

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 электротокового 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 электротокового микрореле (ЭТМ) с электротоковым актюатором (ЭТА).

Особенности конструкции электротокового микрореле

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

электротокового 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

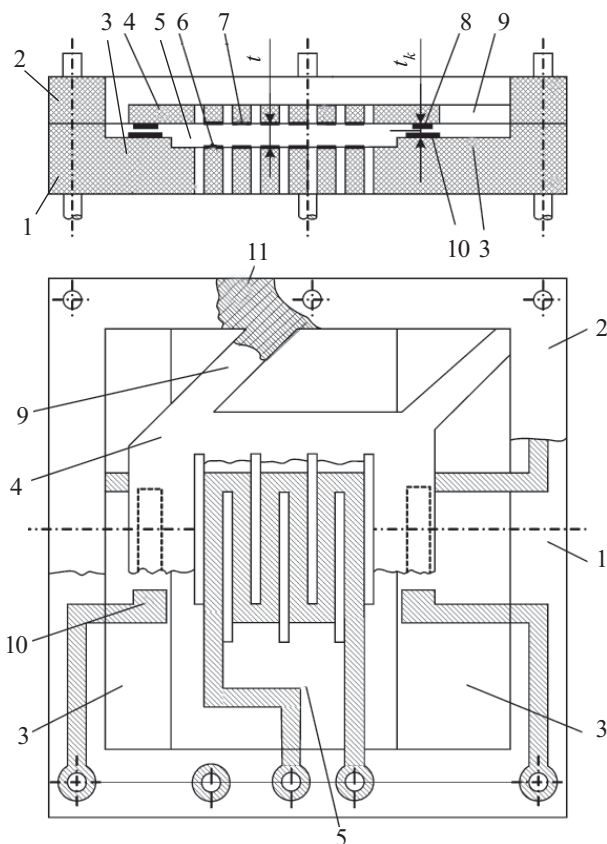


Рис. 1. Конструктивная схема электротокового микрореле: 1 — подложка; 2 — диэлектрическая пластина; 3 — ступеньки в подложке; 4 — подвижный якорь; 5 — углубление в подложке; 6 — неподвижный МУ; 7 — подвижный МУ; 8 — перемычки; 9 — упругие держатели; 10 — контакты; 11 — рамка пластины

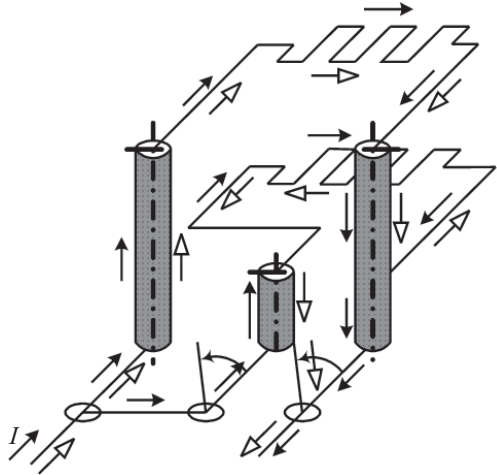


Рис. 2. Направление тока в меандровых участках при разном ходе электротеплового актюатора:
 → — прямой ход (параллельное включение МУ); ← — обратный ход (последовательное включение МУ)

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 8 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 управляю-

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

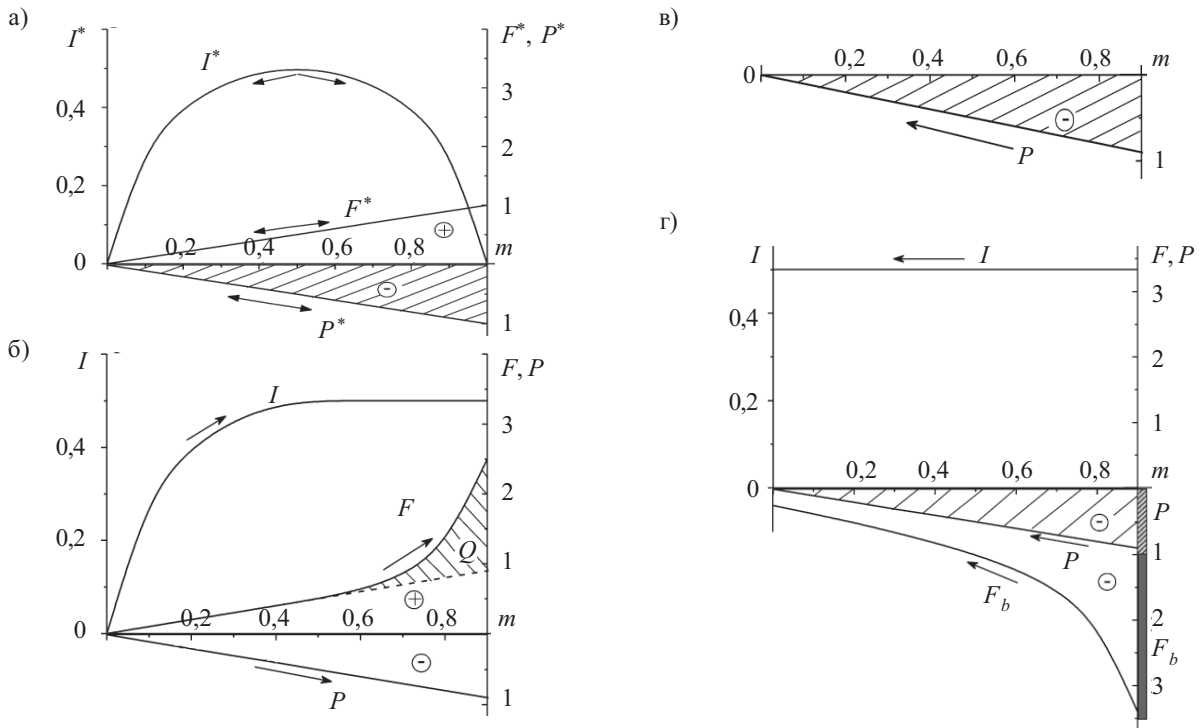


Рис. 3. Расчетные зависимости электрохимических параметров ЭТМ в рабочем цикле (а) и экспериментальные, полученные в процессе прямого (б) и обратного хода при отключении тока (в) и переключении тока (г)

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

где μ_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. Hah 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.: Машгиз, 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.

