

УДК 621.315.592

PACS: 81, 81.07.-b

Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования динамических и энергетических характеристик микро- и наноэлектромеханических систем

С. В. Гандилян, Д. В. Гандилян

В работе предложен новый обобщенный подход обобщенного физико-математического и компьютерного моделирования динамических и энергетических характеристик микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС), как сложных динамических систем с бинарно-сопряженными подсистемами. На базе предложенных теоретических принципов и моделей рассматриваются возможности исследования электрофизических характеристик биологических наноструктур. Рассматриваются некоторые узловые вопросы перспективного развития МЭМС и НЭМС, если в структурах их функциональных элементов возбуждения имеются активные наноструктурированные материалы дуального назначения, в которых при отсутствии внешних электромагнитных полей наблюдаются и намагниченность, и электрическая поляризация, так называемые сегнетоэлектромеханики.

Ключевые слова: микроминиатюрная электромеханика, наноэлектромеханика, МЭМС и НЭМС, физико-математическое моделирование, классификация, принцип действия, бинарно-сопряженные системы, самоорганизация, электробиология и магнитобиология

Ссылка: Гандилян С. В., Гандилян Д. В. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 6. С. 419.

Reference: S. V. Gandilyan and D. V. Gandilyan, Usp. Prikl. Fiz. **8** (6), 419 (2020).

Введение

Данная работа является органическим продолжением работ автора прошлых лет [1–4], в которых, наряду с приведенным кратким обзором современного состояния совершенно нового направления микросистемной техники (МСТ) – микросистемной электромеханики, рассматриваются неко-

торые узловые вопросы обобщенного физико-математического и компьютерного моделирования динамических и энергетических характеристик ее базовых объектов исследования: МЭМС (Microminiature electromechanical systems – MEMS) и НЭМС (Nanoelectromechanical systems – NEMS).

Системный анализ, проведенный на рубеже XX и XXI столетий, фундамен-

Гандилян Сейран Вартович¹, преподаватель, к.ф.-м.н.

Гандилян Давид Ваганович², инженер.

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

E-mail: GandilyanSV@mgsu.ru

² Институт проблем механики

им. А. Ю. Ишлинского РАН.

Россия, 119526, Москва, пр-т Вернадского, 101, корп. 1.

E-mail: david.gandilyan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 ноября 2020 г.

© Гандилян С. В., Гандилян Д. В., 2020

тальных исследований в области физико-математического моделирования и технологического изготовления МЭМС и НЭМС приведен в многочисленных зарубежных и российских научных публикациях, например, в [5–10]. По мнению специалистов, в последние годы прогресс в области развития теории и моделей микромира (и соответственно в области микросистемной электромеханики) достигается в основном путем использования более мощных компьютерных программ, и в гораздо меньшей мере за появление новых теоретических представлений и моделей.

На сегодняшний день, дальнейшее развитие микросистемной электромеханики (особенно в наноструктурном уровне) требует от физиков и химиков решить задачи более глубокого изучения строения веществ, при котором на первый план выходит совершенствование методов получения кристаллической решетки с закономерным распределением атомов и молекул в зависимости от предлагаемых свойств назначения этих материалов, резкое повышение качества атомно-молекулярных композиций, а также углубленное изучение электромагнитных и тепловых полей, а также развитие специальных нелинейных теорий для уточнения численных методов моделирования в задачах автоматизированного проектирования МЭМС и НЭМС [11–13].

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

В исследованиях по физико-математическому моделированию МЭМС и НЭМС первостепенным является рассмотрение следующих узловых вопросов: моделирование процессов энергопреобразования между функциональными элементами («индуктором» и «якорем») микромини-

атюрных и наноэлектромеханических преобразователей (ЭМП) энергии; их рассмотрение в системе (ансамбле) других микросистемных структур; взаимодействие МЭМС и НЭМС с внешней средой и, как результат этих исследований, их комплексное физико-математическое и компьютерное моделирование [14].

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.

1. Классификация МЭМС и НЭМС

С технологической точки зрения микроминиатюрные электромеханические системы (МЭМС) — это совокупность электронных и механических элементов (компонентов), выполненных в микро исполнении в одном технологическом цикле на основе групповых методов. Бурное развитие микроминиатюрной электромеханики в последние 15–20 лет связано, прежде всего, с широким использованием микроэлектронных технологий с сотовой микроструктурой. Такой подход позволил за короткое время создать новые объемные конструктивные элементы: мембраны, балки, полости, отверстия с большим аспектным соотношением (калибром) — за счет использования так называемых LiGA технологий на основе синхронного излучения и т. д. При этом разнообразные приборы, схемы, устройства и подсистемы, в которых динамические процессы энергопреобразования носят электромеханический характер, а структурные функциональные элементы имеют размер (по меньшей мере в одном направлении) $100 \text{ нм} < l < 100000 \text{ нм}$ ($0,1 \text{ мкм} < l < 0,1 \text{ мм}$), могут быть частью или законченным изделием МЭМС.

В случае использования нанотехнологий и наноструктурных материалов в микросистемной электромеханике следует использовать термин наносистемная электромеханика. Это происходит при тех значениях размеров и мощностей, при которых созданные человеком электромеханические преобразователи энергии имеют мощность, соизмеряемую с мощностью биологических преобразований энергии устройств и наибольших молекул живых организмов. На этом уровне мощностей господствует одно из стратегических направлений современной наноауки – наноэлектромеханика, которая рассматривает электромеханические системы (НЭМС) со структурными функциональными элементами размером (ходя в одном направлении) $10 \text{ нм} < l < 100 \text{ нм}$.

При этом частью или законченным изделием НЭМС могут быть открытые недавно элементы нано структурированных веществ такие, как нанотрубки, молекулярные моторы, комплексы ДНК, квантовые ямы, молекулярные переключатели и т. д. В настоящее время на основе подражания природным аналогам (например, используя возможности и функциональные свойства биологических наноструктур), ведутся работы по созданию НЭМС, в которых часть функций выполняют элементы живых организмов (биомолекулы, бактерии и т. д.).

При этом открытые недавно организованные наноструктуры вещества, такие как нанотрубки, молекулярные моторы, комплексы ДНК, квантовые ямы, молекулярные переключатели и т. д., или их подсистемы, могут быть частью или законченным изделием НЭМС [15–17]. Несмотря на имеющиеся между МЭМС и НЭМС сходные характеристики по функциональным применениям в микросистемной технике, сравнительный анализ выявляет их кардинальное отличие по узловым признакам динамического и энергетического состояния.

Основные особенности МЭМС и НЭМС могут быть сформированы следующим образом:

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

- Так как в МЭМС процессы взаимного преобразования механической и электромагнитной энергии обусловлены воздействием механических и электромагнитных сил между микромеханическими элементами, то их физико-математическое моделирование можно осуществить на базе классических законов электрофизики Фарадея-Максвелла и нелинейной модификаций классической теорией электрических цепей.

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

- Если изделия микросистемной техники в области МЭМС по структуре чисто технические, то в области наносистемной техники появляются фундаментальные ис-

следования, в которых устанавливается возможность создания изделий НЭМС с совмещением гармонично действующих технических и природных функциональных элементов [18, 19].

• Разработка искусственных НЭМС является сложнейшей задачей, однако, природой созданы различные наномеханические устройства. Многие известные биологические системы – вирусы, бактерии, одноклеточные микроорганизмы и др. имеют различные приспособления, позволяющие им перемещаться в зависимости от поведения окружающей среды, в том числе под действием электрических импульсов нейронов. Поэтому, одним из актуальных направлений в области создания НЭМС является не только разработка принципиально новых, а подражание уже известным природным молекулярным моторам. Химическое управление такими наноактюаторами осуществляется при помощи изменения состава окружающей среды. Иногда используют свет, который, воздействуя на молекулы, приводит актюатор в движение. К химическим наноактюаторам относятся и биологические молекулярные моторы. Примером такого мотора может быть устройство, способное выталкивать и втягивать сделанный из молекулы ДНК стержень со скоростью почти 190 нанометров в секунду, а общее перемещение может достигать до 3-х микрометров. Диаметр этого стержня 2 нанометра. В качестве источника питания двигатель использует молекулы АТФ (аденозинтрифосфорной кислоты) – стандартный источник энергии, которым пользуются живые клетки. Существует много других наноактюаторов, сделанных из биологических молекул, полимеров, кремния и других материалов. Так как в отличие от биомоторов, созданных человеком по базе их технической аналогии, НЭМС могут функционировать в широком диапазоне температур (от низких температур вплоть до нескольких сотен градусов) и в различ-

ных агрессивных средах, то естественно, что в настоящее время один из главных мотивов, побуждающих нас к изучению живого вещества в наномасштабе – это мотив технологический [20].

• Для нано ЭМП энергии и их систем существенным является интеграция с электронными компонентами. С учетом размерного фактора НЭМС, речь должна идти о наноэлектронике. Однако развитой компонентной базы наноэлектроники пока нет. Поэтому возникает дополнительная проблема интерфейса с компонентной базой микроэлектроники [21].

2. О физических принципах теоретической электромеханики

В большинстве из современных исследований в области теоретических основ макросистемной электротехники (ТОЭ), особенно в комбинированных задачах моделирования процессов генерирования, передача и потребление электрической энергии, как базовые принципы применяются основные положения бинарно-сопряженной электрофизики [22]. В микросистемной электромеханике эти принципы можно применять, вставляя их в зависимости от топологических характеристик функциональных структур МЭМС и НЭМС [23].

При этом:

- анализ и синтез электротехнических систем с рабочим (динамическим) магнитным полем, в том числе и электроиндукционных (индуктивных) ЭМП, во всем диапазоне энергетического и частотного спектра осуществляется на базе уравнений динамики обобщенного Лагранжа-Максвелловского пространства энергетического состояния и *соответственными уравнениями преобразования электромагнитного поля Фарадея-Максвелла* (рис. 1);
- анализ и синтез электротехнических систем с рабочим (динамическим) электрическим полем, в том числе и магнитно-

индукционных (емкостных) ЭМП, во всем диапазоне энергического и частотного спектра осуществляется на базе обобщенного бинарно-сопряженного пространства

энергического состояния и соответственно бинарно-сопряженной модификацией системы уравнений Фарадея-Максвелла (рис. 2).

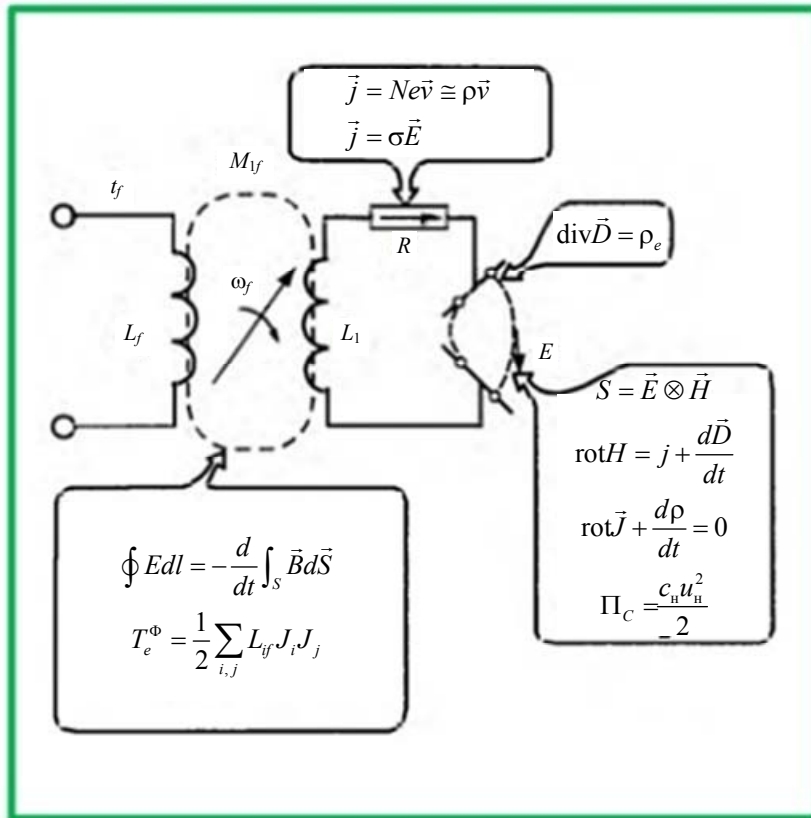


Рис. 1. Электро-электро-индукционная подобласть энергообмена.

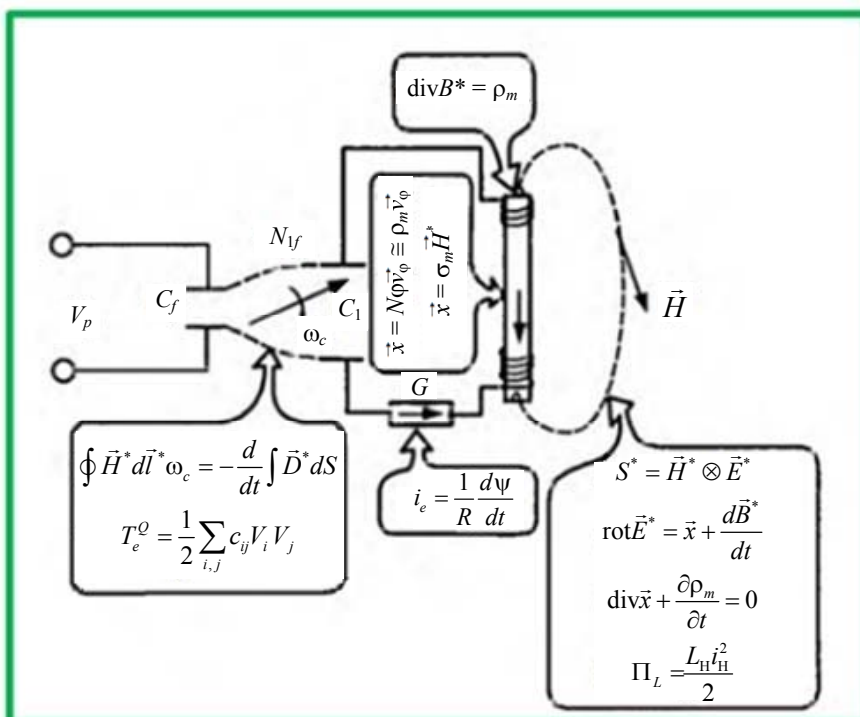


Рис. 2. Магнито-индукционная подобласть энергообмена.

Следует отметить одно важное обстоятельство. Если в Лагранжа-Максвелловской электродинамике емкостные ЭМП с электродной конструкцией рассматриваются в разделе «электростатика», то с точки зрения принципов бинарно-сопряженной электродинамики они получают электродинамическое толкование и рассматриваются как одна из подсистем общего класса емкостных электромеханических преобразователей энергии [24].

Этот факт особенно ярко проявляется в сверхвысокочастотных микроминиатюрных ЭМП, где созданное индуцированным рабочим электрическим полем магнитный поток $-\psi^*$ создает высокочастотное напряжение $-V^* = \frac{d\psi^*}{dt}$ генерирующий

ток $-I_1^* = G_D \frac{d\psi^*}{dt}$, дополнительно к току

емкостной индукции $-I_2^*(t) = -\frac{dQ^*}{dt}$ (обу-

словленное непрерывным перераспределением электрических зарядов на электродах индуктора и якоря) соизмеримо по величине к току емкостной индукции и соизмеримым к ней по величине. При этом внутренняя проводимость емкостного микроминиатюрного ЭМП определяется по формуле $-G_D = \frac{dQ^*}{d\psi^*}$ [25].

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 преобразователей энергии (микроминиатюрных ЭМП энергии).

Определение 2. НЭМС — это многоэлементная динамическая система нели-

нейно взаимодействующих бинарно-сопряженных электро-индукционных и магнитно-индукционных наноэлектромеханических преобразователей энергии (нано-ЭМП энергии).

3. Вопросы обобщенного физико-математического моделирования МЭМС

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 [26, 27], которые выражаются в следующих бинарно-сопряженных эквивалентных формах:

- Принцип действия для электро-индукционных микроминиатюрных ЭМП энергии

$$E_B(t)dt = \sum_{i=1}^n d\left(\oint m_i \mathfrak{U}_i dl_i + \iint d\Psi_i dq_i\right), \quad (1)$$

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

- Принцип действия для магнито-индукционных микроминиатюрных ЭМП энергии

$$E_B^*(t)dt = \sum_{j=1}^h d\left(\oint m_j^* \mathfrak{U}_j^* dl_j + \iint dQ_j^* d\psi_j^*\right), \quad (2)$$

где h — число контуров напряжения; m_j^* — масса; \mathfrak{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) внешней средой в изолированных электромеханических телах $E_B = E_B^* = 0$ энергетические функции $E_B(t)$ и $E_B^*(t)$ характеризуют интенсивность взаимодействия ЭМП с внешней средой.

Для удобства теоретического анализа динамических явлений, особенно при сложных взаимосвязанных электромагнитных контурах, целесообразно признаки энергетического состояния $\Psi(\vec{r}, t)$, $q(\vec{r}, t)$ и $Q^*(\vec{r}, t)$, $\psi^*(\vec{r}, t)$ условно представлять в виде аксиальных обобщенных векторов:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi} &= |\Psi| \bar{e}_\Psi; \quad \bar{Q}^* = |Q^*| \bar{e}_{Q^*}; \quad \bar{q} = |q| \bar{e}_q; \\ \bar{\psi}^* &= |\psi^*| \bar{e}_{\psi^*}, \end{aligned} \quad (3)$$

где \bar{e}_Ψ , \bar{e}_q , \bar{e}_{Q^*} , \bar{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 вектор-матриц токов – $I(r, t) = \dot{q}(r, t)$ и напряжений – $V^*(r, t) = \dot{\psi}^*(r, t)$ в форме следующих разложений

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

Из (4) в первом приближении имеем:

$$\begin{cases} \Psi(\dot{q}(r, t)) = \frac{d\Psi}{d\dot{q}} \dot{q} + \dots = \widehat{L}_D I + \dots \\ Q^*(\dot{\psi}^*(r, t)) = \frac{dQ^*}{d\dot{\psi}^*} \dot{\psi}^* + \dots = \widehat{C}_D V^* + \dots \end{cases} \quad (5)$$

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 энергии.

Из (1)–(5) можно получить исходные уравнения электродинамики и электромеханики микроминиатюрных ЭМП энергии в следующих векторно-матричных формах:

– для индуктивных ЭМП энергии

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{dt} + \widehat{R}_D J = V_L, \\ F_{\text{эм}} = -\frac{d}{dx} W_L = -\frac{d}{dx} \left[I^\tau \frac{d\widehat{L}_D}{dx} I \right], \\ W_L = I^\tau \frac{d\widehat{L}_D}{dx} I, \end{cases} \quad (6)$$

где W_L – энергия рабочего магнитного поля поверхностной упругости; V_L – напряжение генерации внешних источников энергии; I^τ – транспонированная матрица токов; $\widehat{R}_D = \frac{d\Psi}{dq}$ – матрица динамических значений внутренних сопротивлений; $F_{\text{эм}}$ – электромеханическая сила, действующая на подвижные части микроминиатюрных ЭМП энергии;

– для емкостных ЭМП энергии

$$\begin{cases} \frac{dQ^*}{dt} + \widehat{G}_D V^* = I_c^*, \\ F_{\text{эм}}^* = -\frac{d}{dx^*} W_c = -\frac{d}{dx^*} \left[V^{*\tau} \frac{d\widehat{C}_D}{dx^*} V^* \right], \\ W_c = V^{*\tau} \frac{d\widehat{C}_D}{dx^*} V^*, \end{cases} \quad (7)$$

где W_c – энергия рабочего электрического поля; I_c^* – токи генерации, поступающие во внешнюю цепь; $V^{*\tau}$ – 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 энергии.

Для исследования динамических и энергетических характеристик, не нарушая общности можно предположить, что рассматриваемая МЭМС, как сложная динамическая система, состоит из нелинейно взаимодействующих электро-индукционных (подсистема S с количеством элементов M) и магнитно-индукционных (подсистема L с количеством элементов N) микроминиатюрных ЭМП энергии (рис. 3).

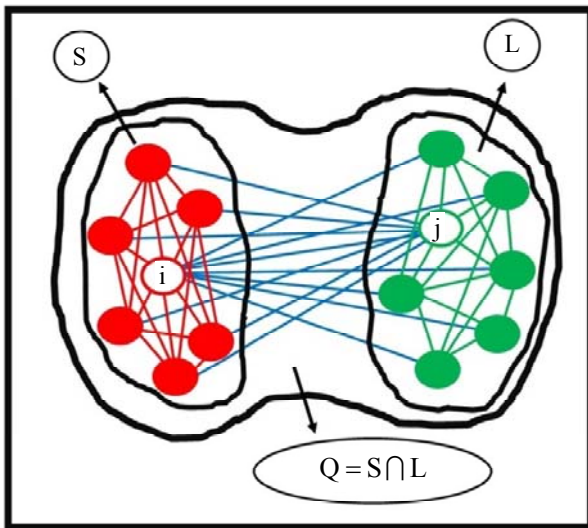


Рис. 3. Обобщенное схематическое представление МЭМС.

В рассматриваемом случае динамическое поведение МЭМС можно описывать на базе 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 энергии) – $(\alpha, \beta) = (x^0, P^0; q^0, \Psi^0; \psi^*, Q^*)$, где приняты следующие обозначения:

$\vec{\alpha}$ – субвектор обобщенных механических и электрофизических координат НЭМС:

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

$\vec{\beta}$ – субвектор обобщенных 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 обобщенной формулировке **принципа наименьшего действия** для диссипативных систем, моделирование динамических режимов МЭМС можно осуществить в многомерном обобщенном пространстве энергетического состояния. Многомерное пространство (α, β) характеризуется определенной функцией энергетического состояния $\mathcal{L}(\alpha, \dot{\alpha}, t)$ – (функцией Лагранжа для данной МЭМС), при которой 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*

$$\left\{ \begin{aligned} \mathcal{S} &= \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L}(\alpha, \dot{\alpha}, t) dt, \\ \alpha(t) &= \underset{\alpha(t)}{\arg \min} \mathcal{S}, \\ \delta \mathcal{S} &= 0, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

где действие – \mathcal{S} , определяется как определенный интеграл-функционал от энергетической функции Лагранжа – $\mathcal{L}(\alpha, \dot{\alpha}, t)$, выражающего в форме разности между эффективной электрокинетической – $T(\dot{\alpha}(t))$ и эффективной электропотенциальной энергией – $U(\alpha(t))$ на траектории динамического режима МЭМС в многомерном пространстве (α, β) [28, 29].

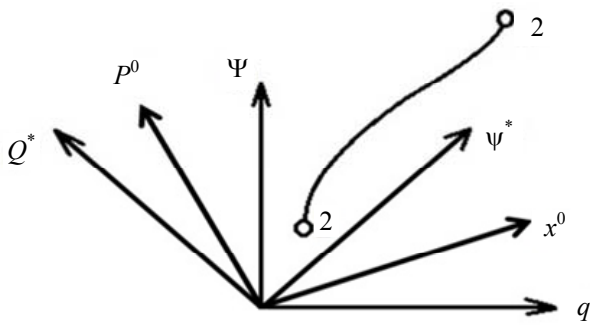


Рис. 4. Траектория динамического режима МЭМС в многомерном пространстве.

Из (4)–(10) получаются обобщенные уравнения Лагранжа второго рода выражающегося в следующей векторно-матричной форме

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\alpha}(t) = \left(\begin{array}{l} I^0 = \frac{dq^0}{dt}; V^{*0} = \frac{d\psi^{*0}}{dt}; \\ \mathfrak{U}_L^0 = \frac{dx_L}{dt}, \mathfrak{U}_c^0 = \frac{dx_c}{dt} \end{array} \right), \\ F^0(t) = \left(\begin{array}{l} \mathfrak{E} = -\frac{d\Psi^0}{dt}; M^* = -\frac{dQ^{0*}}{dt}, \\ F_{\text{мех}} = \frac{dP^0}{dt} \end{array} \right), \end{array} \right. \quad (12)$$

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

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

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

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

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

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

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

При этом обобщенная Лагранжевая функцию для МЭМС можно представить в следующей форме:

$$\mathcal{L}_\circ = \mathcal{L}_L + \mathcal{L}_C + \Delta\mathcal{L}_{LC}, \quad (16)$$

где $\Delta\mathcal{L}_{LC}$ – член Лагранжиана учитывающее нелинейное электрофизическое взаимодействие между функциональными элементами системы электро-индукционного (индуктивного) и магнитно-индукционного (емкостного) действия.

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

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

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

$$\left\{ \begin{aligned} T_L &= T_L^M + T_L^\exists, U_L = U_L^M + U_L^\exists, \\ T_C &= T_C^M + T_C^\exists, U_C = U_C^M + U_C^\exists, \end{aligned} \right. \quad (18)$$

где

• T_L^M и T_C^M , T_L^\exists и T_C^\exists – энергии механических движений подвижных функциональных элементов и соответственные электрокинетические энергии МЭМС

$$\left\{ \begin{aligned} T_L^M &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M m_i \dot{x}_i^2, \\ T_L^\exists &= \left(\sum_{l=1}^M \sum_{j=1}^M \dot{q}_l \widehat{L}_{ij} \dot{q}_j^\tau \right) = q^0 \widehat{L}^0 q^{0\tau}, \\ T_C^M &= \frac{1}{2} \sum_{l=1}^N m_j^* \dot{x}_j^{*2}, \\ T_C^\exists &= \left(\sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^N \dot{\psi}_l^* \widehat{C}_{ij} \dot{\psi}_j^{*\tau} \right) = \psi^{0*} \widehat{C}^0 \psi^{0*\tau}, \end{aligned} \right. \quad (19)$$

где $\widehat{L}^0 = \widehat{L}_{ij}$ – матрица собственных и взаимных индуктивностей, а $\widehat{C}^0 = \widehat{C}_{ij}$ – матрица собственных и взаимных емкостей 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 емкостных – C_{Hj} ($j = 1, \dots, M$) статических элементах МЭМС

$$\left\{ \begin{aligned} U_L^\exists &= \frac{1}{2} \sum_{l=1}^N q_l \widehat{L}_{Hi} q_l^\tau, \\ U_C^\exists &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^F \psi_j^* \widehat{C}_{Hj} \psi_j^{*\tau}. \end{aligned} \right. \quad (20)$$

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

уравнения электродинамики

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi^0 + \dot{q}^0 \widehat{R}_D + \dot{\psi}^{*0} \frac{d\widehat{K}_N^M}{dt} \dot{\psi}^{*0\tau} + \\ + \widehat{K}_N^M \frac{d^2 \psi^{*0}}{dt^2} = \dot{\psi}_{CL}^{*0}, \\ \frac{dQ^{0*}}{dt} + \psi^{*0} \widehat{G}_D + \dot{q}^{0\tau} \frac{d\widehat{K}_N^M}{dt} \dot{q}^{0\tau} + \\ + \widehat{K}_N^M \frac{d^2 q^0}{dt^2} = \dot{q}_{LC}^0, \end{aligned} \right. \quad (21)$$

уравнения электромеханических сил действующих на функциональные элементы МЭМС

$$F_{эм}^0 = \frac{d}{dx^0} \left[\left(\dot{q}^0 \widehat{L}^0 \dot{q}^{0\tau} \right) + \left(\dot{\psi}^{*0} \widehat{C}^0 \dot{\psi}^{*0\tau} \right) + \left(\dot{q}^0 \widehat{K}_N^M \dot{\psi}^{*0\tau} \right) \right], \quad (22)$$

где \dot{q}_{LC}^0 и $\dot{\psi}_{CL}^{*0}$ – субвекторы токов и напряжений между емкостными и индук-

тивными функциональными элементами МЭМС выражаются в форме:

$$\begin{cases} \dot{q}_{LC}^0 = (\dot{q}_{LC/1}, \dot{q}_{LC/2}, \dots, \dot{q}_{LC/M}), \\ \dot{\psi}_{CL}^{*0} = (\dot{\psi}_{CL/1}, \dot{\psi}_{CL/2}^*, \dots, \dot{\psi}_{CL/N}^*). \end{cases} \quad (23)$$

Системы уравнений (11)–(23) носят универсальный характер для МЭМС всевозможной конструкции и их совместное решение полностью определяет динамическое поведение обобщенной модели МЭМС в любых режимах. Для исследования динамических режимов и расчета энергетических характеристик МЭМС, имеющие конкретное предназначение и структуру необходимо в задачах моделирования и автоматизированного проектирования в этих уравнениях учесть все конструкционные и структурные 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

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

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 [30], представляя их в форме квадратичного разложения

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

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

Наглядным примером применения рассмотренных теоретических принципов обобщенного моделирования МЭМС, является исследование его двухэлементной структуры ($M = N = 1$), как совмещённой системы простых (однофазных) индуктивных и емкостных микроминиатюрных ЭМП (рис. 5).

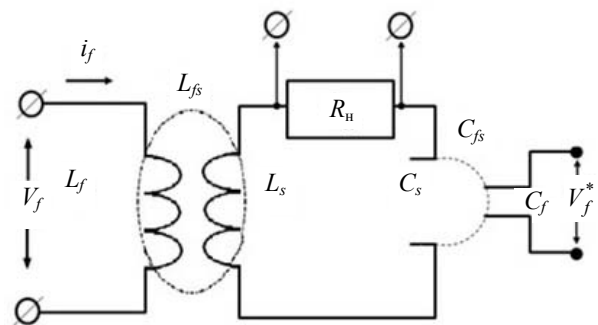


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема элементарной МЭМС.

При стационарных связях и симметричных режимах и при весьма малых отклонениях от линейности (когда $\Delta \mathcal{L}_{LC} \ll \mathcal{L}_L$ и $\Delta \mathcal{L}_{LC} \ll \mathcal{L}_C$) (в разложении (27) можно ограничиться только первым постоянным слагаемым):

$$K_N^M(q_i, \psi^{*j}) = \text{const} = K_0. \quad (28)$$

При этом матрица \widehat{K}_N^M выражается в следующей форме:

$$\widehat{K}_N^M = K_0 \widehat{E}, \quad (29)$$

где \widehat{E} – единичная матрица размерностью (2×2) .

Для указанной двухэлементной структуры МЭМС уравнение (23) выражается в форме:

- уравнения электродинамики для «якорных» цепей

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_s}{dt} + R_s \mathcal{J}_s + K_0 \frac{dV_s^*}{dt} = V_s, \\ \frac{dQ_s^*}{dt} + G_s V_s^* + K_0 \frac{d\mathcal{J}_s}{dt} = \mathcal{J}_s^*, \end{cases} \quad (30)$$

где

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s \mathcal{J}_s + L_{fs} i_f, \\ Q_s^* = C_s V_s^* + C_{fs} V_f^*, \end{cases} \quad (31)$$

- уравнения возбуждения для «индукторных цепей»

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_f}{dt} + i_f R_f = V_f, \\ \frac{dQ_f^*}{dt} + G_f V_f^* = i_f^*, \end{cases} \quad (32)$$

где

$$\begin{cases} \Psi_f = L_f i_f + L_{sf} \mathcal{J}_s, \\ Q_f^* = C_f V_f^* + C_{sf} V_s^*. \end{cases} \quad (33)$$

Совместное решение системы уравнений (30)–(34) полностью определяет электродинамическое поведение микроминиатюрной индуктивно-емкостной ЭМП в любых режимах.

4. Вопросы обобщенного физико-математического моделирования nano ЭМП энергии и их систем (НЭМС)

При этом для обобщенного физико-математического моделирования и автоматизированного проектирования nano ЭМП энергии необходимо исходные базовые уравнения электро-индукционной и магнитно-индукционной микросистемной

электромеханики (1)–(27) (уравнения преобразования электромагнитного поля «LC» контура в подобластях индуктивности «L» и емкости «C» соответственно) корректировать основополагающими принципами квантовой электрофизики, учитывая следующие узловые факторы:

1. Наряду с имеющимися в микросистемной электромеханике определяющее значение силами классического назначения (таких как сила трения, сила электрофизического взаимодействия и т. д.) в наносистемной электромеханике (на расстояниях порядка 10 нм до 250 нм) доминирующее значение приобретает и обусловленное квантомеханическим эффектом Казимира сила Казимира-Лифшица, во всех ее проявлениях (так как в этих расстояниях давление, создаваемое эффектом Казимира, оказывается сравнимым с атмосферным). Большое перспективное фундаментальное и практическое значение эффекта Казимира (особенно в задачах развития квантовых компьютерных технологий) выявилось после обнаружения возможности возникновения отталкивающей силы Казимира между функциональными элементами сложной конфигурации (например, при взаимодействиях сферы и плоскости или взаимодействие более сложных объектов) [30]. **Отдельные функциональные элементы nano ЭМП энергии могут быть связаны между собой Ван-дер-Ваальсовыми связями, вследствие чего они легко двигаются друг относительно друга. Такие nano ЭМП энергии можно применять как гигагерцовые резонаторы и осцилляторы, нанотрубчатые переключатели, элементы памяти, наношприцы, линейные наносерводвигатели со встроенным устройством для определения положения и т. д. [31].**

2. Процессы энергопреобразования и соответствующие энергетические характеристики nano ЭМП энергии и их систем сильно зависят от топологических характеристик их функциональных элементов.

При этом более наглядное и фундаментальное значение приобретает принцип поляризации и деполяризации магнитных и электрических потоков энергопреобразования [32, 33]. В нано ЭМП энергии, замкнутые энергетические контуры энергопреобразования могут быть образованы с помощью электропроводящих и магнитопроводящих нанотрубок:

а) для электро-индукционных нано ЭМП элементарным функциональным элементом энергопреобразования (базовой ячейкой) является замкнутая сверх электропроводящая нанотрубка (где $J = \sigma_e E$ – плотность электрического тока проводимости), энергетическое состояние которого в фазовом пространстве обобщенных сил Лагранжа-Максвелла – $(\Psi(t), q(t))$ представляется неподвижной точкой устойчивости;

б) аналогично для магнитно-индукционных нано ЭМП элементарным функциональным элементом энергопреобразования (базовой ячейкой) является замкнутая сверхмагнитнопроводящая нанотрубка (где $\chi = \sigma_m H^*$ – плотность «магнитного тока проводимости»), энергетическое состояние которого в сопряженном фазовом пространстве – $(Q^*(t), \psi^*(t))$ представляется неподвижной точкой устойчивости (рис. 6) [34].

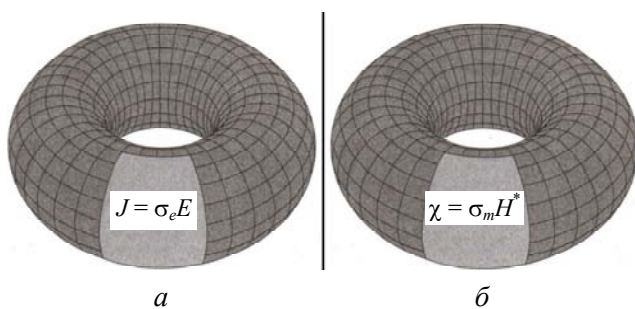


Рис. 6. Схема замкнутых нано трубок: а – электропроводящих, б – магнитнопроводящих.

Замкнутые электропроводящие и магнитнопроводящие нанотрубки в электроиндукционных и магнитноиндукционных подобластях энергопреобразования обра-

зуют вокруг себя двухсвязанные (взаимохватывающие) пространства, энергетические состояния которых, при слабых возмущениях внешних механических нагрузок, электромагнитных и тепловых полей (не нарушающее топологию наноструктуры и сверхпроводящее состояние) остаются неизменным.

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.

Наглядной иллюстрацией сказанному дает биофизика на уровне природных наноактюаторов. 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 долго [35].

3. Физико-математическое моделирование базовых функциональных (исполнительных) элементов нано ЭМП энергии можно осуществить представляя их в форме систем нелинейно взаимодействующих базовых функциональных (исполнительных) элементов из электропроводящих и магнитопроводящих нанокристаллических трех-, дву-, одно- и нульмерных (поликристаллы – 3D; пленки и слои – 2D; нанотрубки, волокна и прутки – 1D и наночастицы – 0D, соответственно) материалов, характерные размеры которых находятся в диапазоне эффективного действия законов квантовой электрофизики.

При этом, в задачах физико-математического анализа процессов энергопреобразования в нано ЭМП энергии, электропроводящие и магнитнопроводящие нанотрубки с открытым концом могут рассматриваться как кванто-механический аналог электромагнитного колебательного контура LCR, геометрические параметры которого не поддаются точному измерению.

Основные теоретические концепции, исследующие физические явления в областях нанонауки и нанотехнологии, основываются на принципах классической электродинамики Фарадея, Максвелла, Лоренца квантовой электродинамики Планка, Де-Бройля, Дирака и Шредингера [36].

Для решения практических задач моделирования и автоматизированного проектирования нано ЭМП энергии их систем (НЭМС), теоретический синтез классической и квантовой электродинамики можно осуществить на основе кванто-механической корректировки исходных уравнений (1) и (2).

При этом исследования динамических и энергетических характеристик нано ЭМП энергии можно осуществить на базе следующих базовых уравнений классической и квантовой электродинамики:

1. Процесс электромагнитного взаимодействия в наноструктурных ячейках электро-индукционных ЭМП энергии можно описать на основе системы уравнений преобразования электромагнитного поля Фарадея-Максвелла-Лоренца в форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \text{rot} [\vec{B} * \vec{u}], \\ \text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right), \\ m_3 \frac{d\vec{v}_e}{dt} = e_3 \left(\vec{E} + [\vec{v}_e * \vec{B}] \right), \\ \text{div } \vec{B} = 0, \\ \vec{B} = \text{rot } \vec{A}, \text{ div } \vec{D} = \rho, \\ \vec{j} = Ne\vec{v} \cong \rho\vec{v}, \end{array} \right. \quad (34)$$

где \vec{u} – скорость деформации электропроводящих нанотрубок; ρ и \vec{j} – плотности электрического заряда и тока, обусловленные наличием электронного «газа» проводимости; m_3 – эффективная масса; e_3 – эффективный заряд; \vec{v}_e – скорость центра масс «индуктора» нано ЭМП энергии.

2. Процессы электромагнитного взаимодействия в наноструктурных ячейках магнитно-индукционных ЭМП энергии можно описать на основе бинарно-сопряженной модификации уравнений Фарадея-Максвелла-Лоренца, где представление о магнитных зарядах (монополи Дирака) — удобная абстракция [37, 38]. Они представляются в форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot } \vec{H}^* = -\frac{\partial \vec{D}^*}{\partial t} - \text{rot} [\vec{D}^* * \vec{u}^*], \\ \text{rot } \vec{E}^* = \vec{x} + \frac{\partial \vec{B}^*}{\partial t}, \\ m_3^* \frac{d\vec{v}_\varphi}{dt'} = \varphi \left(\vec{H}^* + [\vec{v}_u^* * \vec{D}^*] \right), \\ \text{div } \vec{D}^* = 0, \vec{D}^* = \text{rot } \vec{K}, \text{ div } \vec{B}^* = \rho_m, \\ \vec{x} = N\varphi\vec{v}_\varphi \cong \rho_m\vec{v}_\varphi, \\ \varphi = \varphi_0 n, n = 1, 2, \dots, \end{array} \right. \quad (35)$$

где \vec{u}^* – скорость деформации магнитнопроводящих нанотрубок; m_3^* – эффективная масса; φ – эффективный «магнитный заряд» (φ_0 – численная величина кванта магнитного потока-флюксоида); \vec{v}_φ^* – скорость движения центра масс магнитной наноточки.

Имеющее важное практическое значение в задачах физико-математического и компьютерного моделирования нано ЭМП энергии, синтез базовых принципов классической электродинамики и квантовой электродинамики можно осуществить на основе уравнений (1)–(27), (34), (35), следуя рассуждениям приведенных в [39, 40].

Заключение

Более глубокое исследование разработанных теоретических принципов и их применение в задачах физико-математического и компьютерного моделирования динамических и энергетических характеристик МЭМС и НЭМС, задача отдельных научных исследований и будет рассматриваться в других работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гандилян С. В. // Нано- и микросистемная техника. 2015. Т. 181. № 8. С. 15.
2. Гандилян С. В., Гандилян Д. В. // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 7. С. 975.
3. Гандилян С. В., Поддаева О. И., Панфилова М. И., Новоселова О. В. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 2. С. 124.
4. Караян Г. С., Гандилян С. В., Гандилян В. В. // Электричество. 2013. № 3. С. 2.
5. Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В., Копьев П. С., Панов В. И., Полторацкий Э. А., Сибельдин Н. Н., Сирус Р. А. // Микросистемная техника. 2005. № 8. С. 3.
6. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления развития / под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса / Пер. с англ. – М.: Мир, 2002.
7. Нанобиотехнология биомиметических мембран / под ред. Дональд К. Мартин. – М.: Научный мир, 2012.
8. Сарычев А. Г., Шалаев В. М. Электродинамика метаматериалов. – М.: Научный мир, 2011.
9. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. – М.: Техносфера, 2004.
10. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2004.
11. Lew H. S. // Biomechanics. 1972. Vol. 5. № 4. P. 126.
12. Минкин В. И. // Российский химический журнал. 2004. Т. 44. № 6. С. 3.
13. Knobel R., Cleland A. // Nature. 2003. Vol. 424. P. 291.
14. Харрис П. Углеродные нанотрубки и родственные структуры: Новые материалы XXI века. – М.: Техносфера, 2003.
15. Нано- и макросистемная техника: от исследований к разработкам / под ред. П. П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2005.
16. Паун Г., Розенберг Г., Салома А. ДНК-компьютер. – М.: Мир, 2004.
17. Татаренко Н. И., Кравченко В. Ф. Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. – М.: Физматлит, 2006.
18. Лукашин А. В., Елисеев А. А. Применение функциональных наноматериалов (МЭМС, НЭМС, нанoeлектроника). – М.: Изд-во МГУ им. Ломоносова, 2007.
19. Пул Ч. Мир материалов и технологий (Нанотехнологии). – М.: Техносфера, 2004.
20. Kocherginsky N. M., Moshkovsky Y. S., Osak I. S., Piruzian L. A. The model of biological membrane for the investigation of biologically active compounds. 1983. USSR Patent # 1043564.
21. Уайт Д. С., Вудсон Г. Х. Электромеханическое преобразование энергии. – М.-Л.: Энергия, 1964.
22. Иосифьян А. Г. // Электричество. 1987. № 12. С. 26; 1989. № 9. С. 19.
23. Копылов И. П., Гандилян С. В., Гандилян В. В. // Электротехника. 1998. № 9. С. 25.
24. Serafi A. M., Kar N. C. // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005. Vol. 20. № 1. P. 197.
25. Sobczyk T. J. // Archives of Electrical Engineering. 2011. Vol. 60. № 1. P. 142.
26. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1992.
27. Фейман Р., Лейстон Р., Сэндс М. Феймановские лекции по физике. Т. 6. – М.: Эдиториал УРСС, 2004.
28. Сидняев Н. И., Вилисова Н. Т. Введение в теорию планирования эксперимента. – М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2011.
29. Копылов И. П. Математическое моделирование электромеханических преобразователей энергии. – М.: Высшая школа, 2001.
30. Яфаров Р. К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. – М.: Физматлит, 2009.
31. Lamoreaux S. K. // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 78. № 1. P. 186.
32. Вишков С. А. Фазовые и структурные переходы жидкокристаллических наносистем. – М.: Высшая школа, 2012.
33. Кадомцев В. В. // УФН. 1987. Т. 151. С. 172.
34. Криогенные электрические машины / под ред. Н. Н. Шереметьевского. – М.: Энерго-атомиздат, 1985.
35. Воронов В. К., Подоплелов А. В., Сагдеев Р. З. Физические основы нанотехнологии. – М.: Изд-во URSS, 2010.
36. Чечнин Н. Г. Магнитные наноструктуры и их применение. – М.: Изд-во Грант Виктория ТК, 2006.
37. Фраерман А. А. // УФН. 2012. Т. 182. № 12. С. 345.
38. Пятаков А. П., Звездин А. К. // УФН. 2012. Т. 182. № 12. С. 593.
39. Ulrich A. S. // Bioscience Reports. 2002. Vol. 22. № 2. P. 328.
40. Стишков С. М. // УФН. 2004. Т. 171. № 8. С. 853.

Some issues of generalized physical and mathematical modeling of dynamic and energy characteristics of micro- and nanoelectromechanical systems (MEMS and NEMS)

S. V. Gandilyan¹ and D. V. Gandilyan²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
26 Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russia

² Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences
101-1 Prospect Vernadskogo, Moscow, 119526, Russia

Received November 16, 2020

The paper proposed a new generalized approach to generalized physical-mathematical and computer modeling of the dynamic and energy characteristics of MEMS and NEMS as complex dynamic systems with binary-conjugate subsystems. The possibilities of studying the electrophysical characteristics of biological nanostructures are considered on the basis of the proposed theoretical principles and models.

Some nodes of the prospective development of MEMS and NEMS are considered, if the involved dual-purpose materials are excited in the structures of their functional elements, in which in the absence of external electromagnetic fields, both magnetization and electric polarization, the so-called ferroelectromagnets, are observed.

Keywords: microminiature electromechanics, nanoelectromechanics, MEMS and NEMS, physical and mathematical modeling, classification, principle of operation, binary-conjugate systems, self-organization, electrobiology and magnetobiology.

REFERENCES

1. S. V. Gandilyan, Nano- i mikrosistemnaja tehnika **181** (8), 15 (2015) [in Russian].
2. S. V. Gandilyan and D. V. Gandilyan, Journal of Applied Physics **89** (7), 975 (2019) [in Russian].
3. S. V. Gandilyan, O. I. Poddaeva, M. I. Panfilova, and O. V. Novoselova, Usp. Prikl. Fiz. **8** (2), 124 (2020) [in Russian].
4. G. S. Karayan, S. V. Gandilyan, and V. V. Gandilyan, Jelektrichestvo, No. 3, 2 (2013) [in Russian].
5. Zh. I. Alferov, A. L. Aseev, S. V. Gaponov, P. S. Kop'ev, V. I. Panov, Je. A. Poltorackij, N. N. Sibel'din, R. A. Sirius, Microsystems Technology, No. 8, 3 (2005) [in Russian].
6. Nanotehnologija v blizhajšem desjatiletii. Prognoz napravlenija razvittija [Nanotechnology in the next decade. Development direction forecast], Edited by M. K. Roko, R. S. Uil'jams i P. Alivisatos: Trans. (Mir, Moscow, 2002) [in Russian].
7. Nanobiotehnologija biomimeticheskikh membran [Nanobiotechnology of biomimetic membranes], Edited by Donal'd K. Martin (Nauchnyj mir, Moscow, 2012) [in Russian].
8. A. G. Sarychev and V. M. Shalaev, Jelektrodinamika metamaterialov [Electrodynamics of metamaterials] (Nauchnyj mir, Moscow, 2011) [in Russian].
9. V. Varadan, K. Vinoj, and K. Dzhoze, VCh MJeMS i ih primenenie [RF MEMS and their applications] (Tehnosfera, Moscow, 2004) [in Russian].
10. Ch. Pul and F. Oujens, Nanotehnologii (Tehnosfera, Moscow, 2004) [in Russian].
11. H. S. Lew, Biomechanics **5** (4), 126 (1972).

12. V. I. Minkin, Russian Journal of General Chemistry **44** (6), 3 (2004) [in Russian].
13. R. Knobel and A. Cleland, Nature **424**, 291 (2003).
14. P. Harris, *Uglerodnye nanotrubki i rodstvennye struktury: Novye materialy XXI veka [Carbon Nanotubes and Related Structures: New Materials of the 21th Century]* (Tehnosfera, Moscow, 2003) [in Russian].
15. *Nano- i makrosistemnaja tehnika: ot issledovanij k razrabotkam [Nano- and macrosystem technology: from research to development]* Edited by P. P. Mal'ceva (Tehnosfera, Moscow, 2005) [in Russian].
16. G. Paun, G. Rozenberg, and A. Saloma, *DNK-komp'juter [DNA computer]* (Mir, Moscow, 2004) [in Russian].
17. N. I. Tatarenko and V. F. Kravchenko, *Avtoemissionnye nanostrutury i pribory na ih osnove [Field emission nanostructures and devices based on them]* (Fizmatlit, Moscow, 2006) [in Russian].
18. A. V. Lukashin and A. A. Eliseev, *Primenenie funkcional'nyh nanomaterialov (MJeMS, NJeMS, nanoelektronika) [Application of functional nanomaterials (MEMS, NEMS, nanoelectronics)]* (Izd. MSU, Moscow, 2007) [in Russian].
19. Ch. Pul, *Mir materialov i tehnologij (Nanotehnologii) [World of Materials and Technologies (Nanotechnology)]* (Tehnosfera, Moscow, 2004) [in Russian].
20. N. M. Kocherginsky, Y. S. Moshkovsky, I. S. Osak, and L. A. Piruzian, The model of biological membrane for the investigation of biologically active compounds. 1983. USSR Patent # 1043564.
21. D. S. Uajt and G. H. Vudson, *Jeletromehaničeskoe preobrazovanie jenergii [Electromechanical energy conversion]* (Jenergija, Moscow-Leningrad, 1964) [in Russian].
22. A. G. Iosifyan, *Jelettrichestvo*, No. 12, 26 (1987); No. 9, 19 (1989) [in Russian].
23. I. P. Kopylov, S. V. Gandilyan, and V. V. Gandilyan, *Jeletrotehnika*, No. 9, 25 (1998) [in Russian].
24. A. M. Serafi and N. C. Kar, IEEE Transactions on Energy Conversion **20** (1), 197 (2005).
25. T. J. Sobczyk, Archives of Electrical Engineering **60** (1), 142 (2011).
26. L. D. Landau and E. M. Lifshic, *Jeletrodinamika sploshnyh sred [Continuous media electrodynamics]* (Nauka, Moscow, 1992) [in Russian].
27. R. Fejman, R. Lejston, and M. Sjends, *Fejmanovskie lekcii po fizike [Feynman lectures in physics]. Vol. 6.* (Jeditorial URSS, Moscow, 2004) [in Russian].
28. N. I. Sidnjaev and N. T. Vilisova, *Vvedenie v teoriju planirovanija jeksperimenta [Introduction to Experiment Design Theory]* (Izd. BMSTU, Moscow, 2011) [in Russian].
29. I. P. Kopylov, *Matematicheskoe modelirovanie jeletromehaničeskikh preobrazovatelej jenergii [Mathematical modeling of electromechanical energy converters]* (Vysshaja shkola, Moscow, 2001) [in Russian].
30. R. K. Jafarov, *Fizika SVCh vakuumno-plazmennyyh nanotehnologij [Physics of microwave vacuum-plasma nanotechnology]* (Fizmatlit, Moscow, 2009) [in Russian].
31. S. K. Lamoreaux, Phys. Rev. Lett. **78** (1), 186 (1997).
32. S. A. Vshivkov, *Fazovye i strukturnye perekhody zhidkokristallicheskih nanosistem [Phase and structural transitions of liquid crystal nanosystems]* (Vysshaja shkola, Moscow, 2012) [in Russian].
33. V. V. Kadomcev, UFN **151**, 172 (1987) [in Russian].
34. *Kriogennyye jelettricheskie mashiny [Cryogenic electrical machines]*, Edited by N. N. Sheremet'evskogo (Jenergo-atomizdat, Moscow, 1985) [in Russian].
35. V. K. Voronov, A. V. Podoplelov, and R. Z. Sagdeev, *Fizicheskie osnovy nanotehnologii [Physical foundations of nanotechnology]* (Izd. URSS, Moscow, 2010) [in Russian].
36. N. G. Chechnin, *Magnitnye nanostruktury i ih primenenie [Magnetic nanostructures and their applications]* (Izd. Grant Viktorija TK, Moscow, 2006) [in Russian].
37. A. A. Fraerman, UFN **182** (12), 345 (2012) [in Russian].
38. A. P. Pjatakov and A. K. Zvezdin, UFN **182** (12), 593 (2012) [in Russian].
39. A. S. Ulrich, Bioscience Reports **22** (2), 328 (2002).
40. S. M. Stishkov, UFN **171** (8), 853 (2004) [in Russian].