

МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЕ MEMS-КОММУТАТОРЫ

С.М. Карабанов, д.т.н., А.С. Карабанов, Д.В. Суворов, к.т.н.
390027, Россия, г. Рязань, ул. Новая, 51В, ОАО «РЗМКП»

В работе дано описание нового класса приборов – микромеханического коммутационного элемента, управляемого внешним магнитным полем, изготовленного по MEMS-технологии. Подробно представлена конструкция прибора, принцип работы, особенности управления и использования в различных датчиках положения. Представленные данные показывают, что магнитоуправляемый MEMS-коммутатор является малогабаритным перспективным прибором, сочетающим преимущества функциональных аналогов – герконов и датчиков Холла.

In the paper, a new class of devices is described in details. This is a micromechanical switching element operated by the external magnetic field, manufactured according to MEMS-technology. A design of the device, a principle of operation, features of operation as well as of application in different position sensors, is described in details. The data presented therein show that MEMS-switch is a small-sized perspective device which combines the advantages of devices similar in operation – reed switches and Hall sensors.

В настоящее время актуальным направлением развития датчиков, управляемых внешним магнитным полем, является их миниатюризация. Миниатюризация датчиков на основе магнитоуправляемых контактов (герконов) сопряжена с рядом технических и технологических трудностей, обусловленных рядом физических ограничений и особенностей их конструкции. Так, в настоящее время существуют герконы с размером баллона порядка 4-5 мм, и дальнейшее уменьшение размеров герконов, изготавливаемых по традиционной технологии, не прогнозируется. Использование в качестве функционального элемента малогабаритных датчиков приборов другого класса – датчиков Холла, обладающих меньшими габаритами, в ряде случаев не приемлемо по причине необходимости обеспечения их питанием в режиме ожидания и высокого сопротивления в активном состоянии.

Целью настоящей работы является описание нового класса приборов – микромеханического коммутационного элемента, управляемого внешним магнитным полем (кодирование – MS1), изготовленного по MEMS-технологии. Микропереключатель MS1 [1, 2] сочетает в себе преимущества герконов (не требует постоянного питания в режиме ожидания, обладает малым контактным сопротивлением) и датчиков Холла (малые габариты, сравнительно высокая точность определения положения в датчиках положения с простой магнитной системой). Микропереключатель MS1 был разработан компанией Schneider Electric Industries (Франция) совместно с компанией CEA-Leti (Франция). Конструкция микропереключателя защищена патентом США № US6663158B1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика магнитоуправляемых датчиков

	Микропереключатель MS1	Датчик Холла	Геркон
Характерные размеры (по площади прибора в корпусе)	< 3 мм ²	≈ 6 мм ²	>12 мм ²
Не требует энергопотребления	+	-	+
Малый размер	+	+	-
Точность определения положения в датчиках положения	+	+	-

Конструкция MEMS-переключателя MS1

Магнитоуправляемый микропереключатель, изготовленный на основе MEMS-технологии, обладает всеми преимуществами MEMS-устройств: миниатюрность, простота изготовления, возможность интеграции в микроэлектронные схемы и невысокая стоимость при крупносерийном производстве [3].

Микропереключатель MS1 состоит из исполнительного механизма и электрических контактов, заключенных в герметичный кремниевый корпус (рис. 1). Кремниевый корпус прибора включает в себя кремниевую подложку, на которой расположен исполнительный механизм и кремниевый колпачок. Исполнительный механизм состоит из подвижной ферромагнитной пластины (якоря) из магнитомягкого гальванического сплава FeNi (Ni 80 %, Fe 20 %) толщиной 8 микрон, прикрепленной с помощью гибких торсионных рычагов к кремниевой подложке, предварительно покрытой изолирующим слоем. Ферромагнитная пластина содержит подвижный электрический контакт 1, покрытый слоем рутения, имеющим толщину порядка 100 нм. Использование наноразмерного рутениевого покрытия позволяет существенно увеличить ресурс работы коммутатора (по критерию залипания контактов) по сравнению с золотыми контактами без покрытия. На изоляционной подложке также расположены неподвижный электрический контакт 2 с аналогичным рутениевым нанопокрытием и проводники из золота толщиной 1 мкм. Подложка и колпачок соединены герметизирующим кольцом. В кремниевом SMD-корпусе (для поверхностного монтажа) выполнены сквозные токопроводящие каналы (TSV), соединяющиеся с контактными площадками для поверхностного монтажа (SMT), выполненными из эвтектического сплава AuSnCu.

В замкнутом состоянии переключателя электрический ток протекает (показано на рис. 1 стрелками) через неподвижный и подвижный контакты, ферромагнитную пластину и электрические проводники, соединенные с контактными площадками.

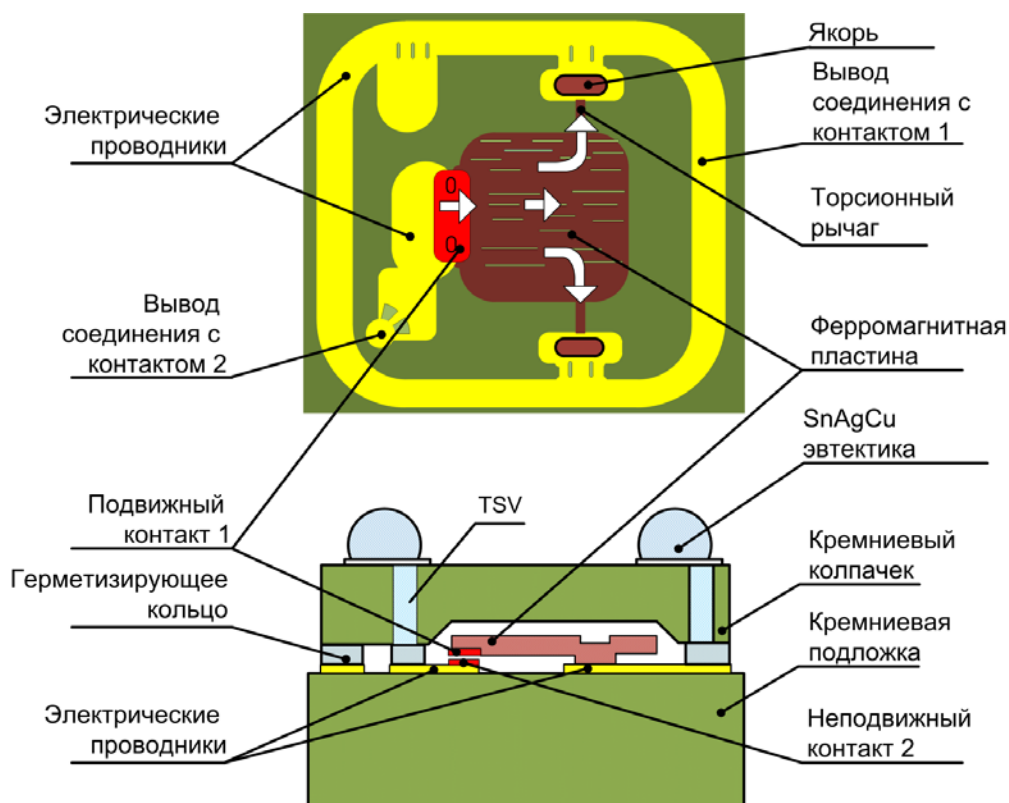


Рис. 1. Конструкция MEMS-переключателя MS1

Принцип работы

Принцип работы MEMS-переключателя MS1 существенно отличается от принципа работы герконов и датчиков Холла. Замыкание и размыкание контактов MS1 происходит за счет переориентации ферромагнитной пластины датчика вдоль линий внешнего магнитного поля. Таким образом, состояние переключателя определяется линией ориентации магнитного поля, а не только его силой, как в случае с герконом или датчиком Холла. Поэтому для стабильной работы переключатель должен всегда находиться под влиянием магнитного поля. На рис. 2 представлена схематическая иллюстрация работы прибора. Видно, что при перемещении постоянного магнита относительно переключателя изменяется направление линий магнитного поля внутри датчика, и контактная ферромагнитная пластина, закрепленная на гибких торсионных рычагах, поворачивается, замыкая или размыкая контакты. Коммутация контактов происходит в точке пересечения медианой магнита центра переключателя.

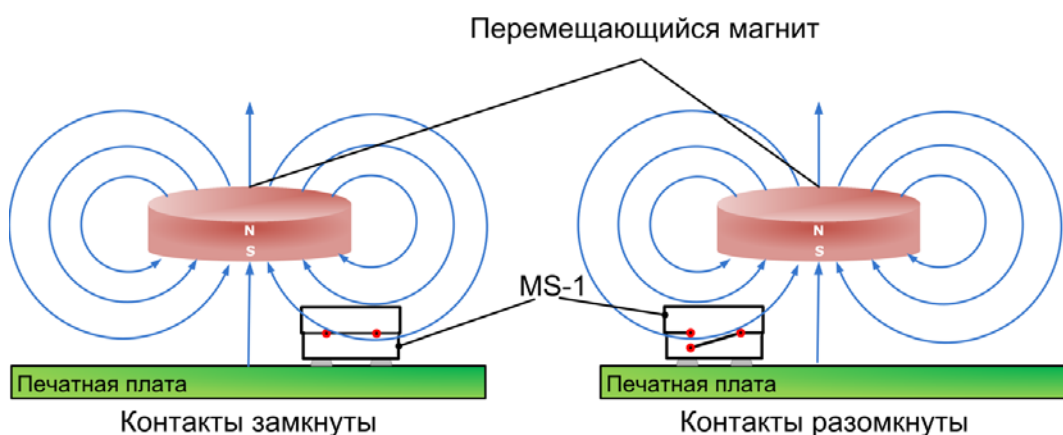


Рис. 2. Схематическая иллюстрация работы микропереключателя

Наноразмерное покрытие контактов MEMS-коммутатора MS-1

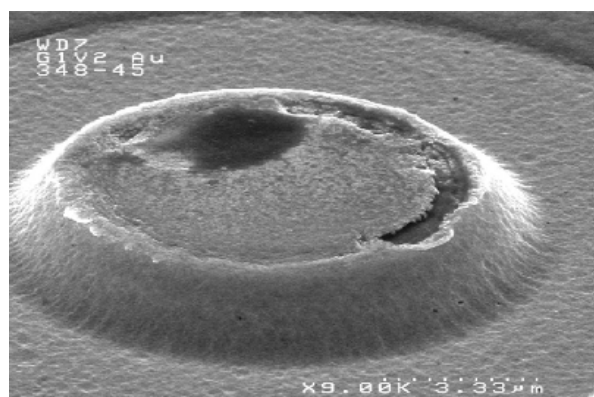
Ресурс работы и эксплуатационные характеристики (прежде всего, сопротивление в замкнутом состоянии) любых коммутационных приборов, включая MEMS-коммутаторы, в основе конструкции которых лежит «сухой контакт», определяются свойствами контактного покрытия. С целью повышения ресурса работы и снижения контактного сопротивления в MEMS-коммутаторах MS-1 в качестве контактного покрытия используется слой рутения толщиной 100 нм, формируемый с использованием PVD-технологии, что позволяет получить высокую степень химической чистоты и гладкости покрытия. Толщина рутениевого покрытия была выбрана равной 100 нанометров исходя из требований достижения баланса между эрозийной стойкостью (возрастает с увеличением толщины) и напряжением покрытия (чем тоньше, тем меньше внутренних напряжений, большая толщина контактного покрытия может стать причиной выхода MEMS-коммутатора из строя из-за отслаивания покрытия при коммутации больших токов). Результаты исследований эксплуатационных характеристик MEMS-коммутаторов с наноразмерным рутениевым покрытием и без него, когда контактные площадки формируют из золота – материала проводников, представлены в табл. 2.

Перед началом испытаний все MEMS-коммутаторы имели электрическое сопротивление в замкнутом состоянии менее 1 Ом. Использовался режим горячей коммутации (коммутируемое напряжение 3 В, ток 10 μ А, резистивная нагрузка, частота коммутации 100 Гц). Испытания завершались после 100 млн циклов коммутаций. Все испытанные MEMS-коммутаторы (20 штук) в цепь включались одинаковым образом, при котором на подвижный контакт подводился положительный потенциал, а на неподвижный – отрицательный.

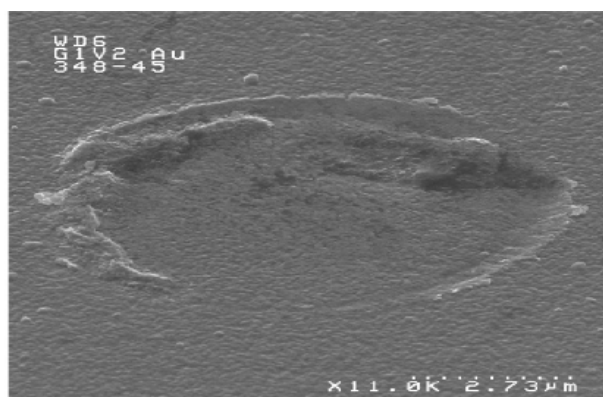
Работоспособность и электрические характеристики MEMS-коммутаторов с золотым и наноразмерным рутениевым покрытием контактов после 100 млн циклов коммутаций

Золотые контакты (без наноразмерного покрытия)	Контакты с наноразмерным рутениевым покрытием
<p>У 16 % приборов произошло залипание контактов.</p> <p>4 % приборов продолжали работать при значениях электрического сопротивления до 200 Ом из-за карбонизации контактов.</p> <p>80 % приборов продолжали работать при значениях электрического сопротивления на 20-30 % выше первичного значения. При этом после испытаний с помощью сканирующего электронного микроскопа обнаружены расплавленные золотые контакты.</p>	<p>100 % приборов показали свою работоспособность (без залипания), но у всех приборов значение электрического сопротивления увеличилось в связи с карбонизацией.</p> <p>У 30 % приборов электрическое сопротивление составляет до 200 Ом.</p> <p>У 70 % приборов электрическое сопротивление около 20 Ом.</p>

После испытаний проводились исследования поверхности контактов с помощью сканирующего электронного микроскопа. Фотографии контактных площадок без указанного покрытия и с ним, сделанные после 100 млн циклов коммутаций с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), представлены, соответственно, на рис. 3 и 4.

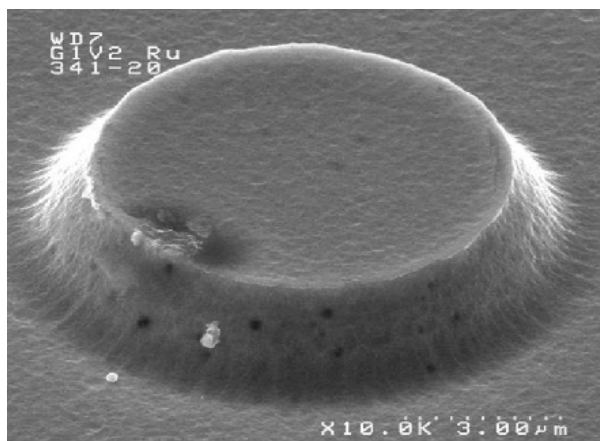


а

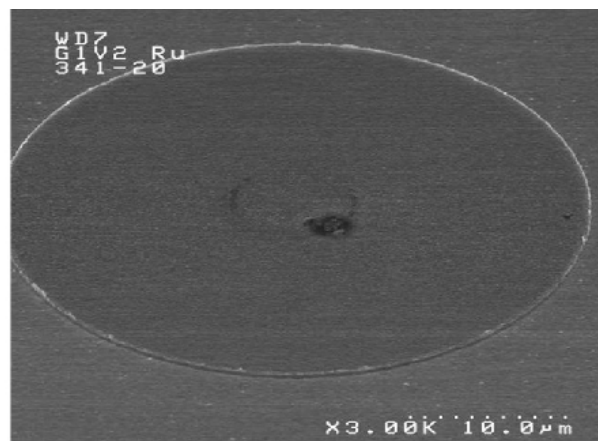


б

Рис. 3. СЭМ-изображения золотых контактов после 100 млн коммутаций: а) подвижные контакты (закрепленные на ферромагнитной пластине); б) неподвижные контакты (на подложке)



а



б

Рис. 4. СЭМ-изображения контактов с рутениевым наноразмерным покрытием после 100 млн коммутаций: а) подвижные контакты (закрепленные на ферромагнитной пластине); б) неподвижные контакты (на подложке)

Как видно из результатов исследования (рис.3 и 4), на золотых контактах обнаружены следы сильной эрозии и оплавления, а контакты с наноразмерным рутениевым покрытием изменились незначительно по сравнению с золотыми контактами. Использование золота в качестве контактного материала приводит к негативному явлению – залипанию контактов MEMS-коммутатора, а использование наноразмерного рутениевого покрытия толщиной 100 нм обеспечивает работу MEMS-коммутаторов без залипания контактов при сравнительно малом контактном сопротивлении, достаточном для работы в цепях цифровых сигналов, в качестве датчиков.

Технические характеристики, геометрические размеры, схема включения

Таблица 3 содержит все основные электрические и механические характеристики MEMS-переключателя MS1, а на рис. 5 представлены геометрические размеры SMD-корпуса прибора. Типовая схема включения микропереключателя в электрическую цепь представлена на рис. 6.

Таблица 3

Технические характеристики MEMS-переключателя

Электрические характеристики	
Диапазон коммутируемого напряжения, В	от 0 до 5
Пропускаемый ток (резистивная нагрузка), мА	от 0 до 1
Контактное сопротивление, Ом, не более	2
Износостойкость (количество циклов) 10 мкА, 3 В, резистивная нагрузка, не менее	10^8
Износостойкость (количество циклов) 1 мА, 5 В, резистивная нагрузка, не менее	10^6
Сопротивление изоляции между разомкнутыми контактами, МОм	100 при 100 В
Размеры, механические и временные характеристики	
Габаритные размеры, мм	1,60 x 1,65 x 1,15
Механическая износостойкость (количество циклов до механического разрушения токопроводящих торсионов)	$2 \cdot 10^8$
Время срабатывания переключения (включая дребезг), мкс, не более	50
Частота коммутации, кГц	1
Синусоидальная вибрация	10-500 Гц, (5g)
Механический удар одиночного действия	30g (11 мс)

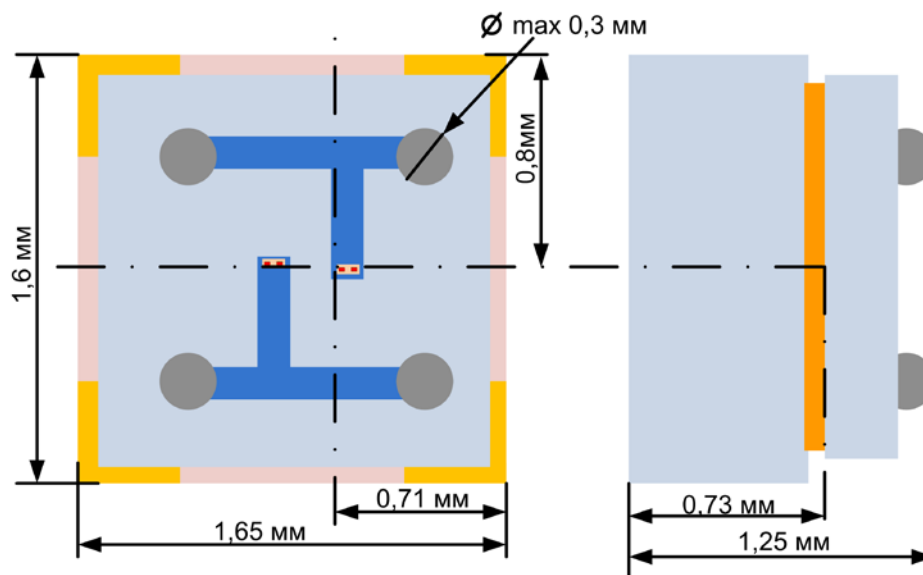


Рис. 5. Геометрические размеры микропереключателя (в миллиметрах); пересечением штрихпунктирных линий изображен магнитный центр переключателя

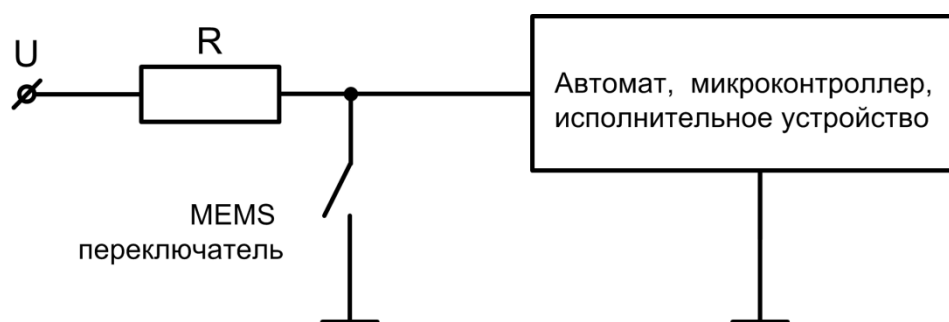


Рис. 6. Типовая схема включения микропереключателя в электрическую цепь

Примеры использования в датчиках различных типов

Пример 1: Датчик с продольным перемещением магнита относительно плоскости печатной платы, на которой размещен MEMS-переключатель (рис. 7).

В данной конструкции датчика используется цилиндрический магнит NdFeB, магнитная ось которого перпендикулярна переключателю (при этом не имеет значения, каким полюсом магнит направлен к переключателю). Коммутация происходит при перемещении магнита относительно магнитного центра переключателя – точки крепления ферромагнитной пластины к контактным площадкам на кремниевой пластине. Для обеспечения стабильной работы датчика, с целью устойчивого размыкания контактов, переключатель постоянно находится под воздействием магнита.

На рисунках 7-9 представлены различные варианты реализации конструкции датчиков перемещения на основе MEMS-коммутатора MS-1 (изменяются размеры магнита, зазор и расстояния коммутации).

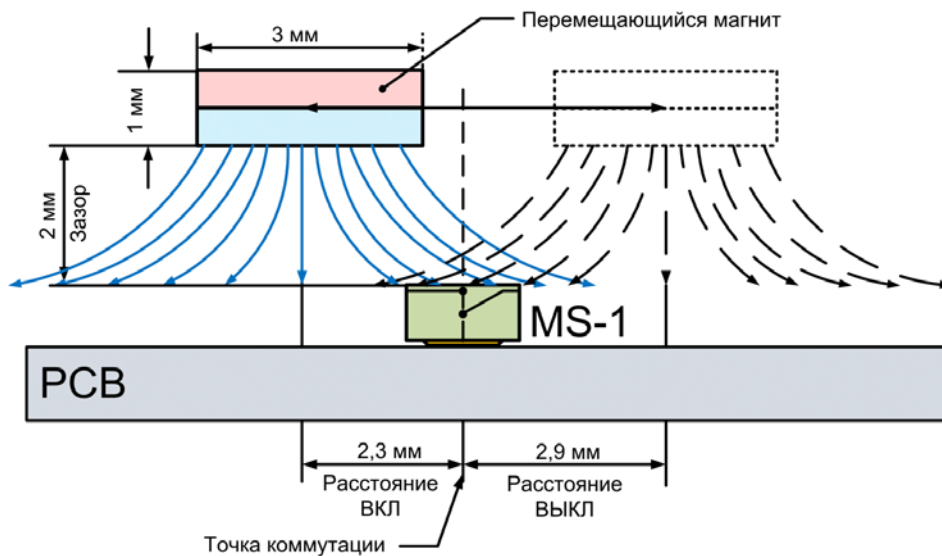


Рис. 7. Датчик с продольным перемещением магнита относительно плоскости MEMS-переключателя

Пример 2: Датчик с продольным перемещением магнита относительно плоскости MEMS – переключателя и дополнительным поляризационным магнитом (рис. 8).

Данная геометрия датчика применяется в случае, когда микропереключатель не всегда может оставаться под влиянием движущегося магнита (в случае продольного перемещения). В этом случае используется дополнительный поляризационный магнит, размещаемый под печатной платой, на которой расположен микропереключатель. Функция поляризационного магнита – обеспечивать устойчивое размыкание контакта.

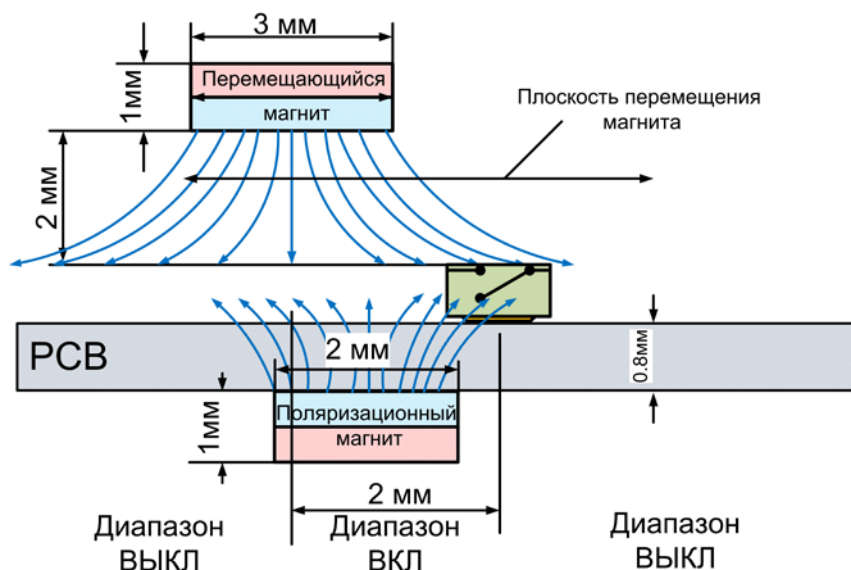


Рис. 8. Датчик с продольным перемещением магнита относительно плоскости печатной платы с расположенным MEMS-переключателем и дополнительным поляризационным магнитом

Вариант реализации геометрии датчика:

- перемещающийся магнит: материал – NdFeB, габариты – 3x1x1 мм, зазор – 2 мм.
- поляризационный магнит: материал – NdFeB, габариты – 2x2x1 мм, зазор – 0,8 мм (толщина печатной платы), расстояние вкл. – 2 мм, расстояние выкл. – не ограничено.

Пример 3: Датчик с перпендикулярным перемещением магнита относительно плоскости MEMS-переключателя (рис. 9).

Данная геометрия датчика применяется в случае, когда используется перпендикулярное (относительно плоскости датчика) перемещение магнита. Геометрия и топология элементов датчика во многом идентичны предыдущему случаю: также используется дополнительный поляризационный магнит, обеспечивающий устойчивое размыкание контакта.

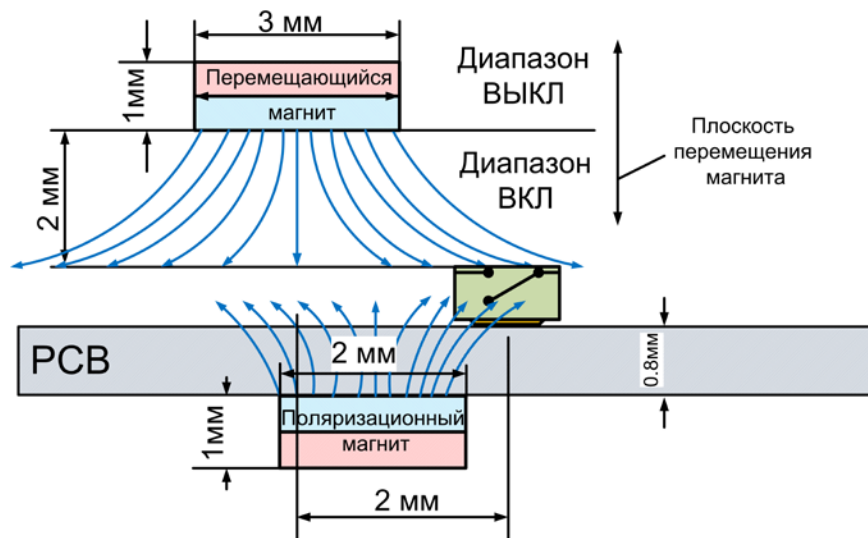


Рис. 9. Датчик с перпендикулярным перемещением магнита относительно плоскости MEMS-переключателя

Вариант реализации геометрии датчика:

- перемещающийся магнит: тип – NdFeB, габариты – 3x1x1 мм, расстояние вкл. – менее 2 мм, расстояние выкл. – не ограничено.
- поляризационный магнит: тип – NdFeB, габариты – 2x2x1 мм, зазор – 0,8 мм (толщина печатной платы).

Пример 4: Датчик скорости вращения и определения углового положения (рис. 10).

Конструктивно датчик представляет собой магнитное колесо с несколькими парами полюсов магнитов. На рис. 10, а схематично представлена конструкция датчика, включающего два микропереключателя и магнитное колесо из четырех пар магнитов. При вращении колеса происходит замыкание и размыкание контактов микропереключателей. Временная диаграмма состояния микропереключателей приведена на рис. 10, б. Видно, что в данном случае возможно не только измерение скорости вращения, но и определение углового положения колеса (в данном примере с точностью $\pm 11,25^\circ$).

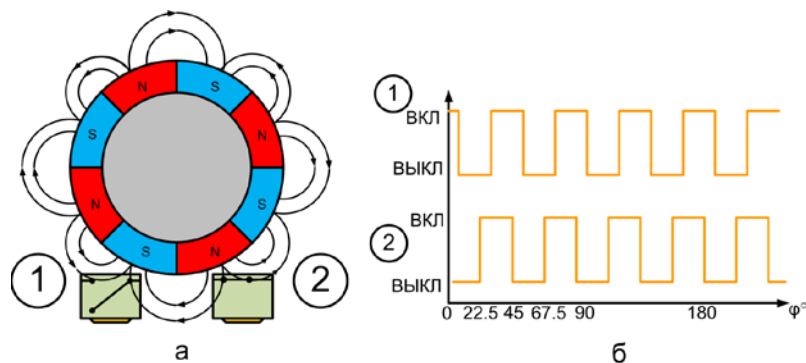


Рис. 10. Датчик скорости вращения и определения углового положения

Области применения микропереключателя MS1

Микропереключатель MS1 может быть использован в различных датчиках положения для авиа- и автомобилестроения, робототехники, систем автоматики, медицинской техники, бытовой техники, мобильных телефонов, нажимных кнопках и клавиатуре, системах охранной сигнализации.

Заключение

Представленные данные показывают, что магнитоуправляемый микропереключатель MS1, изготовленный на основе MEMS-технологии, является малогабаритным перспективным прибором для изготовления датчиков различного назначения. Он сочетает в себе преимущества герконов (не требует постоянного питания, обладает малым контактным сопротивлением) и датчиков Холла (малые габариты, высокая точность определения положения в датчиках перемещения) и вместе с тем, благодаря использованию MEMS-технологии, обладает размерами, меньшими, чем любой другой тип его функциональных аналогов. Использование MS1 особенно целесообразно в мобильных (портативных) устройствах, когда к массогабаритным характеристикам предъявляются повышенные требования. Малые габариты и особенности управления обеспечивают высокую точность позиционирования датчиков положения на основе MS1. Герметичный SMD-корпус прибора позволяет устанавливать прибор прямо на печатную плату, используя автоматизированные линии.

Литература

1. M. Vincent, L. Chiesi, J.C. Fourrier, A. Garnier, B. Grappe, C. Lapiere, C. Coutier, A. Samperio, and S. Paineau, "Electrical contact reliability in magnetic MEMS switch", in Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference, Orlando, October 27-29, 2008, pp. 145-150.
2. C. Coutier, L. Chiesi, A. Garnier, J.C. Fourrier, C. Lapiere, M. Trouillon, B. Grappe, M. Vincent, A. Samperio, S. Borel, C. Dieppedale, E. Lorent and H. Sibuet, "A New Magnetically Actuated Switch For Precise Position Detection", in Proceedings of the 15th International Conference Transducers 2009, Denver, June 21 - 25, 2009, pp. 861-864.
3. Springer Handbook of Nanotechnology. 2nd edition, by edition of Barat Bhushan. Springer Science+Business Media Inc. 2007. p. 1916.