

**Физико-математическое моделирование динамических процессов самоорганизации в сложных нанoeлектромеханических системах***С. В. Гандилян, Д. В. Гандилян*

*Рассматриваются вопросы моделирования процессов самоорганизации и само сборки в сложных нанoeлектромеханических системах (НЭМС) с бинарно-сопряженными функциональными элементами подсистем и исследуется возникновение в них эффекта самоорганизации. На базе предложенных принципов моделирования устанавливается возможность создания изделий НЭМС с совмещением действующих гармонично технических и природных функциональных элементов (например, сложных многоэлементных систем нелинейно связанных разноструктурных молекулярных моторов).*

*Ключевые слова:* сложные динамические системы, биоэнергетика, бинарно-сопряженные системы, моделирование, самоорганизация, самосборка, биомембраны, самоорганизация, МЭМС и НЭМС, молекулярные моторы, электробиология и магнитобиология, природоподобные технологии.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-2-78-84

**Введение**

В настоящее время физико-математическое моделирование динамических режимов сложных наноскопических и биологических систем имеет большое теоретическое и практическое значение для фундаментальных исследований многих междисциплинарных проблем, находящихся на стыке математики, физики, биологии, нанoeлектроники. В качестве примеров можно указать на необходимость понимания механизмов самоорганизации и образования сложных структур в живой и неживой природе, квантомеханического переноса энергии в реакциях фотосинтеза, опре-

деления степени управляемости открытых систем молекулярных моторов, динамики дефектов в наноструктурах и т. д. [1, 2].

Системный анализ, проведенный на рубеже XX и XXI столетий, фундаментальных исследований в области физико-математического моделирования динамических режимов сложных нано- и биосистем приведен в многочисленных зарубежных и российских научных публикациях, например, в работах [3–5], в которых, кроме общеизвестных методов исследования (таких как метод кинетических уравнений, метод молекулярной динамики и т. д.), применяются и принципиально новые подходы и методы (такие как методы вещественного, ультраметрического и  $p$ -адичного анализов), позволяющие учитывать большое число коллективных и многочастичных взаимосвязанных эффектов, определяющих динамическое поведение системы.

Например, при исследовании сложных атомных или молекулярных систем большого размера наиболее распространенным является метод молекулярной динамики, который позволяет рассчитывать новые и перспективные материалы на атомно-молекулярном уровне и

Гандилян Сейран Вартович<sup>1</sup>, преподаватель, к.ф.-м.н.  
E-mail: GandilyanSV@mgsu.ru

Гандилян Давид Ваганович<sup>2</sup>, аспирант.  
E-mail: david.ghandilyan@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.  
Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

<sup>2</sup> Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН.  
Россия, 119526, Москва, пр-т Вернадского, 101, корп. 1.

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2021 г.

на базе технологии типа «снизу–вверх» (восходящее производство), основой которых служит атомный и молекулярный синтез (так называемый «молекулярный монтаж» или «атомная сборка»), создавать новые наноструктурные материалы с заданными физико-техническими свойствами [3–6].

Для дальнейшего расширения научно-технологического базиса развития по всему спектру современной нано-биотехнологической индустрии представляется особенно важным совершенствование методов теоретических построений и моделей, уточнение численных методов исследования динамических режимов в задачах автоматизированного проектирования сложных систем с оптимальными динамическими и статическими характеристиками.

В настоящей работе, которая является органическим продолжением работ авторов [7, 8], рассматриваются некоторые узловые вопросы моделирования процессов самоорганизации и самосборки в структурах наноэлектронных интегральных схем (НИС) и сложных систем наноэлектромеханических преобразователей (нано-ЭМП) энергии (далее кратко – наноэлектромеханические системы – НЭМС), позволяющих учитывать большое число взаимосвязанных характеристик их динамического состояния. При этом, как подражание сложных нано- и биосистем НЭМС, рассматривается сложная система нелинейно взаимодействующих элементов нано-ЭМП-энергии различной физической природы (например, молекулярные моторы – нано-актюаторы как функциональные элементы живых организмов и созданные человеком их технические аналоги) [7].

**Расширенное определение НЭМС** – это сложная многоэлементная динамическая система нелинейно взаимодействующих бинарно-сопряженных электро-индукционных и магнитно-индукционных наноэлектромеханических преобразователей энергии (нано-ЭМП-энергии).

При этом функциональными элементами для сложных НЭМС могут быть открытые недавно элементы наноструктурированных веществ, такие как нанотрубки, молекулярные моторы, комплексы ДНК, квантовые ямы, молекулярные переключатели и т. д., которые можно представлять (аппроксимировать) как

нелинейные открытые подсистемы с собственной структурой, состоящей из базовых исполнительных элементов (ячеек) из электропроводящих и магнитопроводящих нанокристаллических трех-, дву-, одно- и нульмерных материалов (поликристаллы – 3D; пленки и слои – 2D; нанотрубки, волокна и прутки – 1D и наночастицы – 0D соответственно), характерные размеры которых находятся в диапазоне эффективного действия законов квантовой электрофизики.

### **Физико-математическое моделирование процессов самоорганизации в сложных НЭМС**

Процессы самоорганизации в сложных НЭМС можно моделировать с помощью динамических уравнений эволюции системы в многомерном фазовом пространстве энергетического состояния, исходя из приведенных в работах [8, 9] методов моделирования динамически режимов МЭМС и НЭМС.

Для решения представленной задачи необходимо рассматривать следующие узловые вопросы:

- электрофизическое моделирование процессов энергообмена между функциональными ячейками нано-ЭМП-энергии;
- рассмотрение нано-ЭМП-энергии в системе других наноструктур;
- образование сложной НЭМС как многоэлементного ансамбля нано-ЭМП-энергии;
- взаимодействие НЭМС с внешней средой;
- как результат этих исследований комплексное физико-математическое и компьютерное моделирование сложных НЭМС.

Не нарушая общности, можно НЭМС рассматривать как сложную открытую динамическую систему, состоящую из нелинейно взаимодействующих функциональных элементов в лице электро-индукционных (**1** – с количеством элементов  $M \gg 1$ ) и магнитно-индукционных (**2** – с количеством элементов  $N \gg 1$ ) нано-ЭМП-энергии (см. рис. 1). Для общности моделирования предположим, что взаимодействие между элементами НЭМС осуществляется по принципу сети Хопфилда, т. е. каждый нано-ЭМП-энергии, принадле-

жавший НЭМС, взаимодействует со всеми остальными [10].

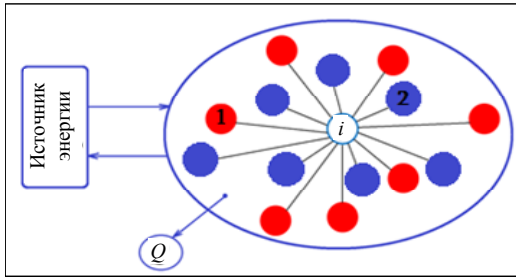


Рис. 1. Обобщенное схематическое представление сложных НЭМС.

При указанных условиях, задача моделирования процессов самоорганизации в сложных открытых НЭМС может реализовываться с помощью системы динамических уравнений эволюции в многомерном лагранжевом фазовом пространстве энергетического состояния, при котором динамическое состояние сложной НЭМС представляется как многомерная точка фазового пространства. С течением времени состояние НЭМС изменяется и точка динамического состояния движется по определенной траектории. Совокупность всех возможных траекторий образует фазовый эволюционный портрет системы, который зависит от структурных параметров НЭМС и характеристик внешних источников энергии, определяющих граничные условия уравнений эволюции [11–14].

Согласно разработанному в [8, 9] методу моделирования динамических режимов nano-ЭМП-энергии, в сложных НЭМС их энергетические характеристики, на расстояниях  $l \gg \rho$  ( $\rho$  – это параметр характеризующий максимальные геометрические размеры nano-ЭМП-энергии) в лагранжевом пространстве энергетического состояния можно аппроксимировать с помощью энергетических характеристик эквивалентных электрических и магнитных динамических диполей соответственно (см. рис. 2).

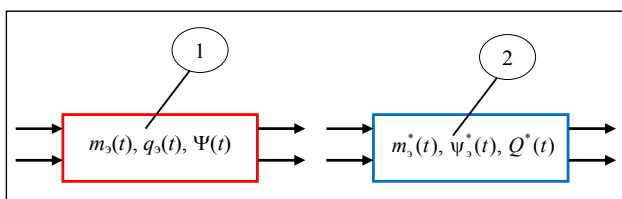


Рис. 2. Схематическое представление nano-ЭМП-энергии: 1 – электро-индукционные; 2 – магнито-индукционные.

При таком подходе к моделированию толкование физических сущностей параметров динамического состояния электро-индукционных nano-ЭМП-энергии (в виде  $m_s(t), q_s(t), \Psi(t)$ ) и магнито-индукционных nano-ЭМП-энергии (в виде  $m_s^*(t), \psi_s^*(t), Q^*(t)$ ) приведено в работе [10] на основе базовых теоретических положений бинарно-сопряженной электрофизики. Это дает возможность их обобщенное физико-математическое моделирование осуществить, исходя из интегрального принципа Действия для сложных открытых систем, который, в рассматриваемом случае, выражается в следующей форме:

$$E_B(t)dt = \sum_{i=1}^M d \left( \oint m_i \mathcal{U}_i dl_i + \iint d \Psi_i dq_i \right) + \sum_{j=1}^N d \left( \oint m_j^* \mathcal{U}_j^* dl_j + \iint d Q_j^* d \psi_j^* \right), \tag{1}$$

где приняты следующие обозначения:

- для электро-индукционных nano-ЭМП-энергии

$$\begin{cases} m_i = m_{i_s} \delta[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)], & q_i = q_{i_s} \delta[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)] \\ \Psi_i = \int \vec{B}_i d\vec{s}_i, & \mathcal{U}_i = \dot{\mathbf{r}}_i \\ q_{i_s} = n_{ei} e, & (n_{ei}(t) = 1, 2, 3, \dots), \end{cases} \tag{2}$$

здесь  $m_{i_s}$  – эффективная масса;  $q_{i_s}$  – эффективный электрический заряд;  $\mathbf{r}_i(t)$  – радиус вектор,  $\mathcal{U}_i(t)$  – скорость центра масс;  $\Psi_i$  – динамический магнитный поток вне объема  $i$ -го nano-ЭМП-энергии;  $e$  – заряд электрона;  $\delta[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)]$  – дельта функция;  $n_e(t)$  – дискретная временная функция количества свободных электрических зарядов в объеме nano-ЭМП-энергии;

- для магнито-индукционных nano-ЭМП-энергии

$$\begin{cases} m_j^* = m_{j_s}^* \delta[\mathbf{r}^* - \mathbf{r}_j^*(t)], & \psi_j^* = \psi_{j_s}^* \delta[\mathbf{r}^* - \mathbf{r}_j^*(t)] \\ Q_j = \int \vec{D}_j d\vec{s}_j, & \mathcal{U}_j^* = \dot{\mathbf{r}}_j^* \\ \psi_{j_s}^* = n_{\phi j}(t) \phi, & (n_{\phi j}(t) = 1, 2, 3, \dots), \end{cases} \tag{3}$$

здесь  $m_j^*$  – эффективная масса;  $\psi_j^*$  – эффективный магнитный «заряд»,  $r_j^*(t)$  – радиус вектор;  $\dot{\psi}_j^*(t)$  – скорость центра масс;  $Q_j^*$  – динамический электрический поток вне объема  $j$ -го нано-ЭМП-энергии;  $\varphi$  – численная величина кванта магнитного потока – флюксонида;  $n_\varphi(t)$  – дискретная временная функция количества магнитного потока в наноструктурных функциональных элементах нано-ЭМП-энергии по единицам флюксонида. При этом следует отметить, что представление о магнитных зарядах (монополи Дирака) в расчетах динамических и энергетических режимов магнитных микроструктур (особенно в наноструктурных системах) является удобной и практичной абстракцией [15].

В формуле (1) функция  $E_B(t)$  характеризуют интенсивность протекающих через НЭМС потоков энергии, массы, заряда и теплоты.

В рассматриваемом случае динамическое поведение сложной НЭМС можно описывать на базе основных теоретических положений **принципа наименьшего действия** для диссипативных сложных систем, который выражается в следующей форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} S = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L}(\bar{\alpha}, \dot{\bar{\alpha}}, t) dt \\ \alpha(t) = \underset{\alpha(t)}{\text{arg min}} S, \\ \delta S = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $\bar{\alpha}$  –  $M + N$ -мерный аксиальный субвектор механических и электрофизических обобщенных координат НЭМС:

$$\bar{\alpha} = (r_i(t), r_j^*(t), q_i(t), \psi_j^*(t)), \quad (5)$$

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

Из формул (1)–(4) получаются обобщенные уравнения Лагранжа второго рода, выражающегося в следующей векторно-матричной форме:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\bar{\alpha}}} \right) - \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \bar{\alpha}} + \frac{\partial \Phi}{\partial \bar{\alpha}} \right) = \bar{F}. \quad (6)$$

Здесь  $\mathcal{L}$  – обобщенная лагранжевая функция энергетического состояния;  $\Phi(\dot{\alpha})$  – обобщенная диссипативная функция Релея (которая состоит из механических и электрофизических частей);  $\bar{F}$  – субвектор суммарной (эффективной) силы внешнего воздействия (в зависимости от предназначения НЭМС могут возбуждаться от разных источников энергии: звуковых волн, света, биотоков мозга, мембранных потенциалов, теллурических или земных токов, атмосферного электричества и т. д.).

При этом лагранжевая функция  $\mathcal{L}$  для НЭМС может быть представлена в форме разности эффективных значения внутренней динамической (кинетической) –  $T(\dot{\bar{\alpha}})$  и накопительной (потенциальной)  $U(\bar{\alpha})$ -энергии, что выражается следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{L}(\alpha, \dot{\alpha}, t) = T(\dot{\bar{\alpha}}) - U(\bar{\alpha}) \\ T(\dot{\bar{\alpha}}) = \frac{1}{2} \left( \sum_{l=1}^{M+N} \sum_{j=1}^{M+N} \dot{\alpha}_l Q_{lj} \dot{\alpha}_j \right) = \frac{1}{2} \dot{\bar{\alpha}} \hat{Q} \dot{\bar{\alpha}}^T \\ U(\bar{\alpha}) = \frac{1}{2} \left( \sum_{l=1}^{M+N} \sum_{j=1}^{M+N} \alpha_l K_{lj} \alpha_j \right) = \frac{1}{2} \bar{\alpha} \hat{K} \bar{\alpha}^T, \end{array} \right. \quad (7)$$

здесь  $\hat{Q}$  – обобщенная субматрица, подматрицами которой являются: матрицы собственных и взаимных динамических индуктивностей –  $\hat{L} = L(\alpha_i, \alpha_j)$  ( $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, M$ ) собственных и взаимных динамических емкостей –  $\hat{C} = C(\alpha_i, \alpha_j)$  ( $i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N$ ) и диагональная матрица эффективных масс –  $\hat{m}_s = (m_{ii}, m_{jj}^*)$  электроиндукционных и магнито-индукционных нано-ЭМП-энергии соответственно, являющихся функциональными элементами НЭМС, а  $K_{i,j}$  – элементы  $(M + N)$ -мерной матрицы взаимодействий (взаимного влияния) между ними –  $\hat{K}$ , которая симметрична и имеет нули на главной диагонали.

Функционал  $U(\bar{\alpha})$  интерпретируется как некоторая «обобщенная потенциальная энергия». Так как сложный НЭМС рассматри-

вается как нелинейный ансамбль магнитных и электрических динамических диполей, то такая интерпретация берет начало от известной физической модели Изинга, в которой совокупность взаимодействующих магнитных диполей (спинов) стремится занять такую конфигурацию, в которой суммарная энергия будет минимальна [16].

В общем случае необходимые зависимости элементов матрицы взаимодействия от параметров состояния НЭМС можно установить на базе теории планирования эксперимента [17], представляя их в форме квадратичного разложения

$$K_{i,j} = \sum_{i=1}^M \beta_i q_i + \sum_{j=1}^N \mu_j \psi^{*j} + \dots + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} q_i \psi^{*j} + \dots, \quad (8)$$

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

В формуле (6) обобщенная диссипативная функция Релея –  $\Phi(\dot{\alpha})$  может быть представлена в форме следующего функционала:

$$\Phi(\dot{\alpha}) = \frac{1}{2} \dot{\alpha} \tilde{Z} \dot{\alpha}^T, \quad (9)$$

где, в общем случае, элементы матрицы  $\tilde{Z}$  являются непрерывными функционалами от теплоэлектрофизических и механических характеристик материала среды, где действуют функциональные элементы НЭМС, что выражается в следующей форме:

$$Z_{i,j} = Z_{i,j}(\beta(\mathbf{r}, t), \varepsilon(\mathbf{r}, t), V, T(\mathbf{r}, t)), \quad (10)$$

где  $\beta(\mathbf{r}, t)$  – магнитная проницаемость;  $\varepsilon(\mathbf{r}, t)$  – электрическая проницаемость;  $V$  – объем НЭМС;  $T(\mathbf{r}, t)$  – температура активного материала среды.

Из формул (4)–(10) обобщенные эволюционные уравнения для сложных НЭМС определяются в форме следующей векторно-матричной системы:

$$\frac{d}{dt} \left( \dot{\alpha} \tilde{Q} \right) + \left( \dot{\alpha} \tilde{Z} \right) + \left( \dot{\alpha} \tilde{K} \right) = \vec{F}. \quad (11)$$

Системы уравнений (1)–(11) носят универсальный характер для НЭМС всевозможной конструкции и их совместное решение полностью определяет динамическое (эволюционное) поведение обобщенной модели НЭМС в любых режимах.

На основе уравнений (4) – (11) можно показать, что в рассматриваемой сложной НЭМС имеются основные выявленные факторы, наличие которых необходимо для получения в системе эффекта самоорганизации вне зависимости от природы явления: нелинейность структуры; существование критических точек бифуркации, переход через которые качественно изменяет поведение структуры (переходы из состояния хаоса к порядку и наоборот). При этом матричное уравнение (10) является эквивалентным уравнением известного и хорошо изученного логастического уравнения для стохастических систем в многомерном обобщенном пространстве энергетического состояния, управляющим параметром для которого является матрица взаимодействия  $\tilde{K}$ .

Если мы выдерживаем указанную систему вдали от равновесия, то должны постоянно компенсировать рост энтропии, т. е. «питать» систему свободной энергией, что осуществляется изменением управляющего параметра (элементов  $K_{i,j}$   $(M+N)$ -мерной

матрицы  $\tilde{K}$ , которые меняются, например, при воздействии на систему электромагнитного поля или света)

Следует отметить, что уравнения (1)–(11) могут быть применены в исследованиях следующих областей микросистемной электрофизики:

- в анализе процессов самоорганизации магнитоэлектрических и пьезоэлектрических веществ – как компонентов искусственных магнитоэлектрических наноструктурированных композиционных материалов;
- в анализе динамических режимов микроприводов и роботов с совмещенной индуктивно – емкостной динамической компонентой на уровне микро- и нанотехнологий;
- в анализе электрофизических характеристик биологических наноструктур и т. д.

Для исследования НЭМС конкретной конструкции необходимо в задачах автомати-

зированного проектирования в этих уравнениях учесть все конструкционные особенности их функциональных элементов.

### Заключение

Более глубокие исследования этих вопросов и анализ результатов для задач физико-математического моделирования электрофизических процессов самоорганизации природо-подобных НЭМС и наноструктурных биосистем будут проведены в следующих работах авторов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов Ж. И., Асеев А. Г., Гапонов С. В. // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3.
2. Елецкий А. В. // Успехи физических наук. 2007. Т. 37. № 3. С. 233.
3. Иванова Е. А., Кривцов А. М. // Доклады РАН. 2003. Т. 391. № 6. С. 764.
4. Рамбиди Н. Г., Березкин А. В. Физические и химические основы нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2008.
5. Воронов В. К., Подоппелов А. В., Сагдеев Р. З. Физические основы нанотехнологии. – М.: Либроком, 2011.
6. Попов А. М. Вычислительные нанотехнологии. – М.: КноРус, 2017.
7. Fennimore A. M. et al. // Nature. 2003. Vol. 424. P. 408.
8. Гандилян С. В. // Нано- и микросистемная техника. 2015. Т. 181. № 8. С. 15.
9. Гандилян С. В., Гандилян Д. В. // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 7. С. 975.
10. Гандилян С. В., Гандилян Д. В. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 6. С. 419.
11. Kryzhanovsky B. V., Magomedov B. M., Mikaelian A. L. // Doklady Mathematics. 2005. Vol. 71. P. 310.
12. Федоров А. В., Баранов А. В., Маслов В. Г. и др. Физика наноструктур. – СПб.: СПбГТУ, 2014.
13. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2009.
14. Малыгин А. А. // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 3–4. С. 87.
15. Чечнин Н. Г. Магнитные наноструктуры и их применение. – М.: Изд-во Грант Виктория ТК, 2006.
16. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.
17. Сидняев Н. И., Вилисова Н. Т. Введение в теорию планирования эксперимента. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.

PACS: 81

## Physical and mathematical modeling of dynamic processes of self-organization in complex nanoelectromechanical systems

*S. V. Gandilyan<sup>1</sup> and D. V. Gandilyan<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering  
26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russia  
E-mail: GandilyanSV@mgsu.ru

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

*Received February 24, 2021*

*The issues of modeling the processes of self-organization and self-assembly in complex nanoelectromechanical systems (NEMS) with binary-conjugated functional elements of subsystems are considered, and the emergence of the effect of self-organization in them is investigated. On the basis of the proposed modeling principles, the possibility of creating NEMS products with the combination of operating harmoniously technical and natural functional elements (for example, complex multi-element systems of nonlinearly connected molecular motors of different structures) is established.*

*Keywords:* complex dynamical systems, bioenergy, binary-conjugated systems, modeling, self-organization, self-assembly, biomembranes, self-organization, MEMS and NEMS, molecular motors, electrobiology and magnetobiology, nature – similar technologies.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-2-78-84

## REFERENCES

1. G. I. Alferov, A. G. Aseev, and S. V. Gaponov, *Microsistemnaya tekhnika*, No. 8, 3 (2003).
2. A. V. Elecki, *Phys. Usp.* **37** (3), 233 (2007).
3. E. A. Ivanova and A. M. Krivcov, *Doklady RAN* **391** (6), 764 (2003).
4. N. G. Rambidi and A. V. Berezkin, *Physical and chemical foundations of nanotechnology* (Fizmatlit, Moscow, 2008) [in Russian].
5. V. K. Voronov, A. V. Podoplelov, and R. Z. Sagdeev, *Physical foundations of nanotechnology* (Librokom, URSS, 2011) [in Russian].
6. A. M. Popov, *Computational nanotechnology* (KnoRus, Moscow, 2017) [in Russian].
7. A. M. Fennimore, et al., *Nature*, **424**, 408 (2003).
8. S. V. Gandilyan, *Nano and Microsystem technology* **181** (8), 15 (2015).
9. S. V. Gandilyan and D. V. Gandilyan, *Tech. Phys.* **89** (7), 975 (2019).
10. S. V. Gandilyan and D. V. Gandilyan, *Usp. Prikl. Fiz.* **8** (6), 310 (2020).
11. B. V. Kryzhanovskiy, B. M. Magomedov, and A. L. Mikaelian, *Doklady Mathematics* **71**, 310 (2005).
12. A. V. Fedorov, A. V. Baranov, V. G. Maslov, et al., *Physics of nanostructure* (SPBGU, St. Petersburg, 2014) [in Russian].
13. A. I. Gusev, *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies* (Fizmatlit, Moscow, 2009) [in Russian].
14. A. A. Malygin, *Rossiyskiye nanotekhnologii* **2** (3–4), 87 (2007).
15. N. G. Chechnin, *Magnetic nanostructures and their applications* (Grant Victoriya TK, Moscow, 2006) [in Russian].
16. S. Chaykin, *Neural networks: full course* (Izdatelskiy dom “Vilyams”, Moscow, 2006) [in Russian].
17. N. I. Sidnyaev and N. T. Vilisova, *Introduction to experiment design theory* (BMSTU Bauman MSTU, Moscow, 2011) [in Russian].