BRUCE – ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕХАНИЗМ ВТЯГИВАНИЯ ШТИФТА

Majid Hihoud [(1)], Alexandre Pagès[(1)], Christophe Benoit[(1)], Frank Claeyssen[(1)], Stephanie Sanchez[(2)], Sylvain Trémolières[(2)], Philippe Guay[(2)]

[(1)] Cedrat Technologies S.A., 59 chemin du Vieux Chêne 38246 MEYLAN, FRANCE, Email:actuator@cedrat-tec.com

[(2)] CNES, 18 avenue Edouard Belin, BPI1715 31401 TOULOUSE CEDEX 9, FRANCE

ВВЕДЕНИЕ

Механизмы втягивания штифта используются для удержания, запирания или закрепления развертываемых или подвижных деталей космических аппаратов во время их запуска. Такие исполнительные механизмы «одного выстрела» обычно производились на основе зарядов взрывчатого вещества. Важными характеристиками механизма втягивания штифта являются: сила втягивания (которая должна быть достаточной, чтобы вытянуть штифт из фиксируемого механизма), максимально допустимая радиальная сила (которая ограничивает размер фиксируемой системы), а также габариты и вес. Возможность перезапуска для повторного использования механизма также является ценным преимуществом. По запросу Французского национального космического агентства (CNEC), компания CEDRAT TECHNOLOGIES (CTEC) разработала механизм втягивания штифта с электромагнитным управлением с возможностью восстановления исходного положения, который называется BRUCE (Broche Rétractable Utilisant une Commande Electromagnétique – Рис.1).

Рисунок 1. BRUCE

1. ВВЕДЕНИЕ

Существует растущая потребность в устройствах фиксации / закрепления, предназначенных для применения в космосе. Взрывобезопасные актуаторы на основе плавких проводов появились 30 лет назад. В 1999 году компания CEDRAT TECHNOLOGIES квалифицировала замковый механизм на основе сплава с памятью формы (Shape Memory Alloy - SMA), который был установлен на борту космического аппарата Rosetta [1]. Ранее SMA актуатор, на основе сплава с памятью формы, производства компании Tini Aerospace, использовался для разрыва запирающего стрежня. Несмотря на то, что эта технология была надежной, процесс разрыва стержня вызывал риск загрязнения, с которым пришлось иметь дело компании CEDRAT TECHNOLOGIES. Вопрос загрязнения имеет решающее значение, когда дело доходит до обеспечения защиты оптических систем или исследовательских инструментов. Другим недостатком многочисленных актуаторов на основе сплавов с памятью формы и актуаторов на основе плавких проводов является то, что они не могут быть перезапущены без замены сломанной части, хотя сейчас доступны восстанавливаемые вручную механизмы втягивания штифта на основе сплавов с памятью формы. Также были разработаны двупозиционные электромагнитные механизмы втягивания штифта, но они имеют более низкую производительность [2].

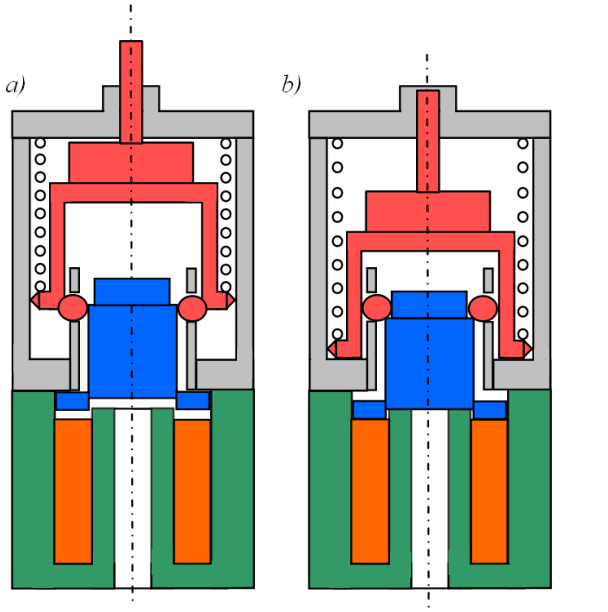
Компания CEDRAT TECHNOLOGIES и Французское национальное космическое агентство (CNES) провели совместную работу по разработке перезапускаемого вручную электромагнитного механизма выталкивания штифта. Выбор электромагнитного способа срабатывания делает механизм выталкивания штифта совместимым с командой PYRO и пригодным к применению на чувствительных к загрязнению системах. Кроме того, CEDRAT TECHNOLOGIES имеет значительный опыт в проектировании всех видов электромагнитных актуаторов [3]. Цель состояла в том, чтобы обеспечить более высокую производительность, чем эквивалентные механизмы вытягивания штифта на основе сплавов с памятью формы, при тех же габаритах. Кроме того, BRUCE был разработан в соответствии с правилами проектирования и требованиями по резервированию Европейской кооперации по стандартизации в области космической техники (ECSS) в отличие от актуаторов некоторых конкурентов.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ

BRUCE основан на двухступенчатой структуре, запатентованной [4] CNEC и CEDRAT TECHNOLOGIES (Рис. 2).

В первой ступени используется компактный актуатор с переменным магнитным сопротивлением, который разблокирует вторую ступень с шариковым механизмом. Этот механизм удерживает штифт в выдвинутом из корпуса состоянии и разблокирует его, когда электромагнитный привод включается. Штифт втягивается с помощью сжатия пружины. Связь между первой и второй ступенью осуществляется с помощью детали, называющейся триггером (спусковой механизм).

На Рис. 2 показана структура механизма втягивания штифта. Когда на электромагнитный актуатор подано напряжение, магнитное поле создается в первой ступени, что ведет к притягиванию спускового механизма (триггера). В результате триггер перемещается вниз и шары перемещаются к центру механизма: теперь вторая ступень разблокирована. Ведомый пружиной сжатия, штифт может свободно перемещаться вниз.



Первая ступень: Электромагнитный актуатор
Триггер (спусковой механизм)
Вторая ступень: Шариковый механизм

Рисунок 2. Упрощенная структура BRUCE:
a) Заблокированное состояние штифта
b) Разблокированное состояние штифта

Интерес к этой структуре заключается в том, что второй уровень позволяет снижать уровень требуемой приводящей силы: сила необходимая для разблокировки штифта в 8 раз меньше, чем сила втягивания штифта.

Механизм может быть вручную легко приведен в возведенное состояние через резьбовое отверстие M1.6 с помощью специального инструмента. Он также может быть возведен нажатием на штифт через отверстие в задней части механизма. В обоих случаях шары переведутся обратно в исходное положение блокировки.

Выбор материала позволяет работать в широком диапазоне температур: BRUCE можно использовать при температурах от -150 °C до 150 °C в вакууме или на воздухе.

Для того, чтобы обеспечить максимальную производительность, а также для соответствия с правилами проектирования ECSS, основные оптимизационные работы были проведены с электромагнитным актуатором и с контактным давлением между шарами и деталями механизма.

Давление:

Контакты между шарами и окружающими деталями были оптимизированы для того, чтобы уменьшить контактное давление. Действительно, шары удерживают штырь в заблокированном состоянии и поэтому принимают на себя потенциальную силу приводной пружины, которая составляет более 100Н. Контактные поверхности были оптимизированы в смысле оптимизации контактов сфера / сферы и сфера / цилиндр. Были произведены расчеты с использованием теории Герца, чтобы гарантировать проверку на соответствие граничным условиям ECSS с точки зрения механического напряжения.

Возможность обеспечения требуемой точности механической обработки является очень критичной, учитывая что чем ближе будут находится шары и другие части поверхности, тем ниже будет контактное давление. В результате снижения контактного давления ограничено точностью механической обработки – поставщикам комплектующих были заданы допуски до 5 мкм. Для заданного диаметра шаров, контактное давление определяет максимальную вытягивающую силу актуатора.

Изучение контактов между шарами и триггерами также привело к определению габаритов электромагнитного актуатора. Действительно, в спецификации ECSS требуются применение коэффициент безопасности 3 - на силы трения и 1,2 - на характеристики пружины. Очевидно, что чем выше сила втягивания, тем мощнее должен быть актуатор.

Актуатор:

Было исследовано несколько форм электромагнитных актуаторов на программном обеспечении Cedrat FLUX 10.4 для того, чтобы найти наиболее подходящую форму для реализации механизма втягивания штифта. Так как масса триггера должна быть как можно ниже, чтобы избежать несвоевременного втягивание штифта, то по сравнению с другими (рис. 3), была выбрана конфигурация с применением небольших подвижных частей (Рис. 4).

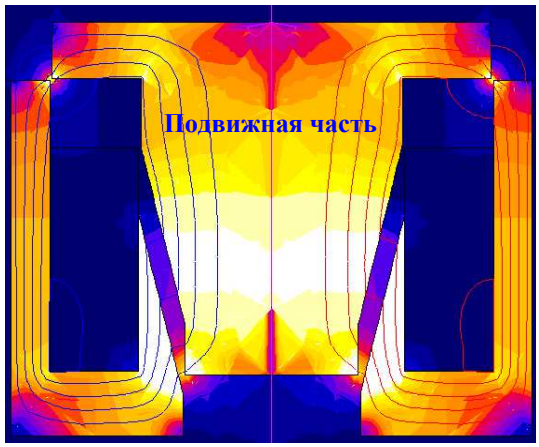


Рисунок 3. Пример формы Актуатора, который не был выбран: подвижная часть очень тяжелая для того, чтобы соответствовать приложению.

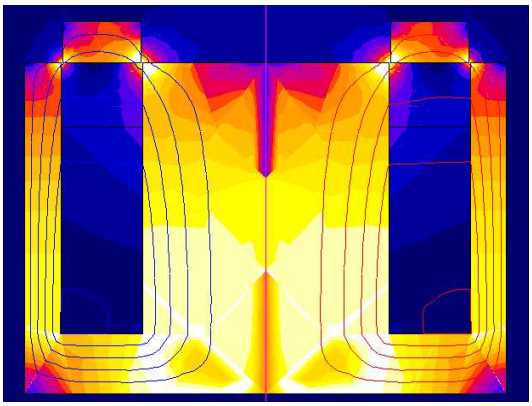


Рисунок 4. Форма Актуатора до оптимизации

После того, как была определена основная форма, актуатор был оптимизирован для:

- Обеспечения соответствующего Интерфейса с триггером
- Крепления к верхней части механизма
- Обеспечения достаточной приводной силой для выполнения критериев ECSS
- Обеспечения такого же или меньшего диаметра как и у конкурирующего механизма выталкивания штифта.

На FLUX 10.4 были проведены исследования для оценки влияния каждой модификации актуатора изменения на собственную кривую силы. Например, было установлено, что три отверстия M2 через внешнюю часть привода не должны были бы никакого влияния на производительность актуатора. Действительно, электромагнитное насыщение происходит во внутренней части привода, а не во внешней части (Рис. 5). Эти три отверстия используются для крепления актуатора винтами к корпусу механизма.

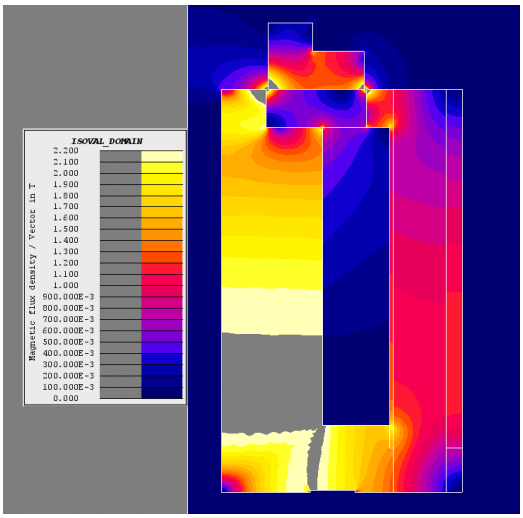


Рисунок 5. Моделирование, показывающее насыщение во внутренней части актуатора (показана половина секции)

Исходя из этого наблюдения, мы также изучили влияние среднего диаметра катушки на характеристики актуатора. Чем больше диаметр катушки, тем больше будет внутренняя часть актуатора, и тем меньше будет насыщенность. В результате при увеличении диаметра катушки, производительность должна возрастать.

Было обнаружено ожидаемое снижение насыщения (Рис. 6). Это исследование позволило нам на треть повысить силу, развиваемую актуатором (от 55 до 70 Н на максимуме).

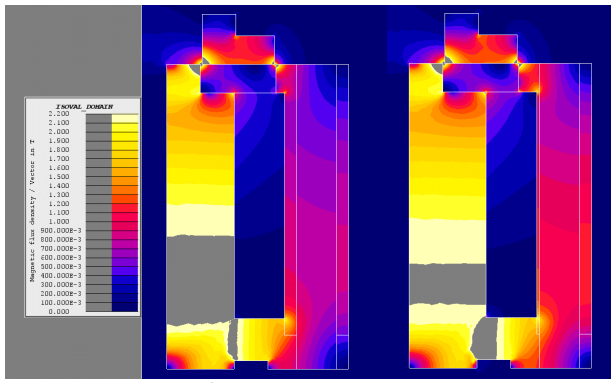


Рисунок 6. Рост насыщения при повышении среднего диаметра катушки

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ

BRUCE соответствует PYRO командам: 5A и 21 мс. Длительный импульс тока 21 мс используется для втягивания штифта. Приведение в действие занимает 5 мс, что в 4 раза короче, чем длительность импульса команды.

В следующей таблице (Рис. 7) резюмируются характеристики BRUCE по сравнению с эквивалентными вытягивающими штырями на основе сплавов с памятью формы (SMA).

	SMA Pin-puller 1	BRUCE	SMA Pin-puller 2	SMA Pin-puller 3
Габариты (мм)	L:31.75 ∅: 31.8	L:63.7 ∅: 31.8	L:50.8 ∅: 46	L: 70 ∅: 51
Вес (г)	28	125 *85**	74	130
Рабочая температура (°C)	-60/+70	-150/ +150	-60/+70	-60/+70
Ход (мм)	6.35	6.3	9.5	12.7
Сила втягивания (Н)	22.24	102 *150**	111	334
Максим. осевая нагрузка штифта (Н)	9	390 *1500**	45	112.5
Максим. радиальная нагрузка штифта (Н)	222	450 *600**	1110	2220

**без резерва, определенного ECSS*

Рисунок 7. Характеристики BRUCE по сравнению с эквивалентным SMA механизмами втягивания штифта на основе сплавов с памятью формы.

BRUCE достигает лучших характеристик по сравнению с эквивалентными SMA механизмами втягивания штифта на основе сплавов с памятью формы. Кроме того его структура позволяет использовать различные размеры электромагнитного актуатора с тем же механизмом. Это позволят адаптировать характеристики BRUCE к приложению за счет снижения веса или повышения производительности.

4. ИСПЫТАНИЯ

CEDRAT TECHNOLOGIES и CNES произвели интенсивные испытания инженерных моделей BRUCE EM (Engineering Models). Были успешно проведены функциональные испытания и испытания осевой/радиальной нагрузок. На BRUCE EM были проведены циклические испытания с нагрузкой и без нагрузки (Рис. 8).

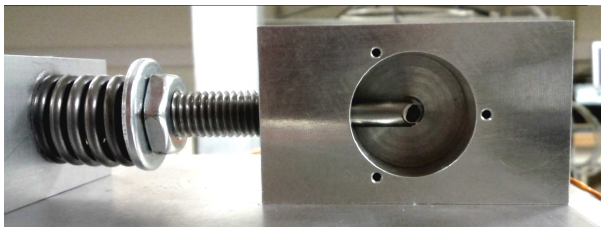


Рисунок 8. 450 Н радиальная нагрузка штифта

Записи испытаний подтвердили, что приведение в действие выполняется в течение первых 5 мс импульса тока (Рис. 9). Эти характеристики являются повторяющимися при более чем 100 циклах.

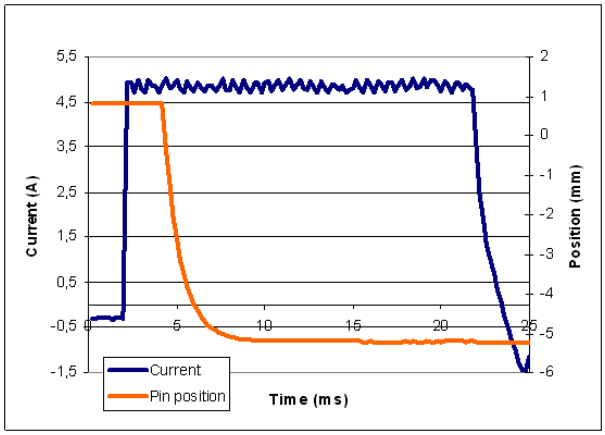


Рисунок 9. Запись уровня тока команды и положения штифта во время стандартного приведения в действие

Срабатывание в вакууме при термическом воздействии -150 °C и +150 °C также было успешным. Для завершения этой серии испытаний также были успешно выполнены десять срабатываний в вакууме при стандартной температуре окружающей среды и при радиальной нагрузке 100Н (Рис. 10).

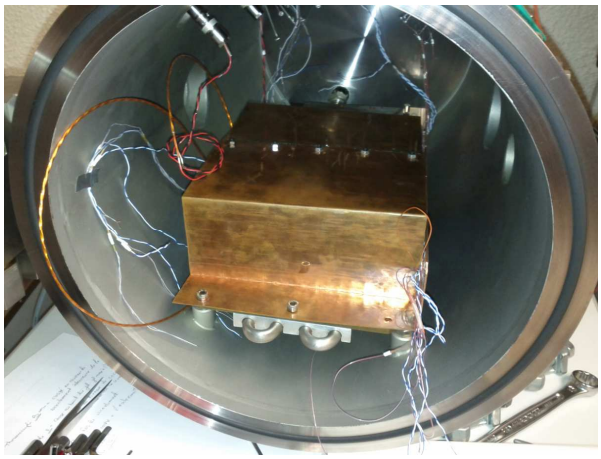


Рисунок 10. Настройка испытаний в вакууме

BRUCE EM подверглись вибрациям и ударным нагрузкам вдоль осевых и радиальных направлений (Рис. 11). Была выполнена экспертная оценка с целью выявления каких-либо признаков проскальзывания на деталях интерфейсов и никаких неисправностей не было обнаружено.

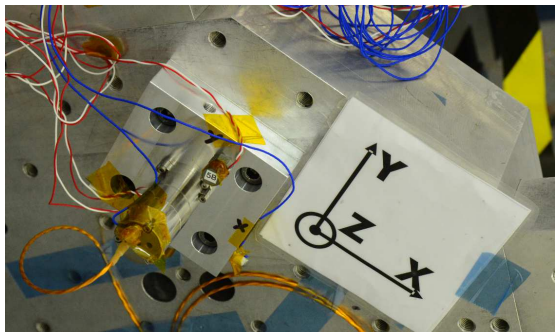


Рисунок 11. Колебания и уровни ударов

Уровни, которые были приложены, показаны на Рис. 12.

СИНУСОИДАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ	
Частота (Гц)	**Уровень (0-максимум)**
4-20	12,5 мм
20-100	20 g (2 октавы/мин)

СЛУЧАЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ – 30 gRMS* в течение 2 мин 30 сек		
Частота (Гц)	**PSD** (g^2/Гц)**	**Наклон (дБ/окт.)**
20	0.2	-
100	1	3.00
400	1	0.00
800		-3.00
2000	0.0428	-5.00

УДАРНЫЕ НАГРУЗКИ	
Частота (Гц)	**Уровень(g)**
100	20 g
100-1000	Linear log-log
1000-10000	1000 g

** gRMS - Среднеквадратичное значение псевдослучайных колебаний*
*** PSD - Спектральная плотность ускорения*
Рисунок 12. Уровни вибрационных и ударных нагрузок

Такая же инженерная модель (EM) была интегрирована в ВЧ антенну спутника TARANIS IME-HF (IME-HF - Instrument de Mesure du champ Electrique Haute Fréquence; TARANIS - Tool for the Analysis of RAdiations from lightNIng and Sprites), предназначенного для измерения излучений от молний, с целью проведения дополнительных вибрационных испытаний (Рис. 13). Здесь снова, BRUCE остался в запертом положении на протяжении всей кампании, несмотря на усиление возбуждения системы. После процесса возбуждения, приведения в действие было выполнено успешно.

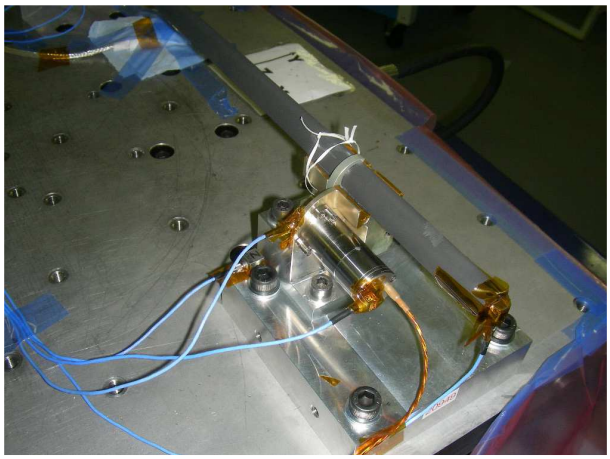


Рисунок 13. BRUCE интегрирован с IME-HF антенной для вибрационных испытаний

И, наконец, была выполнена последняя серия испытаний с использованием статистического программного обеспечения.

- Первая серия включений была произведена с различными токами команд, на уровне ниже 5А при фиксированной длительности импульса тока 20мс. Успех или не успех каждого включения позволяет получить кривую Гаусса, гарантируя, что все срабатывания будут успешными с командой тока 5А. Также было исследование влияние радиальной нагрузки на кривую Гаусса.

- Вторая серия включений была сделана с помощью того же принципа, но при уменьшенной длительности импульсов 20мс, текущее значение тока было зафиксировано на уровне 5А. При этом вновь было статистически показано, что все срабатывания будут успешными (Рис. 14).

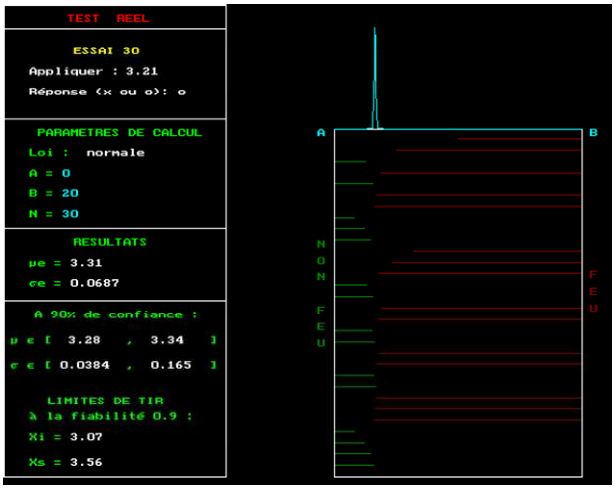


Рисунок 14. Снимок экрана, показывающий, что все срабатывания будут эффективными для импульса тока продолжительностью 3,5 мс

В конце этих испытаний, два BRUCE EM выполнили около 100 циклов каждый. Один из них был разобран и проверен на предмет повреждений. Также был проведен химический анализ интерфейсов трения, который продемонстрировал стандартные трибологические характеристики.

Небольшие изменения были сделаны на нефункциональных интерфейсных модулей для замены процесса спекания процессом лазерной сварки. Причина заключается в том, что CEDRAT TECHNOLOGIES обладает большим опытом применения лазерной сварки и этот процесс рассматривается как более надежный. Полная квалификация, в том числе испытания на ЭМС ожидаются в начале 2014 г. На данный момент CEDRAT TECHNOLOGIES производит квалификационные и летные модели.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье описан электромагнитный механизм втягивания штока BRUCE, который был разработан полностью в соответствии с требованиями Европейской кооперации по стандартизации в области космической техники (ECSS). Этот привод является полностью логически последовательной альтернативой системам на основе сплавов с памятью формы SMA и обеспечивает лучшие характеристики, подобные габариты, и является простым в использовании. Двухступенчатая конструкция действительно оптимизирована для обеспечения максимально возможных характеристик в заданном объеме.

Компания CEDRAT TECHNOLOGIES поблагодарит Французское национальное космическое агентство (CTEC) за это плодотворное сотрудничество.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Le Letty, F. Barillot, N. Lhermet, F. Claeyssen , M. Yorck, J. Gavira Izquierdo, H. Arends model, The scanning mechanism for ROSETTA / MIDAS from an engineering model to the flight – 9th ESMATS

2. Th. Roschke, "Miniaturised Bipolar Electromagnetic Actuators for space applications", Actuator 2002, P73, pp. 664 – 667

3. F. Bloch, Nicolas Lhermet, P. Meneroud, F.Claeyssen, "Space compliant moving coil actuator ", Proc. ACTUATOR 2004, P73, pp.661 – 664

4. Brevet n°11/01093 du 08 avril 2011 : “Système de verrouillage/déverrouillage électromagnétique réarmable »

Контактные данные:

ООО "Промышленная метрология"
http://metrology-spb.ru/
тел. +7 (812) 438-17-18 (доб. 115)
факс +7 (812) 438-17-21
моб: +7 (950) 023-73-89
e-mail: karev_p@metrology-spb.ru