

Научно-технические основы применения наноструктурного материаловедения и нанoeлектроники в системах электромеханических преобразователей энергии специального назначения

© С.В. Гандилян, Д.В. Гандилян

¹ Ереванский государственный университет,
375025 Ереван, Армения

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

e-mail: angastroi@mail.ru, david.gandilyan@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 сентября 2018 г.

В окончательной редакции 14 сентября 2018 г.

Принято к публикации 14 декабря 2018 г.

Рассмотрено современное состояние совершенно нового направления науки — микросистемной электромеханики. Проанализированы широкие спектры его практических применений и перспективы дальнейшего развития. Подробно обсуждены два основных пути создания микро- и нанoeлектромеханических преобразователей энергии как базовых элементов микросистемной электромеханики: „сверху вниз“ и „снизу вверх“. Описаны основные технологические приемы конструирования базовых функциональных элементов микросистемной электромеханики, охарактеризованы области их применения в традиционной и новой технике (в информационных и компьютерных технологиях, медицине, аэрокосмических и ракетно-артиллерийских системах и т.д.). Рассмотрены некоторые узловые вопросы обобщенного физико-математического моделирования микроминиатюрных и нанoeлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС). Предложен новый обобщенный подход исследования динамических и энергетических характеристик МЭМС и НЭМС, как сложных динамических систем с бинарно-сопряженными подсистемами. На базе предложенных теоретических принципов и моделей рассмотрены возможности исследования электрофизических характеристик биологических наноструктур.

DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47784.339-18

Введение

Современная электромеханическая наука, прогресс которой базируется на максимальном использовании новейших достижений классической механики и электромеханики, физики полупроводников, атомной физики, термодинамики, физики низко- и высокотемпературной сверхпроводимости, энергетики, наноструктурного материаловедения и нанoeлектроники, кибернетики и т.д., следуя общим тенденциям мирового научно-технического прогресса, развивается по двум магистральным направлениям.

В настоящее время как в практике электромашиностроения, так и в области моделирования и автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей (ЭМП) энергии решается множество задач, связанных с улучшением их энергетических характеристик и массогабаритных показателей, созданием новых видов ЭМП-энергии и их систем. Наряду с традиционным электромашиностроением, являющимся отправной базой для революционных изменений в XX в. в областях электромашиностроения, промышленности, транспорта, бытовой техники и т.д., в настоящее время интенсивно развивается электромашиностроение специального назначения (быстро возрастает роль электромеханики в возобновляемой энергетике, в перспек-

тивной авиакосмической технике, в высокоскоростном транспорте с магнитной левитацией, в новых системах вооружения и т.д.) [1–3].

Наряду с микроэлектроникой, компьютерной техникой, телекоммуникационными системами и т.д., в области современной электромеханики наиболее ярко проявляется необходимость миниатюризации (и сверхминиатюризации) функциональных элементов ЭМП-энергии.

Первое направление развития современной электромеханической науки в научной литературе традиционно толкуется как „макросистемная электромеханика“, второе — как „микросистемная электромеханика“, как важнейшая отрасль современной микросистемной техники (МСТ) [4].

Современная макросистемная электромеханика охватывает ЭМП-энергии (классического и специального назначения) малых, средних и больших мощностей, от микромашин с мощностью не выше 1 kW, являющихся основой автоматизации технологических процессов, до самых мощных электрических машин (гидро- и турбогенераторов для энергогенерирующих систем).

Базовыми объектами исследования современной микросистемной электромеханики являются микроминиатюрные ЭМП-энергии и их системы (Microminiature electromechanical systems — MEMS, МЭМС) и нанoeлектромеханические ЭМП-энергии и их систе-

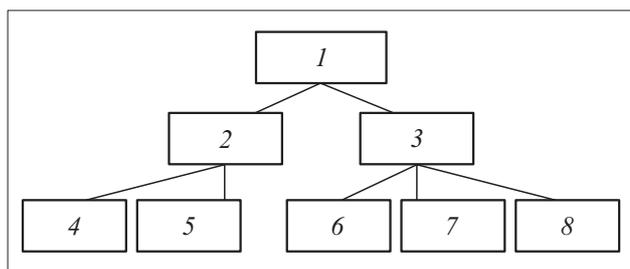


Рис. 1. Классификация ЭМП-энергии по энергетическим и массогабаритным показателям: 1 — современная электромеханика; 2 — микросистемная электромеханика; 3 — макросистемная электромеханика; 4 — наноэлектромеханика; 5 — микроминиатюрная электромеханика; 6 — микроэлектромеханика; 7 — электромеханика в средних диапазонах мощностей; 8 — крупное электромашиностроение.

мы (Nanoelectromechanical systems — NEMS, НЭМС) (рис. 1) [5–7].

Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики

Появление современной микросистемной электромеханики, связанной с очередной высокой стадией развития технических и технологических основ микромеханики и микроэлектроники, благодаря которым стало возможным создание малогабаритных интегрированных многоэлементарных и многофункциональных систем миниатюрных ЭМП-энергии (МЭМС), объединенных в общую интегральную схему [8]. Это позволило при решении поставленных первостепенных задач достичь нового качественного уровня в массогабаритных показателях, быстродействии, функциональных возможностях, производительности, снижении стоимости и т.п.

При этом разнообразные приборы, схемы, устройства и подсистемы, в которых динамические процессы энергообразования носят электромеханический характер, а структурные функциональные элементы имеют размер (по меньшей мере в одном направлении) $0.1\ \mu\text{m} < l < 0.1\ \text{mm}$, могут быть частью или законченным изделием МЭМС [9–11].

В настоящее время качественно новый уровень развития современной электромеханики предопределяет внедрение новейших достижений нанонауки и нанотехнологии в тех отраслях естествознания, инженерных наук и технологии, которые имеют базовое значение для науки в области электромеханики и промышленности в целом.

Для современной электромеханики во всем диапазоне энергетического спектра первостепенной задачей является развитие электротехнического материаловедения. В настоящее время проводятся активные исследования по практическому применению электрических матери-

алов различного назначения, изготовленных по нанотехнологиям.

Среди наноматериалов, перспективных в применении к электромашиностроению, следует выделить: аморфные сплавы, графен, магнитную ферробумагу, углеродные нанотрубки, металлические порошки в электропроводящих слоях, новые фрикционные и электроизоляционные материалы и др. Удельные магнитные потери магнитопроводов из аморфных и нанокристаллических сплавов имеют значительно меньшие значения по сравнению с электрической сталью и ферритами (менее $0.1\ \text{W/kg}$ при $f = 60\ \text{Hz}$). Они обладают высокой относительной начальной магнитной проницаемостью, а также индукцией насыщения на промышленных и высоких частотах ($B_s = 1.2\text{--}1.3\ \text{T}$). Например, графен — новейший наноструктурный материал, обладающий уникальными токопроводящими свойствами, которые позволяют ему служить как очень хорошим проводником, так и полупроводником. Кроме того, графен чрезвычайно прочен и выдерживает огромные нагрузки как на разрыв, так и на прогиб. Указанные свойства актуальны для проводниковых материалов ЭМП-энергии, работающих в условиях интенсивных динамических нагрузок.

Еще одним примером применения нанотехнологии является изготовление обмоточного провода с использованием тонкодисперсного порошка оксида кремния, введенного химическим способом в полиамидную изоляцию. Этот метод позволил увеличить качество готового провода и повысить его температурный индекс до 280°C .

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что внедрение наноструктурных электротехнических материалов в производстве ЭМП-энергии в макросистемной электромеханике может способствовать комплексному повышению уровня современного электромашиностроения (особенно крупному). Однако этот процесс пока ограничивается технико-технологическими трудностями изготовления и высокой стоимостью указанных материалов [12–14].

В случае использования нанотехнологий и наноматериалов в микросистемной электромеханике следует использовать термин наносистемная электромеханика.

Это касается тех случаев, когда размеры и мощности ЭМП-энергии имеют мощности, соразмерные с мощностью биологических преобразователей энергии (при этом наименьшие из сделанных человеком устройств соизмеримы с наибольшими молекулами живых организмов). На этом уровне мощностей господствует одно из стратегических направлений современной нанонауки — наноэлектромеханика, которая рассматривает электромеханические системы (НЭМС) со структурными функциональными элементами размером (хотя бы в одном направлении) $10_{\text{nm}} < l < 100_{\text{nm}}$ [15,16].

Решение первостепенных задач современной микросистемной электромеханики требует дальнейшего глубокого изучения строения вещества, синтеза процессов в веществе, а также установления методов получения кристаллической решетки проводников, диэлектриков,

полупроводников, диамагнетиков, ферромагнетиков с закономерным распределением атомов и молекул в зависимости от предлагаемых свойств и назначения этих материалов, создания проводников и полупроводников на базе полимерной и других химических соединений. Необходимо резкое повышение качества атомно-молекулярных композиций и композиционных материалов для установок непосредственного преобразования тепловой, солнечной, атомной, химической энергий в электрическую энергию с высоким КПД. Наиболее перспективным с этой точки зрения является современное наноструктурное материаловедение.

В работах авторов [17,18] осуществлен сравнительный анализ динамических и структурных характеристик и классификация по принципу действия базовых функциональных элементов МЭМС и НЭМС — микро- и нано ЭМП-энергии, с точки зрения микро- и наноминиатюрных трактовки основных принципов и теоретических положений современной электрофизики.

Было установлено, что, несмотря на имеющиеся между МЭМС и НЭМС сходные характеристики по функциональным принципам в МСТ, между ними имеется кардинальное отличие по узловым признакам динамического и энергетического состояния.

Основные особенности МЭМС и НЭМС могут быть вкратце сформулированы следующим образом.

- В наносистемной технике используются предельные возможности сверхминиатюризации электрических, магнитных, механических и биологических систем.

- Если для МЭМС процесс миниатюризации функциональных элементов, подчиняясь общим закономерностям развития современной микросистемной техники, можно осуществить с помощью моделей и технологии типа „сверху вниз“ (нисходящее производство), которые в неявной форме предполагают, что уменьшение размеров структур не влияет на их функциональные свойства (и принцип функционирования), то при производстве наносистемной техники (в том числе и НЭМС) главенствующее значение принимают технологии типа „снизу вверх“ (восходящее производство), основой которых служат атомный и молекулярный синтезы (так называемый „молекулярный монтаж“ или „атомная сборка“).

- Так как в МЭМС динамические процессы преобразования электромагнитного поля обусловлены силой тяжести (инертностью) микромеханических элементов, то их физико-математическое моделирование можно осуществить с помощью классических законов электрофизики Фарадея–Максвелла (и соответственно классической теории электрических цепей).

- Так как в наносистемной технике (и соответственно в НЭМС) силы тяжести незначительны по сравнению с силами химических связей межатомного и межмолекулярного воздействий, то в задачах физико-математического моделирования НЭМС законы классической электрофизики (и соответствующая теория электрических цепей) должны быть скорректированы в соответствии с квантовыми законами электрофизики.

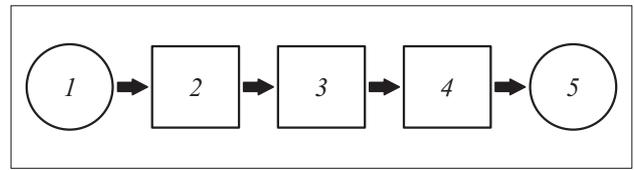


Рис. 2. Общая структура НЭМС: 1 — входной сигнал; 2 — сенсор; 3 — схема управления и обработки сигнал; 4 — наноактюатор; 5 — выходной сигнал.

- Если изделия микросистемной техники в области МЭМС по структуре чисто технические, то в области наносистемной техники необходимы фундаментальные исследования возможности создания изделий НЭМС с совмещением гармонично действующих технических и природных функциональных элементов.

- В настоящее время на основе подражания природным аналогам (например, с использованием возможностей и функциональных свойств биологических наноструктур) ведутся работы по созданию НЭМС, в которых часть функций выполняют элементы живых организмов (биомолекулы, бактерии и т.д.). Так как созданные человеком НЭМС могут функционировать в широком диапазоне температур (от низких температур вплоть до нескольких сотен градусов) и в различных агрессивных средах, то естественно, что в настоящее время один из главных мотивов, побуждающих нас к изучению живого вещества в наномасштабе — это мотив технологический. Можно утверждать, что сегодняшнее развитие наносистемной электромеханики предопределяет путь к созданию природоподобной техники [19,20].

Развитию НЭМС способствовали следующие открытия последнего двадцатилетия:

- создание углеродных нанотрубок и применение зондов микроскопов и литографических методов для сборки получаемых трубок в отдельные устройства;

- возможность размещения сконструированных отдельных молекул в зазоре между электродами и измерения переноса заряда через эти молекулы;

- развитие зондовых методов для манипулирования отдельными атомами вещества и создания наноструктур;

- разработка химических методов синтеза нанокристаллов и методов их объединения в более крупные упорядоченные структуры;

- выделение биохимических „молекулярных двигателей“ и их включение в небиологическую среду [21,22].

Элементной базой НЭМС и наноробототехники являются углеродные нанотрубки (обладающие исключительными физическими и электрическими свойствами), углеродные каркасные структуры (например, фуллерен C₆₀), молекулярные моторы, молекулярные переключатели, комплексы ДНК и т.д., или их подсистемы, которые могут быть частью или законченным изделием НЭМС. Общая структура НЭМС включает в себя чувствительные элементы (датчики информации или

наносенсоры), каналы передачи энергии и информации, управляющие устройства и исполнительные механизмы (например, наноактуаторы) (рис. 2) [15].

Вопросы обобщенного физико-математического моделирования и автоматизированного проектирования МЭМС и НЭМС

На рубеже XX и XXI столетий прогресс в области теории и моделей ЭМП-энергии и их систем (особенно на микросистемном уровне) достигался в основном путем использования более мощных компьютерных программ и в гораздо меньшей мере из-за появления новых теоретических представлений и моделей [23].

Для дальнейшего развития микросистемной электромеханики (особенно в наноструктурном уровне) представляется особенно важным совершенствование методов теоретических построений и моделей, углубленного изучения электромагнитных и тепловых полей, уточнение численных методов исследования переходных электрофизических процессов в задачах автоматизированного проектирования МЭМС и НЭМС.

В настоящей работе предложен новый подход к решению некоторых узловых вопросов обобщенного физико-математического моделирования, позволяющего учитывать большое количество взаимосвязанных факторов, определяющих основные динамические и энергетические характеристики МЭМС и НЭМС.

При этом первостепенным считается, исходя из базовых теоретических и технологических принципов современной электромеханической науки и микроэлектроники, четкое физико-математическое толкование терминов МЭМС и НЭМС и их классификация по динамическим и функциональным характеристикам.

О физических принципах теоретической электромеханики

В большинстве из современных исследований в области теоретических основ электротехники (ТОЭ), особенно в комбинированных задачах моделирования процессов генерирования, передача и потребление электрической энергии как базовые принципы применяются основные положения бинарно-сопряженной электрофизики, где процессы преобразования электромагнитных полей вставляются в зависимости от топологических характеристик их функциональных структур [24].

При этом

- анализ и синтез электротехнических систем с рабочим (динамическим) магнитным полем, в том числе и электро-индукционных (индуктивных) ЭМП, во всем диапазоне энергетического сектора осуществляется на базе обобщенного Лагранжа–Максвелловского пространства энергетического состояния и, следовательно,

уравнениями преобразования электромагнитного поля Фарадея–Максвелла;

- анализ и синтез электротехнических систем с рабочим (динамическим) электрическим полем, в том числе и магнитно-индукционных (емкостных) ЭМП, во всем диапазоне энергетического спектра осуществляется на базе обобщенного бинарно-сопряженного пространства энергетического состояния и соответственной модификацией системы уравнений Фарадея–Максвелла.

Применение вышеуказанного подхода моделирования к электромеханическим системам, аргументирует следующее обобщенное толкование терминов МЭМС и НЭМС.

Определение 1: МЭМС — это многоэлементная динамическая система (совокупность) нелинейно взаимодействующих бинарно-сопряженных (электро-индукционных и магнитно-индукционных) микроминиатюрных электромеханических преобразований энергии (микроминиатюрных ЭМП).

Определение 2: НЭМС — это многоэлементная динамическая система нелинейно взаимодействующих бинарно-сопряженных электро-индукционных и магнитно-индукционных наноэлектромеханических преобразователей энергии (нано-ЭМП).

При вышеуказанной трактовке термина МЭМС их обобщенное физико-математическое моделирование можно осуществить на базе исследования динамических режимов и энергетических характеристик микроминиатюрных ЭМП, исходя из интегрального принципа действия электромеханики [25–27], который выражается в следующих бинарно-сопряженных эквивалентных формах:

- для электро-индукционных (индуктивных) микроминиатюрных ЭМП

$$E_B(t)dt = \sum_1^n d \left(\oint m_i V_i dl_i + \iint d\Psi_i dq_i \right), \quad (1)$$

где n — число контуров тока, m_i — масса, V_i — скорость, q_i — электрический заряд, Ψ_i — магнитное потокоцепление i -го контура тока;

- для магнитно-индукционных (емкостных) микроминиатюрных ЭМП

$$E_B^*(t)dt = \sum_1^h d \left(\oint m_j^* V_j^* dl_j + \iint dQ_j^* d\psi_j^* \right), \quad (2)$$

где h — число контуров напряжения, m_j^* — масса, V_j^* — скорость, Q_j^* — рабочее электрическое потокоцепление, ψ^* — магнитный поток, индуцированный рабочим электрическим полем для j -го контура напряжения.

В уравнениях (1) и (2) энергетические функции $E_B(t)$ и $E_B^*(t)$ характеризуют интенсивность взаимодействия ЭМП с внешней средой. В изолированных электромеханических телах $E_B = E_B^* = 0$.

Для удобства теоретического анализа динамических явлений, особенно при сложных взаимосвязанных электромагнитных контурах, целесообразно представлять

признаки энергетического состояния $\Psi(r, t)$, $q(r, t)$ и $Q^*(r, t)$, $\psi^*(r, t)$ условно в виде аксиальных обобщенных векторов:

$$\Psi = |\Psi|e_\Psi; \quad Q^* = |Q^*|e_{Q^*},$$

$$q = |q|e_q; \quad \psi^* = |\psi^*|e_{\psi^*}, \quad (3)$$

где $e_\Psi, e_q, e_{Q^*}, e_{\psi^*}$ — единичные векторы, отражающие пространственную ориентацию соответствующих осей потокосцеплений.

В общем случае для сложных взаимосвязанных контуров микроминиатюрных ЭМП в (1) и (2) целесообразно признаки энергетического состояния $\Psi(r, t)$ и $Q^*(r, t)$ представлять как функциональные зависимости от вектор-матриц токов — $I(r, t) = \dot{q}(r, t)$ и напряжений $V^*(r, t) = \dot{\psi}^*(r, t)$ в форме следующих разложений:

$$\Psi(\dot{q}(r, t)) = \frac{d\Psi}{d\dot{q}} \dot{q} + \frac{d^2\Psi}{d^2\dot{q}} \dot{q}^2 + \dots,$$

$$Q^*(\dot{\psi}^*(r, t)) = \frac{dQ^*}{d\dot{\psi}^*} \dot{\psi}^* + \frac{d^2Q^*}{d^2\dot{\psi}^*} \dot{\psi}^{*2} + \dots \quad (4)$$

Из (4) в первом приближении имеем

$$\Psi(\dot{q}(r, t)) = \frac{d\Psi}{d\dot{q}} \dot{q} + \dots = \widehat{L}_D I + \dots,$$

$$Q^*(\dot{\psi}^*(r, t)) + \frac{dQ^*}{d\dot{\psi}^*} \dot{\psi}^* + \dots = \widehat{C}_D V^* + \dots, \quad (5)$$

где $\widehat{L}_D = \frac{d\Psi}{d\dot{q}}$ и $\widehat{C}_D = \frac{dQ^*}{d\dot{\psi}^*}$ — матрицы динамических индуктивностей и емкостей микроминиатюрных ЭМП.

Из формул можно получить исходные уравнения электродинамики и электромеханики микроминиатюрных ЭМП в следующих векторно-матричных формах:

- для индуктивных ЭМП

$$\frac{d\Psi}{dt} + \widehat{R}_D J = V_L,$$

$$F_{EM} = -\frac{d}{dx} W_L = -\frac{d}{dx} \left[I^T \frac{d\widehat{L}_D}{dx} I \right],$$

$$W_L = I^T \frac{d\widehat{L}_D}{dx} I, \quad (6)$$

где W_L — энергия рабочего магнитного поля, V_L — напряжение генерации внешних источников энергии, I — матрица токов проводимости, I^T — транспонированная матрица токов, $\widehat{R}_D = \frac{d\Psi}{d\dot{q}}$ — матрица динамических значений внутренних сопротивлений, F_{EM} — электромеханическая сила, действующая на подвижные части микроминиатюрных ЭМП;

- для емкостных ЭМП

$$\frac{dQ^*}{dt} + \widehat{G}_D V^* = I_c^*,$$

$$F_{EM}^* = -\frac{d}{dx^*} W_c = -\frac{d}{dx^*} \left[V^{*T} \frac{d\widehat{C}_D}{dx^*} V^* \right],$$

$$W_c = V^{*T} \frac{d\widehat{C}_D}{dx^*} V^*, \quad (7)$$

где W_c — энергия рабочего электрического поля, I_c^* — токи генерации, поступающие во внешнюю

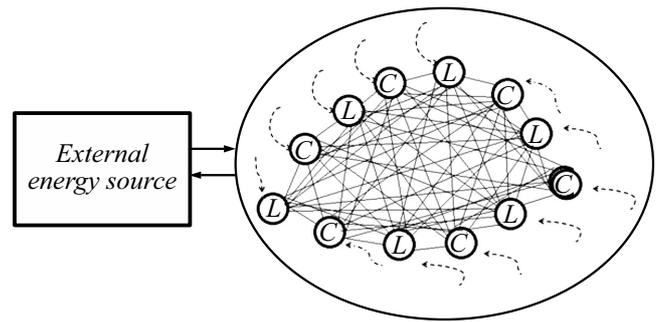


Рис. 3. Обобщенное схематическое представление МЭМС: L — электро-индукционные (индуктивные) микроминиатюрные ЭМП; C — магнитно-индукционные (емкостные) микроминиатюрные ЭМП.

цепь, V^{*T} — транспонированная матрица напряжений, $\widehat{G}_D = \frac{dQ^*}{d\dot{\psi}^*}$ — матрица динамических значений внутренних проводимостей, F_{EM}^* — электромеханическая сила, действующая на подвижные части микроминиатюрных ЭМП.

Не нарушая общности, можно предположить, что рассматриваемая по определению 1 МЭМС, как сложная динамическая система, состоит из нелинейно взаимодействующих электроиндукционных (с количеством M) и магнитно-индукционных (с количеством N) микроминиатюрных ЭМП (рис. 3).

Следовательно, в рассматриваемом случае динамическое поведение МЭМС можно описывать на базе корректировки основных теоретических положений принципа наименьшего действия для диссипативных систем в некотором $\langle M + N \rangle$ -мерном пространстве аксиальных обобщенных векторов (механических и электрофизических признаков энергетического состояния микроминиатюрных ЭМП) — $(\alpha, \beta) = (x^o, P^o; q^o, \Psi^o; \psi^{*o}, Q^{*o})$ [25,26], где приняты следующие обозначения:

α — субвектор обобщенных механических и электрофизических координат МЭМС

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= (x^o, q^o, \psi^{*o}) \\ x^o &= (x_L, x_c) \\ x_L &= (x_1, x_2, \dots, x_M), \\ x_c &= (x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) \\ q^o &= (q_1, q_2, \dots, q_M) \\ \psi^{*o} &= (\psi_1^*, \psi_2^*, \dots, \psi_N^*) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

β — субвектор обобщенных механических и электрофизических импульсов МЭМС

$$\left. \begin{aligned} \beta &= (P^o, \Psi^o, Q^{*o}) \\ P^o &= (P_L, P_c) \\ P_L &= (P_1, P_2, \dots, P_M) \\ P_c &= (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*) \\ \Psi^o &= (\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_M) \\ Q^{*o} &= (Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_N^*). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

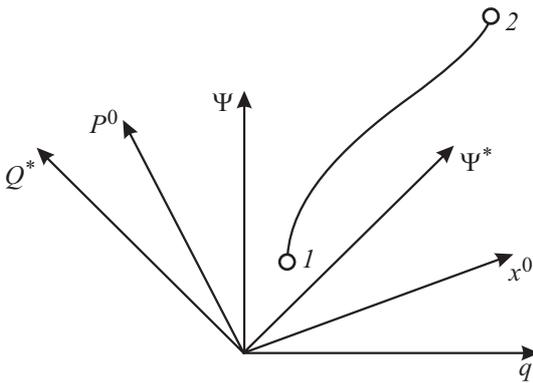


Рис. 4. Траектория динамического режима МЭМС в многомерном пространстве энергетического состояния.

Согласно обобщенной формулировке принципа наименьшего действия для диссипативных систем, моделирование динамических режимов МЭМС можно осуществить в обобщенном пространстве энергетического состояния (α, β) , которое характеризуется определенной функцией энергетического состояния — $\mathcal{L}(\alpha, \dot{\alpha}, t)$ (функцией Лагранжа для данной МЭМС), при котором поведение системы между фиксированными положениями 1 (при $t = t_1$; $\alpha_1 = (x_1^0, q_1^0, \psi_1^0)$) и 2 (при $t = t_2$; $\alpha_2 = (x_2^0, q_2^0, \psi_2^0)$) (рис. 4) подчиняется принципу экстремума полного действия

$$\begin{aligned} \mathcal{S} &= \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L}(\alpha, \dot{\alpha}, t) dt, \\ \alpha(t) &= \arg \min_{\alpha(t)} \mathcal{S}, \\ \delta \mathcal{S} &= 0, \end{aligned} \tag{10}$$

где действие \mathcal{S} определяется как определенный интеграл-функционал от энергетической функции Лагранжа $\mathcal{L}(\alpha, \dot{\alpha}, t)$, выражающейся в форме разности между эффективной электрокинетической $T(\dot{\alpha}(t))$ и эффективной электродинамической $U(\alpha(t))$ энергиями на траектории динамического режима МЭМС в многомерном пространстве (α, β) .

Из (4)–(10) получается обобщенное уравнения Лагранжа второго рода, выражающееся в следующей векторно-матричной форме:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\alpha}} \right) = F^0. \tag{11}$$

В уравнении (11) приняты следующие обозначения: $\dot{\alpha}(t)$ и $F^0(t)$ — субвекторы механических и электрофизических обобщенных скоростей и сил функциональных элементов МЭМС

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}(t) &= \left(I^0 = \frac{dq^0}{dt}; V^{*0} = \frac{d\psi^{*0}}{dt}; \gamma_L^0 = \frac{dx_L}{dt}, \gamma_c^0 = \frac{dx_c}{dt} \right), \\ F^0(t) &= \left(E = -\frac{d\Psi^0}{dt}; M^* = -\frac{dQ^0}{dt}, F_M = \frac{dP^0}{dt} \right), \end{aligned} \tag{12}$$

где E — обобщенный вектор электродвижущих сил (ЭДС), действующих в индуктивных элементах МЭМС; M^* — обобщенный вектор магнитодвижущих сил (МДС), действующих в магнитопроводящих структурах МЭМС; F_M — обобщенный вектор $(M + N)$ -мерный механических сил, действующих на подвижные элементы МЭМС.

В (11) обобщенная диссипативная функция Рэлея состоит из механических $\Phi_M(\gamma_L^0, \gamma_c^0)$ и электрофизических $\Phi_E(I^0, V^{*0})$ частей

$$\Phi(\dot{\alpha}) = \Phi_M(\gamma_l) + \Phi_E(I_i, V_j^*). \tag{13}$$

При приближениях (4) и (5) для $\Phi_E(I^0, V^{*0})$ имеем следующее выражение:

$$\Phi_E(I^0, V^{*0}) = -\frac{1}{2} (I^0 \widehat{R}_D I^{0T} + V^{*0} G_D V^{*0T}). \tag{14}$$

Необходимый лагранжиан для обобщенной модели МЭМС может быть построен с помощью введения нового в данном случае $(M \times N)$ -размерного тензора взаимодействия (взаимного влияния) между магнитными (электро-эндуцированными) и емкостными (магнитно-индукционными) функциональными элементами МЭМС, $\widehat{K}_N^M(q^0, \psi^{*0})$, который выражается в следующей явной форме:

$$\widehat{K}_N^M(q^0, \psi^{*0}) = \begin{bmatrix} K_M^N(q_1, \psi^{*1}) & \dots & K_M^N(q_1, \psi^{*N}) \\ \vdots & & \vdots \\ K_M^N(q_M, \psi^{*1}) & \dots & K(q_M, \psi^{*N}) \end{bmatrix}. \tag{15}$$

При этом обобщенную лагранжевую функцию для МЭМС можно представлять в следующей форме:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_L + \mathcal{L}_C + \Delta \mathcal{L}_{LC}, \tag{16}$$

где $\Delta \mathcal{L}_{LC}$ — член лагранжиана учитывающие нелинейное электрофизическое взаимодействие между функциональными элементами системы электроиндукционного (индуктивного) и магнитно-индукционного (емкостного) действия.

В общем случае для комбинированного изучения динамических процессов МЭМС, члены лагранжиана в (16) выражаются в формах

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_L &= (x_L, q^0, \dot{x}_L, \dot{q}^0, t) = T_L(\dot{x}_L, \dot{q}^0, t) - U_L(x_L, q^0), \\ \mathcal{L}_C &= (x_c, \psi^{*0}, x_c, \psi^{*0}, t) = T_C(x_c, \dot{\psi}^{*0}, t) - U_C(x_c, q^0), \\ \Delta \mathcal{L}_{LC} &= \dot{q}^0 \widehat{K}_N^M(q^0, \psi^{*0}) \dot{\psi}^{*0T}. \end{aligned} \tag{17}$$

В (17) T_L и T_C и U_L и U_C определяются выражениями

$$\begin{aligned} T_L &= T_L^M + T_L^E, \\ T_C &= T_C^M + T_C^E \end{aligned} \tag{18}$$

и соответственно

$$U_L = U_L^M + U_L^E, \\ U_C = U_C^M + U_C^E, \quad (19)$$

где T_L^M и T_C^M — энергии механических движений подвижных функциональных элементов МЭМС

$$T_L^M = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M m_i x_i^2, \\ T_C^M = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_j^* x_j^{*2}, \quad (20)$$

где T_L^E и T_C^E соответствующие электрокинетические энергии

$$T_L^E = \left(\sum_{l=1}^M \sum_{j=1}^M \dot{q}_l \widehat{L}_{lj} \dot{q}_j \right) = q^0 \widehat{L}^0, \\ T_C^E = \left(\sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^N \dot{\psi}_l^* \widehat{C}_{lj} \dot{\psi}_j^{*T} \right) = \psi^{0*} \widehat{C}^0 \psi^{0*T}, \quad (21)$$

где $\widehat{L}^0 = \widehat{L}_{lj}$ — матрица собственных и взаимных индуктивностей, а $\widehat{C}^0 = \widehat{C}_{lj}$ — матрица собственных и взаимных емкостей функциональных элементов МЭМС; U_L^M и U_C^M — механическая энергия накопления, U_L^E и U_C^E — соответствующие электрофизические потенциальные энергии накопления в индуктивных L_{Hi} ($i = 1 \dots, M$) и емкостных C_{Hj} ($j = 1 \dots, M$) статических элементах МЭМС

$$U_L^{ec} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \dot{q}_i \widehat{L}_{HL} \dot{q}_i^T, \\ U_C^{ec} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^F \dot{\psi}_j^* \widehat{C}_{Hj} \dot{\psi}_j^{*T}. \quad (22)$$

Совместное решение системы уравнений (11) и (16)–(19) полностью определяет динамическое поведение обобщенной МЭМС в любых режимах взаимодействия функциональных элементов. При этом уравнения динамики МЭМС определяются в следующей векторно-матричной форме:

- уравнения электродинамики

$$\frac{d}{dt} \Psi^0 + \dot{q}^0 \widehat{R}_D + \dot{\psi}^{*0} \frac{d\widehat{K}_N^M}{dt} \psi^{*0T} + \widehat{K}_N^M \frac{d^2 \psi^{*0}}{dt^2} = \dot{\psi}_{CL}^{*0}, \\ \frac{dQ^0}{dt} + \psi^{*0} \widehat{C}_D + \dot{q}^0 \frac{d\widehat{K}_N^M}{dt} \dot{q}^{0T} + \widehat{K}_N^M \frac{d^2 q^0}{dt^2} = \dot{q}_{LC}^0, \quad (23)$$

- уравнения электромеханических сил, действующих на функциональные элементы МЭМС

$$F_E^0 = \frac{d}{dx^0} [(\dot{q}^0 \widehat{L}^0 \dot{q}^{0T}) + (\dot{\psi}^{*0} \widehat{C}^0 \dot{\psi}^{*0T}) + (\dot{q}^0 \widehat{K}_N^M \dot{\psi}^{0T})], \quad (24)$$

где \dot{q}_{LC}^0 и $\dot{\psi}_{CL}^{*0}$ — субвекторы токов и напряжений между емкостными и индуктивными функциональными элементами МЭМС:

$$\dot{q}_{LC}^0 = (\dot{q}_{LC/1}, \dot{q}_{LC/2}, \dots, \dot{q}_{LC/M}), \\ \dot{\psi}_{CL}^{*0} = (\dot{\psi}_{CL/1}^*, \dot{\psi}_{CL/2}^*, \dots, \dot{\psi}_{CL/N}^*). \quad (25)$$

Системы уравнений (23) и (24) носят универсальный характер для МЭМС всевозможных конструкций, и их совместное решение полностью определяет динамическое поведение обобщенной модели МЭМС в любых режимах.

Для исследования МЭМС конкретной конструкции в задачах автоматизированного проектирования в этих уравнениях необходимо учесть все конструкционные особенности их функциональных элементов.

Следует отметить, что основные аналитические свойства элементов тензора взаимодействия $\widehat{K}_N^M(q^0, \psi^{*0})$ можно вкратце сформулировать так: элементы тензора $\widehat{K}_N^M(q^0, \psi^{*0})$ являются непрерывными функциями, имеют непрерывную производную $\frac{d}{dt} K_N^M(q_i, \psi^{*j})$ и удовлетворяют условиям

$$\left. \begin{aligned} \lim_{q_i \rightarrow 0} K_N^M(q_i, \psi^{*j}) &= \lim_{\psi^j \rightarrow 0} K_N^M(q_i, \psi^{*j}) = 0, \\ 0 \leq |K_N^M(q_i, \psi^{*j})| &\leq k_1, \\ \int_0^{q_{\max}} \int_0^{\psi_{\max}^*} K_N^M(q_i, \psi^{*j}) dq_i d\psi^{*j} &\leq k_2, \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

где k_1 и k_2 — положительные величины.

При этом зависимости элементов тензора взаимодействия от конструктивных параметров МЭМС можно установить на базе теории планирования эксперимента [27,28], представляя их в форме квадратичного разложения:

$$K_N^M(q_i, \psi^{*j}) = K_N^M(q_i, \psi^{*j}) + \sum_{i=1}^M \beta_i q_i + \sum_{j=1}^N \mu_j \psi^{*j} \\ + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} q_i \psi^{*j} + \dots, \\ i = 1, 2, \dots, M; \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (27)$$

где $\beta_i, \mu_j, \gamma_{ij}$ — коэффициенты квадратичной формы, определяющиеся конструктивными (структурными) особенностями функциональных элементов МЭМС.

Физико-техническое обоснование применения основных принципов и положений бинарно-сопряженной электрофизики в задачах исследования динамических и энергетических характеристик нано-ЭМП-энергии и их систем осуществлено в работах [4,5,17], где рассматриваются следующие узловые вопросы:

- электрофизическое моделирование процессов энергопреобразования между функциональными ячейками нано-ЭМП-энергии;

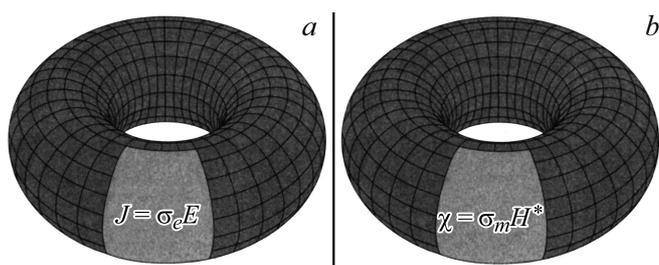


Рис. 5. Схема замкнутых электропроводящих (а) и магнитно-проводящих (b) нанотрубок.

- взаимодействие нано-ЭМП-энергии с внешней средой;
- рассмотрение нано-ЭМП-энергии в системе других наноструктур;
- как результат этих исследований комплексное физико-математическое и компьютерное моделирование НЭМС.

При этом для обобщенного физико-математического моделирования и автоматизированного проектирования нано-ЭМП энергии исходные базовые уравнения электроиндукционной и магнитно-индукционной электромеханики (уравнения преобразования электромагнитного поля LC -контура в подобластях индуктивности L и емкости C соответственно) необходимо корректировать, согласно основополагающим принципам квантовой электрофизики, учитывая следующие узловые факторы:

1. Для электроиндукционных нано-ЭМП элементарным функциональным элементом энергопреобразования (базовой ячейкой) является замкнутая сверхэлектропроводящая нанотрубка, энергетическое состояние которой в фазовом пространстве обобщенных сил Лагранжа–Максвелла — $(\psi(t), q(t))$ — представляется неподвижной точкой устойчивости.

2. Аналогично для магнитно-индукционных нано-ЭМП элементарным функциональным элементом энергопреобразования (базовой ячейкой) является замкнутая сверхмагнитно-проводящая нанотрубка, энергетическое состояние которой в сопряженном фазовом пространстве — $(Q^*(t), \psi^*(t))$ — представляется неподвижной точкой устойчивости (рис. 5).

Наглядную иллюстрацию сказанному дает биофизика на уровне природных наноактуаторов. Например, рассматривая положения, которые могут занимать молекулы белков и нуклеиновых кислот, мы сталкиваемся с аналогичными топологическими характеристиками структур живой природы. Для энергообмена молекулы с внешней средой необходимо разорвать химические связи данного участка полимерной цепи. Энергетические затраты такого процесса довольно значительны, поэтому при достаточно низкой температуре и слабых воздействиях внешних электромагнитных полей вероятность разрыва молекулы мала, и она может существовать в состоянии энергетического минимума достаточно долго [28].

Замкнутые электропроводящие и магнитно-проводящие нанотрубки в электроиндукционных и магнитно-индукционных подобластях энергопреобразования образуют вокруг себя двухсвязанные (взаимоохватывающие) пространства, энергетические состояния которых при слабых возмущениях внешних механических нагрузок, электромагнитных и тепловых полей (не нарушающие топологию наноструктуры и сверхпроводящее состояние) остаются неизменными.

Для осуществления энергообмена нанотрубок с внешней средой необходимо разбивать двухсвязанные пространства на односвязанные или рассматривать воздействие электромагнитных и тепловых полей, нарушающих сверхпроводящее состояние нанотрубок.

При этом в задачах физико-математического анализа процессов энергопреобразования в нано-ЭМП электропроводящие и магнитно-проводящие нанотрубки с открытым концом могут рассматриваться как квантово-механический аналог электромагнитного колебательного LCR -контура, геометрические параметры которого не поддаются точному измерению (характеризуются принципами квантовой электрофизики) [29–31].

Более глубокое применение разработанных теоретических принципов моделирования микроминиатюрных ЭМП (и МЭМС) для физико-математического (и соответствующего компьютерного) моделирования нано-ЭМП (и НЭМС) является задачей отдельных научно-исследовательских работ.

Заключение

В работе рассмотрены некоторые узловые вопросы электрофизического моделирования МЭМС и НЭМС. Предложен новый обобщенный подход исследования динамических и энергетических характеристик МЭМС и НЭМС как сложных динамических систем с бинарно-сопряженными подсистемами.

Получены системы уравнений, полностью определяющие динамическое и энергетическое поведение обобщенных моделей МЭМС и НЭМС в любых режимах.

На базе предложенных теоретических принципов и моделей рассматриваются возможности исследования электрофизических характеристик биологических наноструктур.

Список литературы

- [1] Бут Д.А. // Электричество. 1995. № 1. С. 2–10; 1995. № 2. С. 2–10.
- [2] Копылов И.П. // Электротехника. 2007. № 12. С. 50–55.
- [3] Караян Г.С., Гандилян С.В., Гандилян В.В. // Электричество. 2013. № 3. С. 2–9.
- [4] Караян Г.С., Гандилян С.В., Гандилян В.В. // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 6. С. 370–380.
- [5] Гандилян С.В. // Нано- и микросистемная техника. 2015. Т. 8. С. 15–32.
- [6] Алферов Ж.И., Асеев А.Г., Гапонов С.В. // Микросистемная техника. 2005. Т. 181. № 8. С. 3–13.

- [7] Варадан В., Виной К.Д., Джозе К.А. ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 263 с.
- [8] Нано- и микросистемная техника: от исследований к разработкам / Под ред. П.П. Мальцева. М.: Техносфера, 2005. 361 с.
- [9] Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. М.: Техносфера, 2005. 446 с.
- [10] Gallacher B.J., Burdess J.S., Harris A.J., McNie M.E. // Proc. of the Symposium Gyro Technology. Stuttgart, Germany, 2001. P. 10–20.
- [11] Muralt P. // Rep. Prog. Phys. 2001. Vol. 64. P. 1339–1388.
- [12] Драгунов В.П., Киселев Д.Е., Сеницкий Р.Е. // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 16. № 6. С. 360–370.
- [13] Губин С.П., Ткачев С.В. Графен и родственные наноструктуры углерода. М.: URSS, 2014. 101 с.
- [14] Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Изд. центр Академия, 2005. 192 с.
- [15] Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления развития / Под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса, П. Аливисатоса / Пер. с англ. М.: Мир, 2002. 292 с.
- [16] Мартин-Пальма Р., Лахтакия А. Нанотехнологии — ударный вводный курс / Пер. с англ. Долгопрудный: Издат. дом Интеллект, 2017. 208 с.
- [17] Karayun H.S., Gandilyan S.V. // Arm. J. Phys. 2016. Vol. 9. N 3. P. 244–259.
- [18] Ковишов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ибрагимов И.М. Основы нанотехнологии в технике. М.: Издат. центр Академия, 2009. 237 с.
- [19] Альтман Ю. Военные нанотехнологии: Возможности применения и превентивного контроля вооружений. М.: Техносфера, 2006. 424 с.
- [20] Гандилян С.В. // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 8. С. 15–32.
- [21] Харис П. Углеродные нанотрубки и родственные структуры. М.: Техносфера, 2003. 336 с.
- [22] Елецкий А.В. // УФН. 2002. Т. 172. № 4. С. 401–438.
- [23] Serafi A.M., Kar N.C. // IEEE Tr. Energy Conver. 2005. Vol. 20. N 1. P. 197–206.
- [24] Sobczyk T.J. // Arch. El. Eng. 2011. Vol. 60. N 1. P. 142–149.
- [25] Уайт Д.С., Вудсон Г.Х. Электромеханическое преобразование энергии. М. Л.: Энергия, 1964. 528 с.
- [26] Иосифьян А.Г. // Электричество. 1987. № 12. С. 26–32; 1989. № 9. С. 19–26.
- [27] Копылов И.П., Гандилян С.В., Гандилян В.В. // Электротехника. 1998. № 9. С. 25–40.
- [28] Ulrich A.S. // Bioscience Rep. 2002. Vol. 22. N 2. P. 328–334.
- [29] Такадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. М.: Мир, 1983. 302 с.
- [30] Воронов В.К., Подоплелов А.В., Сагдеев Р.З. Физические основы нанотехнологии. М.: URSS, 2010. 429 с.
- [31] Чечнин Н.Г. Магнитные наноструктуры и их применение. М.: Грант Виктория ТК, 2006. 166 с.