

И.Ш. НЕВЛЮДОВ, д.т.н., проф. ХНУРЭ, Харьков;
В.А. ПАЛАГИН, к.т.н., доц., проф. ХНУРЭ, Харьков;
Ю.И. БОГДАН, аспирантка ХНУРЭ, Харьков;
С.М. ТОМАНОВА, магистрант ХНУРЭ, Харьков;

ВЛИЯНИЕ МАСШТАБА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Теории подобия и размерностей физических величин (ТП и РФВ) содержат основные принципы для оценки изменения свойств МЭМС при уменьшении линейных размеров. Различные активные силы меняются по разным законам, эти силы перечислены в статье. ТП и РФВ могут использоваться для анализа и оценки изменения характеристик МЭМС. В статье показаны некоторые основные тенденции микроминиатюризации.

Ключевые слова: теория подобия, теория размерностей физических величин, микроэлектромеханические системы, микросистемная техника, эффекты масштабирования, миниатюризация, теория аналогий.

Введение. Микросистемная техника (МСТ) представляет собой очередной этап в развитии электроники, обеспечивающий продолжение действия эмпирического закона Мура по темпам микроминиатюризации и уровня интеграции [1], а также обеспечивающий улучшение электрофизических свойств приборов и систем. Микроэлектромеханические (МЭМС), микрооптоэлектромеханические (МОЭМС), микроакустоэлектромеханические (МАЭМС) и другие разновидности МСТ объединяют в одном чипе (микрочипсе) компоненты различной физической природы, что позволяет получать новые эффекты, недостижимые в макроисполнении и при раздельной реализации компонентов [2].

В первую очередь необходимо отметить повышение надежности МСТ за счет объединения в одном устройстве микромеханических устройств (сенсоров и актюаторов), микроэлектронных систем управления и информационных подсистем в виде встроенных датчиков и программного обеспечения. Такое объединение является основным принципом мехатроники и приводит к повышению автономности, децентрализации управления в системе, уменьшению количества линий связи с внешними устройствами и длины линий связи в самом компоненте, снижению электропотребления устройства. В свою очередь, за счет уменьшения количества и длины линий связи снижаются шумы и влияние наводок. Использование групповых микроэлектронных технологий для изготовления электронных и микромеханических компонентов в едином цикле позволяет сократить расходы на их производство.

Основная часть. Для моделирования различных физических, химических, экономических, информационных и других процессов, а также технических объектов широко используются теории подобия и размерностей физических величин [3]. Исторически теория подобия в большинстве случаев использовалась для распространения экспериментальных данных, полученных на физической модели, имеющей размеры значительно меньше объекта, на свойства реальных объектов.

При проектировании устройств микросистемной техники (МСТ) разработчик должен учитывать изменение (скорость изменения) физических величин при уменьшении их размеров от макроразмеров или от существующих микроминиатюрных изделий. При этом естественно интересуют те преимущества миниатюризации, которые позволяют улучшить электрофизические, эксплуатационные и производственные характеристики компонентов, приборов, систем.

Размеры микромеханических компонентов МЭМС находятся в пределах от 1 до 10^3 мкм. В этом диапазоне размеров многие физические величины в МСТ значительно отличаются от соответствующих величин макродиапазона в части их влияния на функционирование компонентов и устройств. Важной является оценка этих отличий при пропорциональном уменьшении всех линейных размеров и сохранении неизменными угловых размеров, определяющих форму тел.

Анализ условий подобия производится на основе теорий подобия и размерностей физических величин, определяющих свойства подобия на основе критериев подобия (необходимых и достаточных условий) и утверждающих, что подобные явления имеют подобные условия однозначности (геометрические соотношения, физические параметры, начальные и граничные краевые условия) и одинаковые критерии однозначности.

Физические процессы или системы подобны, если в соответствующие моменты времени в соответствующих точках пространства значения переменных величин, характеризующих состояние одной системы, пропорциональны соответствующим величинам другой системы.

Коэффициенты пропорциональности для каждой из величин называются коэффициентами подобия. При геометрическом подобии существуют пропорциональность соответствующих геометрических элементов подобных фигур и тел. При физическом подобии поля соответствующих физических параметров двух систем подобны в пространстве и времени [4].

Логической основой теории подобия является теория размерностей физических величин [5, 6].

Пусть для описания изучаемых явлений используется система с r основными независимыми величинами. (В системе СИ для описания механических процессов достаточно трех основных единиц – длины l , м [L]; массы m , кг [M]; времени t , с [T]. Для электрических необходимо добавить

силу тока, A [J] или напряжение B , [U]). Производные единицы образуются по общему уравнению:

$$[x_{r+1}] = k [x_1]^{\alpha_1} [x_2]^{\alpha_2} \dots [x_r]^{\alpha_r}, \quad (1)$$

где $[x_i]$ – единица (размерность) величины x_i , $i = 1, 2, \dots, r$;
 α_i – отвлеченные положительные или отрицательные числа;
 k – числовой коэффициент.

Размерность любой физической величины представляет собой произведение возведенных в степень размерностей первичных величин.

Выбор основных единиц системы связан с удобством и способами их измерения. Добавление новой основной единицы (или её исключение) добавляет (отбрасывает) некоторый размерный коэффициент.

Рассмотрим различные виды подобия для элементов МСТ при условии неизменности свойств материала: плотности ρ , модулей, постоянных ε и μ , коэффициентов и др.

При механическом подобии упругих систем предполагается наличие геометрического, кинематического и динамического подобия:

- для геометрического подобия должна обеспечиваться пропорциональность соответствующих линейных размеров двух систем;
- при кинематическом подобии существует подобие полей скоростей двух систем;
- при динамическом подобии реализуется подобие систем действующих сил или силовых полей различной физической природы (силы тяжести, давления, силы вязкости и др.).

В электромеханическом подобии, электромеханических аналогиях (ЭМА) существует подобие изменения состояния (токов и напряжений в электрических цепях силам и скоростям в механических системах, содержащих элементы массы, упругости, механических потерь).

Пропорциональность в подобных явлениях приводит к тому, что все безразмерные комбинации (отношения), которые можно составить из их параметров, имеют для подобных явлений одинаковые численные значения и являются критериями подобия. Любая комбинация из критериев подобия также является критерием подобия рассматриваемых физических явлений [3]. Такие комбинации должны включать отношения величин, описывающих различные стороны процессов. Например, количество запасенного тепла и количество отводимого тепла, нагрузки и прочность элементов.

Размерные физические параметры, входящие в критерии подобия, могут принимать для подобных систем сильно различающиеся значения; одинаковыми должны быть лишь безразмерные критерии подобия [7].

В устройствах МСТ одновременно могут действовать силы различной природы: силы тяжести, инерции, поверхностного натяжения, электростатические, электромагнитные, магнитные, трения. Действие различных сил, меняющихся по разным законам при изменении линейных

размеров, приводит к необычным для макроустройств эффектам, позволяющим существенно улучшить электрофизические параметры устройств.

Рассмотрим действие обобщенных сил (F , M) при механическом перемещении и уменьшении линейных размеров в l раз.

Площадь $S \sim [L^2]$ уменьшается в l^2 раз, объем $V \sim [L^3]$ в l^3 раз, масса объекта $m \sim [L^3]$ в l^3 раз.

Перемещение тела под действием силы F происходит с ускорением

$$a = \frac{F}{m} \sim [L^F][L^{-3}], \quad (2)$$

т.е. изменение ускорения на три порядка больше изменения масштаба сил $[L^F]$.

При перемещении тела за время t под действием силы F с линейным увеличением скорости до половины пути $l/2$ и линейным замедлением на остальной части пути

$$\begin{aligned} \frac{l}{2} &= \frac{a\left(\frac{t}{2}\right)^2}{2}; \\ l &= \frac{at^2}{4} = \frac{Ft^2}{4m}; \\ t &= \left(\frac{4ml}{F}\right)^{0,5} \sim \frac{([L^3][L])^{0,5}}{[L^{0,5F}]} \sim [L^2][L^{-0,5F}] \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим изменения действия различных сил при изменениях линейных размеров элементов МЭМС.

1. Сила поверхностного натяжения точно пропорциональна длине $[L^1]$ потому, что она зависит только от длины.

$$F = \alpha \cdot l \sim [L^1], \quad (4)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения.

2. В электрических цепях при постоянной напряженности электрического поля $El = U \sim [L^1]$. Зависимость производных величин от линейных размеров приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость электрических величин от масштаба

Параметр	Формула	Масштаб
Сопротивление	$R = \frac{\rho l}{S}$	L^{-1}
Емкость	$C = \frac{\varepsilon S}{d}$	L^1
Индуктивность, взаимоиндукция	L, M	L^1
Ток	$I = \frac{U}{R}$	L^2
Мощность	$P = U \cdot I$	L^3
Мощность потерь	$P_{nom} = \frac{U^2}{R}$	L^3

Потенциальная энергия плоского конденсатора рассчитывается по формуле

$$W = \frac{-Cu^2}{2} = \frac{-\varepsilon_r \varepsilon_0 b l u^2}{2} \sim \frac{[L^2]}{[L]} [L u^2] \sim [L] [L u^2], \quad (5)$$

u – напряжение между пластинами конденсатора;

ε_0 – диэлектрическая постоянная;

b – ширина пластин.

При изменении взаимного положения (уменьшении зазора между пластинами или площади перекрытия) пластин конденсатора работа, выполняемая силой взаимодействия, зависит от изменения емкости конденсатора. Сила может определяться по формулам для случаев, представленных на рисунке 1 ($U = const$) [8].

$$F_x = \frac{\partial W}{\partial l} = \frac{u^2}{2} \frac{\partial C}{\partial l}. \quad (6)$$

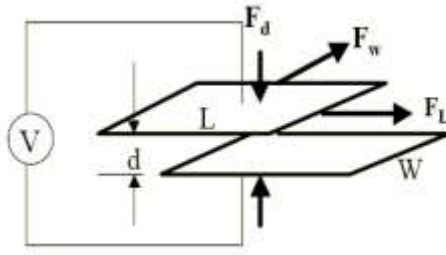


Рис. 1 – Электростатические взаимодействия

Потенциальная энергия будет пропорциональна $W \sim [L^1][L^{U^2}] \sim [L^3]$.

Электростатические силы при изменении одного из параметров конденсатора (зазора или смещении по одной из осей пластин) окажутся равными:

$$\begin{aligned}
 F_d &= \frac{\partial W}{\partial d} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 b l}{d^2} u^2 \sim [L^2], \\
 F_b &= \frac{\partial W}{\partial b} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 l}{d} u^2 \sim [L^2], \\
 F_l &= \frac{\partial W}{\partial l} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 b}{d} u^2 \sim [L^2]
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Таким образом, изменение размера по одной из координат в l раз приводит к изменению силы в l^2 раз.

3. Электромагнитная сила F возникает в результате взаимодействия тока I , протекающего через проводник, с магнитным полем с индукцией B , созданной магнитным потоком Φ . Согласно закону Фарадея, на проводник с током длиной l действует сила F , перемещающая проводник на расстояние dx . Если магнитное поле создается постоянным магнитом (см. рис. 2) [9]

$$F = i \frac{d\psi}{dx} = i \frac{B \cdot l \cdot dx}{dx} = B \cdot l \cdot i \sim [L^3],
 \tag{8}$$

где $d\psi = d\Phi$ – приращение потокосцепления;
 $B = \text{const}$.

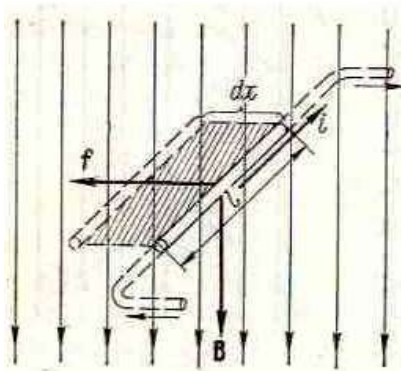


Рис. 2 – Магнитоэлектрические взаимодействия

За. При электромагнитном взаимодействии между двумя контурами с током энергия магнитного поля системы равна

$$W_M = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M \cdot i_1 i_2, \quad (9)$$

где L_1 , L_2 и M – индуктивность первого и второго контура и их взаимоиנדукция соответственно.

Электромагнитная сила, стремящаяся изменить координату l , определяющую взаимное положение контуров, зависит только от M

$$F_{ЭМ} = \left(\frac{\partial W_M}{\partial l} \right) \Big|_{U=const} = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial l} \sim [L^2][L^2][L^0] \sim [L^4]. \quad (10)$$

Т.е., при уменьшении длины проводника в 2 раза сила уменьшается в 16 раз. Изменение электромагнитной силы значительно резче, чем в случае действия электростатической силы $\sim [L^2]$ (см. формулу 7). Это является причиной того, что электромагнитные силы обычно не используются в МЭМС двигателях. Более эффективными становятся электростатические двигатели. Такому переходу способствуют также сложность создания электромагнитного поля (сложность использования тонких проводов, их сопротивление и, соответственно, потери, увеличиваются), в то время, как уменьшение зазоров увеличивает электрическое взаимодействие и проще реализуется.

Итак, в МЭМС действуют силы, изменяющиеся пропорционально различным степеням линейного размера:

$F \sim [L^1]$ – силы поверхностного натяжения;

$F \sim [L^2]$ – электростатические силы; силы, создаваемые пневматическим и гидравлическим давлением; биологические силы, определяемые поперечным сечением мышц;

$F \sim [L^3]$ – электростатические силы, при использовании улучшенного теплоотвода для повышения плотности тока в проводниках, электромагнитные силы;

$F \sim [L^4]$ – силы электромагнитного взаимодействия.

В. Триммер предложил ввести «вектор сил», связанный зависимостью от линейного размера, в виде вектор-столбца [10]:

$$F = [L^F] = \begin{bmatrix} L^1 \\ L^2 \\ L^3 \\ L^4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Тогда связанные с действием сил величины ускорений, времени отработки (быстродействия), мощности, удельной мощности, мощности потерь могут быть выражены следующими «векторами»:

$$a = [L^F][L^{-3}] = \begin{bmatrix} L^{-2} \\ L^{-1} \\ L^0 \\ L^1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Отсюда следует, что ускорение увеличивается при уменьшении размеров для $F \sim [L^1]$ и $F \sim [L^2]$. Из выражения этого «вектора» следует, что время, необходимое для выполнения действия при уменьшении размеров, остается постоянным только для наихудшего случая $F \sim [L^4]$, а при остальных масштабах силы быстродействие увеличивается:

$$t = \begin{bmatrix} L^{1,5} \\ L^{1,0} \\ L^{0,5} \\ L^0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Результаты проведенного анализа связи основных величин, характеризующих состояние механических динамических систем, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – «Вектор сил»

Шкала силы, F	Ускорение, a	Время, t	Плотность мощности P/V_0	Плотность мощности потерь
1	-2	1,5	-2,5	–
2	-1	1,0	-1,0	-2
3	0	0,5	0,5	-1
4	1	0	2,0	0

Мощность P может быть рассчитана по формуле, с учетом данных приведенных в табл. 2

$$P = \frac{F \cdot l}{t} . \tag{14}$$

Согласно таблице 2, суммируя показатели степеней величин, определяющих P , имеем

$$P = \begin{bmatrix} L^1 \\ L^2 \\ L^3 \\ L^4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^1 \\ L^1 \\ L^1 \\ L^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^{-1,5} \\ L^{-1,0} \\ L^{-0,5} \\ L^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^{0,5} \\ L^{2,0} \\ L^{3,5} \\ L^5 \end{bmatrix} \tag{15}$$

Удельная мощность для различных сил вектора Триммера

$$\frac{P}{V} = \begin{bmatrix} L^{-2,5} \\ L^{-1,0} \\ L^{0,5} \\ L^{2,0} \end{bmatrix} \tag{16}$$

При проектировании МЭМС вместо мощности часто используется понятие удельной мощности, равной работе сил за единицу времени t под массой единичного объема V_0 при ее перемещении на пути l за время t

$$\frac{P}{V_0 t} = \frac{F \cdot l}{V_0 t} \sim [L^F][L^1][L^{-3}][T^{-1}] = [L^F][L^{-2}][T^{-1}]. \quad (17)$$

Для случая магнитного действия, рассеиваемая мощность определяется потерями в проводниках. Мощность потерь при неизменной плотности тока

$$P_R = I^2 R \sim [L^4][L^{-1}] \sim [L^3], \quad (18)$$

т.е. уменьшается в l^3 раз.

Плотность мощности потерь $P_R/V_0 \sim [L^0]$ – инвариантна к изменению масштаба.

В производных величинах порядок их зависимости от масштаба сил определяется путем суммирования порядков основных величин для соответствующего порядка шкалы сил и формулам связи с основными величинами.

При различных исходных предпосылках основные и производные величины, характеризующие свойства системы, могут иметь различные зависимости от параметра масштаба. Точная зависимость электростатических сил зависит от изменений напряженности электрического поля E , электромагнитного взаимодействия – от параметров электрического и магнитного поля.

Выводы. Микросистемная техника является связующим звеном с нанотехнологиями: исследования в нанодиапазоне осуществляются с использованием микросистемных инструментов, а приборная реализация квантово-механических эффектов, присущих наноразмерной области, осуществляется в виде МСТ-устройств.

Использование теории подобия и размерностей физических величин при проектировании МЭМС исходит из тех же предпосылок, что и аналитический расчет: должны быть заданы граничные условия, параметры и координаты исследуемого процесса. Это позволяет оценивать изменение физических величин, характеризующих микро- и наносистемы по сравнению с макросистемами, вплоть до диапазона размеров, в котором существенными оказываются квантово-механические эффекты. Кроме того, применение ТП и РФВ обеспечивает ориентацию относительно правильности результатов, полученных другими методами для микродиапазона размеров. Учет характера изменения действующих сил микросистемы помогает рациональному выбору принципа функционирования устройств.

Уменьшение размеров компонентов обеспечивает повышение быстродействия устройств (и собственной резонансной частоты). Повышается чувствительность датчиков неэлектрических величин. Электростатические двигатели становятся эффективнее электромагнитных. Микробалки становятся эффективными датчиками температуры, являются

перспективными чувствительными элементами для инфракрасного видения. Снижается энергопотребление МСТ-устройств.

МСТ-устройства являются микроминиатюрными информационно-управляющими системами, пригодными для производственных технологий, способными удовлетворить различным требованиям (интеллектуальности, цифровому представлению информации, многофункциональности, высокой чувствительности и точности, низкой стоимости при массовом производстве и использовании групповых технологий производства).

Список литературы: 1. Дрекслер, К.Э. Машины созидания [Текст] / К. Э. Дрекслер. – Энкор Букс, 1986. – 386 с. 2. Семенец В.В. Введения в мікросистемну техніку та нанотехнології: підручн. для ВНЗ [Текст] / В. В. Семенец, І.Ш. Невилюдов, В.А. Палагін. – Х.: Тов. «Компанія СМІТ», 2011. – 416 с. 3. Алабужев, П.М. Теория подобия и размерностей. Моделирование: Уч. пособ. [Текст] / П.М. Алабужев, В.Б. Геронимус, Л.М. Минкевич, Б.А. Шеховцов. – М.: Изд. «Высш. шк.», 1968. – 208 с. 4. Большой энциклопедический словарь «Физика» [Текст] / Гл. ред. А. М. Прохоров. – М.: Науч. изд-во «Больш. Рос. Энциклопедия», 4-ое стереотип. изд., 1999. – 944 с. 5. Клайн, С.Дж. Подобие и приближенные методы [Текст] / пер. с англ. под ред. И.Т.Алабьева, К.Д. Воскресенского. – М.: Изд. «Мир», 1968. – 304 с. 6. Бурдун, Г.Д. Единицы физических величин. Справочник [Текст] / Г.Д. Бурдун, В.А. Базакуца. – Х.: Вища школа. Изд. ХГУ, 1984. – 208 с. 7. Павловський М. А. Теоретична механіка [Текст] / М. А. Павловський. – Київ: Техніка, 2002. – 510 с. 8. *Tai-Ran Hsu*. MEMS and Microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering / *Tai-Ran Hsu*. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008. – 546 p. 9. *Нейман, А.Р.* Теоретические основы электротехники: Учебник [Текст] / *А.Р. Нейман, К.С. Демирчян* / Изд. 3-е, Т.1. Л.: Энергоиздат., 1981. – 534 с. 10. *Trimmer, W.S.N.* Sensors and Actuators [Text] / *W.S.N. Trimmer* / *JSA*, Vol.19, N3, September, 1982. P. 267-287.

Bibliography (transliterated): 1. *Dreksler, K.Je.* Mashyny sozidanija. Jenkor Buks, 1986. Print. 2. *Semenec', V.V., I. Sh. Nevljudov, V. A. Palagin.* Vvedennja v mikrosistemnu tehniku ta nanotehnologij: pidruchn. dlja VNZ. Kharkiv: Tov. «Kompanija SMIT», 2011. Print. 3. *Alabuzhev, P.M. et al.* Teorija podobija i razmernostej. Modelirovanie. Moscow: Vyssh. shk., 1968. Print. 4. *Prohorov, A. M. et al.* Bol'shoj jenciklopedicheskiy slovar' «Fizika». Moscow: Nauch. izd-vo «Bol'sh. Ros. Jenciklopedija», 1999. Print. 5. *Klajn, S. Dzh.* Podobie i priblizhennye metody. Moscow: Mir, 1968. Print. 6. *Burdun, G.D. and V.A. Bazakuca.* Edinicy fizicheskikh velichin. Spravochnik. Kharkiv: Vishha shkola. Izd. HGU, 1984. Print. 7. *Pavlov's'kij M. A.* Teoretichna mehanika. Kiiv: Tehnika, 2002. Print. 8. *Tai-Ran Hsu.* MEMS and Microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2008. Print. 9. *Nejman, A.R. and K.S. Demirchjan.* Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: Uchebnik. Leningrad: Jenergoizdat., 1981. Print. 10. *Trimmer, W.S.N.* Sensors and Actuators. *JSA*, Vol.19, N3, September, 1982: 267-287. Print

Поступила (received) 15.06.2014