

На правах рукописи

СТЕПАНОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ  
МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ  
НАКАТОМ УПРУГИХ ЛЕНТ**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2013 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

- Научный руководитель:** **Меркурьев Игорь Владимирович**,  
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Антуфьев Борис Андреевич**,  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО  
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор
- Ткачев Степан Сергеевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
научный сотрудник Института прикладной математики  
им. М.В. Келдыша
- Ведущая организация:** **ЗАО «Инерциальные технологии «Технокомплекса»**  
**(г. Раменское)**

Защита состоится «19» июня 2013 г., в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 в ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Автореферат разослан «    » мая 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Федотенков Г.В.

**Актуальность проблемы.** Основными задачами, которые ставятся перед разработчиками микроэлектромеханических систем (МЭМС), являются повышение точности, надежности и энергоэффективности проектируемых систем за счет применения новых конструкционных материалов, создания и совершенствования технологий изготовления, использования методов математического моделирования, позволяющего получить требуемые характеристики системы.

Отечественными учеными В.Л. Дятловым из института математики сибирского отделения Российской академии наук (ИМ СО РАН), Э.Г. Косцовым из института автоматизации и электрометрии (ИАиЭ СО РАН) был разработан новый принцип преобразования энергии, основанный на эффекте обратимого электростатического наката тонких металлических лент на поверхность сегнетоэлектрической пленки. Данный эффект обладает высоким быстродействием и обратимостью. Ими было рассмотрено применение указанного эффекта в ряде устройств, таких как планарный микродвигатель<sup>1</sup>, микроинжекторы микроструй жидкости<sup>2</sup>.

В настоящей работе объектами исследования являются новые научные задачи, связанные с разработкой новых перспективных устройств: реверсивный микродвигатель вращения и сенсорное устройство с электростатическим накатом проводящей гибкой ленты.

Микродвигатель может использоваться для построения микропозиционеров, микрооптических устройств, микросканеров, систем управления и диагностики, а также микроробототехнических систем медицинского назначения. Сенсорное устройство может найти применение в создании блоков измерения ускорений, датчиков давления, в системах навигации мобильных роботов и в системах авионики.

**Целью работы** является разработка динамических моделей новых микроэлектромеханических систем и их элементов в составе реверсивного микродвигателя вращения и сенсорного устройства, основанных на электростатическом накате подвижных гибких лент.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи**:

- разработка электромеханических моделей реверсивного микродвигателя вращения и сенсорного устройства, основанных на новом электромеханическом преобразовании энергии – накате металлической ленты на поверхность сегнетоэлектрической пленки;
- анализ различных режимов движения микродвигателя и сенсорного устройства;
- разработка программного обеспечения для аналитического и численного анализа различных режимов движения устройств;
- определение параметров системы для требуемых режимов работы устройств.

Цели диссертации соответствуют Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации по направлению «Транспортные и космические системы», приоритетному направлению модернизации и технологического развития экономики России: «Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры», работа направлена на развитие технологий, входящих в перечень критических технологий Российской Федерации по направлению «Технологии мехатроники и создания микросистемной техники». Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 12-08-01072-а), Совета по грантам Президента Российской Федерации (победитель конкурса 2013 года на право получения стипендии Президента

---

<sup>1</sup> Дятлов В.Л., Косцов Э.Г. Высокоэнергоемкие микродвигатели на основе тонких сегнетоэлектрических пленок – Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 22 – 31.

<sup>2</sup> Ахметов Д.Г., Косцов Э.Г., Соколов А.А. Микроэлектромеханические электростатические высокопроизводительные инжекторы микроструй жидкости // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 53-60.

РФ молодым ученым и аспирантам № СП-4911.2013.3) и программы У.М.Н.И.К. («Участник молодежного научно-инновационного конкурса») 2012 года.

**Методы исследования** определялись спецификой изучаемых объектов и их математических моделей. В работе были использованы методы классической механики, асимптотические методы нелинейной механики, теория дифференциальных уравнений, методы математического моделирования и аналитических вычислений.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректным применением методов теоретической механики, механики деформируемых тел и асимптотическими методами теории дифференциальных уравнений, содержащих малый параметр, а также сопоставлением полученных результатов с экспериментальными данными и результатами, полученными другими исследователями.

**Научная новизна** результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

- получены новые механико-математические модели реверсивного электростатического микродвигателя вращения и сенсорного устройства с электростатическим накатом упругих лент на поверхность сегнетоэлектрической пленки;
- разработана методика расчета электростатического давления, действующего на гибкую ленту, для неоднородного электростатического поля;
- установлено влияние закрепления ленты с подвижным элементом на характер изменения исследуемых параметров систем;
- установлено влияние упруго-массовых параметров ленты на период восстановления ее первоначальной формы и динамику микроактюатора в процессе разгона и квазиустановившегося режима;
- определены допустимые области основных параметров сенсорного устройства;
- установлен характер влияния требуемых параметров сенсорного устройства на его чувствительность.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в разработке механико-математических моделей реверсивного микродвигателя вращения и сенсорного устройства с электростатическим накатом упругих лент на поверхность сегнетоэлектрической пленки, создании методики определения основных динамических параметров микромеханических устройств с электростатическим накатом. Полученные результаты могут быть использованы в разработке новых моделей, методов, алгоритмов и программных средств, позволяющих решать задачи проектирования новых типов микроэлектромеханических систем и их элементов.

**Апробация работы и публикации.** Результаты работы докладывались и обсуждались на

- международной молодежной научно-практической конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», посвященной 300-летию со дня рождения М. В. Ломоносова и 90-летию со дня рождения академика РАН Д.Е. Охочимского (Москва, НИИ Механики МГУ, 2011);
- конференции – конкурсе молодых ученых МГУ, (Москва, НИИ Механики МГУ, 2011);
- I всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные подходы к развитию вооружения, военной специальной техники» (Москва, Академия Генерального Штаба Вооруженных Сил России, 2010 г.);

– академических чтениях по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики» (Москва, МГТУ им. Баумана, 2010 – 2012 гг.);

– международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2008 – 2012 гг.).

– международном МЭМС – форуме 2012 «Моделирование. Производство. Тестирование» (Москва, МЭИ, 2012 г.).

– конкурсе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.»), проводимом при поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Москва, МЭИ, 2012 г.);

– XX международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии» (Москва, МЭИ, 2012 г.).

**Публикации.** По результатам исследований, проведенных в рамках диссертации, опубликовано 17 работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патент на полезную модель, 3 доклада, 10 тезисов докладов.

**Личный вклад автора** заключается в разработке моделей реверсивного микродвигателя вращения и сенсорного устройства, а также в проведении численного моделирования.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы 138 стр., 12 стр. списка литературы, насчитывающего 111 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** дана общая характеристика рассматриваемой проблемы и обоснована ее актуальность. Сформулирована цель диссертации и дан обзор предшествующих исследований. Приведен краткий обзор работ, посвященных разработке и исследованию МЭМС-устройств (позиционирующих, сенсорных, микродвигателей).

**В первой главе** разработана динамическая модель (рис. 1) реверсивного электростатического микродвигателя вращения с электростатическим накатом металлических упругих лент на поверхность сегнетоэлектрической пленки.

Реверсивный электростатический микродвигатель вращения (рис. 1.1) содержит ротор 1 с упругими лентами 2а, 2б, статор 3, с последовательно нанесенными проводящим слоем 4, сегнетоэлектрической пленкой 5, систему управления и питания (СУиП) 6, датчик угловой скорости 7, и приводится в движение системой микроактюаторов (рис. 1.2). На верхнюю плоскость кольца ротора нанесены проводящие слои 8а, 8б, которые соединены с соответствующими подвижными лентами 2а, 2б контактами 9а (показан на рис. 1.2, а), 9б (показан на рис. 1.2, б). Статор 3 закреплен на основании 10. Ротор 1 опирается на опору 11. Ленты 2а, 2б и проводящий слой 4 образуют конденсаторы переменной емкости.

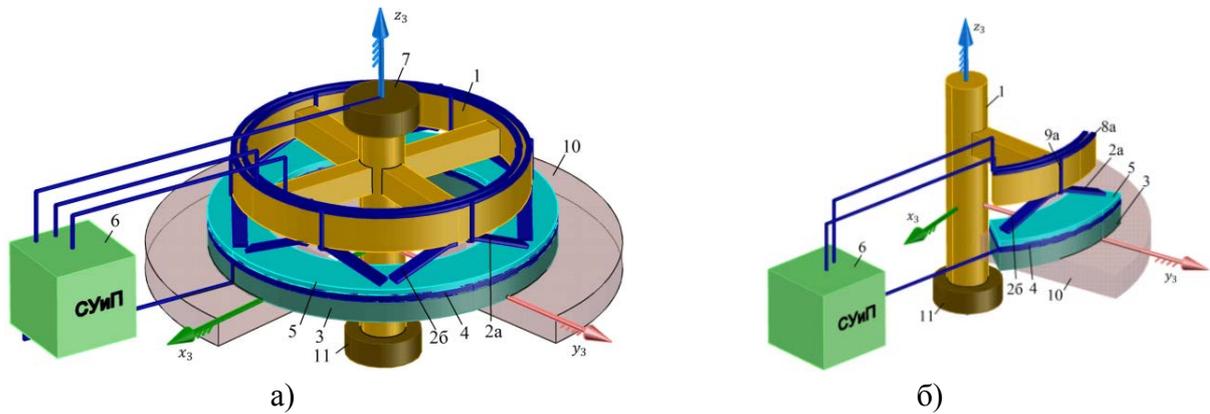


Рис. 1. Конструктивная схема: а – микродвигатель; б - микроактюатор

Составной частью микродвигателя (рис. 1,а) является микроактюатор (рис. 1, б). Для построения характеристик реверсивного микродвигателя вращения исследована динамика микроактюатора, модель которого приведена на рис. 2.

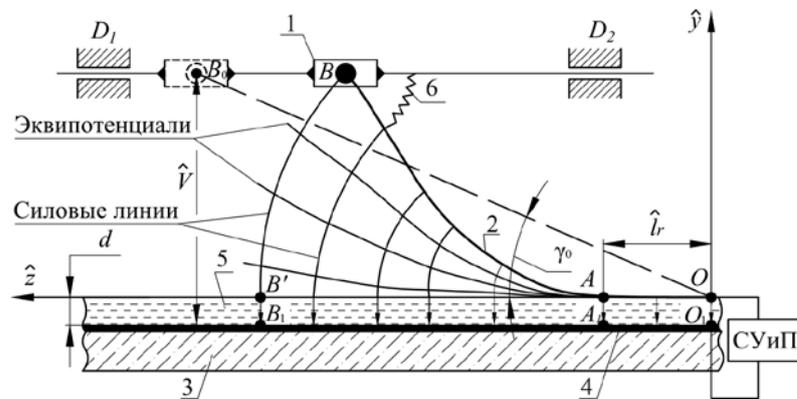


Рис. 2. Динамическая модель микроактюатора

Модель микроактюатора состоит из подвижного элемента - слайдера 1, поступательно перемещающегося в вдоль направляющих  $D_1D_2$ , нерастяжимой металлической ленты 2 с малой изгибной жесткостью. Связь ленты со слайдером моделируется упругим шарнирным соединением 6. На статор 3 нанесены проводящий слой 4 и сегнетоэлектрическая пленка 5, приведенной толщины  $d$ . Предполагается, что угол поворота  $\theta(1)$  ленты в точке  $B$  изменяется в интервале от  $\gamma_0$ , определяющего исходное положение ленты  $B_0O$  длиной  $\hat{l}_\gamma$ , до  $\pi/2$ . Расстояние между проводящим слоем и слайдером постоянное и равно  $\hat{V} = \hat{l}_\gamma \sin \gamma_0 + d$ .

Все элементы модели, кроме металлической ленты, являются абсолютно твердыми телами. Инерционные свойства системы моделируются двумя сосредоточенными массами – слайдера 1 (в точке  $B$ ) и ленты (в точке  $O$ ) Таким образом, задача сведена к упруго-массовой системе с двумя степенями свободы. В качестве сил сопротивлений принимаются силы сухого трения в направляющих  $D_1, D_2$ , а также сухое трение на участке контакта  $AO$  ленты с сегнетоэлектрической пленкой.

Характерные параметры микроактюатора: масса слайдера  $m_{1*} = 1$  г, сила  $F_* = 1$  мН, длина ленты  $L_* = 1$  мм, координата  $\Delta z_* = 1$  мм, время  $T_* = 1$  мс.

Предполагается:

- электростатическое поле локализовано в области  $O_1 - O - A - B - B' - B_1 - O_1$  с подвижными границами (краевые эффекты пренебрегаются);
- электростатическое поле геометрически неоднородно – криволинейные эквипотенциали и силовые линии с неравномерным распределением;

- поле физически неоднородно – относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  в части области  $A - B - B' - A$  равна единице, а в части  $O_1 - O - A - B' - B_1 - O_1$  имеет порядок  $10^3$ .

При взаимодействии с электростатическим полем, мерой которого являются электростатические силы с поверхностной плотностью  $p_{эс}$  (далее – электростатическое давление)<sup>3</sup>, происходит деформация ленты, соответствующая продольно-поперечному изгибу гибкого стержня переменной длины  $\hat{l}_y - \hat{l}_r$  ( $\hat{l}_r$  длина участка ленты  $AO$ , образованного в результате наката на сегнетоэлектрическую пленку), что приводит к перемещению слайдера 1 из начального положения  $B_0$  в положение  $B$  (рис 1.7).

Описание динамики рассматриваемой электромеханической системы включает в себя следующие системы уравнений:

- дифференциальные уравнения для потенциалов электростатических полей с подвижными границами в областях  $A - B - B' - A$  (I) и  $O_1 - O - B' - B_1 - O_1$  (II) с соответствующими граничными условиями на ленте, проводящем слое, силовых линиях  $O_1 - O$ ,  $B' - B_1 - B$  и условиях сопряжения на поверхности  $B' - A$  пленки; по результатам решения краевой задачи определяется величина напряженности поля  $E_0$  вблизи поверхности  $O - A - B$ , а затем соответствующее электростатическое давление  $p_{эс}$  на ленте;

- нелинейные дифференциальные уравнения для краевой задачи продольно-поперечного изгиба гибкого стержня переменной длины при действии электростатического давления и его отсутствии (нелинейность связана с большими деформациями ленты и электростатическим нагружением); по результатам решения краевой задачи определяются реакции ленты (продольные и поперечные силы) на массу слайдера в точке  $B$  и материальную точку  $O$ ;

- дифференциальные уравнения движения масс слайдера и материальной точки с нелинейной правой частью; по результатам интегрирования анализируются режимы движения слайдера при наличии и отсутствии напряжения на обкладках конденсатора.

Комплексное решение всей совокупности дифференциальных уравнений электромеханической системы со столь сложными граничными условиями требует разработки соответствующих численных процедур.

В данной работе каждая из сформулированных выше задач решаются самостоятельно при использовании различного рода упрощающих допущений.

Для определения электростатического давления  $p_{эс}$  использована физическая модель электростатического поля, изображенная на рис. 3.



Рис. 3. Физическая модель электростатического поля

<sup>3</sup> Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм – М.: Высшая школа, 1983.

На рис. 3 приведена электромеханическая структура, состоящая из ленты 2, подложки 3, с последовательно нанесенными проводящим слоем 4 и сегнетоэлектрической пленкой 5, образующая конденсатор переменной емкости. Силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным линиям.

Основные параметры физической модели поля:  $\theta$  – угол между сегнетоэлектрической пленкой 5 и проводящей лентой 2 с координатами  $\hat{z}, \hat{y}$ ;  $\varphi$  – текущий угол ( $0 \leq \varphi \leq \theta$ );  $r$  – радиус кривизны силовых линий;  $\rho$  – радиус кривизны  $\hat{y}$  ленты;  $T$  – кривизна эквипотенциальной линии в точке пересечения с силовой линией;  $s_0, s$  – координаты силовых линий на поверхности сегнетоэлектрической пленки и в произвольной точке соответственно. При расчете электрического поля толщина сегнетоэлектрической пленки определяется соотношением

$$d = d_s / \varepsilon,$$

где  $d_s$  – толщина сегнетоэлектрической пленки,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость ( $\varepsilon \gg 1$ ). В результате замены диэлектрическая среда между поверхностями ленты и проводящим слоем, далее считается условно однородной.

В физической модели поля переменность кривизны  $\hat{y}$  по длине ленты, большой диапазон изменения текущего угла поворота сечения ленты  $\theta$  приводит к неоднородности электростатического поля в конденсаторе. При оценке влияния указанного эффекта было принято допущение, что силовые линии электростатического поля имеют форму, близкую к окружности<sup>4</sup>, концы которых направлены перпендикулярно поверхностям ленты и проводящего слоя. Такая модель поля позволяет определить кривизну эквипотенциалей  $T$  в любой точке вдоль силовых линий  $s$  (отсчитывается от проводящей поверхности ленты до рассматриваемой точки, см. рис. 1.8).

Полученное соотношение для определения электростатического давления для неоднородного электростатического поля имеет вид

$$p_{эс} = \frac{\varepsilon_0 U^2}{2} \frac{\left(1 - \frac{1}{8} \frac{\varepsilon_0 b U^2}{N_0}\right)^2}{(\hat{y} + d)^2}. \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $N_0$  – продольная реакция ленты в первом приближении,  $b$  – ширина ленты.

По сравнению со значениями  $p_{эс}$ , получаемыми для однородного поля, выражение (1) во всем диапазоне изменения угла  $\theta$  дает поправку приблизительно 17%.

В работе было исследовано напряженно-деформированное состояние ленты при действии электростатического давления  $p_{эс}$ . В качестве модели ленты принят невесомый гибкий нерастяжимый стержень в условиях продольно-поперечного изгиба.

Полученная после нормализации система дифференциальных уравнений для гибкого стержня с соответствующими граничными условиями содержит малый параметр  $\mu$  (безразмерная жесткость ленты). Уравнения системы относятся к классу сингулярно возмущенных уравнений. Их решения строятся в соответствии асимптотическим методом<sup>5</sup> в виде разложений

<sup>4</sup> **Фадеев С.И.** Об электростатическом притяжении плёночной металлизированной ленты // Моделирование в плёночной механике (Вычислительные системы) – Новосибирск: ИМ СО АН СССР, 1981.

<sup>5</sup> **Бутузов В.Ф., Васильева А.Б.** Асимптотические разложения решений сингулярно возмущённых уравнений – М.: Наука, 1973.

$$\left\{ \begin{array}{l} l_r = l_0 + \mu l_1, \quad y = y_0 + \mu^2 y_1, \quad z = z_0 + \mu^2 z_1, \\ \kappa = \kappa_0 + \Pi_d + \Pi_\mu + Q_\mu + \mu^2 \kappa_1, \\ \theta = \theta_0 + a_{d\theta} \Pi_d + \mu(a_\theta \Pi_\mu + b_\theta Q_\mu) + \mu^2 \theta_1, \\ \mu p = \mu(p_0 + a_{dp} \Pi_d + a_p \Pi_\mu + b_p Q_\mu) + \mu^2 p_1, \quad f = f_0 + \mu^2 f_1, \end{array} \right.$$

где решения вида  $(\dots)_0, (\dots)_1$  функции медленной переменной  $l$  (текущая длина ленты);  $a_{d\theta}, a_\theta, b_\theta, a_{dp}, a_p, b_p$  – коэффициенты при пограничных функциях  $\Pi_\mu(s_1), Q_\mu(s_2), \Pi_d(s_3)$  быстрых переменных  $s$ ,

где  $s_1 = (l - l_0)/\mu, s_2 = (l - 1)/\mu, s_3 = (l - l_0)/d_0, v_0 = f_0^{1/2}, v_3 = 2\sin\theta_0(1)$ .

$\mu p, f_0$  – соответственно поперечная и продольная реакции;  $\kappa, \theta, y, z$  – кривизна, текущий угол, координаты ленты соответственно;  $\mu = 0,071, d_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ .

Таким образом, из решения определены реакции, действующие на элемент ленты.

Также было исследовано напряженно-деформированное состояние ленты при отсутствии электростатического давления  $p_{эс}$ . В связи со сложностью учета непрерывно распределенной массы ленты, качестве ее модели принимается невесомый упруго закрепленный стержень малой изгибной жесткости с сосредоточенной массой  $\hat{m}_2$  в точке  $O$  (рис. 2). Из решения краевой задачи были определены реакции ленты, необходимые для составления дифференциальных уравнений движения сосредоточенной массы в точке  $O$  относительно слайдера. Результаты интегрирования уравнений движения позволяют оценить время достижения лепестком исходной формы.

**Во второй главе** в пакете компьютерной алгебры смоделирована динамика микротоатора в шаговом режиме, в процессе разгона и в квазиустановившемся режиме.

Процесс движения слайдера за один шаговый режим исследован при двух условиях длительности электрического импульса:

- действие импульса ограничивается временем достижения до максимальной скорости слайдером – длительность импульса равна  $T_v$ ;

- действие импульса ограничивается временем достижения до предельного угла  $\theta(1)$  – длительность импульса равна  $T_\theta$ .

На рис. 4 а графики зависимости скорости слайдера  $v$  от времени  $\tau$  при массе, равной 1 и 3, обозначены 1 и 2 соответственно; штриховая вертикальная линия определяет длительность импульса напряжения  $T_v$ , необходимого для достижения максимальной скорости, штрихпунктирная линия соответствует времени движения  $T_\theta$  ротора до максимального угла. Момент времени при максимальной скорости слайдера после отключения напряжения показан пунктирной линией. На рис. 4 б координата слайдера  $\Delta z$  для массы, равной 1 и 3, при длительности импульсов  $T_\theta$  обозначены 1 и 2 соответственно, графики 1', 2' соответствуют тем же массам, но построенные при учете достижения максимальной скорости  $T_v$ .

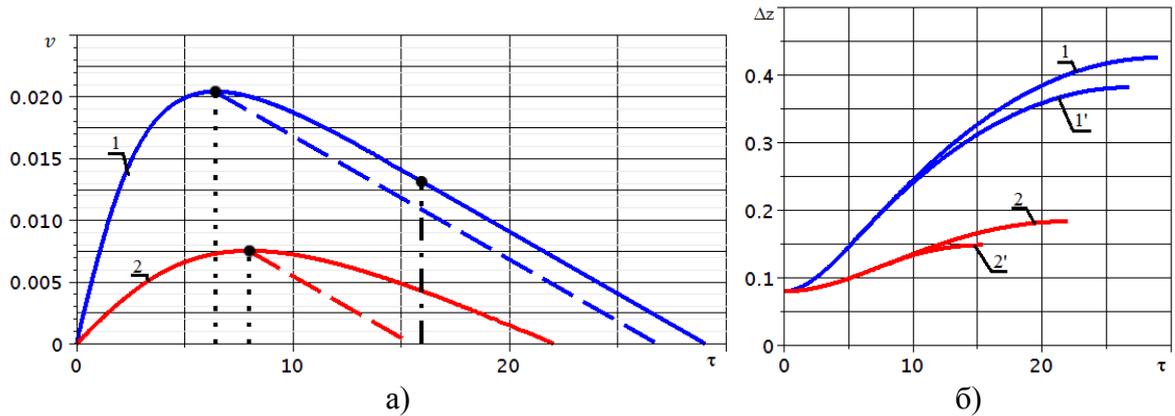


Рис. 4. Безразмерные зависимости скорости  $v$  (а) и перемещения  $\Delta z$  (б) слайдера с массой, равной 1 и 3, от времени  $\tau$

Для получения максимальной эффективности микроактюатора, с точки зрения дальности перемещения слайдера, необходимо, чтобы длительность импульса напряжения была равна времени  $T_\theta$ , при котором достигается предельный угол. Расстояния, пройденные слайдером при отсутствии электростатического давления, значительно больше перемещения, которое он проходит при наличии электростатического давления на ленту.

Установлено, что угол  $\theta_{v_{max}}(1)$ , который достигается в момент максимальной скорости, при увеличении жесткости  $C$  закрепления ленты стремится к асимптотическому значению (рис. 5).

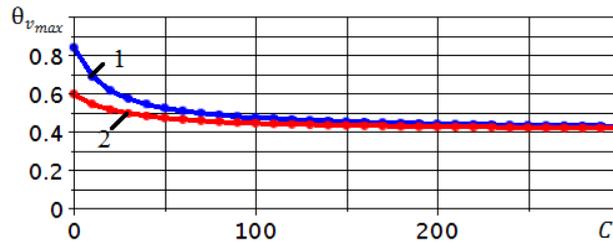


Рис. 5. Зависимости  $\theta(1)(C)$ : 1 – при  $m_1 = 1$ ; 2 – при  $m_1 = 3$

Процесс разгона слайдера осуществляется последовательной подачей импульсов напряжения  $q_0$  продолжительностью  $T_a$  и интервалами между ними  $T_n$ . При этом движение слайдера на интервале времени  $T_a + T_n$  соответствует одному шагу циклической последовательности импульсов. По мере движения ротор разгоняется и выходит на штатный (квазиустановившийся) режим, при котором относительное изменение  $\delta_{cp}$  средней скорости  $v_{cp}$  не превышает заданной величины.

Указанная процедура разгона включает в себя две фазы движения – активную и пассивную.

Активная фаза – движение при подаче импульса напряжения на обкладки конденсатора в течение  $T_a(i)$ , где  $i = 1 \dots N$  – номер очередного импульса. Проведенное моделирование активной фазы шагового режима показало, что скорость слайдера в начале возрастает, достигает максимального значения за время  $T_v$  и уменьшается до достижения ленты предельного угла  $\theta(1)$ .

Пассивная фаза связана с движением слайдера при отключенном напряжении под действием сил сопротивления на интервалах времени  $T_n(i)$ . Этот процесс сопровождается отлипанием ленты от сегнетоэлектрической пленки и восстановлением его первоначальной

формы. При моделировании пассивной фазы движения длительность пассивной фазы  $T_{\text{п}}(i)$  определяется временем восстановления формы ленты.

Время достижения ленты первоначальной формы  $T_{\text{п}}$  для первого импульса напряжения, при понижении точечной массы ленты на один порядок, снижается в три с лишним раза.

При моделировании разгона и квазиустановившегося режима, зависимости скоростей от времени показаны на рис. 6, длительность активной фазы  $T_{\text{а}}(i)$  может ограничиваться временем достижения максимальной скорости (график 1) и временем достижения предельного угла (график 2) (далее в тексте – режимы «регулирования по максимальной скорости» и «регулирования по предельному углу» соответственно). Предельный угол достигается в момент, когда сила микроактюатора достигает минимального значения.

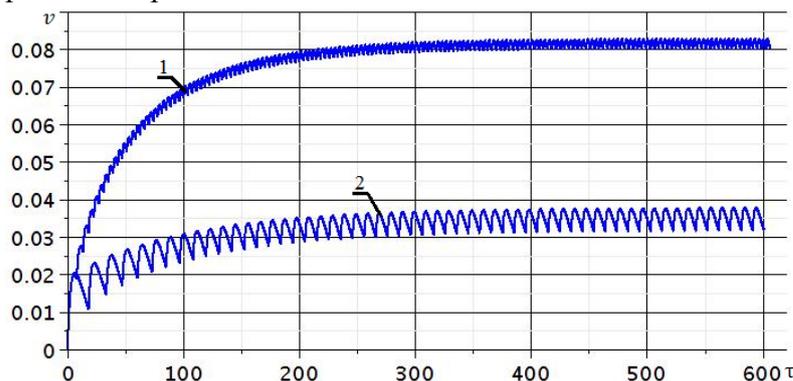


Рис. 6. Зависимость  $v(\tau)$  (1 – «регулирование по максимальной скорости», 2 – «регулирование по предельному углу»)

Установлено, что квазиустановившаяся скорость  $v_{\text{уст}}$  при жесткости закрепления ленты  $C = 20$  больше  $v_{\text{уст}}$  при  $C = 4$  на 27%.

На рис. 7 приведены графики изменения длительности активной фазы (график 1 – «регулирование по максимальной скорости») и пассивной фазы (график 2 – «регулирование по предельному углу») от номера импульса.

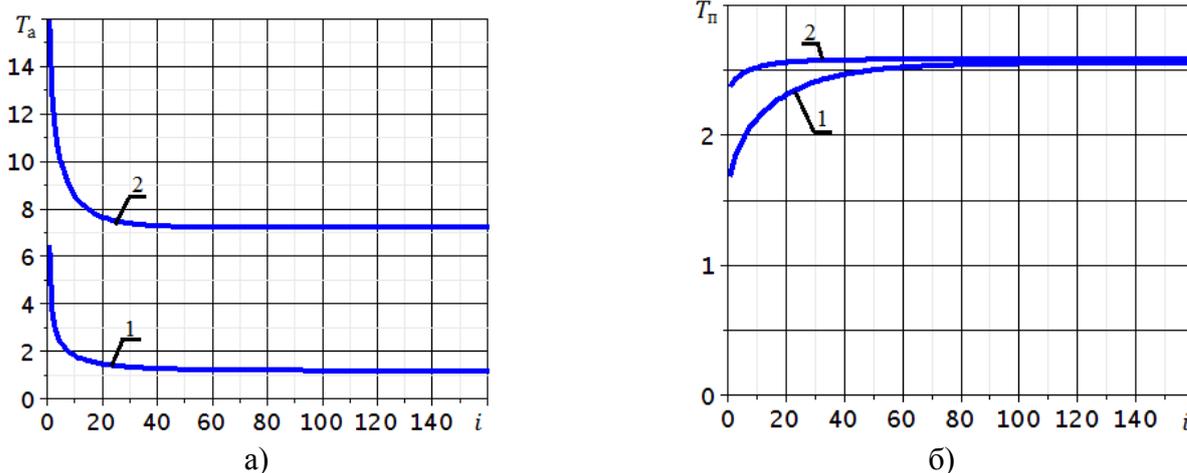


Рис. 7. Зависимости: а –  $T_{\text{а}}(i)$ ; б –  $T_{\text{п}}(i)$

Из рис. 7 видно, что значения  $T_{\text{а}}(i)$ ,  $T_{\text{п}}(i)$  по мере выхода слайдера на квазиустановившееся движение стремятся к асимптоте.

При моделировании разгона и квазиустановившегося режима без «регулирования» за постоянные параметры длительности активной и пассивной фаз приняты установившиеся значения  $T_{\text{а}}^{\text{уст}}$ ,  $T_{\text{п}}^{\text{уст}}$ , полученные из схем с «регулированием». Результаты показали, что квазиустановившаяся скорость слайдера  $v_{\text{уст}}$  (график 1, рис. 6) при выбранных асимптотических

значениях  $T_a^{уст}$ ,  $T_n^{уст}$  больше  $v_{уст}$  полученной с «регулированием по скорости» на 7,8%. Значение  $v_{уст}$  при асимптотических значениях  $T_a^{уст}$ ,  $T_n^{уст}$  полученных из «регулирования по предельному углу» больше скорости приобретенной по схеме с «регулированием по предельному углу» на 4,1%.

Приведенные выше результаты исследований в настоящей работе получены при условии идеального прилегания контактной пары (металлической лепесток – проводящий слой с сегнетоэлектрической пленкой). Для сравнения с экспериментами необходим учет неплотности<sup>6</sup> сопряжения в контактной паре, что является следствием шероховатой структуры поверхностей.

В лаборатории тонкопленочных сегнетоэлектрических структур ИАиЭ СО РАН (руководитель Косцов Э. Г.) были выполнены эксперименты, позволившие косвенно оценить качество поверхностей в контактной паре, образованной металлической лентой и сегнетоэлектрической пленкой на кремниевой подложке, по значениям емкостей и тока проводимости. По их результатам был введен модельный параметр – величина постоянного в области наката  $l_r$  воздушного нанозазора  $d_z$  между лентой и сегнетоэлектрической пленкой, значение которого зависит от напряжения  $U$  в контактной паре. Эксперименты<sup>7</sup>, проведенные в ИАиЭ СО РАН, показали, что диапазону изменения напряжения  $40В \pm 10В$  соответствует величина нанозазора на  $14нм \mp 2нм$ . Введение нанозазора изменяет выражения для электростатического давления  $p_{эс}(0)$  в области наката  $l_r$ , продольной силы  $f_0$ , поперечной силы  $\mu p(l_r)$  в сечении  $l_r$ , и, следовательно, изменяют результаты моделирования. В таблице 1 представлены средние значения скоростей на одном шаге движения слайдера  $v_{mod}$  и экспериментальные значения<sup>8</sup>  $v_{exr}$  для различных рабочих напряжений в контактной паре.

Таблица 1.

Параметры	$U, В$		
	30	40	50
$d_z, нм$	16	14	12
$v_{mod}, мм/с$	0,33	0,80	1,53
$v_{exr}, мм/с$	0,21	0,55	1,08
$(v_{mod} - v_{exr})/v_{ср} \cdot 100\%$	44	37	35

Из приведенных значений таблицы 1 следует удовлетворительная согласованность результатов моделирования и экспериментальных данных.

Основные параметры, определяющие характеристики микродвигателя:  $M_{z_3}$  – момент микродвигателя;  $M_{med}$  – средний момент на активной фазе движения;  $\Omega_{med}$  – постоянная средняя угловая скорость. Приведенный радиус ротора составляет  $\hat{r} = 2$  мм; количество микроактюаторов  $n = 6$ ; угол исходного положения ленты  $\gamma_0 = 0,4$  рад; напряжение  $U = 38$  В.

Построение характеристик демонстрируется на режиме «с регулированием по скорости». Для моделирования процесса разгона и квазиустановившегося движения принимается

<sup>6</sup> Плёночная электромеханика В.Л. Дятлов, В.В. Коняшкин, Б.С. Потапов и др. – Новосибирск: «Наука», 1991.

<sup>7</sup> Косцов Э.Г., Камышлов В.Ф. Быстродействующие электростатические микроклапаны // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 12. С. 57-59.

<sup>8</sup> Косцов Э.Г., Багинский И.Л., Буханец Д.И., Кашеев Э. Л. Электростатический двигатель для быстродействующих микромеханических устройств // Микросистемная техника. 2004. № 4. С. 2–7.

допущение об идентичности работы лент микроактюаторов микродвигателя на активной и пассивной фазах.

Для моделирования процесса разгона и квазиустановившегося движения принимается допущение об идентичности работы микроактюаторов в активной и пассивной фазах.

Момент микродвигателя определяется соотношением

$$\frac{1}{\alpha_l} J_{z_3} d\Omega_{z_3} / d\tau = M_{z_3}, \quad (2)$$

где  $\Omega_{z_3}$  – угловая скорость ротора,  $J_{z_3}$  – приведенный момент инерции,  $\alpha_l = \Delta S_* / L_*$ .

Момент  $M_{z_3}$  включает в себя моменты двигателя  $M_f$ ,  $M_p$  связанных с влиянием продольной  $f(1)$  и поперечной  $\mu p(1)$  реакций, соответственно, в сечении ленты  $B$

$$\begin{cases} M_f = nr f(1) (\cos \bar{\theta}(1) - \mu^2 \theta_1(1) \sin \bar{\theta}(1)), \\ M_p = nr \mu p(1) (\sin \bar{\theta}(1) + \mu^2 \theta_1(1) \cos \bar{\theta}(1)), \end{cases}$$

моменты  $\Delta M_f$ ,  $\Delta M_p$  связанные с влиянием продольных, поперечных сил, соответственно, в сечении  $B$  каждой ленты на трение в опорах

$$\begin{cases} \Delta M_f = -nr k_{t*} k_t f(1) (\sin \bar{\theta}(1) + \mu^2 \theta_1(1) \cos \bar{\theta}(1)), \\ \Delta M_p = -nr k_{t*} k_t \mu p(1) (\cos \bar{\theta}(1) - \mu^2 \theta_1(1) \sin \bar{\theta}(1)). \end{cases}$$

Здесь  $k_{t*}$ ,  $k_t$  – характерный и нормализованный коэффициенты трения,  $\theta_1(1)$  – угол в первом приближении в сечении ленты  $B$ , угол  $\bar{\theta}(1)$  имеет вид

$$\bar{\theta}(1) = \theta_0(1) - C_{\text{пр}}(\theta_0(1) - \gamma_0),$$

где  $\theta_0(1)$  – угол поворота ленты в точке в первом приближении,  $C_{\text{пр}}$  – приведенная жесткость заделки.

Также,  $M_{z_3}$  содержит момент сопротивления

$$M_c = -r_t k_t P - \nu \Omega_{z_3}$$

где  $k_t$ ,  $\nu$  – коэффициенты сухого и вязкого трения,  $r_t$  – приведенный радиус опор.

Численно проинтегрировав дифференциальное уравнение движения микродвигателя (2) в пакете компьютерной алгебры *Maple*, зависимость момента микродвигателя  $M_{z_3}(\tau)$  (рис. 8) при импульсном воздействии напряжения на этапе разгона и квазиустановившемся режимах для условия идеального прилегания контактной пары.

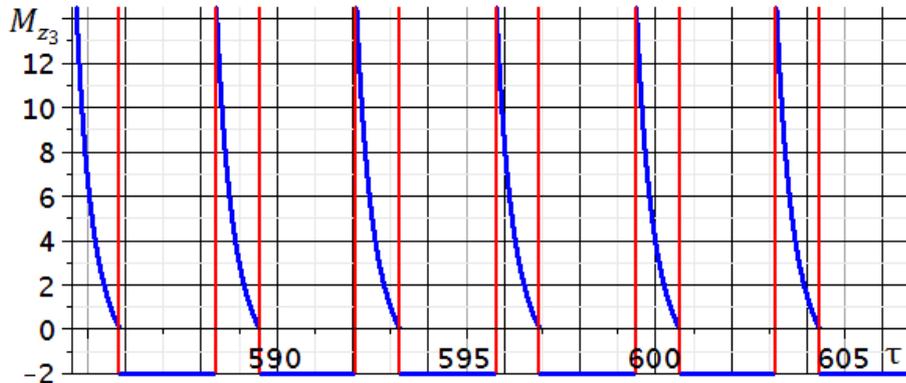


Рис. 8.  $M_{z_3}(\tau)$  на квазиустановившемся режиме

Средний момент микродвигателя на активной фазе движения определяется из соотношения

$$M_{med}(\Omega_{med}) = \Delta K_a(i) / T_a(i), \quad (3)$$

где кинетический момент на активном участке движения ротора определяется из выражения

$$K_a(i) = \int_{\Omega_{z_3}(T_a(i-1)+T_n(i-1))}^{\Omega_{z_3}(T_a(i))} J_{z_3} d\Omega_{z_3}.$$

С помощью *Maple* из (3) строится график  $M_{med}(\Omega_{med})$  для идеально прилегающей контактной пары (рис. 9).

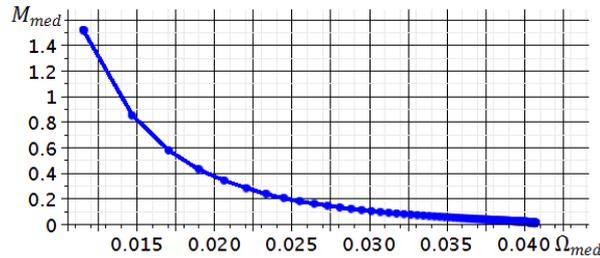


Рис. 9. Зависимость  $M_{med}(\Omega_{med})$

Квазиустановившаяся угловая скорость  $\Omega_{med}$  (рис. 9) соответствует 390 об/мин.

**В третьей главе** динамическая модель микромеханического сенсорного устройства маятникового типа с электростатическим накатом металлических упругих лент на поверхность сегнетоэлектрической пленки (рис. 10).

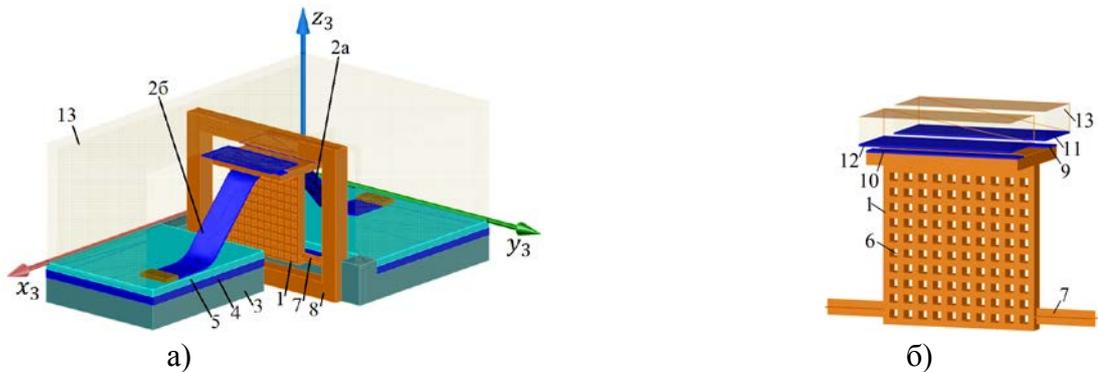


Рис. 10. Конструктивная схема: а – сенсорное устройство;  
б - чувствительный элемент

Микромеханическое сенсорное устройство включает в себя чувствительный кремниевый элемент 1 маятникового типа с упругими лентами 2а, 2б, изготовленными из бериллиевой бронзы, и кремниевое основание (подложку) 3, с последовательно нанесенными проводящим слоем 4 и сегнетоэлектрической пленкой 5. Чувствительный элемент 1, имеющий перфорационные отверстия 6, посредством торсионов 7 прикреплен к рамке. Сенсорное устройство имеет дифференциальный емкостной измеритель перемещений, который включает конденсаторы с обкладками 9 – 12, две из них расположены на корпусе. На ленты 2а, 2б малой изгибной жесткости в паре с проводящим слоем кремниевого основания 1 подается исходное (базовое) напряжение, в результате чего формируется электростатическое давление, под действием которого ленты 2а, 2б накатываются на сегнетоэлектрическую пленку 5. Таким образом, чувствительный элемент приводится в исходное (базовое) положение. При силовом или кинематическом воздействии соответствующая сила либо ускорение определяются по величине смещения инерционной массы чувствительного элемента 1 в установившемся состоянии. При работе в компенсационном режиме измерительная система определяет пропорциональное перемещению добавочное напряжение, создаваемое обратной связью, необходимое для возвращения чувствительного элемента 1 в исходное положение. При отсутствии обратной связи осуществляется прямое измерение перемещения.

Для построения уравнений динамики инерционной массы чувствительного элемента использована модель, изображенная на рис. 11.

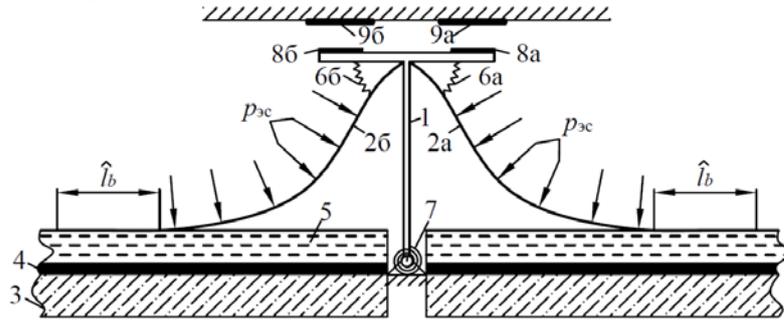


Рис. 11. Динамическая модель сенсорного устройства

Модель состоит из чувствительного элемента 1, ленты 2а, 2б. На подложку 3 последовательно нанесены проводящий слой 4 и сегнетоэлектрическая пленка 5. Металлические ленты 2а, 2б и подложка 3 образуют конденсаторы, емкость которых меняется в результате изменения базовой длины наката  $\hat{l}_b$ . Жесткость упругой заделки лент 2а, 2б моделируются пружинами 6а, 6б, торсионы моделируются угловой пружиной 7. Перемещение измеряется дифференциальным измерителем, включающий проводящие слои 8а, 8б, 9а, 9б.

В качестве характерных параметров сенсорного устройства выбраны: инерционная масса  $m_{s*} = 1\text{мг}$ , перемещение  $\Delta S_* = 1\text{мкм}$ , напряжение  $U_{b*} = 10\text{В}$ , характерное ускорение  $w_{s*} = 0,1g\text{ м/с}^2$ . Высота чувствительного элемента  $L_s = 1\text{мм}$ , ширина  $0,5\text{мм}$ .

Для моделирования динамики чувствительного элемента построено дифференциальное уравнение, нелинейность которого связана с найденными из решения краевой задачи реакциями лент.

$$-m_s \frac{\rho_s^2}{l_s^2} \ddot{\Delta S} - \frac{c_\varphi}{l_s^2} \Delta S - \lambda_h \frac{h_\varphi}{l_s^2} \dot{\Delta S} + \lambda_g \frac{m_s \Delta S}{l_s} + \lambda_s f_s + \sum_{j=1}^2 S^{(j)} + Q_i^* = 0, \quad (4)$$

где  $\Delta S$  – нормализованное перемещение инерционной массы,  $\dot{\Delta S} = d\Delta S/d\tau_s$ ,  $\ddot{\Delta S} = d^2\Delta S/d\tau_s^2$  ( $\tau_s$  – безразмерное время),  $m_s, \rho_s, l_s$  – соответственно, приведенные инерционная масса, радиус инерции, высота чувствительного элемента;  $c_\varphi, h_\varphi$  – угловые коэффициенты упругости и вязкости, учитывающие влияние торсионов и газового демпфирования;  $f_s$  – внешнее возмущение;  $Q_i^*$  – пондеромоторная сила дифференциального измерителя. Кроме того, в (4) введены следующие обозначения

$$\lambda_h = H_\varphi / (C_\varphi T_s), \quad \lambda_g = m_{s*} g L_* / C_\varphi, \quad \lambda_s = F_s L_*^2 / (C_\varphi \Delta S_*),$$

где  $C_\varphi, H_\varphi$  – характерные угловые коэффициенты упругости и вязкости,  $m_{s*}, T_s, \Delta S_*, L_*$  – характерные инерционная масса, время, перемещение, длина ленты,  $g$  – ускорение свободного падения,  $F_s$  – характерное внешнее возмущение.

Слагаемое  $\sum_{j=1}^2 S^{(j)}$  ( $j$  – номер ленты) соответствует сумме моментов реакций лент в возмущенном состоянии.

Продольная сила  $f_0^{(j)}$  определяется соотношением

$$f_0^{(j)} = \left( \frac{q^{(j)}}{4d_0} \right) / \left[ \text{tg}^2 \left( \frac{\theta_0^{(j)}(1)}{2} \right) \left( 1 + \text{tg}^2 \left( \frac{\theta_0^{(j)}(1)}{2} \right) \right) \right],$$

где параметр напряжения  $q^{(j)}$  имеет вид

$$q^{(j)} = q_b + \Delta q.$$

Базовый параметр напряжения  $q_b$ , определяющий выставку исходного положения по оси симметрии инерционной массы чувствительного элемента, равен

$$q_b = \alpha_q (U_{b*} u_b)^2, \quad \alpha_q = \frac{\varepsilon_0 b}{2F_* L_*}.$$

Здесь  $U_{b*}, u_b$  – характерный и безразмерный базовые напряжения;  $b$  – ширина ленты.

Добавочный параметр напряжения  $\Delta q$ , который характеризует обратную связь, определяется соотношением

$$\Delta q = - \frac{K_{упр} \alpha_l q_b}{\operatorname{tg} \left( \frac{\theta_0^{(b)}(1)}{2} \right) \sin \gamma_0} \Delta S,$$

где  $K_{упр}$  – коэффициент управления,  $\theta_0^{(b)}(1)$  – базовый угол в сечении  $E$  ленты в первом приближении,  $b$  – ширина ленты.

Для приведения чувствительного элемента в исходное положение задается угол  $\theta_0^{(b)}(1)$  в первом приближении, который позволяет определить координату  $\Delta z_b$  для невозмущенного состояния при  $\Delta S = 0$  из выражения

$$\Delta z^{(j)} = \Delta z_b + (-1)^{j+1} \alpha_l \Delta S,$$

где  $\Delta z^{(j)}$  – координата инерционной массы в возмущенном состоянии,  $\Delta S$  – перемещение инерционной массы.

Допустимые области определяются для параметров – угол  $\theta^{(j)}(1)$  и продольная сила  $f_0^{(j)}$ , чувствительность  $S_q$ , представляющее собой отношение добавочного напряжения  $\Delta q$ , необходимого для возвращения чувствительного элемента в исходное положение, к величине внешнего воздействия  $f_s$

$$S_q = \Delta q / f_s. \quad (5)$$

В (5) внешнее воздействие  $f_s$  определяется из (4) при условии установившегося движения ( $\Delta \dot{S} = 0, \Delta \ddot{S} = 0$ ) в системе *Maple*. В современных МЭМС-устройствах принимается, что отклонение нелинейной характеристики чувствительности от линейной не превышает 0,1%, соответствующие нелинейная 1 и линейная 2 зависимости  $S_q(f_s)$ , полученные из (5), приведены на рис. 12, построенные при базовом напряжении  $u_b = 5$  и угле  $\theta^{(b)}(1) = 0,4839$  рад.

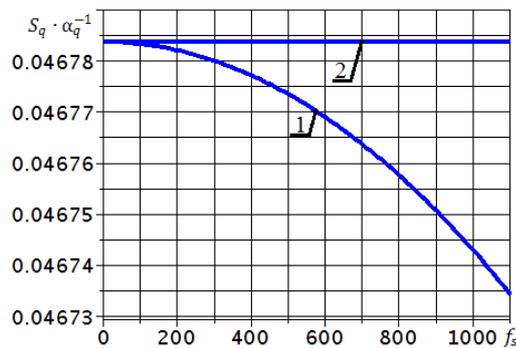


Рис. 12. Зависимость  $S_q(f_s)$

Далее, численным интегрированием дифференциального уравнения движения (4) в системе *Maple* моделировалась реакция системы на внезапно приложенное воздействие  $f_s^{max}$ . При этом для представления соответствующего динамически приложенного внешнего возмущения использовалась функция Хевисайда, заданная в начальный момент времени  $\tau = 0$ . Установлено, что наибольшее значение  $f_s^{max} = 1000$  достигается при  $u_b = 5$  и

$\theta^{(b)}(1) = 0,4839$ . Соответствующие переходные характеристики продольной реакции второй ленты  $f_0^{(2)}$  и угла первой ленты  $\theta^{(1)}(1)$  представлены на рис. 13.

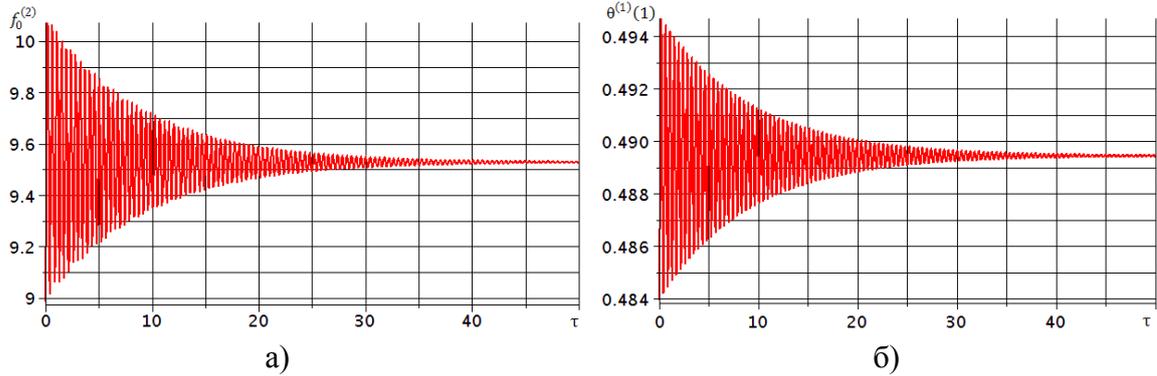


Рис. 13. Переходные характеристики: а –  $f_0^{(2)}(\tau)$ ; б –  $\theta^{(1)}(1)(\tau)$

Из рис. 13 а видно, что максимальное значение силы не превышает 11, что соответствует напряжению в сечении ленты 22 МПа, которое ниже  $\sigma_T = 220 \dots 350$  МПа<sup>9</sup>.

Для принятого уровня нелинейности параметра чувствительности менее 0,1% построена линейная модель системы, на основе которой оценено влияние базовых параметров на изменение параметра чувствительности.

Линейное дифференциальное уравнение имеет вид

$$\ddot{\Delta S} + 2n_h \dot{\Delta S} + \omega^2 \Delta S - \Lambda_s f_s = 0. \quad (6)$$

В уравнении (6) для нормализованного квадрата частоты сенсорного устройства введено обозначение  $\omega^2 = K_{\text{пр}} l_s^2 / (m_s \rho_s^2)$ . Коэффициент вязкости системы  $n_h$  и параметр  $\Lambda_s$  обозначены

$$n_h = \lambda_h h_\varphi / (2m_s \rho_s^2), \quad \Lambda_s = \lambda_s l_s^2 / (m_s \rho_s^2).$$

Приведенная жесткость  $K_{\text{пр}}$ , имеющая структуру вида

$$K_{\text{пр}} = \frac{c_\varphi}{l_s^2} - \lambda_g \frac{m_s}{l_s} + 2 \left( \zeta \frac{\partial F_b}{\partial q_b} - \frac{\partial F_b}{\partial \Delta z_b} \alpha_l \right),$$

найдена с использованием системы компьютерной алгебры *Maple*.

Здесь за функцию  $F_b$  принимается равенство

$$F_b = \sum_{j=1}^2 S_b^{(j)},$$

где  $\sum_{j=1}^2 S_b^{(j)}$  – сумма моментов реакций лент в невозмущенном состоянии.

В установившемся режиме ( $\ddot{\Delta S} = 0, \dot{\Delta S} = 0$ ) из (6) получается равенство

$$\Delta S = \Lambda_s f_s / \omega^2,$$

которое через перемещение  $\Delta S$  определяет действующее возмущение  $f_s$ .

Чувствительность при линейной постановке задачи имеет вид

$$S_q = \alpha_l K_{\text{упр}} q_b \Lambda_s / \left( \omega^2 \operatorname{tg}(\theta_0^{(b)}(1)/2) \sin \gamma_0 \right). \quad (7)$$

Зависимость  $S_q(u_b)$  при  $\theta^{(b)}(1) = 0,4839$  приведена на рис. 14.

<sup>9</sup> Кузнецов О. А., Погалов А. И., Сергеев В. С. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры – М.: Радио и связь, 1990.

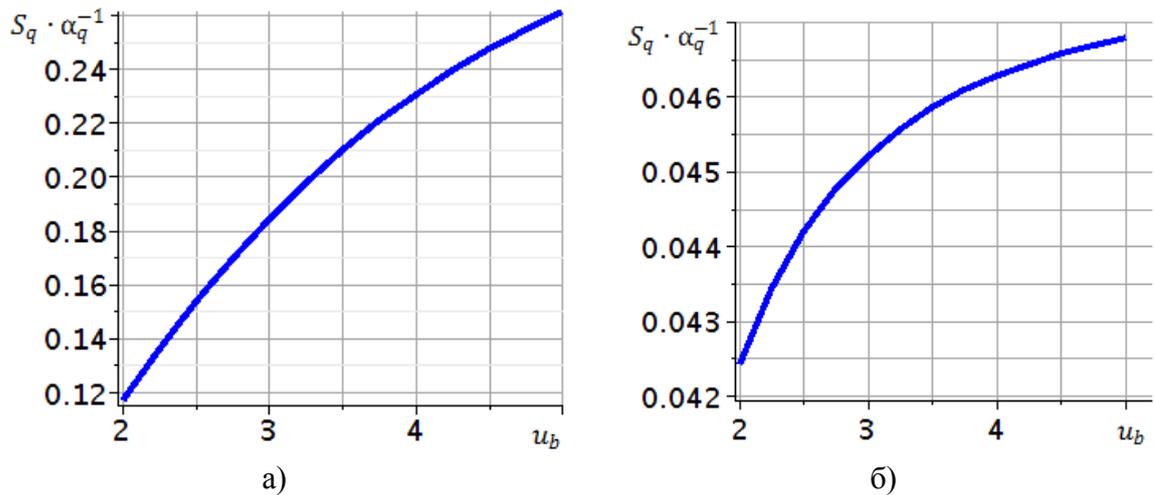


Рис. 14. Зависимость  $S_q(u_b)$ : а –  $\theta_0^{(b)}(1) = \pi/3$ ; б –  $\theta_0^{(b)}(1) = \pi/6$

Из рис. 14 видно, что увеличение базовых напряжения  $u_b$  и угла  $\theta_0^{(b)}(1)$  приводит к повышению чувствительности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертации изложены научно-обоснованные решения, имеющие существенное значение для проектирования и создания новых типов микродвигателей и сенсорных устройств, включая датчики давления и инерциальной информации, а также повышения технических и эксплуатационных характеристик систем на их основе.

Основные результаты, полученные в работе, заключаются в следующем:

1. Разработана электромеханическая модель реверсивного микродвигателя вращения.
2. В рамках принятой модели установлено снижение на 17% электростатического давления на упругую ленту микроактюатора вследствие неоднородности электрического поля в конденсаторе переменной емкости.
3. Определены соотношения для упруго-массовых параметров, необходимые для получения максимальной эффективности микроактюатора оцениваемой по следующим параметрам: скорость, перемещение и время движения слайдера в шаговом режиме.
4. Численным моделированием пассивного движения микроактюатора определено время восстановления исходной формы ленты в зависимости от упруго-массовых параметров системы.
5. Исследованы режимы разгона и квазиустановившегося движения «с регулированием по максимальной скорости (или предельному углу)» и «без регулирования» при различных значениях упруго-массовых параметров микроактюатора. Установлено, что большая величина квазиустановившейся скорости слайдера может быть достигнута в режиме «без регулирования», если при выборе длительности и тактовой частоты импульсов использовать их асимптотические значения, определенные в режимах «с регулированием».
6. Разработана методика построения характеристик микродвигателя.
7. Разработана и динамическая модель микромеханического сенсорного устройства с электростатическим накатом упругих лент на поверхность сегнетоэлектрической пленки.
8. Определены области допустимых значений основных параметров сенсорного устройства исходя из величин допустимых механических напряжений и максимальных углов

поворота сечений лент, а также от величины линейной зоны для чувствительности устройства.

9. Построена линейная модель сенсорного устройства. Установлены влияния базового напряжения и базового угла наклона лент на величину чувствительности системы. Установлено, что увеличение базовых напряжения и угла наклона лент приводит к повышению чувствительности.

**Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. **Устинов В.Ф., Степанов А.С. Анализ динамики разгона и квазиустановившегося режима электростатического планарного устройства // Вестник МЭИ. 2012. №1. С. 78-84.**

2. **Устинов В.Ф., Степанов А.С., Моделирование динамики электростатического планарного микродвигателя // Вестник МЭИ. 2010. №4. С. 12-19.**

3. **Меркурьев И.В., Степанов А.С. Расчет динамических характеристик микромеханического акселерометра с монокристаллическим блоком чувствительных элементов // XVI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тез. докл. В 3 т. М: МЭИ. 2010. Т. 3. С. 336-337.**

4. **Меркурьев И.В., Подалков В.В., Степанов А.С. Проектирование микромеханического гироскопа-акселерометра // Материалы XXXIV академических чтений по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики» / Под общей редакцией А.К. Медведевой. М: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2011. С. 608—609.**

5. **Моделирование разгона и квазиустановившегося режима планарного МЭМС микроактюатора: а. с. программы для ЭВМ 2012612910 Рос. Федерация / В. Ф. Устинов, А.С. Степанов; заявитель и правообладатель: ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ». – № 2012610711; заявл. 07.02.2012; опубл. 23.03.2012.**

6. **Реверсивный электростатический микродвигатель вращения: пат. на полез. мод. 123269 Рос. Федерация: МПК<sup>51</sup> H02N1/00 / В. Ф. Устинов, А.С. Степанов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ». – 2012115230/07; заявл. 18.04.2012; опубл. 20.12.2012.**

7. **Степанов А.С. Анализ режимов работы планарного микроактюатора с электростатическим накатом // Труды конференции-конкурса молодых учёных. 12-14 октября 2011 г. Под редакцией академика РАН Г.Г. Черного, профессора В.А. Самсонова. М.: Изд-во Моск. Ун-та. 2012. С. 30-37.**

8. **Устинов В.Ф., Степанов А.С. Исследование динамики моделей микромеханических устройств с электростатическим накатом // Сборник расширенных тезисов Международной молодежной научно-практической конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», посвященной 300-летию М.В. Ломоносова и 90-летию со дня рождения акад. Д.Е. Охоцимского. Под редакцией профессора Ю.Г. Мартыненко. – М: Изд-во Московского университета. 2011. С. 154-160.**

9. **Устинов В.Ф., Степанов А.С. Динамика планарного микродвигателя с электростатическим накатом // Сб. докладов I всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные подходы к развитию вооружения, военной специальной техники». Москва. Академия Генерального Штаба ВС России. 2011. С. 193-196.**

10. **Устинов В.Ф., Степанов А.С.** Моделирование работы электростатического планарного двигателя // XIV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тез. докл. В 3 т. М: МЭИ. 2008. Т. 3. С. 242.

11. **Устинов В.Ф., Степанов А.С.** Анализ различных режимов нагружения электростатического планарного двигателя // XV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тез. докл. В 3 т. М: МЭИ. 2009. Т. 3. С. 291.

12. **Устинов В.Ф., Степанов А.С.** Динамика разгона электростатического планарного микродвигателя // XV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тез. докл. В 3 т. М: МЭИ. 2010. Т. 3. С. 335-336.

13. **Устинов В.Ф., Степанов А.С.** Моделирование движения микромеханического акселерометра с электростатическим накатом // XVII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тез. докл. В 3 т. М: МЭИ. 2011. Т. 3. С. 301.

14. **Устинов В.Ф., Степанов А.С.** Моделирование разгона и квазиустановившегося режима электростатического планарного устройства // Материалы XXXV академических чтений по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики» / Под общей редакцией А.К. Медведевой. М: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2011. С. 621—622.

15. **Устинов В.Ф., Степанов А.С.** Анализ динамики микромеханического планарного акселерометра с электростатическим накатом // Материалы XXXV академических чтений по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики» / Под общей редакцией А.К. Медведевой. М: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2012. С. 618 — 619.

16. **Устинов В.Ф., Степанов А.С.** Анализ динамики моделей планарных микромеханических устройств с электростатическим накатом // XVIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тез. докл. В 3 т. М: МЭИ. 2012. Т. 3. С. 325.

17. **Устинов В. Ф., Степанов А.С.** Разработка и исследование реверсивного MEMS-двигателя вращения с электростатическим накатом // Труды XX Международной научно-технической конференции «Информационные, средства и технологии». В 3 томах. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ. С. 69-75. 2012.