

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С. В. Гандилян, Д. В. Гандилян

Рассматривается современное состояние совершенно нового направления науки – микросистемной электромеханики. Анализируются широкие спектры его практических применений и перспективы дальнейшего развития. Подробно обсуждаются два основных пути создания микро- и нанозлектромеханических преобразователей энергии как базовых элементов микросистемной электромеханики: «сверху вниз» и «снизу вверх». Описаны основные технологические приёмы 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 обобщённого физико-математического моделирования микроминиатюрных и нанозлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС). Предложен новый обобщённый подход к исследованию динамических и энергетических характеристик МЭМС и НЭМС, как сложных динамических систем с бинарно-сопряжёнными подсистемами. На базе предложенных теоретических принципов и моделей рассматриваются возможности исследования электрофизических характеристик биологических наноструктур.

Ключевые слова: микроминиатюрная электромеханика, нанозлектромеханика, МЭМС и НЭМС, бинарно-сопряжённые системы, самоорганизация, электробиология и магнитобиология.

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 нанозлектроники, 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 веке 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 перспективной 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», важнейшая отрасль современной микросистемной техники (МСТ) [4].

Современная макросистемная электромеханика охватывает ЭМП энергии (классического и специального назначения) малых, средних и больших мощностей, от микромашин мощностью не выше 1кВт, 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 нанозлектромеханические ЭМП энергии и их систем (Nanoelectromechanical systems – NEMS, НЭМС) (рис. 1) [5 – 7].

Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики

Появление современной микросистемной электромеханики связано с очередной высокой стадией развития технических и технологических основ

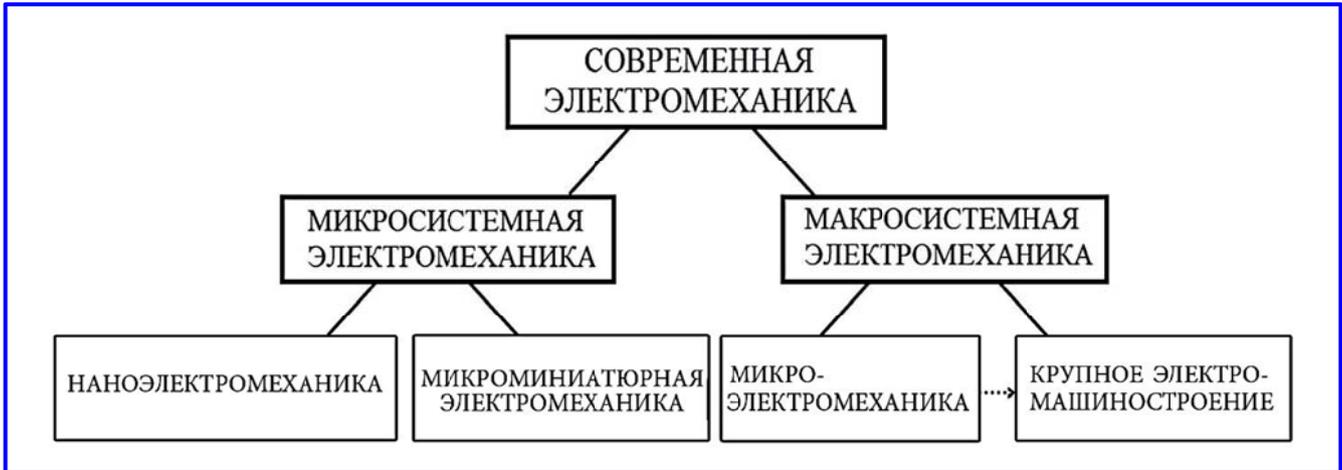


Рис. 1. Классификация ЭМП энергии по энергетическим и массогабаритным показателям

микромеханики и микроэлектроники, благодаря которым стало возможным создание малогабаритных интегрированных многоэлементарных и многофункциональных систем миниатюрных ЭМП энергии (МЭМС), объединённых в общую интегральную схему [8]. Это позволило при решении поставленных первоочередных 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) $0,1_{\text{мкм}} < l < 0,1_{\text{мм}}$, 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 всём диапазоне энергетического спектра первоочередной задачей является развитие электротехнического материаловедения. В настоящее время проводятся активные исследования по практическому применению электрических материалов 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 Вт/кг при $f = 60$ Гц). Они обладают высокой относительной начальной магнитной проницаемостью, а также индукцией насыщения на промышленных и высоких частотах ($B_S = 1,2 \dots 1,3$ Тл). 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.

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

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 крупного). 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 соразмерны с размерами и 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) $10_{\text{нм}} < l < 100_{\text{нм}}$ [15, 16].

Решение первостепенных задач современной микросистемной электромеханики требует дальнейшего глубокого изучения строения вещества, синтеза процессов в веществе, а также установления методов получения кристаллической решётки 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 энергии в электрическую с высоким КПД. Наиболее перспективным с этой точки зрения является современное наноструктурное материаловедение.

В работах авторов [17, 18] осуществлён сравнительный анализ динамических и структурных характеристик и классификация по принципу действия базовых функциональных элементов МЭМС и НЭМС – микро- и наноЭМП 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:

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

2. Если для МЭМС процесс миниатюризации функциональных элементов, подчиняясь общим закономерностям развития современной мик-

росистемной 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 служит атомный и молекулярный синтез (так называемый «молекулярный монтаж» или «атомная сборка»).

3. 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 теорией электрических цепей).

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

5. 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.

6. 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 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 нанороботехники являются углеродные нанотрубки (обладающие исключительными физическими и электрическими свойствами), углеродные каркасные структуры (например, фуллерен C_{60}), 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, наноактюаторы) (рис. 2) [23].

Вопросы обобщённого 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 путём использования более мощных компьютерных программ и в гораздо меньшей мере – из-за появления новых теоретических представлений и моделей [24].

Для дальнейшего развития микросистемной электромеханики (особенно в наноструктурном уровне) представляется особенно важным совершенствование методов теоретических построений

и моделей, углублённого 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 обобщённого 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, чёткое физико-математическое толкование терминов МЭМС и НЭМС и их классификация по динамическим и функциональным характеристикам.

О физических принципах теоретической электромеханики. В большинстве современных исследований в области теоретических основ электротехники (ТОЭ), особенно в комбинированных задачах моделирования процессов генерирования, передачи и потребления электрической энергии, как базовые принципы применяются основные положения бинарно-сопряжённой электрофизики, где процессы преобразования электромагнитных полей вставляются в зависимости от топологических характеристик их функциональных структур [25].

При этом:

- анализ и синтез электротехнических систем с рабочим (динамическим) магнитным полем, в том числе и электроиндукционных (индуктивных) ЭМП, во всем диапазоне энергетического сектора осуществляется на базе обобщённого Лагранжа-Максвелловского пространства энергетического состояния и, следовательно, уравнениями преобразования электромагнитного поля Фарадея – Максвелла;

- анализ и синтез электротехнических систем с рабочим (динамическим) электрическим полем, в



Рис. 2. Общая структура НЭМС

том числе и магнитно-индукционных (ёмкостных) ЭМП, во всём диапазоне энергетического спектра осуществляется на базе обобщённого бинарно-сопряжённого пространства энергетического состояния и соответственной модификацией системы уравнений Фарадея – Максвелла.

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

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

Определение 2: НЭМС – это многоэлементная динамическая система нелинейно взаимодействующих бинарно-сопряжённых электроиндукционных и магнитно-индукционных наноэлектромеханических преобразователей энергии (наноЭМП).

При вышеуказанной трактовке термина МЭМС их обобщённое физико-математическое моделирование можно осуществить на базе исследования динамических режимов и энергетических характеристик микроминиатюрных ЭМП, исходя из интегрального принципа действия электромеханики [26 – 28], который выражается в следующих бинарно-сопряжённых эквивалентных формах:

– для электроиндукционных (индуктивных) микроминиатюрных ЭМП

$$E_B(t)dt = \sum_1^n d (\oint m_i \mathcal{U}_i dl_i + \iint d\Psi_i dq_i), \quad (1)$$

где n – число контуров тока; m_i – масса; \mathcal{U}_i – скорость; q_i – электрический заряд; Ψ_i – магнитное потокосцепление i -го контура тока;

– для магнитно-индукционных (ёмкостных) микроминиатюрных ЭМП

$$E_B^*(t)dt = \sum_1^h d (\oint m_j^* \mathcal{U}_j^* dl_j + \iint dQ_j^* d\psi_j^*), \quad (2)$$

где h – число контуров напряжения; m_j^* – масса; \mathcal{U}_j^* – скорость; Q_j^* – рабочее электрическое потокосцепление; ψ_j^* – 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 взаимо-

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

$$\Psi = |\Psi| e_\Psi; \quad Q^* = |Q^*| e_{Q^*}; \quad (3)$$

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

где e_Ψ , e_q , e_Q , e_{ψ^*} – 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 векторов матриц токов – $I(r, t) = \dot{q}(r, t)$ и напряжений – $V^*(r, t) = \dot{\psi}^*(r, t)$ в форме следующих разложений:

$$\Psi(\dot{q}(r, t)) = \frac{d\Psi}{dq} \dot{q} + \frac{d^2\Psi}{d^2q} \dot{q}^2 + \dots \quad (4)$$

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

Из (4) в первом приближении имеем:

$$\Psi(\dot{q}(r, t)) = \frac{d\Psi}{dq} \dot{q} + \dots = \widehat{L}_D I + \dots \quad (5)$$

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

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

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

– для индуктивных ЭМП

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

$$F_{эм} = -\frac{d}{dx}W_L = -\frac{d}{dx}\left[I^T \frac{d\widehat{L}_D}{dx} I\right]; \quad (6)$$

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

где W_L – энергия рабочего магнитного поля; V_L – напряжение генерации внешних источников энергии; I – матрица токов проводимости; I^T – транспонированная матрица токов; $\widehat{R}_D = \frac{d\Psi}{dq}$ – матрица

динамических значений внутренних сопротивлений; $F_{эм}$ – электромеханическая сила, действующая на подвижные части микроминиатюрных ЭМП; – для ёмкостных ЭМП

$$\frac{dQ^*}{dt} + \widehat{G}_D V^* = I_C^*;$$

$$F_{эм}^* = -\frac{d}{dx^*}W_C = -\frac{d}{dx^*}\left[V^{*T} \frac{d\widehat{C}_D}{dx^*} V^*\right]; \quad (7)$$

$$W_C = V^{*T} \frac{d\widehat{C}_D}{dx^*} V^*,$$

где W_C – энергия рабочего электрического поля; I_C^* – токи генерации, поступающие во внешнюю цепь; V^{*T} – транспонированная матрица напряжений; $\widehat{G}_D = \frac{dQ^*}{d\Psi^*}$ – матрица динамических значений

внутренних проводимостей; $F_{эм}^*$ – 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 обобщённых векторов (механических и электрофизических признаков энергетического состояния микроминиатюрных ЭМП) $(\alpha, \beta) = (x^0, P^0, q^0, \Psi^0; \psi^{*0}, Q^{*0})$ [26, 27], где приняты следующие обозначения: $\vec{\alpha}$ – субвектор обобщённых механических и электрофизических координат МЭМС

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= (x^0, q^0, \Psi^{*0}) \\ x^0 &= (x_L, x_c) \\ x_L &= (x_1, x_2, n, x_M) \\ x_c &= (x_1^*, x_2^*, n, x_N^*) \\ q^0 &= (q_1, q_2, n, q_M) \\ \Psi^{*0} &= (\Psi_1^*, \Psi_2^*, \dots, \Psi_N^*) \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

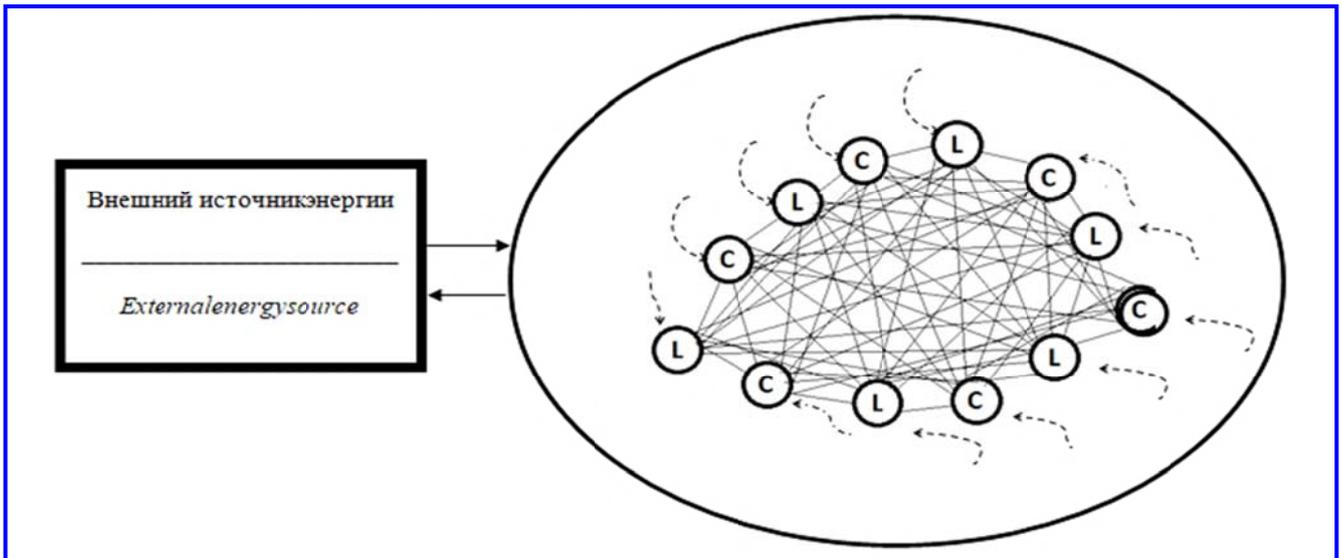


Рис. 3. Обобщённое схематическое представление МЭМС: (L) – электроиндукционные (индуктивные) микроминиатюрные ЭМП; (C) – магнитно-индукционные (ёмкостные) микроминиатюрные ЭМП

$\vec{\beta}$ – субвектор обобщённых механических и электрофизических импульсов МЭМС

$$\left. \begin{aligned} \beta &= (P^0, \Psi^0, Q^{0*}) \\ P^0 &= (P_L, P_C) \\ P_L &= (P_1, P_2, \dots, P_M) \\ P_C &= (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*) \\ \Psi^0 &= (\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_M) \\ Q^{0*} &= (Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_N^*) \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Согласно обобщённой формулировке принципа наименьшего действия для диссипативных систем, моделирование динамических режимов МЭМС можно осуществить в обобщённом пространстве энергетического состояния (α, β) , характеризующегося определённой функцией энергетического состояния – $L(\alpha, \dot{\alpha}, t)$ (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

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(\alpha, \dot{\alpha}, t) dt; \quad (10)$$

$$\alpha(t) = \arg \min_{\alpha(t)} S;$$

$$\delta S = 0,$$

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

Из (4) – (10) получаются обобщённые уравнения Лагранжа второго рода, выражающиеся в следующей векторно-матричной форме

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

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

$$\dot{\alpha}(t) = \left(I^0 = \frac{dq^0}{dt}; V^{*0} = \frac{d\Psi^{*0}}{dt}; \mathcal{U}_L^0 = \frac{dx_L}{dt}, \mathcal{U}_C^0 = \frac{dx_C}{dt} \right); \quad (12)$$

$$F^0(t) = \left(\mathcal{E} = -\frac{d\Psi^0}{dt}; M^* = -\frac{dQ^{0*}}{dt}, F_{\text{мех}} = \frac{dP^0}{dt} \right),$$

где \mathcal{E} – обобщённый вектор электродвижущих сил (э. д. с.), действующих в индуктивных элементах МЭМС; M^* – обобщённый вектор магнитодвижущих сил (м. д. с.), действующих в магнитопроводящих структурах МЭМС; $F_{\text{мех}}$ – обобщённый вектор механических сил ($M + N$ -мерный), действующих на подвижные элементы МЭМС.

В (11) $\Phi(\dot{\alpha})$ – обобщённая диссипативная функция Релея состоит из механических $\Phi_{\text{мех}}(\mathcal{U}_L^0; \mathcal{U}_C^0)$ и электрофизических $\Phi_{\text{эл}}(I^0; V^{*0})$ – частей

$$\Phi(\dot{\alpha}) = \Phi_M(\mathcal{U}_l) + \Phi_{\mathcal{E}}(I_i, V_j^*). \quad (13)$$

При приближениях (4) и (5) для $\Phi_{\text{эл}}(I^0; V^{*0})$ имеем следующее выражение

$$\Phi_{\text{эл}}(I^0; V^{*0}) = -\frac{1}{2} \left(I^0 \widehat{R}_D I^{0T} + V^{*0} G_D V^{*0T} \right). \quad (14)$$

Необходимый лагранжиан для обобщённой модели МЭМС может быть построен с помощью введения

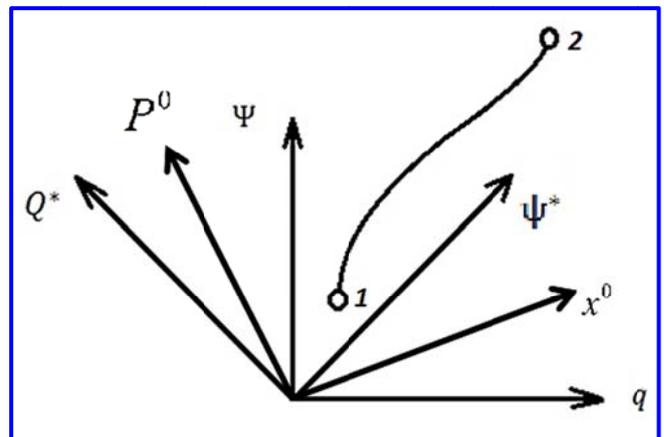


Рис. 4. Траектория динамического режима МЭМС в многомерном пространстве энергетического состояния

нового, в данном случае ($M * N$)-размерного тензора взаимодействия (взаимного влияния) между магнитными (электроиндукционными) и ёмкостными (магнитно-индукционными) функциональными элементами МЭМС, $\widehat{K}_N^M(q^0, \psi^{*0})$, которая выражается в следующей явной форме:

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

При этом обобщённую функцию Лагранжа для МЭМС можно представить в следующей форме:

$$L_* = L_L + L_C + \Delta L_{LC}, \quad (16)$$

где ΔL_{LC} – член лагранжиана, учитывающий нелинейное электрофизическое взаимодействие между функциональными элементами системы электроиндукционного (индуктивного) и магнитно-индукционного (ёмкостного) действия.

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

$$L_L = \left(x_L, q^0, \dot{x}_L, \dot{q}^0, t \right) = T_L \left(\dot{x}_L, \dot{q}^0, t \right) - U_L \left(x_L, q^0 \right);$$

$$L_C = \left(x_C, \psi^{*0}, \dot{x}_C, \dot{\psi}^{*0}, t \right) = T_C \left(\dot{x}_C, \dot{\psi}^{*0}, t \right) - U_C \left(x_C, \psi^{*0} \right); \quad (17)$$

$$\Delta L_{LC} = \dot{q}^0 \widehat{K}_N^M(q^0, \psi^{*0}) \psi^{*0\tau}.$$

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

$$T_L = T_L^M + T_L^\exists; \quad (18)$$

$$T_C = T_C^M + T_C^\exists$$

и соответственно

$$U_L = U_L^M + U_L^\exists; \quad (19)$$

$$U_C = U_C^M + U_C^\exists,$$

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

$$T_L^M = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M m_i \dot{x}_i^2; \quad (20)$$

$$T_C^M = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j^* \dot{x}_j^{*2},$$

где T_L^\exists и T_C^\exists – соответственные электрокинетические энергии

$$T_L^\exists = \left(\sum_{l=1}^M \sum_{j=1}^M \dot{q}_l \widehat{L}_{lj} \dot{q}_j^T \right) = q^0 \widehat{L}^0 q^{0\tau}; \quad (21)$$

$$T_C^\exists = \left(\sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^N \dot{\psi}_l^* \widehat{C}_{lj} \dot{\psi}_j^{*\tau} \right) = \psi^{0*} \widehat{C}^0 \psi^{0*\tau},$$

где $\widehat{L}^0 = \widehat{L}_{ij}$ – матрица собственных и взаимных индуктивностей, а $\widehat{C}^0 = \widehat{C}_{ij}$ – матрица собственных и взаимных ёмкостей функциональных элементов МЭМС; U_L^M и U_C^M – механическая энергия накопления; U_L^\exists и U_C^\exists – соответственные электрофизические потенциальные энергии накопления в индуктивных – L_{Hi} ($i = 1 \dots, M$) и ёмкостных – C_{Hj} ($j = 1 \dots, M$) статических элементах МЭМС

$$U_L^\exists = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^N \dot{q}_l \widehat{L}_{Hi} \dot{q}_i^T; \quad (22)$$

$$U_C^\exists = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^F \dot{\psi}_j^* \widehat{C}_{Hj} \dot{\psi}_j^{*\tau}.$$

Совместное решение системы уравнений (11) и (16) – (19) полностью определяет динамическое поведение обобщённой МЭМС в любых режимах взаимодействия функциональных элементов.

При этом уравнения динамики МЭМС определяются в следующей векторно-матричной форме: – уравнения электродинамики

$$\frac{d}{dt} \Psi^0 + \dot{q}^0 \widehat{R}_D + \dot{\psi}^{*0} \frac{d \widehat{K}_N^M}{dt} \psi^{*0\tau} + \widehat{K}_N^M \frac{d^2 \psi^{*0}}{dt^2} = \dot{\psi}_{CL}^{*0};$$

$$\frac{dQ^{0*}}{dt} + \psi^{*0} \widehat{G}_D + \dot{q}^0 \frac{d \widehat{K}_N^M}{dt} \dot{q}^{0\tau} + \widehat{K}_N^M \frac{d^2 q^0}{dt^2} = \dot{q}_{LC}^0; \quad (23)$$

– уравнения электромеханических сил действующих на функциональные элементы МЭМС

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

где \dot{q}_{LC}^0 и $\dot{\psi}_{CL}^{*0}$ – субвекторы токов и напряжений между ёмкостными и индуктивными функциональными элементами МЭМС.

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

Системы уравнения (23) и (24) носят универсальный характер для МЭМС всевозможной конструкции и их совместное решение полностью определяет динамическое поведение обобщённой модели МЭМС в любых режимах.

Для исследования МЭМС конкретной конструкции необходимо в задачах автоматизированного проектирования в этих уравнениях 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 условия

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

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 [28, 29], представляя их в форме квадратичного разложения

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

$$i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N,$$

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

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

- электрофизическое моделирование процессов энергопреобразования между функциональными ячейками наноЭМП энергии;
- взаимодействие наноЭМП энергии со внешней средой;
- рассмотрение наноЭМП энергии в системе других наноструктур;
- как результат этих исследований комплексное физико-математическое и компьютерное моделирование НЭМС.

При этом для обобщённого физико-математического моделирования и автоматизированного проектирования наноЭМП энергии необходимо исходные базовые уравнения электроиндукционной и магнитно-индукционной электромеханики (уравнения преобразования электромагнитного поля «LC» контура в подобластях индуктивности «L» и ёмкости «C» соответственно) корректировать основополагающими принципами квантовой электрофизики, учитывая следующие узловые факторы:

1. Для электроиндукционных наноЭМП элементарным функциональным элементом энергопреобразования (базовой ячейкой) является замкнутая сверхэлектропроводящая нанотрубка, энергетическое состояние которой в фазовом пространстве обобщённых сил Лагранжа – Максвелла ($\Psi(t), q(t)$) представляется неподвижной точкой устойчивости.

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

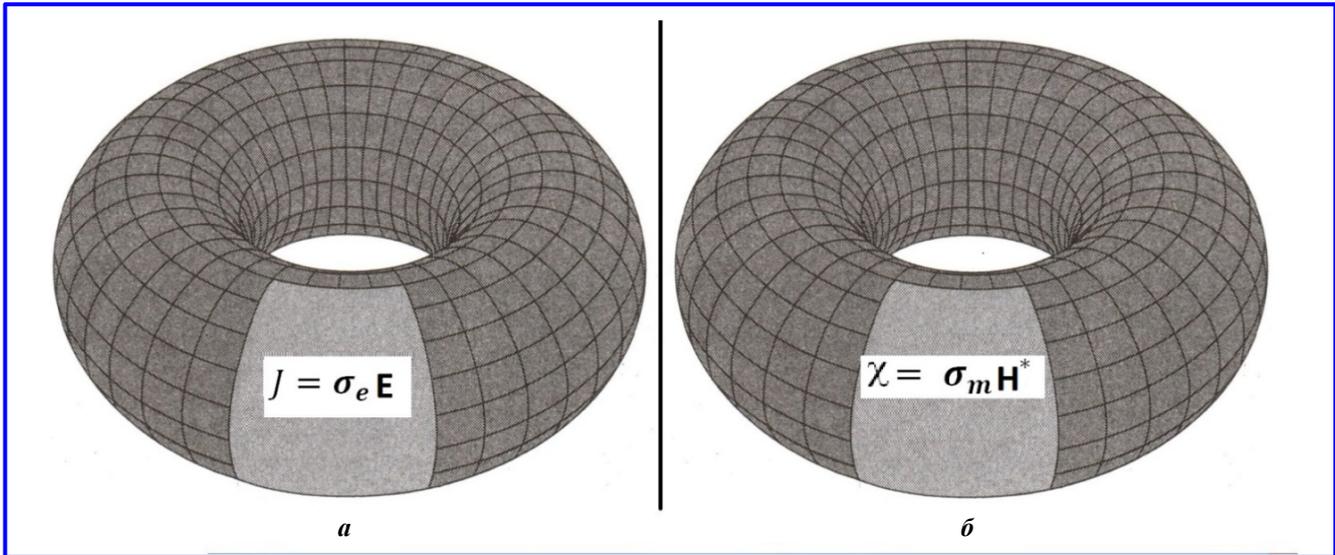


Рис. 5. Схема замкнутых нанотрубок: *а* – электропроводящих и *б* – магнитопроводящих

Наглядную иллюстрацию сказанному даёт 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 со 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 практически долго [29].

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

Для осуществления энергообмена нанотрубок с внешней средой необходимо: или двухсвязные пространства разбивать на односвязные, 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 магнитопроводящие нанотрубки с открытым концом могут рассматриваться как квантово-механический аналог электромагнитного колебательного контура-LCR, геометрические параметры которого не поддаются точному измерению (характеризуются принципами квантовой электрофизики) [30 – 32].

Более глубокое применение разработанных теоретических принципов моделирования микроминиатюрных ЭМП (и МЭМС) для физико-математического (и соответственного компьютерного) моделирования наноЭМП (и НЭМС) задача отдельных научно-исследовательских работ.

Заключение. Таким образом, в работе рассмотрены некоторые узловые вопросы электрофизического моделирования МЭМС и НЭМС. Предложен новый обобщённый подход к исследованиям динамических и энергетических характеристик МЭМС и НЭМС как сложных динамических систем с бинарно-сопряжёнными подсистемами.

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

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

Литература

1. Бут Д. А. Электромеханика сегодня и завтра // Электричество. – 1995. – № 1. – С. 2 – 10; 1995. – № 2. – С. 2 – 10.
2. Копылов И. П. Куда идёт электромеханика // Электротехника. – 2007. – № 12. – С. 50 – 55.

3. Караян Г. С., Гандилян С. В., Гандилян В. В. Нанотехнология в современной электромеханике // Электричество. – 2013. – № 3. – С. 2 – 9.
4. Караян Г. С., Гандилян С. В., Гандилян В. В. Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики // Нано- и микросистемная техника. – М. : Изд-во «Новые технологии», 2017. – Т. 19. – № 6. – С. 370 – 380.
5. Гандилян С. В. Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования микро- и нано-электромеханических систем (МЭМС и НЭМС) // Нано- и микросистемная техника. – М. : Изд-во «Новые технологии», 2015. – Т. 8. – С. 15 – 32.
6. Алфёров Ж. И., Асеев А. Г., Гапонов С. В. Наноматериалы и нанотехнологии // 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 разработке / 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. The design and fabrication of a multi axis vibrating ring gyroscope // Symposium gyro technology 2001. Stuttgart, Germany, 2001. – P. 10 – 20.
11. Muralt P. Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films // Reports on Progress in Physics. – 2001. – Vol. 64. – P. 1339 – 1388.
12. Драгунов В. П., Киселев Д. Е., Сеницкий Р. Е., Особенности электромеханических взаимодействий в МЭМС с непараллельными электродами // Нано- и микросистемная техника. – М. : Издательство «Новые технологии», 2017. – Т. 16. – № 6. – С. 360 – 370.
13. Губин С. П., Ткачёв С. В. Графен и родственные наноструктуры углерода. – М. : URSS, 2012. – 101 с.
14. Андриевский Р. А., Рагуля А. В. Наноструктурные материалы. – М. : Издат. центр «Академия», 2005. – 192 с.
15. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления развития // Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса: Пер. с англ. – М. : Мир, 2002. – 292 с.
16. Lew H. S. Electro-Tension and Torque in Biological Membranes Modelled as a Dipole Sheet // Fluid Conductors. – Biomechanics. 1972. – Vol. 5. – N. 4. – P. 126 – 132.
17. Karayn, H. S. and Gandilyan, S. V. Several Issues of Generalized Physical and Mathematical Modeling of Micro- and Nano-Electromechanical Systems (MEMS and NEMS) // Armenian Journal of Physics. – 2016. – 9 (3). – Pp. 244 – 259. – ISSN 1829-1171.
18. Ковшов А. Н., Назаров Ю. Ф., Ибрагимов И. М. Основы нанотехнологии в технике. – М. : Издательский 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. Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования микро- и нано-электромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. – М. : Изд-во «Новые технологии», 2015. – № 8. – С. 15 – 32.
21. Харис П. Углеродные нанотрубки и родственные структуры. – М. : Техносфера. – 236 с.
22. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – № 4. – С. 401 – 438.
23. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / Под ред. М. Роко, П. Аливисатоса : Пер. с англ. под ред. Р. А. Андриановского. – М. : Мир, 2002. – 292 с.
24. Serafi A. M. Kar N. C. «Methods for determining the intermediate-axis saturation characteristics of salient-pole synchronous machines from the measurement d-axis characteristics // IEEE Transactions on Energy Conversion. – Vol. 20, (2005). – № 1. – P. 197 – 206.
25. Sobczyk T. J. «Application of higher order forms for the description of electromechanical energy converters, Archives of Electrical Engineering. – PWN, Warsaw. – Vol. 60, (2011). – № 1. – P. 142 – 149.
26. Уайт Д. С., Вудсон Г. Х. Электромеханическое преобразование энергии. – М. – Л. : Энергия, 1964. – 528 с.
27. Иосифьян А. Г. Эволюция физических основ электротехники и электродинамики // Электричество. – 1987. – № 12. – С. 26 – 32; 1989. – № 9. – С. 19 – 26.
28. Копылов И. П., Гандилян С. В., Гандилян В. В. Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования электромеханических преобразователей энергии // Электротехника. – 1998. – № 9. – С. 25 – 40.
29. Ulrich A. S. Biophysical aspects of using liposomes as delivery vehicles // Bioscience Reports. – Vol. 22. – № 2. – 2002. – P. 328 – 334.
30. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. – М. : Мир, 1983. – 302 с.
31. Воронов В. К., Подоппелов А. В., Сагдеев Р. З. Физические основы нанотехнологии. – М. : Издательство URSS, 2010. – 429 с.
32. Чечнин Н. Г. Магнитные наноструктуры и их применение. – М. : Изд-во Грант Виктория ТК, 2006. – 166 с.

Поступила в редакцию 04.06.2018

Сейран Вартович Гандилян, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией факультета физики ЕГУ, т.: + 7 (905)568-26-87, e-mail: angastroi@mail.ru.
Давид Ваганович Гандилян, магистрант факультета физики МГУ им. М. В. Ломоносова, e-mail: david.ghandilyan@mail.ru.

SCIENTIFIC AND TECHNICAL BASIS FOR APPLICATION OF NANOSTRUCTURED MATERIALS SCIENCE AND NANOELECTRONICS IN THE SYSTEMS OF ELECTROMECHANICAL CONVERTERS OF SPECIAL-PURPOSE ENERGY

S. V. Gandilian, D. V. Gandilian

The article describes the current state of a completely new branch of science – microsystem electromechanics. A wide range of its practical applications and prospects for the future development are analyzed. Two main methods for creation of micro- and nanoelectromechanical energy converters as the basic elements of microsystem electromechanics are discussed in detail: top-down and bottom-up. The article presents the main design processes for basic functional elements of microsystem electromechanics and describes areas of their application in traditional and innovative equipment (information and computer technology, medicine, aerospace and missile systems etc.). Some focal issues of the general physical and mathematical modeling of microminiature and nanoelectromechanical systems (MEMS and NEMS) are considered. A new generalized approach to the study of dynamic and energy characteristics of MEMS and NEMS as complex dynamic systems with binary coupled subsystems is proposed. On the basis of suggested theoretical principles and models, the possibility to study electrophysical characteristics of the biological nanostructures is considered.

Key words: microminiature electromechanics, nanoelectromechanics MEMS and NEMS, binary coupled systems, self-organization, electrobiology, and magnetobiology.

References

1. But D. A. Electromechanics today and tomorrow // *Electricity*. – 1995. – No. 1. – Pp. 2 – 10; 1995. – No.2. – Pp. 2 – 10.
2. Kopylov I. P. Where does electromechanics go // *Electrical technology*. – 2007. – No.12. – Pp. 50 – 55.
3. Karaian G. S., Gandilian S. V., Gandilian V. V. Nanotechnology in modern electromechanics // *Electricity*. – 2013. – No.3. – Pp. 2 – 9.
4. Karaian G. S., Gandilian S. V., Gandilian V. V. The current state and prospects for development of microsystem electromechanics // *Nano- and microsystem engineering*. – M. : New Technologies publishers, 2017. – Vol. 19. – No. 6. – Pp. 370 – 380.
5. Gandilian S. V. Some issues of general physical and mathematical modeling of micro- and nanoelectromechanical systems (MEMS and NEMS) // *Nano- and microsystem engineering*. – M. : New Technologies publishers, 2015. – Vol. 8. – Pp. 15 – 32.
6. Alferov Zh. I., Aseev A. G., Gaponov S. V. Nanomaterials and nanotechnologies // *Microsystem engineering*. – 2005. – Vol. 181. – No.8. – Pp. 3 – 13.
7. Varadan V., Vinoy K. D., Jose K. A. RF MEMS and their application. – M. : Technosphaera, 2004. – 263 p.
8. Nano- and microsystem engineering: from research to development / Eds. Maltsev P. P. – M. : Technosphaera, 2005. – P. 361.
9. Nanotechnologies in electronics // Eds. Chaplygin Iu. A. – M. : Technosphaera, 2005. – 446 p.
10. Gallacher B. J., Burdess J. S., Harris A. J., McNie M. E. The design and fabrication of multi-axis vibrating ring gyroscope // *Symposium gyro technology 2001*. Stuttgart, Germany, 2001. – Pp. 10 – 20.
11. Murali P. Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films // *Reports on Progress in Physics*. – 2001. – Vol. 64. – Pp. 1339 – 1388.
12. Dragunov V. P., Kiselev D. E., Sinitskii R. E. Specific features of the electromechanical interactions in MEMS with nonparallel electrodes // *Nano- and microsystem engineering*. – M. : New Technologies publishers, 2017. – Vol. 16. – No. 6. – Pp. 360 – 370.
13. Gubin S. P., Tkachev S. V. Graphene and allied carbon nanoforms. – M. : URSS, 2012. – 101 p.
14. Andrievskii R. A., Ragulia A. V. Nanostructure materials. – M. : Academy publishing center, 2005. – 192 p.
15. Nanotechnology Development Directions: Vision for Nanotechnology in the Next Decade // Eds. M. C. Roco, R. S. Williams and P. Alivisatos: transl. from Eng. – M. : Mir, 2002. – 292 p.
16. Lew H. S. Electro-tension and torque in biological membranes modeled as a dipole sheet // *Fluid Conductors*. – Biomechanics. 1972. – Vol. 5. – No. 4. – Pp. 126 – 132.
17. Karaian, G. S., Gandilian, S. V. Some issues of general physical and mathematical modeling of micro- and nanoelectromechanical systems (MEMS and NEMS) // *Armenian Journal of Physics*. – 2016. – 9 (3). – Pp. 244 – 259. – ISSN 1829-1171.
18. Kovshov A. N., Nazarov Iu. F., Ibragimov I. M. Basic principles of nanotechnology in engineering. – M. : Academy publishing center, 2009. – 237 p.
19. Altman J. Military nanotechnology: Potential applications and preventive arms control. – M. : Technosphaera, 2006. – 424 p.
20. Gandilian S. V. Some issues of general physical and mathematical modeling of micro- and nanoelectromechanical systems // *Nano- and microsystem engineering*. – M. : New Technologies publishers, 2015. – No. 8. – Pp. 15 – 32.
21. Harris P. Carbon nanotubes and related structures. – M. : Technosphaera. – 236 p.
22. Eletskaia A. V. Carbon nanotubes and their emissivity // *Advances in Physical Sciences*. – 2002. – Vol. 172. – No. 4. – Pp. 401 – 438.
23. Nanotechnology Research Directions: Vision for Nanotechnology in the Next Decade / Eds. M. C. Roco, R. S. Williams and P. Alivisatos: transl. from Eng., R. A. Andrianovskii (eds.). – M. : Mir, 2002. – 292 p.
24. Serafi A. M., Kar N. C. Methods for determining the intermediate-axis saturation characteristics of salient-pole synchronous machines from the measured d-axis characteristics // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – Vol. 20, (2005). – No. 1. – Pp. 197 – 206.

25. Sobczyk T. J. Application of higher order forms for the description of electromechanical energy converters. Archives of Electrical Engineering. – PWN, Warsaw. – Vol. 60, (2011). – No.1. – Pp. 142 – 149.
26. White D. C., Woodson H. Electromechanical energy conversion. – M. – L. : Energia, 1964. – 528 p.
27. Iosifian A. G. Evolution of physical basis for electrical technology and electrodynamics // Electricity. – 1987. – No.12. – Pp. 26 – 32; 1989. – No. 9. – Pp. 19 – 26.
28. Kopylov I. P., Gandilian S. V., Gandilian V. V. Some issues of general physical and mathematical modeling of electro-mechanical energy converters // Electrical technology. – 1998. – No.9. – Pp. 25 – 40.
29. Ulrich A. S. Biophysical aspects of using liposomes as delivery vehicles // Bioscience Reports. – Vol. 22. – No. 2. – 2002. – Pp. 328 – 334.
30. Tikadzumi S. Physics of ferromagnetism. Magnetic properties of a substance. – M. : Mir, 1983. – 302 p.
31. Voronov V. K., Podoplelov A. V., Sagdeev R. Z. Physical basis of nanotechnology. – M. : URSS publishers, 2010. – 429 p.
32. Chechnin N. G. Magnetic nanostructures and their application. – M. : Grant Victoria TK publishers, 2006. – 166 p.

Seiran Vartovich Gandilian, *Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Chief of Laboratory of the Faculty of Physics of Yerevan State University, tel.: + 7 (905) 568-26-87, e-mail: angastroi@mail.ru.*

David Vaganovich Gandilian, *Master's Degree Student of the Faculty of Physics of MSU named after Lomonosov, e-mail: david.ghandilyan@mail.ru.*