Управляемый актуатор с подвижным штоком: Характеристики в петле с закрытой обратной связью

P. Menéroud[1], T. Porchez[1], J. Muñoa[2], S. Rowe[1], A. Pagès[1], C. Benoit[1], C. Belly[1]
[1]CEDRAT TECHNOLOGIES, Meylan Cedex, Франция
[2]Ideko, Elgoibar, Испания

Аннотация:

Управляемый магнитный актуатор со штоком из железа MICA (английский термин «Moving Iron Controllable Actuator») является Актуатором с высокими показателями по управлению. Он обладает надежной подвижной частью с упругой направляющей для обеспечения длительного срока службы. В данной статье представлены характеристики MICA при работе в замкнутом контуре, что привело к впечатляющим результатам, достигнутым Испанским Технологическим Центром IDEKO на фрезерном станке производства компании SORALUCE.

Ключевые слова: Магнитный Линейный Актуатор Динамический Управляемый Закрытая Петля

Введение

В данной статье представлен Управляемый магнитный актуатор со штоком из железа MICA (рис. 1) [1] и его характеристики в операциях с закрытой петлей обратной связи. MICA является электромагнитным приводом с высокой плотностью силы, с малой массой движущейся части и с возможностью изменять направление действия силы при инвертировании тока. Основные технологические аспекты выбирались исходя из получения полностью управляемого актуатора. Направляющая изготовлена из пластины и тем самым избегается появление трения, что могло бы быть причиной появления гистерезиса. Конструкция рассчитана на большое количество циклов, поэтому актуатор может быть использован в замкнутой системе управления с большой пропускной способностью. Далее в статье приводятся характеристики актуатора, используемого в замкнутом контуре со стандартным ПИД (сокращение от «Пропорционально-интегрально-дифференцирующий») управлением. Приведенные результаты описывают реакцию на команду шага, передаточную функцию системы в открытой и замкнутой петеле и улучшение качества фрезерования в эффективном промышленном применении.

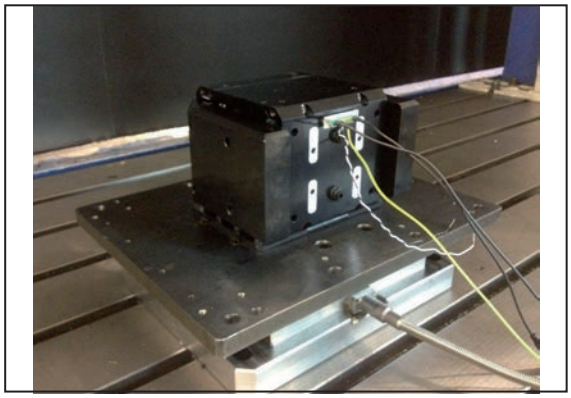

***Рис. 1: Испытание Актуатора** MICA*

Задачи для применения MICA

Целевыми областями применения актуаторов MICA являются такие, которые требуют компактных габаритов и динамичных режимов работы при высокой точности. Критерий компактности оценивается высоким коэффициентом отношения силы к массе [2]. Динамическое использование требует высокого коэффициента отношения силы к перемещаемой массе для того, чтобы обеспечивать достаточную реакцию хода на большой полосе частот. Точность требуется для обеспечения точного позиционирования или эффективного управления амплитудой и фазой колебаний. Точность обычно достигается за счет замкнутой системы управления. Когда полоса частот в области применения является большой, то в системе управления с обратной связью требуется применение высоко динамичного устройства.

Еще один важный аспект для MICA – это надежность. Он важен так как требуется иметь возможность противостоять огромному количеству циклов срабатывания, а также возможным ударным нагрузкам подвижной части в конечных точках. На подвижной части удалось избежать применения катушки, так как любые проволочные катушки связанные с неподвижной частью могут быть причиной отказа при длительных колебаниях. Также удалось избежать применения магнитов, которые, как известно, являются хрупкими. Поэтому во время неизбежных ударных воздействий на актуатор не ожидается никаких поломок. Таким образом, активная подвижная часть выполнена из железа, которое не подвержено указанным выше недостаткам. Также направляющая изготовлена из гибкой пластины для обеспечения движения без трения. Отсутствие трения означает во-первых низкие потери, во-вторых - высокую производительность, а также обозначает отсутствие необходимости обслуживания направляющих используемых деталей.

Характеристики MICA в открытой петле

Электромагниты, которые перемещают железные штоки магнитных актуаторов, являются трудно управляемыми вследствие изменения силы в зависимости от воздушного зазора, и, как правило магнитная часть выходит за габариты для компенсации силы пружины [3] [4]. MICA представляет собой магнитный актуатор с подвижной частью сделанной только из железа, в которой воздушный зазор имеет определенную форму для генерации двунаправленной силы ± 500 Н в соответствии с текущим знаком.

Номинальные характеристики MICA 500L выглядят следующим образом: Сила $F_н$ = 500 Н, ход $S_н$ = 10 мм, напряжение $B_н$ = 500В, ток $I_н$ = 20А. Сила 500 Н достигается при номинальном токе и коэффициент силы MICA 500L обладает значением Ki = 25 Н/А.

Жесткость направляющей пластины составляет 15,5 Н/мм. Пластина фиксирует шток в центре шкалы хода при выключенном питании (± 5 мм).

MICA достигает конечной точки хода для джоулева рассеивания мощности (тепловое рассеивание на катушке) величиной только 5,8 Вт, при отношении запаса по току и номинального тока равном более, чем 6.

По этому критерию электромагнитный актуатор заметно отличаться от пьезоактуаторов, для которых доступная сила теряются при полном ходе.

Сопротивление катушки R = 0,6 Ω и L = 40 мГн. Электрическая постоянная времени 67 мс. При заблокированной подвижной части актуатора, номинальный ток и сила может быть обеспечена на частоте до 100 Гц. Также существует способность обеспечивать 100 Н при 450 Гц. Когда актуатор не заблокирован, то на эти результаты влияет скорость актуатора и наличие механических усиливающихся резонансов.

Подвижная масса в испытываемом MICA 500L составляет 0,71 кг. Собственный механический резонанс актуатора составляет 23,5 Гц. Ускорение без нагрузки достигает 70g и до 20g при массе нагрузки 1,8 кг.

Большая сила позволяет перемещать нагрузку массой до 2 кг при ходе 1мм на частоте 100 Гц (рис. 2), например.

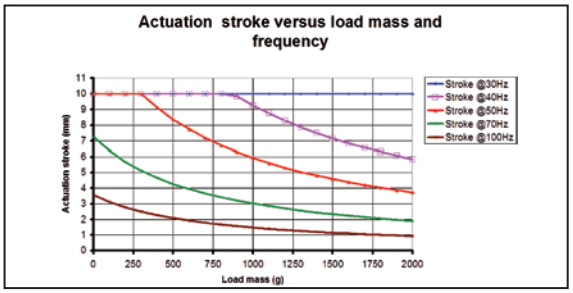

Fig. 2: *достижимый ход MICA 500L в зависимости от массы нагрузки и частоты при возбуждении переменным током*

Управление в закрытой петле

Управляющий контур был создан на испытательном стенде для оценки производительности MICA 500L в замкнутой системе управления.
Для актуатора был выбран блок питания и управления ELMO TUBA 20230 (20A/200V). Это устройство обеспечивает питание актуатора переменным током и обладает цифровым управлением. Такое устройство не является дорогим. Позиция задается датчиком положения, установленным в MICA. Он состоит из классической системы с датчиком холла и магнитной линейки, закрепленной на подвижной части. Управление замкнутым контуром обеспечивается электронной платой UC45 с ее программным обеспечением HDPM 45, которое позволяет произвести настройку ПИД регулятора.
Поправочные коэффициенты, используемый ПИД регулятором P = 1,6, I = 35, D = 0,06. Требуется отметить, что эти коэффициенты ПИД регулятора были установлены для оценки управляемости MICA, но не были оптимизированы.

Время отклика на команду шага в закрытой петле

Первый тип динамического актуатора используется для достижения заданной позиции в течение короткого промежутка времени. В этом случае команда определяет шаг от текущей позиции к требуемой позиции. Была произведена регистрирация откликов актуатора MICA500L, управляемого ПИД регулятором. Время отклика на 95% команд находится в пределах 14,2 мс ***(Рис.3).***

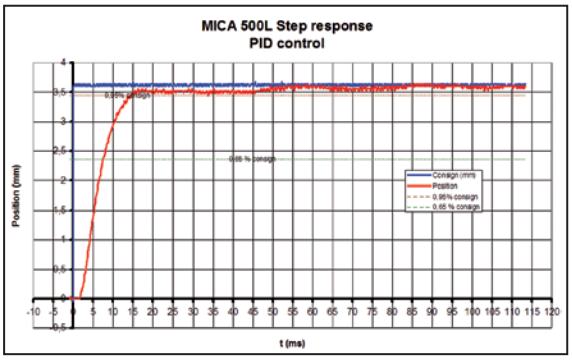

Рис. 3: *прототип MICA V1*

MICA 500L может эффективно управляется в стандартном замкнутом контуре и демонстрировать очень короткое время отклика благодаря его соотношению высокой силы к перемещаемой массе.

Времая отклика на АС команду в закрытой петле

Второй тип динамического актуатора используется для отслеживания сигнала. Наблюдение за сигналом полезно для точного позиционирования, для генерирования сигнала, генерации вибраций или для подавления шумов. На разных частотах была измерена способность отслеживания для сигнала переменного тока.

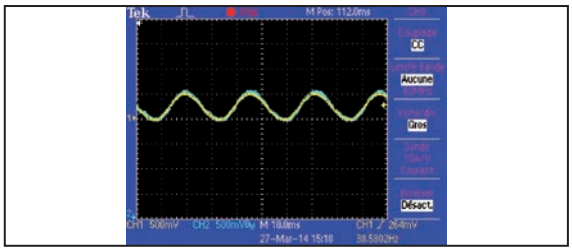

Рис. 4: *отслеживание сигнала переменного тока на частоте 40 Гц*

На предыдущем рисунке показано отслеживание положения на частоте 40 Гц. Были зарегистрированы фаза и амплитуда сигнала слеживания и на **(рис.4)** представлена логарифмическая частотная характеристика.

Несмотря на существование механической резонансной частоты 23,5 Гц, простой ПИД регулятор позволяет производить подавление резонансного пика для сохранения требуемой амплитуды на частотах до 100 Гц и осуществлять эффективное наблюдение за фазой на частотах до 40 Гц **(рис.5)**.

Стоит сравнить характеристики логарифмической частотной диаграммы замкнутого контура с характеристиками открытого контура. При управлении в разомкнутом контуре амплитуда остается эквивалентной требуемой амплитудой в диапазоне частот всего лишь до 10 Гц, а фаза смещается к противоположной фазе на резонансной частоте (23,5 Гц) и выше **(рис. 5)**.

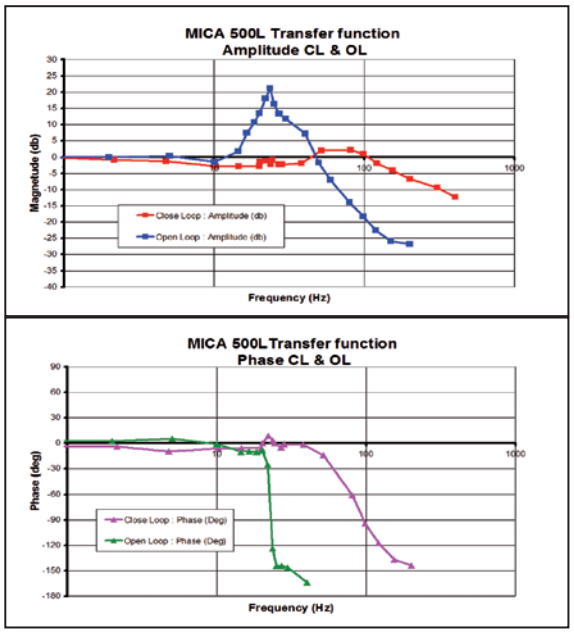

Рис. 5: *Сравнение открытой и закрытой петли*

Модель актуатора

Характеристики MICA 500L были реализованы в графической среде имитационного моделирования Simulink и передаточная функция в открытой петле была смоделирована. Данные для модели Simulink были приведены на стр. 1-2. Было проведено сравнение с данными измерений.

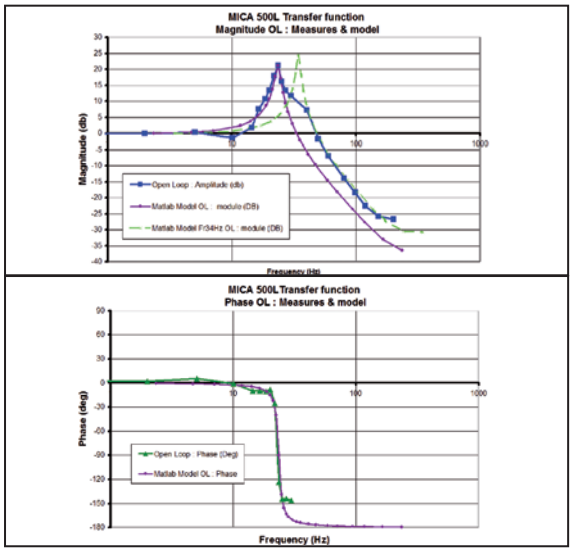

Рис. 6: *FT: открытая петля и модели*

При том что модель Simulink вписывается в начальное измерение передаточной функции, измеренные данные показывают увеличенный пик, как если бы произошла смена резонансной частоты на 34 Гц (**рис. 6**). В действительности же жесткость актуатора обладает некоторой нелинейностью в зависимости от хода. Из-за дополнительной магнитной жесткости она больше, когда привод находится рядом с нулевой позиции.

Учитывая ход 1мм, жесткость направляющей пластины увеличена до 33,3Н/мм, что соответствует резонансной частоте 34,5 Гц. Амплитуда является важным значением при описании разомкнутой системы на частоте близкой к резонансной. Тем не менее, при уходе от резонанса фактически измеренная амплитуда составляет 1,2 мм в связи с ограничением команды во время измерения.

При резонансе соотношение между механической реактивной мощностью и рассеиваемой мощностью обеспечивает добротность устройства 11,6. Отсутствие редукции трения вытекает из применения листовой направляющей, что позволяет использовать актуатор при резонансе, когда оотношение хода при переменном токе к рассеиваемой мощности является важным критерием для применения. Следует заметить, что добротность была получена отношением реактивной мощности к активной мощности в имитационной модели. Механический коэффициент рассеяния был настроен для измерений при величине 9 Н/(м/с). Тем не менее ожидается, что большая часть механической энергии будет рассеиваться при вибрации стола испытательного стенда, который значительно вибрирует от воздействия мощного MICA 500L. Таким образом, ожидается что добротность самого MICA будет выше.
При резонансе (**рис. 7**) полный ход 10 мм достигается при пиковом токе величиной только 0,27 А, что соответствует потерям на джоулево тепло в катушке только 22 мВт. Полезный электрический выход в этом случае более 99%.

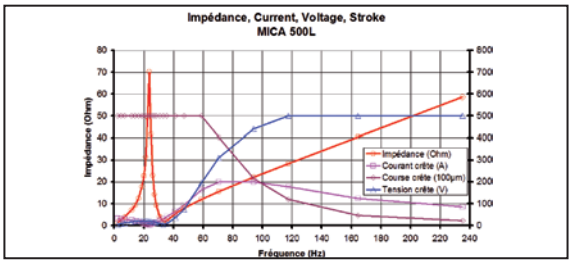

Рис. 7: *Собственное полное сопротивление MICA*

Характеристики MICA с подвижной массой

С учетом особенностей нагрузки (масса, жесткость и рассеивание) может быть интересно добавить жесткости с дополнительными пружинами. Это позволит MICA работать с полным ходом при переменном напряжении с очень малым рассеиванием. Предыдущий график показывает зависимость полного сопротивления от частоты, а также достижимый ход с учетом ограничений тока и напряжения.

Рассматривается пример нагрузки массой 0,4 кг, которая требует движения с частотой 100 Гц для хода 4 мм от пика до пика (**рис. 8**). Моделирование позволяет оценить ход и ограничение MICA 500L для жесткости настроенной на резонанс 100 Гц с дополнительной жесткостью. При этом рассеиваемая тепловая мощность на катушке при резонансе снова остается очень низкой и оценивается величиной 244 мВт.

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

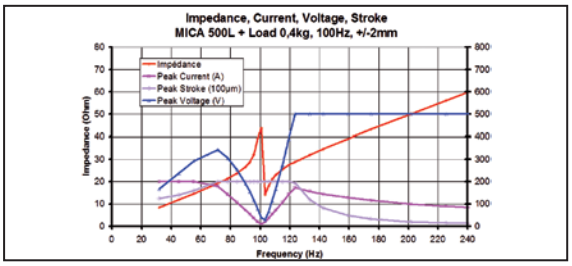

Рис. 8: *Изменение полного сопротивления MICA при изменении нагрузки*

Применение на фрезерных станках

Первый пример применения MICA для устройства гашения вибрации, реализуемого IDEKO в фрезерном станке SORALUCE **(рис. 9)**. В дополнение к возможности управляемости на большой полосе частот, данное применение требует высокого отношения силы к массе. При этом актуатор должен быть полностью интегрирован во фрезерный станок.

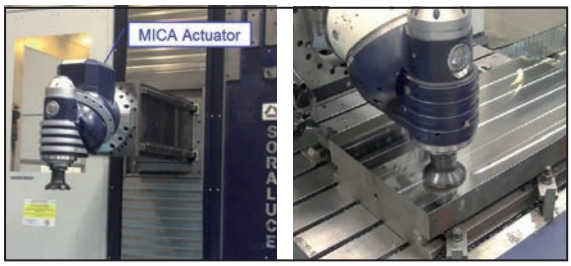

Рис. 9: *MICA установлен на фрезерном станке.*

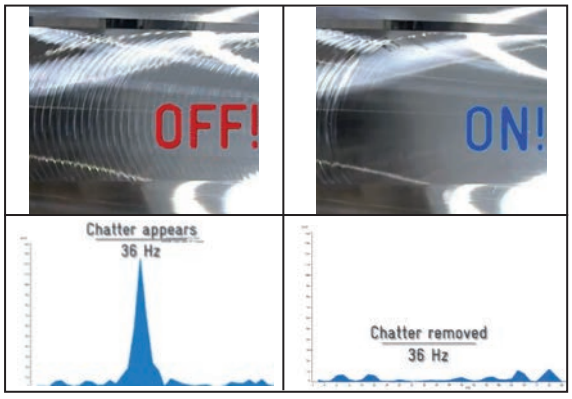

Рис. 10: *Усовершенствование процесса фрезерования с MICA*

Механообрабатывающий станок SORALUCE фрезерует заготовки из стали и качество поверхности зависит от отсутствия вибрации во время операций [5]. Механический станок устанавливается на руку программируемого робота. Существует большая заинтересованность в легком демпферующем устройстве с малым размером, так как оно монтируется на руку робота. Однако силы, генерируемые демпфирующим устройством, имеют первостепенное значение для характеристик станка. Приведенная спектральная зависимость и фотографии показывают разницу качества фрезерования при использовании и без использования MICA в качестве демпферующего устройства (рис. 10).

Резонанс фрезерного инструмента при 36 Гц подавляется и заметно улучшается качество поверхности обрабатываемой детали [6].

Заключение

В данной статье представлены характеристики актуатора MICA при использовании в замкнутой системе управления. В первую очередь идет обращение к основным технологиям и характеристикам, которые делают MICA идеальным для работы в замкнутом контуре. Приведены основные электромеханические характеристики MICA в открытом контуре. Далее проводятся испытания MICA в закрытом контуре с ПИД регулятором. Они показывает время отклика 14,2 с на шаговую команду и хорошее отслеживание для сигнала переменного тока на частоте до 40 Гц. Далее приводится ответ полного перемещения в замкнутом контуре и измерения, демонстрирующие, что полный ход 10мм достигается при частотах до 100 Гц с подвижной массой 710г. В последствии MICA был интегрирован во фрезерный станок в качестве демпфирующего устройства, что значительно улучшило качество фрезерования.

Подтверждение

Исследование, которое привело к этим результатам было выполнено в рамках проекта DynExperts FP7 "Фабрики будущего", Номер Гранта 260073.

Ссылки

[1] F. Claeyssen, G. Magnac, O. Sosnicki, "Moving Iron Controllable actuator", ACTUATOR 2008, 9-11 June 2008, C3.3, pp. 445 – 448

[2] P. Meneroud, C. Benoit, T. Porchez, F. Claeyssen, "MICA Actuator: Highly dynamic controllable ", Proc. ACTUATOR 2012, 13th international conference on new actuators, 18-20 June 2012, P33,

[3] So-Nam Yun, Young-bog Ham, Jung-Ho Park, Il-young Lee, "New approach to design Control cone for electromagnetic Proportional Solenoid actuator", ACTUATOR 2010, 14-16 June 2010, P32, pp. 693 – 697

[4] D. Wiedermann, U. Koch, H. Ulbrich, "Linear reluctance actuator for controlled vibration excitation", ACTUATOR 2010, 14-16 June 2010, C3.4, pp. 501 – 504

[5] Z. Dombovari, J. Munoa, G. Stephan, “General Milling Stability Model for cylindical Tools”, 3rd CIRP Conference on Process Machine Interaction, Procedia CIRP 4, 2012, pp 90-97.

[6] J. Muñoa, I. Mansisidor, N. Loix, L.G. Uriarte, R.Barcene, M. Zatarain, “Chatter suppression in ram type travelling column milling machines using a biaxial inertial actuator”, CIRP annals – Manufactory technology, Vol62/1, pp407-410, 2013.

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