

Д. т. н. Н. И. МУХУРОВ, к. т. н. Г. И. ЕФРЕМОВ,  
д. ф.-м. н. С. П. ЖВАВЫЙ

Республика Беларусь, г. Минск, Институт физики им. Б. И. Степанова  
НАН Беларуси  
E-mail: n.mukhurov@ifanbel.bas-net.by

Дата поступления в редакцию  
13.10 2010 г.  
Оппонент к. т. н. Ю. Э. ПАЭРАНД  
(ДонНУ, г. Алчевск)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТОКОВЫХ МИКРОРЕЛЕ

*По результатам моделирования предложена конструкция электротокowego микрореле. Оценены характеристики микрореле при различных направлениях протекания электрического тока через меандровую систему планарной конструкции.*

Микроэлектромеханические реле широко используются в различных функциональных устройствах в качестве регулирующих, управляющих, контролируемых элементов. Важной частью микрореле являются микроактюаторы, создающие активные силы воздействия на чувствительные элементы. Большое внимание уделено теоретическому моделированию и практическим разработкам электростатических актюаторов [1—3]. Они выполняются в различных конструктивных вариантах, из которых можно выделить плоскопараллельные [4, 5], торсионные [4, 6], консольные [7—9], объемные, планарные. Их перспективность обуславливается малыми массогабаритными показателями и мизерным энергопотреблением. Однако, несмотря на ряд оригинальных предложений, управляемый участок перемещения подвижного элемента в межэлектродном промежутке составляет лишь одну треть его часть. Предлагаемые меры по его увеличению усложняют конструкцию и технологию и при этом требуют значительного повышения значения такого управляющего параметра как электрическое напряжение срабатывания [2, 5, 9]. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть другие варианты изменения активных сил, обеспечивающих функционирование микрореле.

В настоящей работе приводятся результаты теоретического расчета и моделирования микрореле, в котором использован эффект взаимодействия электромагнитных сил, возникающих при протекании постоянного электрического тока через параллельные проводники. Показано, что этот эффект может быть реализован в предложенной конструкции электротокowego микрореле (ЭТМ) с электротокowym актюатором (ЭТА).

### Особенности конструкции электротокowego микрореле

По конструкции ЭТМ подобны электростатическим микрореле [10]. Пример плоскопараллельного

электротокowego микрореле, содержащего ЭТА, представлен на **рис. 1**. Оно состоит из диэлектрической подложки 1 и пластины 2, жестко соединенных между собой. В подложке выполнено прямоугольное углубление 5, на двух противоположных сторонах которого имеются ступеньки 3 с контактами 10. В середине пластины расположен жесткий подвижный якорь 4, который соединен с рамкой 11 пластины упругими держателями 9, расположенными «елочкой». На дне углубления и напротив, на внутренней стороне якоря, сформированы идентичные, зеркально расположенные неподвижный 6 и подвижный 7 токопроводящие силовые меандровые участки (МУ), образующие

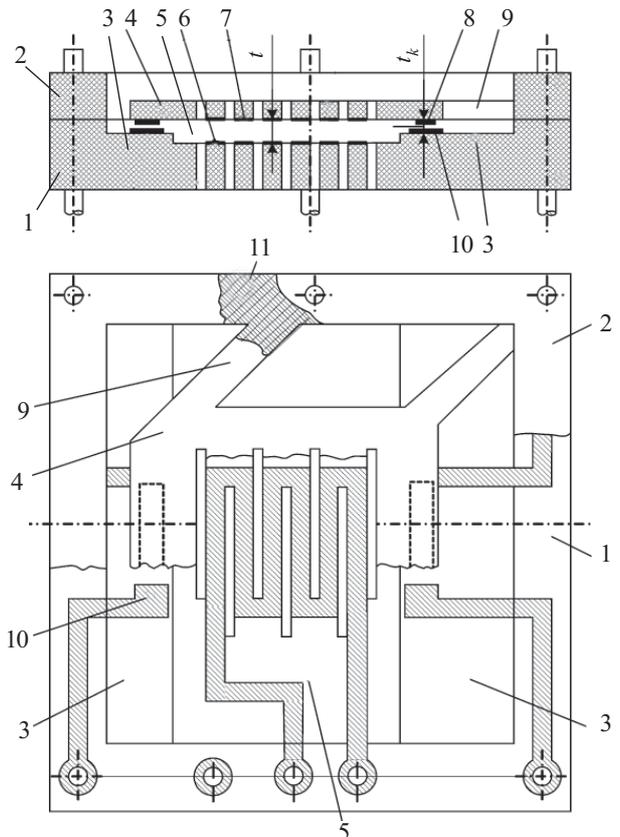


Рис. 1. Конструктивная схема электротокowego микрореле: 1 — подложка; 2 — диэлектрическая пластина; 3 — ступеньки в подложке; 4 — подвижный якорь; 5 — углубление в подложке; 6 — неподвижный МУ; 7 — подвижный МУ; 8 — перемычки; 9 — упругие держатели; 10 — контакты; 11 — рамка пластины

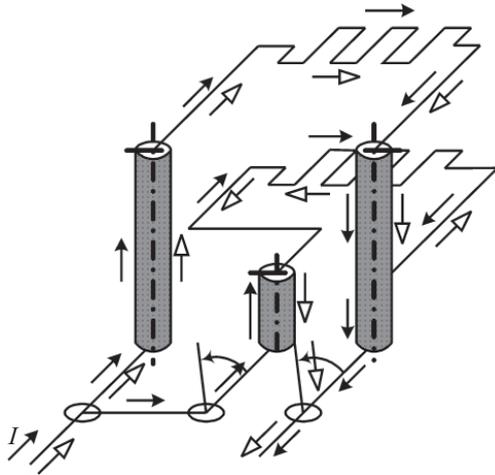


Рис. 2. Направление тока в меандровых участках при разном ходе электротокового актюатора:  
 → — прямой ход (параллельное включение МУ);  
 ⇝ — обратный ход (последовательное включение МУ)

ЭТА. Ветви МУ могут быть разделены сквозными пазами. Начала и концы МУ с помощью штырьков, соединяющих подложку с пластиной, включаются в управляющую цепь. Электрическая схема управляющей цепи предусматривает возможность как параллельного, так и последовательного включения МУ (рис. 2). На внутренней стороне якоря расположены также две переключки  $\delta$  напротив контактов  $10$ . Эти пары входят в управляемую цепь как нормально разомкнутые (НР) контакты. Промежуток между МУ является рабочим межмеандровым расстоянием  $t$ , а между контактами и переключками — межконтактным расстоянием  $t_k$  ( $t_k < t$ ). Элементы электрических цепей соединены токопроводящими дорожками управля-

щей и управляемой цепей. К основным параметрам ЭТМ относятся ток срабатывания, межмеандровое расстояние, управляемая часть рабочего цикла, усилие контакта и усилие возврата.

В качестве материала для изготовления частей ЭТМ может быть использован диэлектрик, обладающий высокими электрохимическими свойствами и позволяющий формировать элементы различной конфигурации. Наиболее предпочтительным материалом представляется анодный оксид алюминия (АОА) [3]. Его самоорганизующаяся ячеистая структура является основой формирования прецизионных конфигураций плоских и объемных перфорированных деталей. Такие детали можно изготавливать на оборудовании для производства микросхем, поскольку процесс их изготовления базируется на интегральной технологии и не требует разработки установок с уникальными параметрами. Толщина полученных пластин может быть от долей до сотен микрометров.

Токопроводящие элементы наносятся термическим напылением или распылением в вакууме металлов с близким к АОА значением КТР с одновременным или с последующим образованием топологического рисунка. Толщина напыления составляет доли микрометра (на рис. 1 соответствующие пленки показаны условно).

**Теоретический расчет основных соотношений**

При включении ЭТМ в управляющую цепь (рис. 2) по обоим МУ пойдет ток  $I$  в одном направлении, и якорь под действием электромагнитных активных сил  $F$  начнет приближаться к подложке (рис. 3, а). Согласно [11], величина сил  $F$  определяется формулой

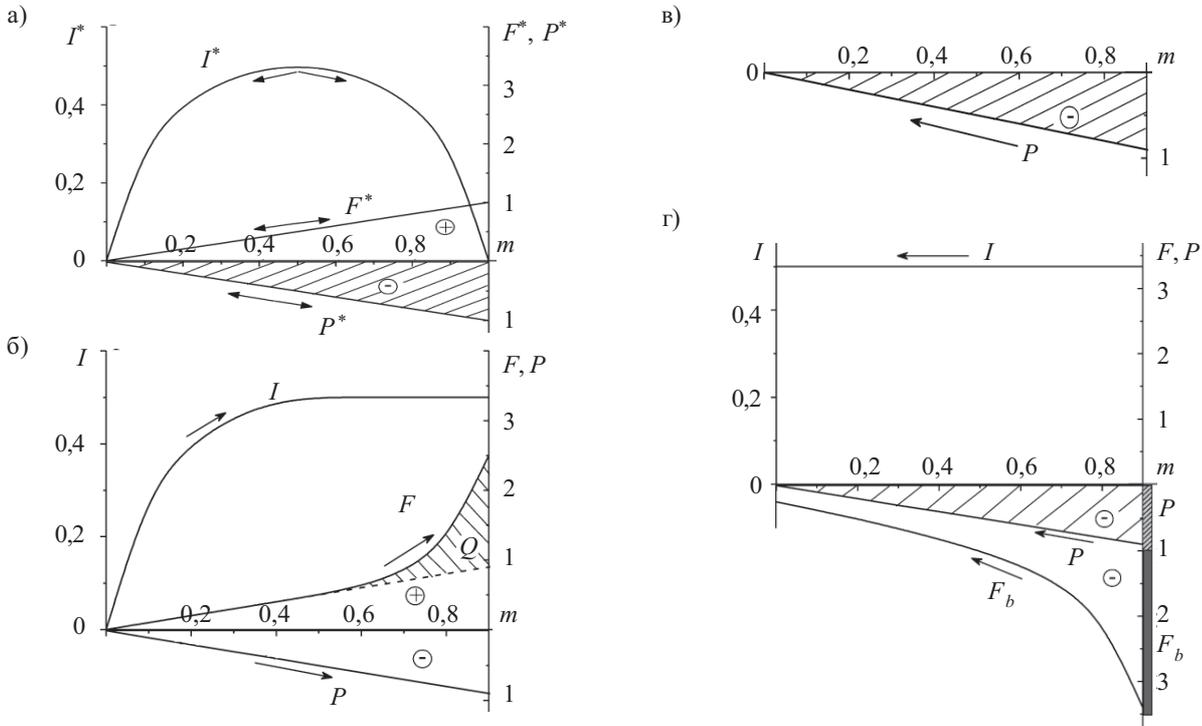


Рис. 3. Расчетные зависимости электромеханических параметров ЭТМ в рабочем цикле (а) и экспериментальные, полученные в процессе прямого (б) и обратного хода при отключении тока (в) и переключении тока (г)

$$F = \frac{\mu_0 I^2 L}{2\pi(t-y)}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  В·с/(А·м);  
 $L$  — суммарная длина ветвей меандра;  
 $y$  — смещение якоря.

В деформируемых держателях якоря возникнет реактивная механическая сила  $P$  [12], определяемая как

$$P = k \frac{Eab^3}{12l^3} qy = Ky, \quad (2)$$

где  $k$  — количество держателей;  
 $E$  — модуль упругости АОА;  
 $a, b, l$  — соответственно ширина, толщина, длина держателей;  
 $q$  — коэффициент заделки концов держателей;  
 $K$  — жесткость упругих держателей.

При постепенном плавном увеличении  $I$  в каждый момент сохраняется равновесное состояние, т. е.

$$F = P. \quad (3)$$

Из формул (1)—(3) следует, что для перемещения якоря на величину  $y$  необходим ток силой

$$I = \sqrt{\frac{2\pi K}{\mu_0 L}} y(t-y). \quad (4)$$

Согласно методике, изложенной в [3, 5], проведем разделение параметров в подкорневом выражении на постоянные и переменные в рабочем цикле реле и введем при этом величину относительного перемещения якоря в межмеандровом промежутке  $m = y/t = 0 \dots 1$ :

$$I = \sqrt{\frac{2\pi K t^2}{\mu_0 L}} \sqrt{m(1-m)}. \quad (5)$$

Обозначив

$$D = \sqrt{\frac{2\pi K t^2}{\mu_0 L}},$$

$$I^* = \sqrt{m(1-m)},$$

получим

$$I = I^* D.$$

Здесь  $D$  — конструктивная константа,  $I^*$  — базовая функция, характеризующая изменение  $I$  в зависимости от  $m$  и не зависящая от  $D$ . Ее дифференцирование показывает, что теоретически она представляет собой симметричную параболу с координатами экстремальной точки  $m_0 = 0,5$ ,  $I^*_{\max} = 0,5$  (рис. 3, а). Такая форма объясняется разной зависимостью  $F$  и  $P$  от  $y$ : активные электромагнитные силы  $F$  обратно пропорциональны  $y$ , а реактивные механические силы  $P$  прямо пропорциональны  $y$ . В интервале  $m = 0 \dots 0,5$  равновесное состояние достигается за счет интенсивного увеличения силы электрического тока в меандровых проводниковых элементах, а в области  $m = 0,5 \dots 0,9$  — за счет постепенного снижения  $I$ , обес-

печивающего равенство  $F$  и  $P$ . Однако практически реализовать такой цикл пока не представляется возможным, т. к. при снижении  $I$  и, следовательно,  $F$ , прогиб держателей уменьшается и начинается возврат якоря в исходное положение.

### Моделирование режима работы

В реальных условиях работы устройств, отслеживающих изменение электрического тока, величина  $I$  незначительно превышает величину  $I^*$ . После того как якорь пройдет положение, характеризующееся равновесным состоянием и значением относительной величины  $m_0$ , равновесие нарушается. В результате наблюдается резкое уменьшение межмеандрового расстояния под действием стремительно возрастающей силы  $F$ . Сближение якоря с неподвижным электродом оканчивается замыканием НР-контактов управляемой цепи и ее включением (рис. 3, б).

Оценим изменение величины контактного усилия  $Q$  в диапазоне изменения  $m$  от 0,5 до 0,9. Его возрастание с увеличением  $m$  определяется соотношениями

$$\alpha = \frac{F_m}{F_{m_0}} = \frac{1}{(1-m)^2};$$

$$\beta = \frac{P_m}{P_{m_0}};$$

$$\gamma = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{1}{4m(1-m)},$$

т. е. при  $m = 0,9$  (рис. 3, б) механические силы возрастают в 1,8 раза, электромагнитные — в 5 раз. Последние больше механических сил в 2,8 раза, что определяет максимальную величину  $Q$ .

Управляемый участок рабочего цикла, соответствующий равновесному состоянию якоря, ограничен диапазоном  $m = 0 \dots 0,5$ , что на 33,4% больше, чем в электростатических микрореле.

После замыкания управляемой цепи сразу или через некоторый интервал времени, определяемый заданным функциональным режимом, происходит отключение микрореле или переключение его на обратный ход. При отключении электромагнитные силы  $F$  равны 0. Возврат якоря в исходное положение осуществляется за счет реактивных сил  $P$ , которые значительно меньше  $F_{m=0,9}$  (рис. 3, в). Силы  $P$  должны не только превысить суммарную величину реактивных сил индуцированных зарядов на диэлектрических участках и инерцию подвижных масс, но и в случае залипания контактов преодолеть удерживающую их силу. Практически значения времени возврата имеют значительный разброс, что снижает надежность микрореле.

При переключении меандровых участков на последовательное соединение между проводниками создается электромагнитное поле с отталкивающей силой  $F_b$  обратного хода, равной  $F_m$ . Возврат якоря в первый момент будет происходить при суммарном воздействии реактивных механических сил  $P_{m=0,9}$  и превосходящих их почти в 3 раза электромагнитных сил  $F_b$  (рис. 3, г). Далее и те, и другие силы будут

уменьшаться, но их совместное действие повышает надежность возврата якоря в исходное положение и уменьшает время обратного хода. В переключающих схемах это позволяет увеличить силы  $F_b$  и повысить надежность срабатывания микрореле в диапазоне СВЧ. Реализация такого режима достигается кратковременным увеличением тока при переключении в  $n$  раз, что согласно формуле (1) повысит  $F$  в  $n^2$  раз при неизменной величине  $P$ .

### Выводы

Электротоковое микрореле предложенной конструкции работает от взаимодействия электромагнитных сил, возникающих между двумя идентичными меандровыми участками электрической цепи с одинаковым или противоположным направлением тока. По величине токи в меандровых участках могут быть равными и неравными.

Изменение направления действия электромагнитных сил в конце прямого хода подвижного якоря с притяжения на отталкивание при противоположном направлении протекания электрического тока через меандровые участки позволяет повысить скорость возврата якоря в исходное положение и надежность срабатывания.

Электротоковое микрореле может успешно работать в слаботочных электрических пороговых, регулирующих, высокочастотных устройствах.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дятлов В. А., Коняшкин В. В., Потапов Б. Е., Фадеев С. И. Пленочная электромеханика.— Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1991. [Diatlov V. A. Novosibirsk. Nauka. 1991]
2. Chan E. K., Dutton R. W. Effects of capacitors, resistors and residual charge on the static and dynamic performance of electro-

statically-actuated devices // Proc. of SPIE.— 1999.— Vol. 3680.— P. 120—130.

3. Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Куданович О. Н. Устройства микромеханики и микросенсорики на нанопористом анодном оксиде алюминия.— Минск: Бестпринт, 2005. [Mukhurov N. I., Efremov G. I., Kudanovich O. N. Minsk. Bestprint. 2005]

4. Petersen K.E. Silicon as a Mechanical Material // IEEE.— 1982.— Vol. 70, N 5.— P. 420—457.

5. Ефремов Г. И., Мухуров Н. И. Функциональные возможности электростатических микрореле по результатам моделирования // Тр. науч.-техн. конф. «Кибернетика и технологии XXI века».— Россия, г. Воронеж.— 2001.— С. 499—508. [Efremov G. I., Mukhurov N. I. // Tr. nauch.tekhn. konf. «Kibernetika i tekhnologii KhKhI veka». Russia, Voronezh. 2001. P. 499]

6. Nah D., Yoon T., Hong S. A low-voltage actuated micromachined microwave switch using torsion springs and leverage // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.— 2000.— Vol. 48, N 12.— P. 2540—2543.

7. Pat. 4959515 USA. Micromechanical electric shunt and encoding devices made therefrom / P. M. Zavracky, R. H. Morrison Jr.— 25.09 1990.

8. Efremov G. I., Mukhurov N. I., Galdetskiy A. V. Analysis of electromechanical parameters of electrostatic microrelay with a movable elastic cantilever electrode // Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS.— Paris.— 2000.— Vol. 4019.— P. 580—585.

9. Алексенко А. Г., Балан Н. Н. Анализ эффекта схлопывания электродов электростатических актюаторов в MEMS- и NEMS-устройствах // Нано- и микросистемная техника.— 2005.— № 7.— С. 31—41. [Aleksenko A. G., Balan N. N. // Nano i mikrosistemnaya tekhnika. 2005. N 7. P. 31]

10. Пат. 2667 РБ. Электростатическое микрореле / И. Л. Григоршин, Г. И. Ефремов, Н. И. Мухуров.— 1996. [Pat. 2667 RB. / I. L. Grigorishin, G. I. Efremov, N. I. Mukhurov. 1996]

11. Кухлинг Х. Справочник по физике.— М.: Мир, 1983. [Kukhling Kh. Moscow. Mir. 1983]

12. Справочник машиностроителя. Т. 3 / Под ред. С. В. Серенсена.— М.: Mashgiz, 1955. [Pod red. S. V. Serensena. Moscow. Mashgiz, 1955]

### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

#### Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике.— М.: ДМК Пресс, 2011 г.— 688 с.

Первая в России книга по самым современным электронным электро- и радиоизмерениям и измерительным приборам, применяемым в научных исследованиях, тестировании и испытании устройств и систем микроэлектроники и нанотехнологий. Впервые подробно описаны средства измерений, применяемые в условиях крупносерийного микроэлектронного производства, и приборы ведущих в их разработке и производстве фирм: Keithley, Tektronix, Agilent Technologies, LeCroy, R&S и др. Особое внимание уделено анализу и генерации тестовых сигналов, измерению их параметров в области малых и сверхмалых значений времени, измерению сверхмалых токов и напряжений, анализу импеданса и иммитанса цепей, измерениям статических и динамических характеристик полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и др. Самый крупный обзор современных зарубежных и отечественных измерительных приборов на рынке России и мира. Для инженеров, научных работников, аспирантов, преподавателей и студентов вузов и университетов технического и классического типов.

