

УДК 621.3.049.76, 530.17

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д.т.н. И.Ш. Невлюдов, к.т.н. В.А. Палагин, Ю.И. Богдан, Харьковский национальный университет радиозлектроники

Уменьшение размеров, электромеханические и другие аналогии существенно меняют свойства компонентов МЭМС. Эти эффекты должны учитываться.

Зменшення розмірів, електромеханічні та інші аналогії суттєво змінюють властивості компонентів МЕМС. Ці ефекти мають бути враховані.

Scaling, electromechanical and other analogies essentially change properties of MEMS components. These effects should be taken into consideration.

Ключевые слова: МЭМС, электромеханические аналогии, изоморфизм, теория подобия, теория размерностей физических величин, пьезоэлектрики.

Особенностями микросистемной техники (МСТ) являются объединение в одном чипе (корпусе) устройств различной физической природы (механических, электрических, акустических, оптических, магнитных, тепловых, аэро-, гидро- химических и других взаимодействующих компонентов), а также изменение электрофизических параметров систем вследствие уменьшения их размеров. Поэтому анализ физико-математических основ микроминиатюризации является актуальной задачей при создании оригинальных компонентов микросистемной техники.

Такими основами являются принципы изоморфизма, электромеханических (и других) аналогий, теории подобия и размерностей физических величин (ТП и РФВ).

Изоморфизм процессов выражается во взаимоднозначном соответствии элементов, свойств, функций и отношений подсистем, состоящих из деталей и узлов различной природы [1].

Так, явления электро- и теплопроводности, диффузии, переноса количества движения при вязком течении жидкости и другие описываются градиентом соответствующей переменной (u – напряжения, T – температуры, C – концентрации вещества, v – скорости течения) по координатам, умноженным на соответствующий коэффициент (σ – электропроводность, λ – теплопроводность, D – диффузия, η_v – динамическая вязкость). Поэтому при введении соответствующих коэффициентов пересчета каждое из перечисленных явлений можно моделировать любым другим с учетом реальных ограничений условий их протекания, удобства и точности измерения соответствующих переменных.

Различают геометрические, механические (кинематические, динамические), физические и другие виды подобий, которые можно характеризовать понятиями аналитической механики: обобщенными

силами, массами, координатами, скоростями и ускорениями, различными удельными величинами.

Электромеханические аналогии позволяют описать действие в едином устройстве микромеханических сенсоров и (или) актюаторов совместно с микроэлектронной схемой обработки и передачи информации [2].

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

Коэффициенты пропорциональности для каждой из величин называются коэффициентами подобия, характеристическими числами, критериями подобия.

Логической основой теории подобия (ТП) является теория размерностей физических величин (РФВ).

Предположим, что для описания изучаемых явлений используется система с r основными независимыми величинами. (В системе измерений СИ для описания механических процессов достаточно трех основных величин: длины l , м [L]; массы m , кг [M]; времени t , с [T]. Для электромеханических систем необходимо добавить еще одну основную величину – силу тока, A [I], 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 $[x_i]$ – основная единица (размерность) величины X_i , $i = 1, 2, \dots, r$;

α_i – отвлеченные положительные или отрицательные числа;

K – числовой коэффициент.

Основными видами взаимодействия в структурах МСТ являются механические, полевые (электростатические, электромагнитные, магнитные, тепловые, оптические, инерционные, гравитационные) и ядерные.

Каждый вид взаимодействия связан с определенной характеристикой объектов, частиц. Так, взаимодействие неподвижных друг относительно друга тел, обладающих зарядом, согласно закону Кулона зависит от величины заряда и расстояния между ними, но не зависит от их массы, а гравитационное взаимодействие определяется только массами тел и расстоянием между ними (закон Ньютона).

Состояние электрических цепей под действием приложенного к ним напряжения (или тока в них) определяется законами Кирхгофа, а механических систем

под действием обобщенных сил – принципом Даламбера баланса сил системы с учетом инерции в каждый момент времени.

Электромагнитные взаимодействия описываются законом Фарадея, электромеханические – уравнениями Лагранжа – Максвелла и т.д.

При проектировании объектов микросистемной техники разработчик должен учитывать изменение физических величин в результате уменьшения линейных размеров их элементов при сохранении угловых размеров, определяющих форму тел (scaling) [3].

Действие различных сил изменяется по разным законам при изменении линейных размеров, изменяются соотношения сил, действующих в устройствах МСТ одновременно. Вследствие того, многие физические величины, характеризующие микро – и наносистемы, чрезвычайно сильно отличаются от величин макросистем.

Будем считать при этом постоянными величинами, определяющие свойства материалов: плотность ρ , модули Юнга E , сдвига, диэлектрическую и магнитную проницаемость ϵ , μ , другие модули и константы.

При пропорциональном уменьшении линейных размеров тел и сохранении углов, определяющих форму, запишем изменения величин в зависимости от масштаба основных величин размерности [L].

Площадь $S \sim [L^2]$; объем $V \sim [L^3]$; масса $m \sim V \sim [L^3]$.

В электрических цепях при постоянной электрической напряженности поля E напряжение $u = El \sim [L^1]$. Зависимость производных электрических величин от линейных размеров (сопротивления R , индуктивности L и взаимной индуктивности M ,

$$R = \rho \frac{l}{S} \sim [L^{-1}]; L, M \sim [L^1], I \sim [L^2]; p \sim [L^2].$$

Ниже рассмотрены законы изменения различных сил.

1. Сила поверхностного натяжения F пропорциональна длине

$$F = cl \sim [L^1]. \quad (2)$$

2. Сила электростатического взаимодействия между обкладками плоского конденсатора от изменения зазора d или смещения по одной из осей плоскости b или l (см. рис. 1), определяется как производная потенциальной энергии по меняющемуся линейному размеру [4].

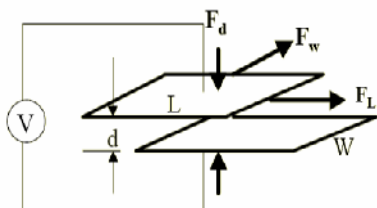


Рис. 1. Силы электростатического взаимодействия

$$F_d = \frac{\partial w}{\partial d} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon \epsilon_2 b l}{d^2} u^2 \sim [L^2]$$

$$F_b = \frac{\partial w}{\partial b} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r l}{d} u^2 \sim [L^2] \quad (3)$$

$$F_l = \frac{\partial w}{\partial l} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r b}{d} u^2 \sim [L^2]$$

При уменьшении размеров элементов сила электростатического взаимодействия уменьшается по квадратичной зависимости.

3. Электромагнитная сила взаимодействия тока I , протекающего по проводнику, с полем постоянного магнита, создающего индукцию B , изменяется согласно закону Фарадея пропорционально кубу линейного размера:

$$F = I \frac{d\psi}{dx} = I \frac{B l dx}{dx} = B l I \sim [L^3], \quad (4)$$

где ψ - потокосцепление.

4. При электромагнитном взаимодействии между двумя контурами с током электромагнитная сила, стремящаяся изменить координату l , определяющую взаимное положение контуров, зависит только от взаимной индукции M

$$F_{эм} = \left(\frac{\partial w_m}{\partial l} = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial l} \right) \sim [L^2] [L^2] [L^0] \sim [L^4]. \quad (5)$$

В. Триммер [5] предложил ввести параметр «вектор сил», связанный с зависимостью различных сил от линейного размера, в виде вектор – столбца

$$F = [L^F] = \begin{bmatrix} L^1 \\ L^2 \\ L^3 \\ L^4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Связь производных величин – ускорений, времени отработки, удельные плотности мощности и мощности потерь определяются по формулам (7...9) и отражены в таблице 1:

$$a = \frac{F}{m} \sim [L^F] [L^{-3}] \quad (7)$$

$$t = \left(\frac{4ml}{F} \right)^{0,5} \sim [L^2] [L^{-0,5F}] \quad (8)$$

$$P = \frac{Fl}{t}; \frac{P}{V_0} = \frac{Fl}{V_0 t} \quad (9)$$

Таблица 1

«Вектор сил» и производных величин

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

Сравнивая формулы (3), (4) и (5), видим более медленное уменьшение сил электростатического взаимодействия относительно сил электромагнитных формул (4) и (5). Вследствие этого, в диапазоне микроразмеров электромагнитные электродвигатели становятся менее эффективными чем электростатические. Кроме того, реализация индуктивности затруднена из-за малых сечений проводников, повышения потерь в них. Электростатическое возбуждение в микро-электромеханических системах (МЭМС) оказывается предпочтительным, в том числе для электродвигателей.

Различный характер изменения сил, действующих в МЭМС, позволяет выбирать наиболее целесообразные принципы функционирования устройств для конкретных условий.

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, и позволяет оценивать изменение физических величин, характеризующих микро- и наносистемы по сравнению с макросистемами, вплоть до диапазона размеров, в котором существенными оказываются квантово-механические эффекты. Это обеспечивает ориентацию относительно правильности результатов, полученных другими методами для микродиапазона размеров. Учет характера изменения действующих сил микросистемы помогает рациональному выбору принципа функционирования устройств.

Использование в одной микросхеме, корпусе элементов различной физической природы требует рассмотрения их взаимодействия, взаимовлияния, преобразования одних видов энергии в другие, использования свойств компонентов с целью достижения максимальных значений параметров устройств и систем.

Механические взаимодействия связаны с передачей обобщенных сил и напряженно-деформированным состоянием элементов конструкции, с преобразованием различных видов энергии и их дистанционной передаче.

Для моделирования устройств МСТ необходима разработка моделей всех элементов, понимание механизмов взаимодействия системы в статических и динамических режимах, умение управлять параметрами компонентов и всей системы, учитывать влияние дестабилизирующих факторов внешней среды.

В аналитической механике механические элементы выступают в виде обобщенной массы (m , полярного, осевого момента инерции J_p или тензора инерции J),

упругости (жесткости) K_{MEX} элементов механических потерь (трения и др.) R_{MEX} . Параметры движения, вызванного действием обобщенных сил (F_i, M_i), выражаются в обобщенных координатах q_i и их производных \dot{q}_i, \ddot{q}_i .

Если сила действует на последовательно соединенные элементы массы, упругости и потерь, то она уравновешивается совместной реакцией всех элементов (см. рис. 2)

$$\bar{F} = (j\omega m + \frac{K_{MEX}}{j\omega} + R_{MEX}) \cdot \bar{q}. \quad (10)$$

В электрической цепи, содержащей сосредоточенные элементы – индуктивность L , емкость C и активное сопротивление R , – под действием синусоидального напряжения возникают колебания, определяемые вторым законом Кирхгофа (рис. 2)

$$\bar{U} = (j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R) \bar{i}. \quad (11)$$

Между механическими величинами уравнения (10) и электрическими в уравнении (11) можно отметить взаимно однозначное соответствие, приведенное в таблице 2. Это соответствие образует первую систему аналогий или аналогий «сила – напряжение».

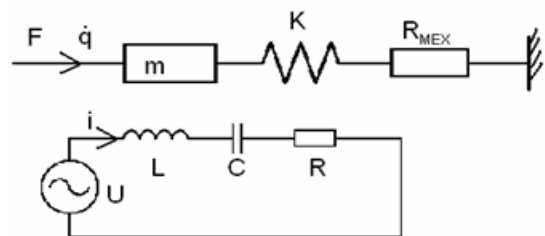


Рис. 2. Первая система («сила – напряжение») электромеханических аналогий

Для параллельного соединения электрических элементов L, C, R (рис. 3) согласно первому закону Кирхгофа суммарный ток $i(t)$, потребляемый схемой от питающего источника, распределяется по параллельным ветвям согласно равенству

$$i(t) = C \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R} + \frac{1}{L} \int U dt, \quad (12)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = C \frac{d^2U}{dt^2} + \frac{dU}{R dt} + \frac{U}{L}. \quad (12')$$

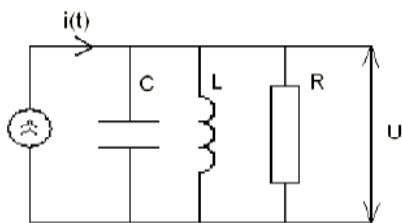


Рис. 3 Параллельное соединение электрических элементов

Сравнением дифференциальных коэффициентов уравнений (10) и (12) устанавливаем аналогии системы «сила – ток»: силы F – производной $\frac{di}{dt}$, упругости –

величине $\frac{1}{L}$, массы – емкости C , потерь – величине $\frac{1}{R}$ и др. (таблица 2).

Оба варианта электрических аналогий являются двумя различными моделями одной и той же механической системы при соответствующих коэффициентах перед обобщенными координатами и их производными.

При анализе более сложных сочетаний электрических компонентов решается система уравнений, представленная матрицей, строки которой соответствуют узлам без одного, а столбцы – ветвям направленного графа электрической схемы, элементы которой равны нулю, единице или минус единице, если данная ветвь соответственно не соединена с данным узлом, направлена от данного узла, направлена к данному узлу [6].

Для исследования динамики механических систем чаще всего используются уравнения Лагранжа второго рода в обобщенных (независимых) координатах, которые содержат минимальное число уравнений, равное числу степеней свободы, для голономных систем; решаются без учета реакций идеальных связей, по единственному алгоритму. Используя понятие кинетического потенциала $L = T - \Pi$, уравнения Лагранжа механической системы приводятся к виду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_j \text{ для } i = 1, 2, \dots, m. \quad (13)$$

При исследовании динамических процессов в электромеханических системах используются уравнения Лагранжа – Максвелла [7], в которых к системе m уравнений механической системы присоединяются $n - m$ уравнений, соответствующих электрическим обобщенным координатам.

В качестве таких обобщенных координат используются заряды q^e , представляющие количество электричества, протекшего через поперечное сечение проводника, начиная с некоторого момента $t = 0$, образуя систему замкнутых контуров. Обобщенные скорости тогда будут равны контурным токам.

Более сложные электромеханические и другие аналогии имеют место в физических средах, свойства

которых зависят от механических, электрических, магнитных и термодинамических величин [8].

Прежде всего, это относится к диэлектрикам, особенно кристаллическим, имеющим структуру в виде системы электрических заряженных элементарных ячеек, оптических кристаллов и ферромагнитных материалов.

Пьезоэлектрики в электрической области по своим свойствам родственны ферромагнетикам (электрострикция и магнитострикция). Сходными являются и некоторые схмотехнические решения, а методы расчета могут производиться на основе инверсной аналогии.

Т.о. пьезоэффект как сложная совокупность эффектов является многосторонним и связывает упругие, диэлектрические и тепловые свойства пьезокерамики [8]. Состояние пьезокерамики может характеризоваться следующими параметрами: внешними – напряженностью электрического поля E , механическими напряжениями T , температурой θ (интенсивные величины), и внутренними, изменяющимися под воздействием внешних параметров – соответственно, индукцией D (или поляризацией P), механической деформацией S и энтропией σ (экстенсивные величины). Пьезоэлектрикам присущ нелинейный характер эффектов, имеют место эффекты второго и более высоких порядков взаимодействия (рисунок 4).

Процессы в пьезоэлектрической среде (в ПЭ) описывают методами тензорного и матричного анализов. Тензорная форма уравнений является более предпочтительной при решении задач, содержащих координатные преобразования и производные по длине.

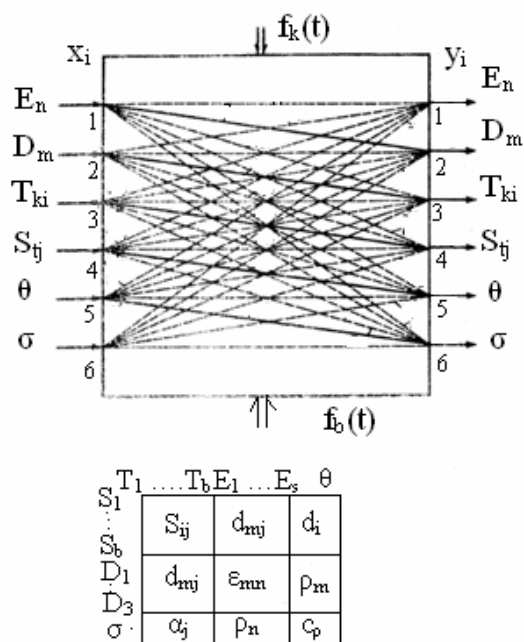


Рис. 4. Пьезоэлемент как многомерный, многосвязный объект управления (а) и матрица 10-го порядка ПЭ (б) [8]

Электромеханические аналогии

	Обобщенные					кинетическая энергия	потенциальная энергия	диссипативная функция Рэлея
Механическая система	силы	координаты q_i	массы	коэффициенты диссипации	коэффициенты упругости			
	F, M	x_i, φ_i	m, J	$R_{\text{мех}}$	$C_{\text{мех}}$	$\frac{1}{2}m(\dot{q})^2$	$\frac{1}{2}cq^2$	$\frac{1}{2}R_{\text{мех}}(\dot{q})$
Эл. цепи (I система)	$e(t)$	q^e, i	L	R	$1/C$	$\frac{1}{2}Li^2$	$\frac{1}{2C}(q^e)^2$	$\frac{1}{2}Ri^2$
Эл. цепи (II система)	$\frac{di}{dt}$	U	C	$1/R$	$1/L$	$\frac{1}{2}C\dot{U}^2$	$\frac{1}{2L}U^2$	$\frac{1}{2R}\dot{U}^2$

На практике теплообменом колеблющегося ПЭ с окружающей средой пренебрегают и используют адиабатические уравнения ($\theta d\sigma = 0$).

Пренебрегают также влиянием магнитных полей, вызываемых токами.

Выводы. Уменьшение размеров компонентов обеспечивает повышение их быстродействия (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 различные требования (интеллектуальности, цифрового представления информации, многофункциональности, высокой чувствительности и точности, низкой стоимости при массовом производстве и использовании групповых технологий).

Объединение электрических и механических устройств на низком уровне интеграции также позволяет существенно улучшить электрофизические свойства устройств:

– быстродействие (например, использование акселерометров с емкостными датчиками в подушках безопасности);

– чувствительность емкостных датчиков (на уровне 100 аФ);

– добротность механических колебательных систем (до 10^5).

Кроме того, возможно получение за счет механических элементов больших значений эквивалентных индуктивностей (десятки кГн), а также получение прецизионных пьезоэлектрических позиционеров, пьезодозаторов жидкости и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Черняев, В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров [Текст]: учеб. для вузов / В. Н. Черняев. - 2-е изд, перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1987. - 464 с.
2. Семенець В.В. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології: підручн. для ВНЗ [Текст] / В. В. Семенець, І.Ш. Невлюдов, В.А. Палагін. - Х.: Тов. «Компанія СМІТ», 2011. - 416с.
3. Дрекслер, К.Э. Машины созидания [Текст] / К. Э. Дрекслер. - Энкор Букс, 1986. - 386 с.
4. Tai-Ran Hsu. MEMS and Microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering / Tai-Ran Hsu. - John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008. - 546 p.
5. Trimmer, W.S.N. Sensors and Actuators [Text] / W.S.N. Trimmer/ JSA, Vol.19, N3, September, 1982. P. 267-287.
6. Нейман, А.П. Теоретические основы электротехники: Учебник [Текст] / А.П. Нейман, К.С. Демирчян/ Изд. 3-е, Т.1. Л.: Энергоиздат., 1981. - 534 с.
7. Павловський М. А. Теоретична механіка [Текст] / М. А. Павловський. - Київ: Техніка, 2002. - 510 с.
8. Джагунов, Р. Г. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник [Текст] / Р. Г. Джагунов, А. А. Ерофеев. Спб: Политехника. 1994. 608 с.