

## МИКРОАКТЮАТОРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ: АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Колешко В.М., Гулай А.В., Лацапнёв Е.В.

*The analytical modeling of surface acoustic wave microactuator is realized by considering it as an object of system, design, power, schematic, acoustic, mechanical, tribological and molecular scales. The characteristic of each specified modelling scales of investigated microactuator is defined and the attracted theories, analyzed models, computed schemas, solved equations are considered and the simulation program products are also given.*

Одним из перспективных направлений развития микромеханики является создание интеллектуальных микроэлектромеханических систем и использование в данных системах исполнительных устройств в виде микроактюаторов на поверхностных акустических волнах. Принцип работы микроактюаторов основан на возбуждении в звукопроводе поверхностных акустических волн, под действием которых совершает движение находящийся в контакте со звукопроводом перемещаемый объект. Создание микроэлектромеханических систем на основе объединения микроактюатора с микроконтроллером и микросенсором (рис. 1) позволит значительно повысить функциональные возможности и расширить области применения данных систем.

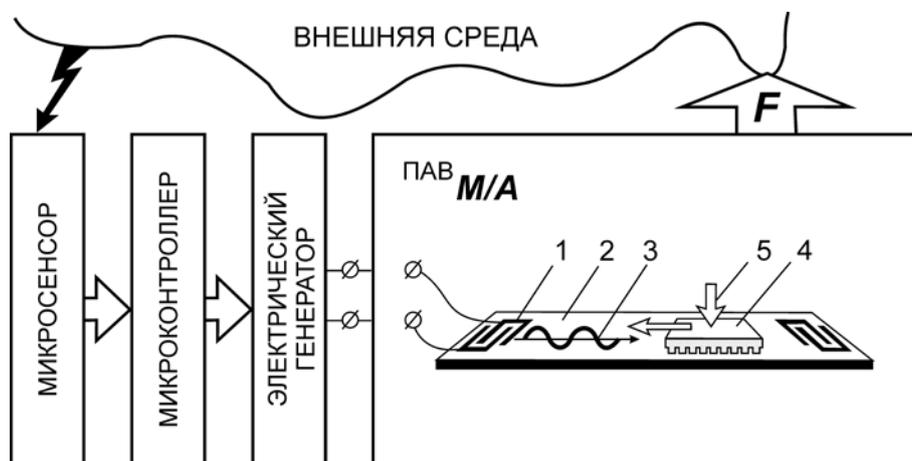


Рис. 1. Обобщенная схема включения микроактюатора на поверхностных акустических волнах в состав интеллектуальной микроэлектромеханической системы: 1 – электроакустический преобразователь; 2 – пьезоэлектрический звукопровод; 3 – поверхностные акустические волны; 4 – перемещаемый объект; 5 – механическая нагрузка.

Микроактюатор на поверхностных акустических волнах, в свою очередь, может рассматриваться как сложная многоуровневая система, в которой осуществляется преобразование энергии, информации и вещества, что и определяет основные подходы к его аналитическому моделированию. В частности, микроактюатор представляет собой многозвенный преобразователь энергии, и от эффективности этого преобразования зависят его выходные механические параметры. Процесс преобразования информации микроактюатором определяет точность механического перемещения по координатам и воздействия на внешнюю среду. Преобразование вещества может быть представлено как модификация материала объекта воздействия, а также в виде процесса поверхностного износа элементов микроактюатора при перемещении.

С этой точки зрения изучаемый микроактюатор (как система) является совокупностью определенных элементов, которые, как и система в целом, обладают различными свойствами, участвуют в разных физических процессах и реализуют разнообразные функции. Уровни аналитического моделирования этих свойств, процессов и функций микроактюатора на по-

верхностных акустических волнах представлены в таблице 1. Здесь следует указать, что расположение уровней моделирования в приведенной последовательности не означает подчинение или соподчинение одних уровней другим, а лишь определяет постепенный переход от рассмотрения микроактюатора с более широких позиций и представлений к более конкретному анализу физических процессов, происходящих в нем.

**Системный уровень** анализа в рассмотренной иерархии уровней моделирования микроактюатора на поверхностных акустических волнах предполагает включение его в состав интеллектуальной микроэлектромеханической системы в виде неотъемлемого физического (электронного, конструктивного, технологического) блока. Это требует рассмотрения влияния микроактюатора на реализацию основных функций микроэлектромеханической системы и внесения им определенного вклада в общие, интегральные характеристики системы. В данном случае интеллектуальная микроэлектромеханическая система, включающая микроактюатор в качестве исполнительного механизма, может анализироваться и моделироваться с использованием общих теоретических представлений о сложной многоплановой системе, взаимодействии ее составных частей, преобразовании информации в ней, проблемах ее микроминиатюризации.

Интересной особенностью интеллектуальных микроэлектромеханических систем, содержащих микроактюатор на поверхностных акустических волнах, которую нельзя обойти вниманием, является выполнение микросенсора, включенного в эту же микросистему, на основе указанных волн в звукопроводе микроактюатора. При этом возбуждаемое поле поверхностных акустических волн выполняет двоякую функцию: придает звукопроводу свойство чувствительности к контролируемому параметру внешней среды и обеспечивает силовое воздействие на подвижный объект и его механическое перемещение. Особенности возбуждения акустического поля и функционирования звукопровода в данном случае более подробно рассматриваются при анализе акустической системы изучаемого микроактюатора (акустический уровень моделирования).

Наиболее общий подход к построению модели интеллектуальной микроэлектромеханической системы, в том числе системы, содержащей в качестве своего структурного элемента микроактюатор на поверхностных акустических волнах, основан на использовании методов общей теории систем. Для описания в рамках общей теории систем поведения микроэлектромеханической системы на конечном интервале времени  $T = [t_0, t_k]$ , где  $t_0, t_k$  – соответственно начальный и конечный моменты времени, принимаются следующие определения. Система имеет  $N$  входов, на которые поступают воздействия (влияния внешней среды, возмущающие воздействия, управляющие сигналы), образующие матрицу  $X_T = \|x_{ij}\|$ , где  $i, j = \overline{1, \dots, n}$ ;  $x_{ij} = x_{ij}(t)$ . В процессе функционирования моделируемая система вырабатывает  $M$  реакций, которые проявляются на ее выходе:  $Y_T = \|y_{ij}\|$ , где  $i, j = \overline{1, \dots, m}$ ;  $y_{ij} = y_{ij}(t)$ . Для учета структуры и внутренних состояний изучаемой системы вводится вектор  $Z_T$  состояний  $Z_T = \|z_{ij}\|$ , где  $i, j = \overline{1, \dots, k}$ ;  $z_{ij} = z_{ij}(t)$ . При этом общесистемную модель функционирования *OSMF* можно представить в виде:

$$OSMF = \langle T, X \in X_T, Y \in Y_T, Z \in Z_T, G, H \rangle, \quad (1)$$

где  $G, H$  – соответственно операторы выходов и операторы переходов, определяющие выходной процесс моделируемой системы по ее начальному состоянию и входному процессу [1].

Функционирование интеллектуальной микроэлектромеханической системы, включающей микроактюатор на поверхностных акустических волнах, осуществляется при реализации

## Иерархия уровней моделирования микроактюаторов на поверхностных акустических волнах

Таблица 1

Уровень анализа модели	Характеристика уровня: рассматриваемое явление, эффект	Исследуемый объект (система)	Привлекаемые теории, анализируемые модели, рассчитываемые схемы:	Программные средства моделирования
1	2	3	4	5
<b>8</b> <b>Системный</b>	Интегрирование микроактюатора на поверхностных акустических волнах с микроконтроллером и микросенсором в единую интеллектуальную микроэлектромеханическую систему	Микроактюатор как составная часть интегральной микросистемы на поверхностных акустических волнах	<ul style="list-style-type: none"> <li>- общая теория систем;</li> <li>- теория автоматического управления;</li> <li>- модель нейронной сети;</li> <li>- теория анализа микросистем;</li> </ul>	Matlab (Control System, Neural Network, Simulink)
<b>7</b> <b>Конструктивный</b>	Поступательное перемещение подвижного объекта под действием поверхностных акустических волн микроактюатора	Микроактюатор как микродвижитель поступательного перемещения на основе использования энергии поверхностных акустических волн	<ul style="list-style-type: none"> <li>- упругий элемент статического нагружения;</li> <li>- магнитный механизм создания нагрузки;</li> <li>- временная характеристика контакта;</li> <li>- характер контактирующей поверхности;</li> </ul>	Autocad, КОМПАС-SPRING, Pro/Mechanica
<b>6</b> <b>Энергетический</b>	Преобразование энергии микроактюатором в последовательности «входные электрические колебания – поверхностные акустические волны – механическое перемещение объекта»	Микроактюатор на поверхностных акустических волнах как электроакусто-механический преобразователь	<ul style="list-style-type: none"> <li>- электромеханическое преобразование энергии;</li> <li>- согласование электрических сопротивлений;</li> <li>- механическое перемещение объекта;</li> <li>- переходной процесс в момент старта;</li> </ul>	Electronic Workbench, ANSYS

1	2	3	4	5
<b>5</b> <b>Схемотехнический</b>	Создание периодического электрического поля электронной системой для возбуждения в звукопроводе микроактюатора поверхностных акустических волн.	Микроактюатор на поверхностных акустических волнах как электронная система с электроакустической нагрузкой	<ul style="list-style-type: none"> <li>- параллельная эквивалентная схема;</li> <li>- последовательная эквивалентная схема;</li> <li>- топология электроакустического преобразователя;</li> <li>- фазовые соотношения в акустическом резонаторе;</li> </ul>	Simulink, Electronic Workbench, FEMLab
<b>4</b> <b>Акустический</b>	Особенности распространения поверхностных акустических волн в звукопроводе микроактюатора	Микроактюатор на поверхностных акустических волнах как акустическая система, испытывающая возмущающее воздействие	<ul style="list-style-type: none"> <li>- энергия упругих колебаний;</li> <li>- затухание поверхностных акустических волн;</li> <li>- теория возмущающего воздействия;</li> </ul>	ACELAN, LSDYNA, FEMLab
<b>3</b> <b>Механический</b>	Механическое взаимодействие в микроактюаторе двух твердых тел: перемещаемого объекта и звукопровода поверхностных акустических волн	Упругий контакт перемещаемого объекта и звукопровода поверхностных акустических волн микроактюатора	<ul style="list-style-type: none"> <li>- теория упругого контакта двух твердых тел;</li> <li>- напряженно-деформированное состояние контактирующих элементов;</li> </ul>	Solid Works, ANSYS
<b>2</b> <b>Трибологический</b>	Трение и износ контактирующих материалов (перемещаемого объекта и звукопровода микроактюатора) в поле поверхностных акустических волн	Трущиеся поверхности в зоне контакта перемещаемого объекта и звукопровода поверхностных акустических волн микроактюатора	<ul style="list-style-type: none"> <li>- трение в зоне контакта мягких материалов;</li> <li>- трение в зоне контакта жестких материалов;</li> <li>- износ трущихся поверхностей;</li> </ul>	Matlab (Partial Differential Equation Toolbox), MathCad
<b>1</b> <b>Молекулярный</b>	Механические колебания молекул вещества под действием поверхностных акустических волн микроактюатора	Микрочастица (молекула), совершающая колебания в поле поверхностных акустических волн микроактюатора	<ul style="list-style-type: none"> <li>- метод молекулярной динамики</li> </ul>	Tinker

системы автоматического управления процессом воздействия ее на объект окружающей среды. Автоматическая система управления микроактюатором характеризуется передаточной функцией, представляющей собой отношение изображения выходной величины  $Y(p)$  к изображению входной величины  $X(p)$  при нулевых начальных условиях. В данном случае изображение выходной величины микроактюатора может быть представлено выражением:

$$Y(p) = \left( \sum_{i=0}^m b_m p^m / \sum_{j=0}^n a_n p^n \right) X(p), \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  – параметры системы управления;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $p$  – оператор Лапласа [2]. В качестве входных параметров системы автоматического управления используются характеристики внешней среды, определяемые микросенсором, выходным сигналом которого после соответствующего преобразования производится управление микроактюатором. Выходными параметрами автоматически управляемой микроэлектромеханической системы являются характеристики механического движения микроактюатора и воздействия на объекты окружающей среды.

Реализация функций автоматического управления микроактюатором на поверхностных акустических волнах в составе интеллектуальной микромеханической системы возможна с использованием искусственной нейронной сети в цепи управления. Составной частью нейронной сети, построенной по принципам организации и функционирования ее биологического аналога, является нейрон, математическая модель которого имеет вид:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i \bullet x_i + b, \quad y = f(s), \quad (3)$$

где  $w_i$  – вес синапса;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $b$  – значения смещения;  $s$  – результат суммирования;  $x_i$  – компонент входного вектора;  $y$  – выходной сигнал нейрона;  $n$  – число входов нейрона;  $f$  – нелинейное преобразование (функция активации) [3]. Задача автоматического управления с использованием нейронной сети сводится к следующей математической постановке: необходимо построить такое отображение  $X \rightarrow Y$ , чтобы на каждый входной сигнал  $X$  формировался правильный выходной сигнал  $Y$ . Для микроэлектромеханической системы, включающей в себя микроактюатор на поверхностных акустических волнах:  $X$  – набор контролируемых микросенсором параметров объекта внешней среды;  $Y$  – код, определяющий воздействие на микроактюатор, соответствующее текущим значениям контролируемых параметров.

Неизбежно возникающая проблема микроминиатюризации в технологии микросистем требует рассмотрения процесса масштабирования микроэлектромеханической системы, имеющей в своем составе микроактюатор на поверхностных акустических волнах. В данном случае при построении модели микроэлектромеханической системы применим закон масштабирования, позволяющий оценивать изменение энергетической эффективности микросистемы в процессе ее микроминиатюризации. Параметр масштабируемости микросистемы  $S_c$  определяется выражением:

$$S_c = - (d\eta_\pi / dV), \quad (4)$$

где  $\eta_\pi$  – выходной энергетический параметр микросистемы;  $V$  – объем ее активных элементов [4]. В данном случае объем  $V$  может быть представлен как  $V = V_{M/A} + \sum V_i$ , где  $V_{M/A}$  – объем микроактюатора на поверхностных акустических волнах;  $V_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) – объем других активных элементов в составе микроэлектромеханической системы. Если энергетические показатели данной системы улучшаются при ее микроминиатюризации, параметр  $S_c$  увеличивается с уменьшением объема активных элементов (микросистема считается хорошо масштабируемой). Если параметр  $S_c$  не возрастает при меньших объемах, это говорит о том, что

микросистема слабо поддается масштабированию. Здесь следует оговориться, что в ряде применений микроэлектромеханических систем их энергетические показатели могут интересоваться не в первую очередь, поэтому под  $\eta_{\pi}$  можно понимать любой другой параметр микросистемы, характеризующий эффективность ее воздействия с помощью рассматриваемого микроактюатора на объект окружающей среды.

На **конструктивном уровне** анализа и моделирования изучаемых микроактюаторов представляют наибольший интерес такие особенности их архитектуры, которые отличают данные микроактюаторы от всех других устройств, использующих поверхностные акустические волны как основной активный фактор. Одной из особенностей является наличие подвижного объекта, прижимаемого к поверхности звукопровода и механически перемещаемого за счет воздействия на него поверхностных акустических волн. На данном уровне рассматриваются также физические эффекты в области механического контакта подвижного объекта и звукопровода, обусловленные конструкцией (формой, объемом) указанных элементов. Изучается влияние периодической системы микровыступов поверхности подвижного объекта, контактирующей со звукопроводом, на процессы отражения, преобразования и рассеяния поверхностных акустических волн, а также исследуется характер контактирования указанных элементов микроактюатора, обусловленный воздействием поверхностных акустических волн.

Механическое сжатие элементов микроактюатора – подвижного объекта и звукопровода в единый пакет для обеспечения надежного контакта между ними производится с помощью нескольких цилиндрических витых пружин сжатия. Основными геометрическими параметрами, которые используются при определении усилия сжатия элементов микроактюатора и влияют на его габариты, являются: средний диаметр пружины; размер сечения витка; индекс пружины; шаг витка пружины; угол подъема витка; длина рабочей части; число рабочих витков. Усилие прижатия подвижного объекта  $P_{\Sigma}$  зависит от силы осевого упругого сжатия  $P$  цилиндрической витой пружины и определяется выражением:

$$P_{\Sigma} = nP = n\lambda/\lambda_1 i, \quad (5)$$

где  $n$  – число пружин микроактюатора;  $\lambda$  – осевое упругое сжатие пружины;  $\lambda_1 = 8c^3/Gd$  – податливость одного витка;  $c$  – индекс пружины;  $G$  – модуль упругости второго рода;  $d$  – диаметр проволоки;  $i$  – число витков [5]. Другие геометрические параметры: шаг витка пружины; угол подъема витков; длина рабочей части рассматриваются и учитываются отдельно в ненагруженном и нагруженном состояниях пружины в конструкции микроактюатора.

Обеспечение надежного механического контакта между подвижным объектом и звукопроводом может производиться также с помощью постоянного магнита, расположенного на указанном объекте, и металлической пластины, размещенной со стороны звукопровода. Сила прижатия  $F$  подвижного объекта к звукопроводу в данном случае оценивается с использованием следующего выражения:

$$F = RVH(dH/dl), \quad (6)$$

где  $R$  – магнитная восприимчивость материала пластины;  $V$  – объем пластины;  $H$  – напряженность магнитного поля;  $dH/dl$  – градиент напряженности магнитного поля в точке расположения пластины, определяемый конструктивными особенностями используемого в микроактюаторе магнита [6]. Наибольшую напряженность магнитного поля позволяют создавать магниты на основе неодима, что делает возможным уменьшение их объема и габаритов и тем самым способствует микроминиатюризации актюатора на поверхностных акустических волнах.

Интересную особенность подвижному контакту между перемещаемым объектом и звукопроводом придает распространение в звукопроводе поверхностных акустических волн, длина которых соизмерима с поперечными размерами микровыступов на поверхности перемещаемого объекта. Контакт между этими элементами существует не постоянно, а рассматривается как периодически прерывающийся, пульсирующий. В течение одного периода поверхностных акустических волн смещение нормальной составляющей колебаний представляется как  $y = a_v \cdot \sin(\omega t)$ , где  $a_v$  – амплитуда колебаний в нормальном направлении. При  $\omega t = \varphi$  ( $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$ ) микровыступ на поверхности подвижного объекта начинает контактировать со звукопроводом и заканчивает контактировать в момент  $\omega t = \pi - \varphi$ . Таким образом, механическая нагрузка микровыступа на звукопровод изменяется во времени как

$$f_n = k_v a_v [\sin(\omega t) - \sin\varphi], \quad (7)$$

где  $k_v$  – твердость материала звукопровода в нормальном направлении к его поверхности [7].

Для учета влияния периодической системы микровыступов подвижного объекта на процесс распространения в звукопроводе микроактюатора поверхностных акустических волн применяется модель рассеяния волн на единичной неоднородности поверхности. Сильное отражение и рассеяние в объем поверхностные акустические волны испытывают вследствие того, что падающая волна не удовлетворяет граничным условиям в области неоднородности поверхности. Коэффициент отражения поверхностных акустических волн  $r$  от одиночной неоднородности равен  $r = C_1 \cdot h/\lambda$ , где  $C_1$  – коэффициент;  $h$  – высота неоднородности поверхности;  $\lambda$  – длина поверхностных акустических волн. Кроме того, существуют локальные волновые поля, возникающие около неоднородностей, которые накапливают энергию волн и тем самым влияют на процессы их рассеяния и прохождения. С учетом указанных эффектов коэффициент отражения равен:

$$r = C_1 h/\lambda + iC_2 (h/\lambda)^2, \quad (8)$$

где  $C_2$  – коэффициент; второе слагаемое учитывает набег фазы на неровном участке поверхности [8]. Коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  зависят от формы неоднородности (в рассматриваемом случае – от формы микровыступов) и параметров материала звукопровода. Кроме того, в пьезоэлектрическом материале звукопровода наблюдается изменение скорости распространения поверхностных акустических волн  $\Delta v/v = (-2/\pi)C_2 (h/\lambda)^2$ , связанное с закорачиванием электрических полей волны, если система микровыступов подвижного объекта выполнена из металла.

Один из подходов к изучению микроактюатора на поверхностных акустических волнах предполагает рассмотрение его как преобразователя высокочастотных электрических колебаний в поверхностные акустические волны и, далее, – в механическое силовое воздействие. Данное электро-акусто-механическое преобразование происходит на основе энергетического обмена как на уровне системы электрический генератор – изучаемый микроактюатор – внешняя среда, так и на уровне собственно микроактюатора – между его узлами: электроакустическим преобразователем, пьезоэлектрическим звукопроводом и перемещаемым объектом. В связи с этим представляет интерес исследование вопросов обеспечения условий согласованной работы электроакустического и акустомеханического узлов микроактюатора, эффективной передачи энергии от входа энергетической цепи – электрического генератора до ее выхода – объекта воздействия, а также проблем получения максимального механического эффекта на выходе микроактюатора: механического усилия, скорости перемещения (энергетический уровень моделирования).

Исследование энергетических соотношений в микроактюаторе на поверхностных акустических волнах предусматривает разработку уравнения связи между входными электрическими параметрами, промежуточными акустическими характеристиками и выходными механическими величинами. В качестве такого уравнения связи используется передаточная функция микроактюатора  $W(p)$ :

$$W(p) = [A_{э/а}(p)/U_{э/а}(p)] \cdot [F_{а/м}(p)/A_{а/м}(p)], \quad (9)$$

где  $U_{э/а}(p)$ ,  $A_{а/м}(p)$  и  $A_{э/а}(p)$ ,  $F_{а/м}(p)$  – изображения соответственно входных и выходных сигналов узлов микроактюатора;  $p$  – оператор прямого преобразования Лапласа; индексы «э/а», «а/м» относятся соответственно к электроакустическому и акустомеханическому узлам микроактюатора. Расчет передаточной функции микроактюатора предполагает синтез его структурной схемы с математическим описанием работы отдельных элементов данной схемы.

Для повышения эффективности работы микроактюатора учитываются условия согласования выхода электрического генератора с нагрузкой – входом электроакустического преобразователя. Так, согласованию на максимум активной мощности, передаваемой от генератора электроакустическому преобразователю, соответствует условие комплексной сопряженности сопротивлений генератора и нагрузки:  $Z_{Г}(\omega) = Z_{Н}^*(\omega)$ . Напротив, согласованию на минимум отражений от нагрузки генератора соответствует условие равенства сопротивлений генератора и преобразователя:  $Z_{Г}(\omega) = Z_{Н}(\omega)$ . Критерием качества согласования является как уменьшение отражений от электроакустического преобразователя (для передачи сигнала с наименьшими искажениями), так и передача максимума активной мощности (для компенсации потерь вследствие шунтирования преобразователя статической емкостью). Поэтому для достижения компромисса между этими условиями используется такой режим согласования, при котором сопротивление генератора лишь частично комплексно сопряжено со входным сопротивлением электроакустического преобразователя:  $Z_{Г}^*(\omega) \approx Z_{Н}(\omega)$ , причем

$$\begin{aligned} Z_{Г}(\omega) &= R_{Г}(\omega) + i[X_{Г1}(\omega) + X_{Г2}(\omega)], \\ R_{Г}(\omega) &= R_{Н}(\omega), \quad X_{Г1}(\omega) = 1/(\omega C_{П}), \quad X_{Г2}(\omega) = -X_{Н}(\omega). \end{aligned} \quad (10)$$

где  $Z_{Г}(\omega)$  – выходное сопротивление генератора ( $R_{Г}(\omega)$ ,  $X_{Г}(\omega)$  – соответственно его активная и реактивная составляющие);  $Z_{Н}(\omega)$  – входное сопротивление преобразователя ( $R_{Н}(\omega)$ ,  $X_{Н}(\omega)$  – соответственно его активная и реактивная составляющие);  $C_{П}$  – статическая емкость преобразователя [9].

Основными выходными параметрами, в наибольшей степени характеризующими эффективность функционирования микроактюатора, являются развиваемое механическое усилие и скорость подвижного объекта. Данные величины пропорциональны упругой деформации звукопровода в тангенциальном направлении в точке контакта его с микровыступом на поверхности подвижного объекта в поле поверхностных акустических волн. Развиваемое механическое усилие  $F$  и скорость перемещения объекта  $v$  определяются выражениями:

$$F = k_h a_h [\cos \varphi - \cos(\omega t) - (\omega t - \varphi) \sin \psi], \quad v = a_h \omega \sin \psi, \quad (11)$$

где  $k_h$  – твердость в тангенциальном направлении материала звукопровода;  $a_h$  – амплитуда колебаний в тангенциальном направлении;  $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$ ;  $\omega$  – круговая частота;  $-\pi/2 \leq \psi \leq \pi/2$  – параметр, определяемый экспериментально исходя из скорости перемещения объекта [7, 10].

Как важная характеристика, во многом определяющая динамику взаимодействия микроактюатора на поверхностных акустических волнах с внешней средой, рассматривается переходной процесс в момент старта подвижного объекта. Данная характеристика представля-

ет собой возрастание скорости (ускорение) перемещаемого объекта в первоначальный момент после включения микроактюатора. С учетом скорости подвижного объекта без механической нагрузки в установившемся режиме  $v_0$ , массы данного объекта  $m$  и максимального развиваемого усилия  $F$  переходная характеристика представляется выражением:

$$v = v_0[1 - \exp(-pt)], \quad p = F/(mv_0), \quad (12)$$

где  $v$  – скорость перемещаемого объекта;  $p$  – импульс данного объекта;  $t$  – время [11].

Для возбуждения поверхностных акустических волн необходимо создание периодического электрического поля в пьезоэлектрическом звукопроводе микроактюатора. Наиболее успешно такая задача решается с помощью встречно-штыревых тонкопленочных электродов, нанесенных на поверхность звукопровода и подключенных к выходу высокочастотного электрического генератора. В рассматриваемом случае электроакустический преобразователь представляет собой для высокочастотного генератора переменную электрическую нагрузку, величина которой зависит от движения перемещаемого объекта. Поэтому при моделировании микроактюатора на **схемотехническом уровне** используются методы расчета и анализа электроакустического преобразователя поверхностных акустических волн путем представления его в виде эквивалентных электрических схем, учитывающих переменную акустическую нагрузку. Анализируются фазовые соотношения в акустическом резонаторе, формируемом системой встречно-штыревых электродов с целью повышения эффективности использования в микроактюаторе энергии поверхностных акустических волн.

Для расчета встречно-штыревого преобразователя по рабочим параметрам используется зависимость его входной проводимости от частоты возбуждающих колебаний. При таком рассмотрении преобразователя его эквивалентная электрическая схема представляет собой параллельное включение активной  $G_a$ , реактивной  $B_a$  составляющих проводимости излучения и статической емкости  $C_T$ :  $Y_{\Delta} = Y_a + j\omega C_T = G_a + j[B_a + \omega C_T]$ . Проводимость излучения (без учета внешних воздействий) определяется по формуле:

$$Y_a = G_{a0} \{[(\sin x)^2/x^2] + j[(\sin 2x - 2x)/2x^2]\}, \quad (13)$$

где  $x = N\pi(\omega - \omega_0)/\omega_0$ ;  $G_{a0} = 4k^2\omega_0 C_s N^2 F/\pi$ ;  $k$  – коэффициент механической связи;  $N$  – число электродов преобразователя;  $C_s$  – емкость одной секции преобразователя;  $F = 1,12$  [12].

В случае представления встречно-штыревого преобразователя поверхностных акустических волн последовательной эквивалентной схемой определяется зависимость его входного сопротивления от частоты возбуждающих колебаний. Эквивалентная электрическая схема при этом содержит последовательное соединение активной  $R_a$ , реактивной  $X_a$  составляющих сопротивления излучения и статической емкости  $C_T$ :  $Z_{\Delta} = Z_a + 1/j\omega C_T = R_a + j[X_a - 1/\omega C_T]$ . По аналогии с проводимостью в параллельной эквивалентной схеме выражение для сопротивления излучения представляется в виде:

$$Z_a = R_{a0} (\omega_0/\omega)^2 \{[(\sin x)^2/x^2] + j[(\sin 2x - 2x)/2x^2]\}, \quad (14)$$

где  $R_{a0} = 4k^2 F/\pi\omega_0 C_s$  [12]. В рассматриваемых схемах емкость пары электродов на единицу их длины определяется диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  материала звукопровода и соотношением  $d$  электрод/полупериод и может быть вычислена по приближенной формуле:  $C_s = 2[6,5d^2 + 1,08d + 2,37](\epsilon + 1)$  [9].

К основным параметрам топологии встречно-штыревого преобразователя относятся: длина периода структуры  $l$ , определяемая из условия акустического синхронизма, и число электродов преобразователя  $N$ , определяемое из условия максимальной ширины полосы пропускания [12]:

$$l = 2\pi v/\omega_0, \quad N^2 = \pi/(4k^2 F). \quad (15)$$

Здесь  $v$  – скорость распространения поверхностных акустических волн в пьезоэлектрической подложке,  $\omega_0$  – частота акустического синхронизма (частота возбуждающего электрического сигнала). Число электродов встречно-штыревого преобразователя  $N$  определяется для получения наибольшей ширины полосы частот из условия  $Q_e = Q_a$ . В данном случае акустическая добротность  $Q_a$  электроакустического преобразователя в рамках модели поперечного поля равна  $Q_a \approx N$ . Электрическая добротность  $Q_e$  преобразователя при согласовании его с помощью параллельно включенной индуктивности, компенсирующей статическую емкость, равна  $Q_e = \pi/(4k^2 NF)$ ;  $k^2 = 2|\Delta v/v|$  – эффективная постоянная электромеханической связи для поверхностных акустических волн;  $\Delta v/v$  – относительное изменение скорости поверхностных акустических волн;  $F = 1,12$  – коэффициент заполнения.

Эффективно функционирующая электроакустическая система микроактюатора выполняется в виде резонатора на поверхностных акустических волнах, состоящего из двух групп встречно-штыревых электродов, формирующих акустический канал резонатора и электрически соединенных между собой [13]. Упругое смещение распространяющейся в звукопроводе поверхностной акустической волны представляется в виде:  $y_+ = \alpha \sin(\omega t - kx)$  и  $y_- = \alpha \sin(\omega t + kx)$ , где  $\alpha$  – амплитуда колебаний;  $k = \omega/v$ ;  $\omega$  – круговая частота;  $v$  – скорость распространения поверхностных акустических волн. В этом случае стоячая волна в резонаторе имеет вид:

$$y_s = y_+ + y_- = 2\alpha \sin(\omega t) \cos(kx). \quad (16)$$

В акустическом канале резонатора расположены также два электроакустических преобразователя встречно-штыревого типа, возбуждающих синусоидальные и косинусоидальные сигналы, которые возбуждают поверхностные акустические волны, складывающиеся с волнами резонатора.

Моделирование акустической системы микроактюатора производится как с использованием общих подходов к анализу процессов возбуждения, распространения и затухания поверхностных акустических волн в пьезоэлектрическом кристалле, так и с учетом особенностей, присущих данным процессам в звукопроводе микроактюатора (**акустический уровень** моделирования). Такие особенности обусловлены, в первую очередь, возмущающим воздействием перемещаемого объекта на акустическое поле поверхностных волн в звукопроводе. Далее, в случае использования звукопровода микроактюатора одновременно в качестве чувствительного элемента микросенсора, особенностью процесса распространения поверхностных акустических волн в нем является возмущающее воздействие внешней среды. Таким образом, звукопровод микроактюатора представляет собой акустическую систему, подверженную многопараметровому влиянию различных физических факторов.

При исследовании и разработке микроактюаторов важно определить величину энергии, связанной с поверхностными акустическими волнами. Производная по времени от энергии упругой деформации в поле акустических волн определяет поток энергии в замкнутый объем сплошной среды или из него. Скорость ухода энергии  $\dot{F}$  через замкнутую поверхность  $S_c$ , ограничивающую данный объем, выражается формулой:

$$\dot{F} = - \int_{S_c} \sigma_{ij} (\partial s_i / \partial t) n_j d\sigma, \quad (17)$$

где  $\sigma$ ,  $s$  – соответственно упругие напряжения и смещения;  $n$  – нормаль к поверхности интегрирования;  $t$  – время.

Выходные механические характеристики микроактюатора во многом зависят от величины потерь энергии, возникающих при распространении упругих колебаний в звукопроводе. Убыванию амплитуды поверхностных акустических волн вследствие поглощения и рассеяния упругой энергии присущи особенности, характерные для продольных и поперечных объемных волн, поскольку поверхностная волна является комбинацией этих волн. При расчете затухания поверхностных акустических волн материал звукопровода микроактюатора рассматривается в виде упругой среды с потерями, для которой комплексные волновые числа в случае продольных  $\bar{k}_l$ , поперечных  $\bar{k}_t$  и поверхностных  $\bar{k}_R$  волн записываются в виде:  $\bar{k}_l = k_l' + jk_l''$ ,  $\bar{k}_t = k_t' + jk_t''$ ,  $\bar{k}_R = k_R' + jk_R''$ . Считая, что затухание акустических волн мало ( $k_l' \gg k_l''$ ,  $k_t' \gg k_t''$ ,  $k_R' \gg k_R''$ ) и одинаково во всех точках среды, комплексные волновые числа можно записать как  $\bar{k}_l = k_l'(1 + j\alpha)$ ,  $\bar{k}_t = k_t'(1 + j\beta)$ ,  $\bar{k}_R = k_R'(1 + j\gamma)$ , где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – малые вещественные поправки, численно равные отнесенным к  $2\pi$  коэффициентам затухания продольной, поперечной и поверхностной волн на длине соответствующей волны. При этом коэффициент затухания поверхностной акустической волны может быть представлен как линейная комбинация из аналогичных коэффициентов затухания продольных и поперечных волн:

$$\gamma = C\alpha + (1 - C)\beta, \quad (18)$$

где  $C$  – величина, зависящая от коэффициента Пуассона  $\nu$  материала звукопровода [15].

Здесь же анализируется проблема одновременного использования поверхностных акустических волн в качестве как энергетического фактора воздействия с помощью подвижного объекта на окружающую среду, так и информативного параметра, отражающего характеристики внешней среды. Рассмотрение обоих случаев (зависимость параметров поверхностных акустических волн от воздействия на звукопровод микроактюатора подвижного объекта, а также влияние внешней среды на процесс распространения волн) возможно с привлечением теории возмущений. Постановка задачи при моделировании микроактюатора на поверхностных акустических волнах аналогична рассмотрению ее для свободно колеблющегося тела, уравнение стационарного движения (невозмущенного движения) для которого записывается в виде:  $\hat{L}_0 w_0 = \lambda_0 w_0$ , где  $\hat{L}_0$  – линейный дифференциальный оператор;  $w_0$  – перемещение;  $\lambda_0$  – собственное значение задачи при заданных граничных условиях. При появлении возмущающего воздействия данное уравнение приобретает вид:  $(\hat{L}_0 + \hat{L}_1)w = (\lambda_0 + \Delta\lambda)w$ , где  $\hat{L}_1$  – оператор, описывающий возмущение;  $\Delta\lambda$  – изменение собственного значения под действием возмущения;  $w$  – собственная функция (перемещение) возмущенной задачи. В случае ортогональности собственных функций невозмущенной задачи поправка  $\Delta\lambda$  определяется по формуле:

$$\Delta\lambda = \left( \int_V w_0 \hat{L}_1 w_0 dV \right) / \left( \int_V w_0^2 dV \right), \quad (19)$$

где  $V$  – область действия оператора  $\hat{L}_0$  [16]. Если собственное значение  $\lambda_0$  связано определенным образом с параметрами поверхностных акустических волн в звукопроводе микроактюатора, то, зная изменение собственного значения, можно найти изменение указанных параметров.

Поскольку основная задача микроактюатора на поверхностных акустических волнах состоит в создании движения перемещаемого объекта посредством механического контакта звукопровода с этим объектом, уделяется особое внимание моделированию и расчету характеристик контакта микровыступов на поверхности подвижного объекта с пьезоэлектриче-

ским звукопроводом. При этом учитывается анизотропия механических свойств пьезоэлектрического кристалла, от которой зависят параметры контакта между указанными элементами. Кроме того, звукопровод микроактюатора, передающий энергию поверхностных акустических волн перемещаемому объекту, создает в нем механические напряжения, равно как и испытывает на себе механическое воздействие подвижного объекта. В связи с этим на **механическом уровне** моделирования производится расчет и анализ напряженно-деформированного состояния контактирующих элементов.

Для моделирования упругого контакта между перемещаемым объектом и подложкой используется задача о давлении двух упругих тел друг на друга. При приложении силы  $N$  в нормальном направлении радиус контакта  $a$  для одиночного сферического выступа с радиусом  $R$  и контактное давление  $p$  определяются выражениями:

$$a^3 = 3\pi N(k_1 + k_2)R/4, \quad p = p_0\sqrt{1 - (r/a)^2}, \quad (20)$$

где  $k_1 = 1 - \gamma_1^2 / \pi E_1$ ;  $k_2 = 1 - \gamma_2^2 / \pi E_2$ ;  $\gamma_1, \gamma_2$  – коэффициенты Пуассона;  $E_1, E_2$  – модули Юнга; индексы 1, 2 относятся соответственно к материалу полусферического выступа на поверхности перемещаемого объекта и материалу подложки;  $p_0 = 3N/2\pi a^2$ ;  $r$  – координата вдоль радиуса зоны контакта [17].

Моделирование напряженно-деформированного состояния подложки в зоне упругого контакта ее с перемещаемым объектом производится с использованием метода конечных элементов. Фундаментальный принцип данного метода заключается в разбиении изучаемой области на элементарные области конечных размеров (конечные элементы), в каждой из которых неизвестная функция аппроксимируется полиномом. Для каждого элемента аппроксимирующей полином определяется его коэффициентами, которые в свою очередь могут быть определены значениями функции в частных точках, называемых узлами элемента. Если известна функция в каждом узле, то имеется возможность ее аппроксимации на всей области. Другими словами, неизвестная функция  $A(x, y)$  зависит от  $NN$  параметров  $A_1, A_2, \dots, A_{NN}$ , являющихся неизвестными, которые функция принимает в каждом узле каждого элемента, и определение данных параметров является этапом определения  $A(x, y)$ :

$$F(A) = \sum_{e=1}^{N_e} F_e(A), \quad (21)$$

где  $F_e(A)$  – функция узла;  $A$  – независимые параметры;  $N_e$  – номер узла.

Реализация основной функции микроактюатора – механического перемещения подвижного объекта существенно зависит от процессов трения и износа в зоне контакта данного объекта со звукопроводом. Рассмотрение указанных процессов производится как с позиций микротрибологии, применяющей представления теории сплошных сред, так и с точки зрения нанотрибологии, учитывающей атомарную структуру вещества (**трибологический уровень** моделирования). Для микротрибологии характерно рассмотрение молекулярного взаимодействия, в котором участвует большое количество атомов и для которого несущественны периодические особенности потенциала кристаллической решетки, играющие важную роль в нанотрибологии. Цель моделирования в данном случае состоит в качественном рассмотрении характера движения перемещаемого объекта по поверхности звукопровода с учетом явления «прилипания – скольжения».

Рассматриваемые ниже модели описывают упругий контакт двух выпуклых тел с радиусами кривизны  $R_{1,2}$ . Причем, для моделирования на трибологическом уровне наиболее важными являются соотношения для радиуса зоны контакта  $a$  и силы адгезионного трения  $F$ . При использовании модели, соответствующей контакту поверхностей из мягких материалов

и/или с большими радиусами кривизны и учитывающей адгезию в контактном приближении путем введения величины работы адгезии  $\gamma$ , выражения для указанных параметров имеют вид:

$$a^3 = (9\pi\gamma R^2)(1 + \sqrt{1 + [2P/(3\pi\gamma R)]})/(8E'), \quad F = \pi\tau a^2, \quad (22)$$

где  $E'$  – приведенный модуль упругости;  $R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$  – приведенный радиус кривизны;  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$ ;  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{12}$  – соответственно удельные поверхностные энергии контактирующих материалов и межфазная энергия контакта;  $\tau$  – напряжение сдвига;  $P$  – сила, приложенная в нормальном направлении к зоне контакта [19].

В случае использования модели, адекватно описывающей контакт жестких поверхностей с дальнедействующими силами притяжения, то есть учитывающей не только сами адгезионные силы, но и их конечный радиус действия через параметр  $z_0$ , соответствующий равновесному расстоянию двух плоских поверхностей, значения  $a$  и  $F$  будут равны [19]:

$$a^3 = 0,75RP/E', \quad F^{3/2} = (\pi\tau)^{3/2} (0,75R/E')(-2\pi R\gamma + P). \quad (23)$$

Соотношение между различными вариантами трибологических моделей определяется универсальным безразмерным параметром  $\mu^3 = (2,92)^3(\gamma^2 R)/(E'^2 z_0^3)$  [16]. При  $\mu > 1$  имеет место предел для случая контакта мягких материалов, а при  $\mu < 1$  – для случая контакта жестких материалов.

Описание величины износа  $J$  трущихся поверхностей в конструкции микроактюатора (микровыступа подвижного объекта и звукопровода) производится в виде  $J = V/S$ , где  $V$  – объем продуктов износа;  $S$  – площадь поверхности трения. С использованием представления о запасенной энергии повреждений износ определяется как отношение скоростей изменения основных компонентов энергии:

$$J = \dot{U}_e / (\Delta U_* - \Delta U_{Tf}), \quad (24)$$

где  $\dot{U}_e = \delta_e \omega$  – скорость изменения скрытой энергии в объеме материала  $V$ ;  $\delta_e$  – относительная величина скрытой энергии,  $\omega$  – удельная мощность трения,  $\Delta U_{Tf}$  – изменение плотности тепловой составляющей внутренней энергии;  $\Delta U_*$  – изменение плотности внутренней энергии, [20].

Микрочастицы вещества в поле поверхностных акустических волн микроактюатора рассматриваются как системы с большим числом степеней свободы, основным инструментом исследования которых является метод молекулярной динамики. Поэтому данный метод, основанный на численном решении классических уравнений движения частиц в некотором выделенном объеме среды, используется на **молекулярном уровне** моделирования физических явлений, сопровождающих процесс функционирования изучаемого микроактюатора. При моделировании учитывается взаимодействие атомов и молекул с многими близлежащими микрочастицами посредством задания потенциала взаимодействия, выбор которого является основным этапом построения численной модели. Функция энергии атомного взаимодействия записывается через элементы парного взаимодействия и взаимодействия нескольких тел, зависящего от относительного расстояния между различными атомами.

Развитие динамических систем в данном случае определяется классическим уравнением движения Гамильтона из второго закона Ньютона:

$$M_i (d^2 R_i / dt^2) = F_i(\{R_i\}) = dV/dR_i, \quad (25)$$

где  $R_i$  – координаты  $i$ -го атома, который совершает движение в силовом поле подобных частиц  $F_i(\{R_i\})$  [21]. Атомные и молекулярные взаимодействия описываются в динамике в соответствии с классическими функциями силовых полей многих тел, при этом функция энергии атомного взаимодействия  $V(\{R_i\})$  записывается через элементы парного взаимодействия

и взаимодействия нескольких тел, которое зависит от относительного расстояния между различными атомами. Здесь атомные силы – это производные функций энергии взаимодействия  $F_i(\{\mathbf{R}_i\}) = dV/d\mathbf{R}_i$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем. – М.: Мысль, 1978.
2. Гусев А. Н. и др. Основы теории автоматического управления. – Самара: Самар. аэрокосм. универс., 1996.
3. Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия-Телеком, 2001.
4. Fatikow S., Rembold U. *Microsystem Technology and Microrobotics*. – Berlin: Springer-Verlag, 1997.
5. Решетов Д. Н. Детали машин. – М.: Машиностроение, 1989.
6. Котунов В. В. Постоянные магниты нового поколения // Рынок вторичных металлов. – 2003. – № 4.
7. Asai K., et. al. Evaluation of the driving performance of a surface acoustic wave linear motor // Proc. of IEEE Ultrasonic Symp., Puerto Rico, Oct. 22 – 25. – 2000. – 3С – 6.
8. Гуляев Ю. В., Плесский В. П. Распространение поверхностных акустических волн в периодических структурах // УФН. – 1989. – т. 157, вып. 1.
9. Орлов В. С., Бондаренко В. С. Фильтры на поверхностных акустических волнах. – М.: Радио и связь, 1984.
10. Kurosawa M. Simulation of surface acoustic wave motor with spherical slider // IEEE Transactions on ultrasonic, ferroelectrics and frequency control. – 1999. – Vol. 46, No 4.
11. Kurosawa M. Elastic contact conditions to optimize friction drive of surface acoustic wave motor // IEEE Transactions on ultrasonic, ferroelectrics and frequency control. – 1998. – Vol. 45, No 5.
12. Кайно Г. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. – М.: Мир, 1990.
13. Asai K., et. al. Novel power circulation methods for a surface acoustic wave motor // Proc. of IEEE Ultrasonic Symp., Lake Tahoe, Oct. 17 – 20. – 1999. – КК-5.
14. Труэлл Р. и др. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972.
15. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981.
16. Баранов В. С. Ультразвуковые методы в атомной энергетике. – М.: Энергия, 1976.
17. Аргатов И. И., Дмитриев Н. Н. Основы теории упругого дискретного контакта. – СПб: Политехника, 2003.
18. Сабоннадьер Ж. К., Кулон Ж. Р. Метод конечных элементов и САПР. – М.: Мир, 1989.
19. Дедков Г. В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // УФН. – 2000. – т. 170, вып. 6.
20. Беркович И. И., Громаковский Д. Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. – Самара: Самар. гос. техн. универс., 2000.
21. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Краткий курс теоретической физики. Кн. 1. Механика. Электродинамика. – М.: Наука, 1969.