контактами соединителя (26);  
 27, 28 — механический интерфейс датчика с системой: 27 — литой фланец датчика с запрессованной втулкой под резьбовой монтаж; 28 — уплотнительное кольцо;  
 29 — электрический интерфейс (встроенный штыревой соединитель);  
 д) 3D-вид паза (24) в донной части корпуса статора (2);

е) ключевые функциональные элементы вновь разработанного бесконтактного датчика механического движения ротора, включаемые для коррекции влияния на данные статора всех возможных /требуемых дестабилизирующих факторов: 211 — дифференциальный массив элементов Холла;  
 212 — мультиосевая МЭМС-структура для детектирования механического движения статора (ускорения /вибрации /ударов /наклона /угловой скорости и т. п.);  
 213 — датчик температуры; 214 — датчик напряжения; 215 — CMOS-схема для цифровой обработки сигналов /слияния данных /коррекции выходов датчиков (АЦП, встроенный блок ЦОС, ЦАП, EEPROM, микроконтроллер, регулятор напряжения, схемы защиты, интерфейсные схемы); 216 — другие датчики (давления среды, ионизирующего излучения и т. д.);  
 ж, з) концепция высокоинтегрального МЭМС датчика механического движения: от мультикристалльного модуля — к CMOS ASIC (ж) и 3D ASIC (з):  
 1 — МЭМС-кристалл; 2 — CMOS массив элементов Холла; 3 — CMOS ASIC /3D ASIC



3. Сысоева С. Датчики близости/положения/расстояния. Важные обновления и дальнейшие перспективы // Компоненты и технологии. 2008. № 3.
4. Сысоева С. Новые концепции датчиков скорости/положения // Компоненты и технологии. 2008. № 1.
5. Сысоева С. Новые интегральные датчики Холла специального назначения // Компоненты и технологии. 2004. № 9.
6. Сысоева С. Магнитоуправляемые, MEMS и мультисенсорные датчики движения 2009 года — функциональнее, точнее, миниатюрнее предшественников // Компоненты и технологии. 2009. № 8.
7. Сысоева С. Введение в High-End сегменты применений MEMS-технологии // Компоненты и технологии. 2010. № 12.
8. Сысоева С. Бесконтактные магнитоуправляемые датчики для вращательных систем летательных аппаратов // XXX Гагаринские чтения. Тезисы докладов Международной молодежной научно-технической конференции. Т. 6. М.: МАТИ, 2004.
9. Сысоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 14. Итоговый сравнительный анализ. Выводы и обновление // Компоненты и технологии. 2006. № 7.
10. Бесконтактный программируемый датчик абсолютного углового положения в диапазоне 360°.
11. Сысоева С.С., Яцун С.Ф., Захаров И.С. Решение № 2278 от 18.04.2007 о выдаче патента на изобретение по заявке на изобретение № 2006102833 от 24.01.2006. Патент № 2312363 (2007.12.10).
12. Яцун С.Ф., Сысоева С.С. Экспериментальная установка для исследования датчиков скорости автомобиля // Известия Курского ГТУ. 2004. № 1 (12).
13. Сысоева С.С. Экспериментальная установка для исследования виброустойчивости датчиков скорости автомобиля // Вибрационные машины и технологии: Сб. науч. тр. Курского ГТУ. Курск, 2003.
14. [www.sysoeva.com/mems.htm](http://www.sysoeva.com/mems.htm)