

# ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМИ МЭМС-АКТЮАТОРАМИ

*Луис Кастанер, В. Джиминес, М. Домингес, Дж. Понс, С. Бермейо*

GDS, Каталонский политехнический университет, Испания

## Аннотация

Рассмотрено эффективное управление электростатическими актюаторами при различных режимах контроля заряда. Для улучшения энергетических показателей, а также соотношения между механическими и электрическими компонентами энергии (при обычном управлении по напряжению), предложены несколько способов управления «по заряду»; отмечены их преимущества, такие как малое энергопотребление, низкие значения кинетической энергии и «мягкая» динамика. В качестве возможной реализации рассмотрен новый драйвер с оптронной развязкой.

## Теоретические соображения

В связи с приходом МЭМС-технологий во множество областей, таких как РЧ, устройства индикации, датчики и т.п., появились исследования, связанные с их условиями эксплуатации, надежностью, управляемостью и чувствительностью. Важным классом МЭМС-устройств являются приборы на базе электростатических актюаторов, которые преобразуют электрическое поле в перемещение подвижных частей. Создаваемое перемещение может быть использовано для позиционирования какого-либо элемента прибора, например мембраны в устройствах оптического разделения каналов, что требуется для изменения длины волны излучения («аналоговое» применение) [1], или же для замыкания ключа, что может быть необходимо в РЧ-МЭМС для замыкания линии передачи сигнала («цифровое» применение) [2]. Помимо требований, диктуемых конкретным применением прибора, часто требуется обеспечить низкое энергопотребление и большой срок службы. Как следствие, применяемые способы актюации или коммутации также приобретают большое значение.

Наиболее типичным рабочим режимом электростатических МЭМС-актюаторов является непосредственное приложение достаточного по величине напряжения на управляющие выводы прибора. Несмотря на то, что это наиболее простой способ управления, он имеет два основных недостатка. Первый из них – это хорошо известная «нестабильность на втягивание», имеющая место при перемещении подвижного элемента на  $1/3$  начального зазора между обкладками, что резко снижает величину контролируемого перемещения. Второй – необходимость в большом количестве энергии от источника питания при максимальных перемещениях. При этом значительная часть набранной кинетической энергии теряется в момент удара подвижной части об ограничитель или подложку [3]. В данной работе рассматриваются проблемы управления актюаторами в цифровых приложениях.

Для начала, сравним два основных способа управления актюаторами: (а) традиционное управление напряжением с непосредственной подачей такового (V-управление) на обкладки с площадью  $A$ , и (б) метод идеального заряда, состоящий в передаче обкладкам определенного количества заряда (Q-управление), например с помощью источника тока. В первом случае, сила определяется уравнением 1 (а), а во втором – уравнением (б).

$$F = \frac{\varepsilon A V^2}{2g^2} \quad (1.a)$$

$$F = \frac{Q^2}{2\varepsilon A} \quad (1.b)$$

Как можно видеть, в (1,а) сила возрастает при уменьшении остаточного зазора и стремится к бесконечности при его смыкании. В реальных приборах максимальная емкость ограничена определенной величиной  $C_f$ , и полный заряд, передаваемый источником составляет  $Q=C_fV$ . Заряд, необходимый для втягивания актюатора имеет величину  $Q_{PI}=3/2C_0V_{PI}$ . Отсюда избыточный заряд, получаемый системой, можно выразить отношением:

$$\frac{Q}{Q_{PI}} = \frac{2C_fV}{3C_0V_{PI}} \quad (2)$$

Это отношение обычно велико, поскольку отношение начальной емкости к конечной в РЧ-приборах должно быть большим, а приложенное напряжение должно превышать напряжение втягивания для обеспечения быстрого срабатывания. Напротив, в случае (б) только имеет значение лишь количество заряда, из чего следует, что отношение (2) станет значительно меньше. Детальный анализ переходных процессов показывает, что избыточный заряд в случае (а) приводит к значительному увеличению потребляемой энергии по сравнению с (б), и значительное количество этой энергии переходит в кинетическую энергию. На рис.1 показано сравнение полных энергий и некоторых их компонентов при одинаковой скорости переходного процесса (напр. одинаковом времени втягивания). Приведенные результаты были получены путем Spice-моделирования одномерного пластинчатого актюатора.

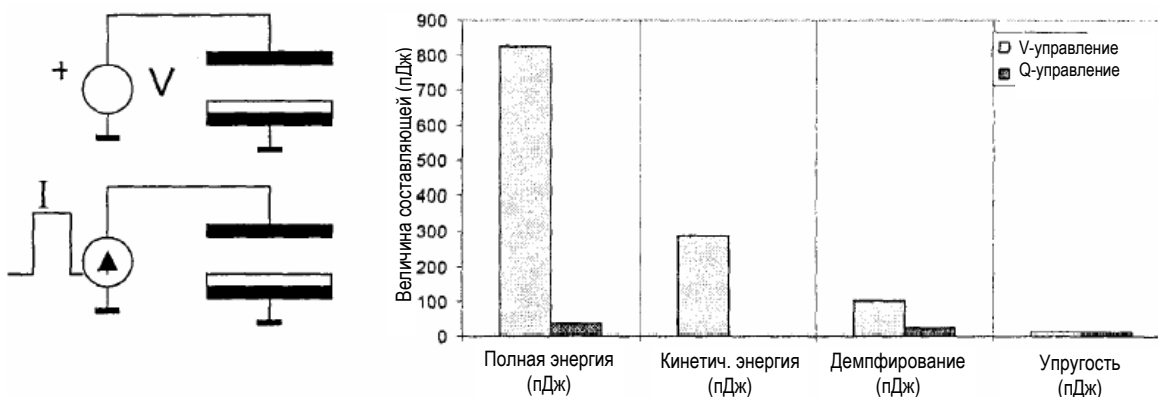


Рис.1. Доли основных составляющих энергии во время переходного процесса при втягивании: (а) – при V-управлении, (б) – при Q-управлении. Время втягивания одинаково. Данные для модели взяты из [3]

Как можно видеть из рис.1, полная затрачиваемая энергия, кинетическая энергия и составляющие демпфирования значительно снижаются; кинетическая энергия при Q-управлении становится едва различима. Как описано в [4], одним из основных недостатков Q-управления является то, что максимально напряжение во время переходного процесса оказывается больше, чем при V-управлении, что не всегда допускает источник. Это имеет последствия для конструкции управляющей цепи. При этом, однако, остаточное напряжение ( $V_{hold}$ )<sup>1</sup> в конце переходного процесса, оказывается намного меньше:

$$V_{hold} = \frac{Q}{C_f} \quad (3)$$

Как следствие напряжение должно быть достаточным для удержания прибора в сработавшем («втянутом») состоянии; кроме того, напряженность поля в диэлектрике снижается, что позволяет говорить о возможном повышении надежности.

Полученные результаты имеют большое значение для устройств с ограниченной мощностью источника и большим количеством рассматриваемых приборов. Для РЧ-

<sup>1</sup> Напряжение удержания. – прим. перев.

применений это не очень актуально, поскольку большое количество приборов в одном устройстве используется редко. Тем не менее и здесь можно говорить о влиянии на надежность системы. С одной стороны, значительная кинетическая энергия в момент удара о диэлектрик может приводить к повреждениям его поверхности, способным быть ловушками для заряда [5]. С другой стороны, при нахождении прибора в «сработавшем» положении диэлектрик должен выдерживать воздействие мощных электрических полей при V-управлении. При Q-управлении эти поля уменьшаются. Поля с большой напряженностью, воздействуя на диэлектрик, приводят к его заряду, что влечет за собой сдвиг кулон-вольтных характеристик и в конечном итоге снижение надежности. Имеются данные, что есть экспоненциальная зависимость между приложенным напряжением и сроком службы приборов [6]. Это является основным доводом в пользу использования различных форм управляющего напряжения – либо биполярных, либо со сниженным напряжением удержания.

### Альтернативные способы управления

В числе различных способов Q-управления в публикациях упоминались импульсный источник тока на базе специализированных ИС [7], резонансные цепи с индуктивностями [8] и схемы с последовательными конденсаторами [9]. Использование источников тока имеет два основных недостатка: токи утечки могут приводить к необходимости «циклов обновления» [9] и повышенной податливостью по напряжению (voltage compliance) [4]. Здесь мы проведем анализ других методик с использованием источников напряжения. Сначала рассмотрим две методики, показанные на рис.2.

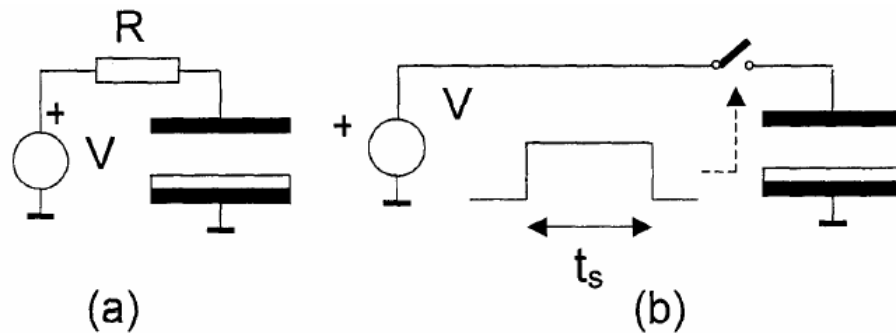


Рис.2. VR-управление (a), SR-управление (b)

Первая методика, VR-управление, состоит во введении большого сопротивления R последовательно с источником напряжения для превращения избытка энергии (переходящего в кинетическую энергию) в тепловые потери резистора. Потери в резисторе во время основной части переходного процесса невелики, за исключением момента втягивания. При этом ток ограничен небольшим значением. Были использованы резисторы с сопротивлением в мегаомном диапазоне [3]. Данная технология не снижает общего энергопотребления, но ее преимуществом является ограничение импульса энергии, воздействующего на нижнюю обкладку.

Вторая методика, управление с коммутацией напряжения (SV-управление), заключается в управлении ключом, включенном последовательно источником напряжения. Замкнутое состояние выдерживается в течении времени  $t_s$ , которое задается несколько меньшим, чем время втягивания. Большая часть переходного процесс проходит при замкнутом состоянии ключа, который размыкается непосредственно перед втягиванием. В результате становится возможным контролировать величину передаваемого заряда путем соответствующего управления ключом. Основным недостатком метода является то, что генерация соответствующих задержек возлагается на управляющую схему.

Основные характеристики SV-метода приведены на рис. (а), где можно видеть, что небольшое уменьшение длины импульса приводит к снижению как потребляемой энергии, так и кинетической. Это также приводит к небольшому увеличению времени втягивания и значительному снижению напряжения удержания.

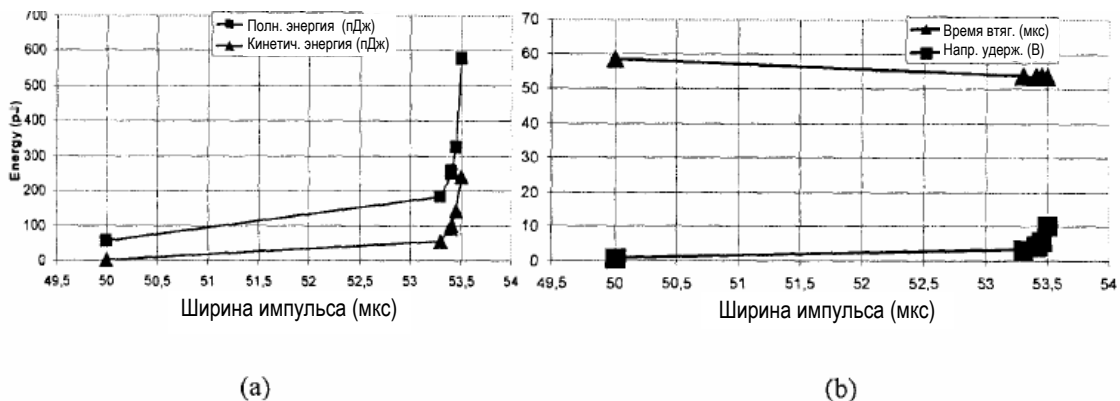


Рис.3. (а) Полная и кинетическая энергии в момент удара в SV-режиме при 15 В, (б) – время втягивания и напряжение удержания

Понимание динамики электростатических актюаторов, полученное благодаря изучению описанных способов управления, наводит на мысль об источнике, сочетающем положительные качества обоих способов. Один из подобных источников будет иметь идеальную характеристику  $I(V)$ , близкую к источнику тока с ограничением по выходному напряжению. Этого можно достичь с «квадратной» характеристикой  $I(V)$ , показанной пунктиром на рис.4, где схематически показан МЭМС-прибор с источником питания.

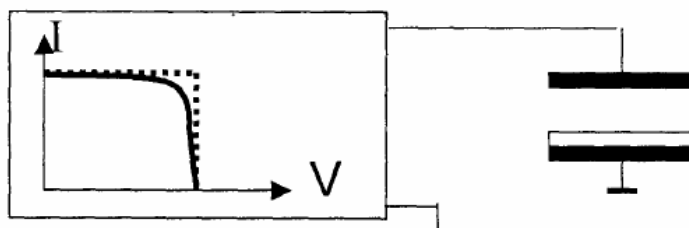


Рис.4. Привод актюатора с оптопарой

Идея состоит в том, что такой прибор будет заряжаться постоянным током до тех пор, пока напряжение не достигнет величины ограничения. После этого ток спадет до нуля, и процесс заряда от источника питания прекратится. Аппроксимация характеристики такого идеального источника может быть произведена с помощью фотодиодной матрицы или фотоэлектрической батареи, что показано на рис. 4 сплошной линией. Мы называем данную технологию «Optodrive».

Примеры переходных процессов в системе с рис.4 приведены на рис.5. Здесь показаны результаты PSpice- моделирования входного тока МЭМС (рис.5,а), перемещения (рис.5,б) и напряжения (рис.5,в). Можно видеть, что можно получить напряжение удержания ниже, чем максимальное значение напряжения. Это доказывает, что рассматриваемый механизм управления обеспечивает ограничение заряда.

### Сравнение и обсуждение

На рис.6 показано сравнение свойств различных способов управления, рассмотренных в данной статье. Для сравнения параметры управления во всех случаях были подобраны таким образом, чтобы обеспечивалось одно и то же время включения или время втягивания. Все свойства были смоделированы с использованием системы PSpice. В качестве эталонного процесса был выбран процесс при управлении с помощью источника

напряжения 15В; процессы для еще пяти способов управления показаны в относительных величинах. Можно видеть, что энергия потребляемая на одно переключения значительно снижается в случае Q-управления, SV-управления и способа «Optodrive». При VR-управлении потребляется такая же энергия, но уменьшается кинетическая составляющая. Случай SV-управления с большим напряжением удержания здесь приведен, чтобы продемонстрировать, что энергия может быть снижена за счет повышения напряжения удержания, но ценой увеличения кинетической энергии. Максимальное напряжение поддерживается на уровне 15В, за исключением случая Q-управления, где диапазон напряжений (в оригинале – «voltage compliance», дословно «податливость напряжения» - термин, по-видимому «изобретенный» авторами статьи. – прим. перев.) должен быть более чем в два раза больше эталонного. Можно заключить, что описанные методы могут помочь созданию простых цепей управления, достижению «мягкой» коммутации и низкого напряжения удержания, а также повышению надежности приборов.

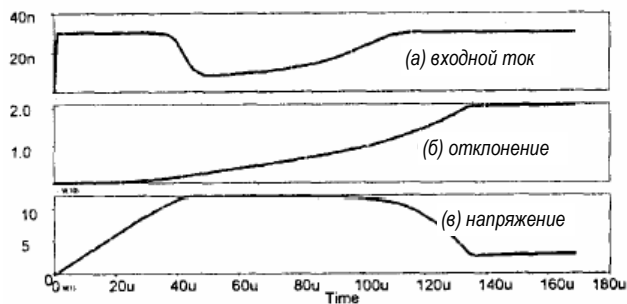


Рис.5. Процессы при управлении «Optodrive»

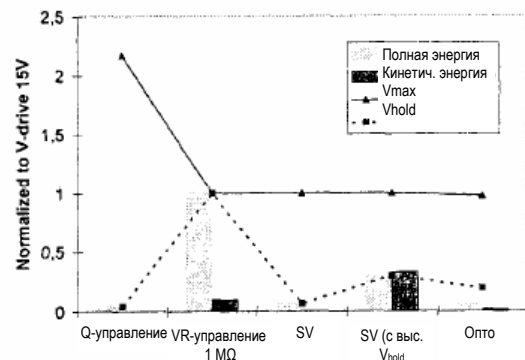


Рис.6. Сравнение различных способов управления

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] . Greek, R. Gupta, K. Hjort, "Mechanical considerations in the design of a micromechanical tunable In-P based WDM filter," J. Microelectromech. Syst., vol.8 no.3, p. 328, 1999.
- [2] Dee, K. Suyama, "Micromachined electromechanically tunable capacitors and their applications to RF IC's," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 46-12, pp. 2587-2596, 1988.
- [3] L. Castañer and S.D.Senturia, "Speed-Energy Optimization of Electrostatic Actuators Based on Pull-in," J. Microelectromech. Syst., vol.8, no.3, pp. 290-298, 1999
- [4] J.Pons A.Rodríguez and L.Castañer, ' Voltage and pull-in time in current drive of electrostatic actuators' J. Microelectromech. Sys., (JMEMS) vol. 11, n°3, pp. 196-205, June, 2002
- [5] G.Blaise ' Fundamental approach to the storage of energy in dielectrics' IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 324-328, 1995
- [6] C. Goldsmith, J. Ehmke, A. Malczewski, B. Pillans, S. Eshelman, Z. Yao, J. Brank, M. Eberly, ' Lifetime characterization of capacitive RF MEMS switches' IEEE MTT-S Digest, p.227-230, 2001
- [7] R. Nadal-Guardia, A. Dehé, R. Aigner, L. Castañer, "Current Drive Methods to Extend the Range of Travel of Electrostatic Microactuators beyond Pull-in" J. Microelectromech. Syst., (JMEMS),vol.11, pp.255-263, 2002.
- [8] .M. Куунярäinen, A.S. Oja, H. Seppä, "Increasing the dynamic range of a micromechanical moving-plate capacitor," Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/ MOEMS. Proceedings of SPIE, vol.4019, 2000, pp.78-89.
- [9] .I. Seeger, S.B. Crary, "Stabilization of electrostatically actuated mechanical devices," Proc. of the International Conf. on Solid State Sensors and Actuators (Transducers'97), 1997, pp.1133-1136.
- [10] L. Castañer, J. Pons, R. Nadal-Guardia, A. Rodríguez "Analysis of the Extended Operation Range of Electrostatic Actuators by Current Pulse Drive," Sensors and Actuators A, Vol. 90, pp. 181-190, May 2001.