

УДК 621.315.592

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-63-70

Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики

Г.С. Караян, С.В. Гандилян, В.В. Гандилян

Представлен обзор современного состояния электромеханической науки, рассмотрены перспективные направления применения новейших достижений нанотехнологии в тех отраслях, где научно-технический прогресс базируется на комплексном применении электромеханических преобразователей энергии.

Рассмотрено современное состояние совершенно нового направления науки — микросистемной электромеханики. Проанализированы широкие спектры его практического применения и перспективы дальнейшего развития. Базовыми объектами исследования микросистемной электромеханики являются системы микроминиатюрных электромеханических преобразователей (МЭМС) и нанoeлектромеханических преобразователей энергии (НЭМС). Подробно даны два основных пути создания микро- и нанoeлектромеханических преобразователей энергии как базовых элементов МЭМС и НЭМС.

Описаны основные технологические приемы конструирования базовых функциональных элементов микросистемной электромеханики, охарактеризованы области их применения в традиционной и новой технике (в информационных и компьютерных технологиях, медицине, аэрокосмических и ракетно-артиллерийских системах и т.д.).

Ключевые слова: микросистемная и нано- электромеханика, МЭМС и НЭМС, молекулярный монтаж, атомная сборка.

Для цитирования: Караян Г.С., Гандилян С.В., Гандилян В.В. Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики // Вестник МЭИ. 2017. № 5. С. 63—70. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-63-70.

Microsystems Electromechanics: the Current State and Prospects for Further Development

G.S. Karayan, S.V. Gandilyan, V.V. Gandilyan

The current state of the electromechanical science is briefly reviewed, and the prospective application fields of the newest achievements in the nanotechnology are considered in the areas the scientific-technical progress in which is based on a comprehensive use of electromechanical energy converters.

The current state of the microsystems electromechanics—an entirely new branch of science—is considered. A wide range of its practical applications and the prospects for its further development are discussed. Microminiature electromechanical converter systems (MEMS) and nanoelectromechanical energy conversion systems (NEMS) are the basic subjects studied in the microsystems electromechanics. Two basic ways of constructing micro- and nanoelectromechanical energy converters as the basic elements of MEMS and NEMS are described in detail.

The main technological methods for constructing the basic functional elements of microsystems electromechanics are described, and their application fields in the traditional and new engineering (information and computer technology, medicine, aerospace systems, ordnance systems, etc.) are outlined.

Key words: microsystem electromechanics, nanoelectromechanics, MEMS and NEMS, molecular assembly, nuclear assembly.

For citation: Karayan G.S., Gandilyan S.V., Gandilyan V.V. Microsystems Electromechanics: the Current State and Prospects for Further Development. MPEI Vestnik. 2017; 5: 63—70. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-63-70.

Посвящается памяти академика А.Г. Иосифьяна

Введение

Современная наука, относящаяся к области электромеханики, прогресс которой базируется на максимальном использовании новейших достижений классической механики и электродинамики, физики полупроводников, атомной физики, энергетики, оптоэлектроники, кибернетики и т.п., развивается по двум магистральным направлениям.

Первое связано с повышением энергетических показателей, проектированием и созданием более экономичных (менее металлоемких и более технологичных) электрических машин и их функциональных элементов и в современной научной литературе традиционно называется макросистемной электромеханикой

Второе — микросистемная электромеханика, важнейшая отрасль современной микросистемной техники, базируется на жизненной необходимости миниатюризации (и сверхминиатюризации) функциональных элементов электромеханических преобразователей (ЭМП) энергии и их систем (рис. 1) [1—6].

Базовыми объектами исследования макросистемной электромеханики являются ЭМП классического назначения: электрические машины и аппараты от микроэлектродвигателей с мощностью не выше 1 кВт, являющиеся основой автоматизации множества технологических процессов, а также мощные электрические машины (гидро- и турбогенераторы для энергогенерирующих систем) [7, 8].

Появление современной микросистемной электромеханики связано с очередной стадией развития техники и технологии микромеханики и микроэлектроники, благодаря которым стало возможным создание малогабаритных интегрированных многофункциональных микроэлектромеханических систем. Это позволило выйти на новый качественный уровень в массогабаритных показателях, быстродействии, функциональных возможностях, производительности, снижении стоимости и т.п., при этом структурные функциональные элементы имеют размер (по меньшей мере в одном направлении) от 0,1 мкм до 0,1 мм и могут быть частью или законченным изделием МЭМС [9—11].

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

Для современной электромеханики первостепенной задачей является развитие электротехнического материаловедения. По всему миру ведутся активные исследования по практическому применению в электромашиностроении электротехнических материалов различного назначения, изготовленных по нанотехнологиям.

Среди наноматериалов, перспективных для электромашиностроения, следует выделить: аморфные сплавы, графен, магнитную ферробумагу, углеродные нанотрубки, металлические порошки в электропроводящих слоях, новые фрикционные и электроизоляционные материалы. 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), обладают высокой относительной начальной магнитной проницаемостью, а также индукцией насыщения на промышленных и высоких частотах ($B_s = 1,2 \dots 1,3$ Тл при $H = 800$ А/м). Так, графен — новейший наноструктурный материал — обладает уникальными токопроводящими свойствами, которые позволяют ему быть как очень хорошим проводником, так и полупроводником. Кроме того, он чрезвычайно прочен и выдерживает огромные нагрузки как на разрыв, так и на прогиб. Указанные свойства актуальны для проводниковых материалов ЭМП, работающих в условиях интенсивных динамических нагрузок.

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

Таким образом, процесс внедрения наноструктурных электротехнических материалов в производстве ЭМП энергии может способствовать комплексному повышению уровня современного электромашиностроения



Рис. 1. Классификация электромеханических преобразователей энергии по энергетическим и массогабаритным показателям

ния, однако существуют значительные ограничения из-за технико-технологических проблем в изготовлении и высокой стоимости указанных материалов [12—14].

В случае применения 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 таком уровне мощностей господствует одно из стратегических направлений современной наноинженерии — нанoeлектромеханика, которая рассматривает электромеханические системы (НЭМС) со структурными функциональными элементами размером 10 ... 100 нм [15,16].

Решение первостепенных задач современной микросистемной электромеханики требует дальнейшего глубокого изучения строения вещества, синтеза процессов, а также установления методов получения кристаллической решетки проводников, диэлектриков, полупроводников, диамагнетиков, ферромагнетиков с закономерным распределением атомов и молекул в зависимости от предлагаемых свойств и назначения этих материалов, создания проводников и полупроводников на базе полимерных 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.

Классификация электромеханических преобразователей и их систем по принципу действия

В окружающем мире (от макрообъектов, таких как галактики и звезды, до микрообъектов — биодвигате-

лей, атомов и всего многообразия элементарных частиц) процесс электромеханического преобразования энергии, обусловленный непосредственным взаимодействием гравитационно-инерционных и электромагнитных сил, — всеобщее и фундаментальное явление.

В природных процессах энергообразования одновременно участвуют и магнитные, и электрические поля. Если в том или ином процессе преобладают магнитные силы, а действием электрических сил можно пренебречь, то можно сказать, что действуют индуктивные ЭМП энергии, если же преобладают электрические силы, а действием магнитных сил можно пренебречь, то действуют емкостные ЭМП энергии. Если мощности магнитных и электрических сил, действующих в общем объеме, соизмеримы друг с другом, то можно говорить о действии совмещенных индуктивно-емкостных ЭМП энергии.

По сути, любой природный процесс преобразования электромагнитного поля можно моделировать как действие некоего совмещенного индуктивно-емкостного ЭМП, подсистемами которого являются нелинейно взаимодействующие индуктивные и емкостные ЭМП. Уникальным примером совмещенной системы индуктивных и емкостных ЭМП (магнитогидродинамических (МГД) и электрогидродинамических (ЭГД-генераторов и двигателей) является планета Земля как самоорганизующаяся многокомпонентная система, взаимодействующая с окружающим космическим пространством через электромагнитные и гравитационно-инерционные поля [17—19].

Если представить шкалу мощностей для природных ЭМП, действующих от микромира до космических масштабов (рис. 2), и на ней выделить предпочтительные области, в которых действуют индуктивные и емкостные ЭМП энергии, то можно утверждать следующее:

- в природных микроструктурах, особенно в биологических и физиологических явлениях в мире кле-

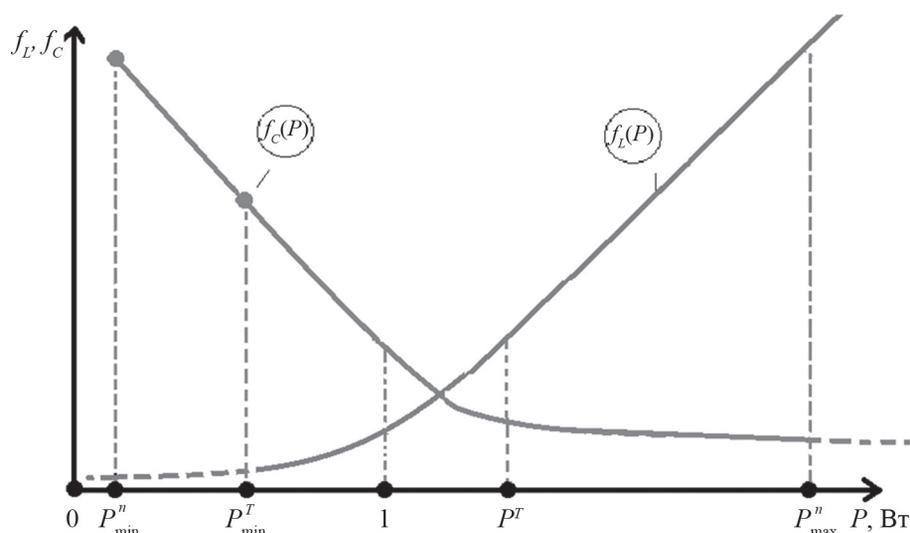


Рис. 2. Предпочтительные области распределения электромеханических преобразователей энергии

точных и субклеточных структур живой природы, в процессах преобразования электромагнитной энергии основная роль принадлежит электрическому полю (действуют емкостные ЭМП, которые занимают область от точки минимума до примерно нескольких ватт);

• индуктивные ЭМП играют решающую роль в природных макросистемах (начиная с макросистем живых организмов до космических объектов) и господствуют в области больших мощностей, начиная от долей ватта до 10^{26} Вт и выше.

Функции распределения $f_L(P)$ и $f_C(P)$ определяются выражениями

$$\begin{cases} f_L(P) = \frac{N_L(P)}{N(P)}; \\ f_C(P) = \frac{N_C(P)}{N(P)}, \end{cases}$$

где P — мощность; $N_L(P)$, $N_C(P)$ — среднестатистические числа индуктивных и емкостных ЭМП энергии; $N(P)$ — общее число ЭМП.

При этом функции $f_L(P)$ и $f_C(P)$ удовлетворяют условиям

$$\begin{cases} \lim_{P \rightarrow \infty} f_L(P) = 1; & \lim_{P \rightarrow P_{\min}} f_L(P) = 0; \\ \lim_{P \rightarrow \infty} f_C(P) = 0; & \lim_{P \rightarrow P_{\min}} f_C(P) = 0. \end{cases}$$

На шкале мощностей для природных ЭМП энергии, действующих в земных масштабах, имеются две значимые точки: минимума $P_{\min}^n \approx 10^{-17}$ Вт, т. е. мощности самого маленького биологического двигателя ворсин-

ки бактерии, и максимума $P_{\max}^n \approx 6,5 \cdot 10^{29}$ Вт — мощности униполярной «электрической динамомшины» Земли [18, 19].

В настоящее время используются некоторые участки узкого интервала шкалы мощностей. Экстремальными отметками этого интервала являются минимум $P_{\min}^T \approx 0,6 \cdot 10^{-8}$ Вт (мощность самого малого емкостного нанодвигателя) и максимум $P_{\max}^T \approx 10^9$ Вт (мощность турбогенератора).

В зависимости от принципа реализации взаимного преобразования электромагнитной и механической энергии технические ЭМП энергии и их системы во всем диапазоне энергетического спектра подразделяют на три больших класса:

- индуктивные (электроиндукционные) ЭМП энергии, в которых рабочим полем является магнитное поле;
- емкостные (магнитно-индукционные) ЭМП энергии, где рабочим полем служит электрическое поле;
- индуктивно-емкостные (магнитно-электроиндукционные) ЭМП энергии, в которых электромеханическое преобразование осуществляется магнитным и электрическим полями.

Принципиальные схемы ЭМП энергии показаны на рис. 3.

При исследовании вопросов физико-математического моделирования и практического изготовления совмещенных индуктивно-емкостных ЭМП энергии следует иметь в виду одно важное обстоятельство. Совместное применение индуктивных и емкостных ЭМП в общем объеме одного агрегата в макросистемной электромеханике неэффективно, так как индуктивные ЭМП энергии являются источниками ЭДС, а емкост-

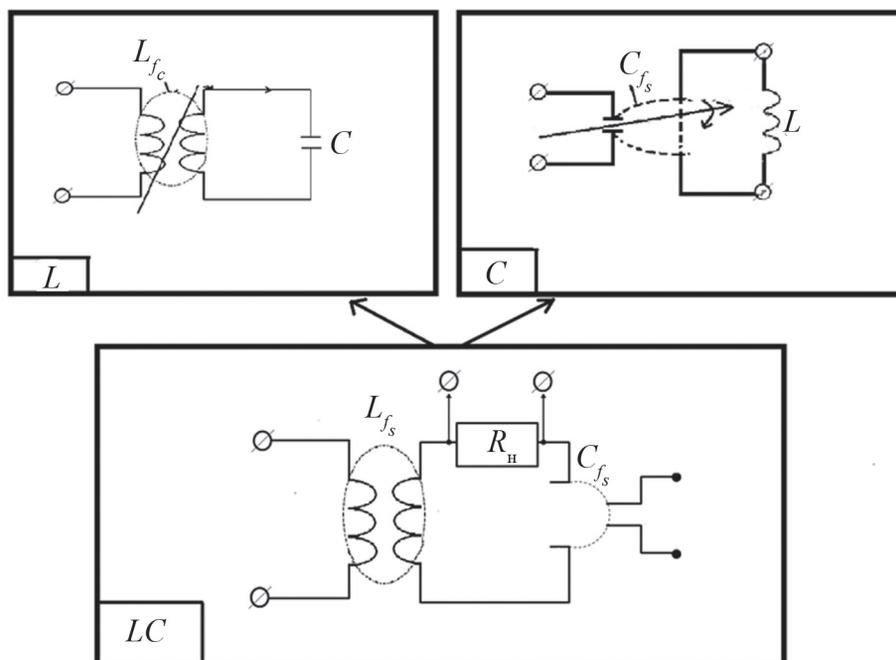


Рис. 3. Классификация электромеханических преобразователей энергии по принципу действия

ные — источниками тока. Подобная совмещенная система представляет гибрид источников низкого и сверхвысокого напряжения и имеет низкий КПД.

В макросистемной электромеханике определенный интерес представляют совмещенные системы, состоящие из последовательного и параллельного соединений индуктивных и емкостных ЭМП. При возникновении резонансных режимов их энергетические характеристики наилучшие, так как происходит обмен реактивной мощностью между индуктивной и емкостной подсистемами, и для создания магнитного и электрического полей совмещенный ЭМП перестает потреблять реактивную мощность от внешних источников энергии [20, 21].

Совершенно иная ситуация в современной микро-системной электротехнике.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию наноструктурных материалов электротехнического назначения, в которых одновременно существуют и магнитное, и сегнетоэлектрическое (или антисегнетоэлектрическое) упорядочение [22].

Если в прошлом веке успешное развитие физики твердого тела в области электротехнического материаловедения, обусловленное интенсивным развитием физики магнитных явлений и сегнетоэлектриков, дало новый качественный скачок в области индуктивных и емкостных макро ЭМП, то наноструктурные электротехнические материалы дуального назначения могут быть с успехом применены в создании новых схем и компонентов микросистемного электрооборудования, в которых базовыми элементами являются совмещенные индуктивно-емкостные микро- и нано ЭМП и их системы.

Как установлено в [23], изготавливаемые по технологии МСТ микроминиатюрные индуктивно-емкостные электродвигатели могут иметь важное значение для совершенствования, миниатюризации и удешевления современных аэрокосмических и ракетно-артиллерийских систем.

В США этими вопросами занимаются известные научно-исследовательские фирмы Intel, MEMS, Inolustry Group, Sandia National Labs. Популярен американский микроминиатюрный летательный аппарат массой 80 г, с размером крыльев — 15 см, с высотой полета — 230 м, перемещающийся со скоростью 70 км/ч, с КПД рабочего двигателя (изготовленного по технологии МСТ микроминиатюрного индуктивно-емкостного электродвигателя), равным 82 %.

Классификация микроминиатюрных электромеханических преобразователей и наноэлектромеханических преобразователей энергии по функциональным характеристикам

В работах [24, 25] приведен сравнительный анализ динамических и структурных характеристик и классификация по принципу действия базовых функциональ-

ных элементов МЭМС и НЭМС ЭМП энергии с точки зрения микро- и наноминиатюрных трактовок основных принципов и теоретических положений современной электрофизики.

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

Основные особенности МЭМС и НЭМС выглядят следующим образом.

В наносистемной технике используются предельные возможности сверхминиатюризации электрических, магнитных, механических и биологических систем. Если для МЭМС процесс миниатюризации функциональных элементов, подчиняясь общим закономерностям развития современной микросистемной техники, можно осуществить с помощью моделей и технологии типа «сверху-вниз» (нисходящее производство), которые в неявной форме предполагают, что уменьшение размеров структур не влияет на их функциональные свойства (и принцип функционирования), то при производстве наносистемной техники (в том числе и НЭМС) главенствующее значение принимают технологии типа «снизу-вверх» (восходящее производство), основой которых служит атомный и молекулярный синтез (так называемый «молекулярный монтаж» или «атомная сборка»).

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

Поскольку в наносистемной технике и 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 теории электрических цепей должны быть скорректированы в соответствии с законами квантовой электрофизики.

Изделия микросистемной техники в области МЭМС по структуре чисто технические, следовательно, в области наносистемной техники требуются фундаментальные исследования, возможность создания изделий НЭМС с совмещением гармонично действующих технических и природных функциональных элементов.

В настоящее время на основе подражания природным аналогам ведутся работы по созданию НЭМС, в которых часть функций выполняют элементы живых организмов (биомолекулы, бактерии и т. д.). Созданные человеком НЭМС также могут функционировать в широком диапазоне значений температуры и в различных агрессивных средах. Можно утверждать, что

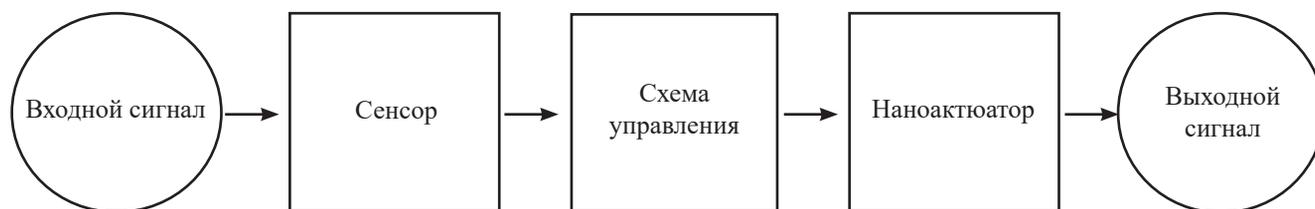


Рис. 4. Общая структура наноэлектромеханических систем

сегодняшнее развитие наносистемной электромеханики предопределяет путь к созданию природоподобной техники [26, 27].

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 небιологическую среду [28, 29].

Элементной базой НЭМС и наноробототехники являются углеродные нанотрубки, обладающие исключительными физическими и электрическими свойствами, углеродные каркасные структуры (например, фуллерен C_{60}), молекулярные моторы и 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 (наноактюаторы) (рис. 4) [30].

Заключение

Рассмотрены основные принципы действия и некоторые узловые вопросы физико-технического моделирования микроминиатюрных и нано ЭМП энергии, основанных на различных принципах преобразования энергии электромагнитного поля в наносистемной технике.

Прогресс в области современной электромеханической науки по всем интервалам энергетических и масшгабаритных показателей ЭМП энергии и их систем во многом зависит от развития электротехнического материаловедения. В настоящее время материаловедческие и технологические разработки, позволяющие за счет создания наноструктур варьировать физико-механические и физико-химические свойства материалов

и изделий, играют большую роль в создании и макроэлектромеханических, и микроэлектромеханических (в том числе наноэлектромеханических) систем.

Литература

1. Иосифьян А.Г. Вопросы электромеханики. М.: Энергия, 1975.
2. Иосифьян А.Г. Электромеханика в космосе. М.: Знание, 1977.
3. Копылов И.П. Куда идет электромеханика // Электротехника. 2007. № 12. С. 50—55.
4. Бертинов А.И. и др. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии. М.: Энергоатомиздат, 1993.
5. Копылов И.П., Гандилян С.В., Гандилян В.В. Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования электромеханических преобразователей энергии // Электротехника. 1998. № 9. С. 25—40.
6. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Изд-во МЭИ, 2003.
7. Гандилян С.В., Гандилян В.В. Некоторые проблемы создания микроминиатюрных электромеханических преобразователей энергии // Электричество. 1999. № 3. С. 43—46.
8. Копылов И.П. Электрические машины. Т. 1, 2. М.: Юрайт, 2015.
9. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю.А. Чаплыгина. М.: Техносфера, 2005.
10. Gallacher V.J., Burdess J.S., Harris A.J., Mc-Nie M.E. The Design and Fabrication of a Multi Axis Vibrating Ring Gyroscope // Proc. Symp. Gyro Techn. Stuttgart, 2001. Pp. 10—20.
11. Murali P. Micromachined Infrared Detectors Based on Pyroelectric Thin Films // Rep. on Progress in Phys. 2001. V. 64. Pp. 1339—1388.
12. Алферов Ж.И. и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2005. № 8. С. 3—13.
13. Губин С.П., Ткачев С.В. Графен и родственные наноструктуры углерода. М.: URSS, 2012.
14. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Академия, 2005.
15. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления развития / под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса, П. Аливисатоса. М.: Мир, 2002.

16. **Lew H.S.** Electro-Tension and Torque in Biological Membranes Modelled as a Dipole Sheet // *Fluid Conductors. Biomechanics*. 1972. V. 5. No. 4. Pp. 126—132.
17. **Гандилян С.В., Гандилян У.В.** Обобщенное электромеханическое моделирование биоэнергетических систем // *Электротехника*. 1996. № 6. С. 53—56.
18. **Нанобиотехнология** биомиметическая мембран / под ред. Д.К. Мартина. М.: Научный мир. 2012.
19. **Григорьев В.И., Григорьева Е.В.** Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планеты и звезд. М.: Физматлит, 2003.
20. **Гандилян С.В., Гандилян У.В.** Совмещенные индуктивно-емкостные электрические машины // *Известия РАН. Сер. «Энергетика и транспорт»*. 1993. № 2. С. 50—62.
21. **Лапцевич А.А., Гречихин Л.И., Куць Н.Г.** Энергетическая база беспилотных летательных аппаратов // *Известия высш. учеб. заведений. Сер. «Энергетика»*. 2010. № 1. С. 64—78.
22. **Пятаков А.П., Звездин А.К.** Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // *УФН*. 2012. Т. 182. С. 539—620.
23. **Турков В.Е., Жукова С.А., Рискин Д.Д.** Реактивные микродвигатели, изготавливаемые по технологии МСТ // *Нано- и микросистемная техника*. 2014. № 12. С. 7—21.
24. **Karayn H.S., Gandilyan S.V.** Several Issues of Generalized Physical and Mathematical Modeling of Micro- and Nano-Electromechanical Systems (MEMS and NEMS) // *Armenian J. Phys.* 2016. V. 9 (3). Pp. 244—259.
25. **Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ибрагимов И.М.** Основы нанотехнологии в технике. М.: Академия, 2009.
26. **Альтман Ю.** Военные нанотехнологии: возможности применения и превентивного контроля вооружений. М.: Техносфера, 2006.
27. **Гандилян С.В.** Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования микро- и наноэлектромеханических систем // *Нано- и микросистемная техника*. 2015. № 8. С. 15—32.
28. **Харис П.** Углеродные нанотрубки и родственные структуры. Новые материалы XXI века. М.: Техносфера, 2003.
29. **Елецкий А.В.** Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // *УФН*. 2002. Т. 172. № 4. С. 401—438.
30. **Нанотехнология** в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / под ред. М. Роко, П. Аливиостоса. М.: Мир, 2002.
31. **Kopylov I.P.** Kuda Idet Elektromekhanika. *Elektrotehnika*. 2007;12:50—55. (in Russian).
32. **Bertinov A.I. i dr.** Spetsial'nye Elektricheskie Mashiny. Istochniki i Preobrazovateli Energii. М.: Energoatomizdat, 1993. (in Russian).
33. **Kopylov I.P., Gandilyan S.V., Gandilyan V.V.** Nekotorye Voprosy Obobshchennogo Fiziko-Matematicheskogo Modelirovaniya Elektromekhanicheskikh Preobrazovateley Energii. *Elektrotehnika*. 1998;9:25—40. (in Russian).
34. **Osin I.L., Yuferov F.M.** Elektricheskie Mashiny Avtomaticheskikh Ustroystv. М.: Izd-vo MPEI, 2003. (in Russian).
35. **Gandilyan S.V., Gandilyan V.V.** Nekotorye Problemy Sozdaniya Mikrominiaturnykh Elektromekhanicheskikh Preobrazovateley Energii. *Elektrichestvo*. 1999;3:43—46. (in Russian).
36. **Kopylov I.P.** Elektricheskie mashiny. Т. 1, 2. М.: Yurayt, 2015. (in Russian).
37. **Nanotekhnologii v Elektronike / Pod Red. Yu.A. Chaplygina.** М.: Tekhnosfera, 2005. (in Russian).
38. **Gallacher B.J., Burdess J.S., Harris A.J., McNie M.E.** The Design and Fabrication of a Multi Axis Vibrating Ring Gyroscope. *Proc. Symp. Gyro Techn.* Stuttgart, 2001:10—20.
39. **Murali P.** Micromachined Infrared Detectors Based on Pyroelectric Thin Films. *Rep. on Progress in Phys.* 2001;64:1339—1388.
40. **Alferov Zh.I. i dr.** Nanomaterialy i Nanotekhnologii. *Mikrosistemnaya Tekhnika*. 2005;8:3—13. (in Russian).
41. **Gubin S.P., Tkachev S.V.** Grafen i Rodstvennyye Nanoformy Ugleroda. М.: URSS, 2012. (in Russian).
42. **Andrievskiy R.A., Ragulya A.V.** Nanostrukturnyye Materialy. М.: Akademiya, 2005. (in Russian).
43. **Nanotekhnologiya v Blizhayshem Desyatiletii. Prognoz Napravleniya Razvitiya / Pod Red. M.K. Roko, R.S. Uil'yamsa, P. Alivisatos.** М.: Mir, 2002. (in Russian).
44. **Lew H.S.** Electro-Tension and Torque in Biological Membranes Modelled as a Dipole Sheet. *Fluid Conductors. Biomechanics*. 1972;5;4:126—132.
45. **Gandilyan S.V., Gandilyan U.V.** Obobshchennoe Elektromekhanicheskoe Modelirovanie Bioenergeticheskikh Sistem. *Elektrotehnika*. 1996;6:53—56. (in Russian).
46. **Nanobiotehnologiya** Biomimeticheskaya Membran / Pod Red. D.K. Martina. М.: Nauchnyy Mir. 2012. (in Russian).
47. **Grigor'ev V.I., Grigor'eva E.V.** Baroelektricheskiy Effekt i Elektromagnitnye Polya Planety i Zvezd. М.: Fizmatlit, 2003. (in Russian).
48. **Gandilyan S.V., Gandilyan U.V.** Sovmeshchennyye Induktivno-emkostnyye Elektricheskie Mashiny. *Izvestiya RAN. Ser. «Energetika i Transport»*. 1993;2:50—62. (in Russian).
49. **Laptsevich A.A., Grechihin L.I., Kuts' N.G.** Energeticheskaya baza Bespilotnykh Letatel'nykh Apparatov. *Izvestiya Vyssh. Ucheb. Zavedeniy. Ser. «Energetika»*. 2010;1:64—78. (in Russian).

References

1. **Iosif'yan A.G.** Voprosy Elektromekhaniki. М.: Energiya, 1975. (in Russian).
2. **Iosif'yan A.G.** Elektromekhanika v Kosmose. М.: Znanie, 1977. (in Russian).

22. **Pyatakov A.P., Zvezdin A.K.** Magnitoelektricheskie Materialy i Mul'tiferroiki. UFN. 2012;182:539—620. (in Russian).

23. **Turkov V.E., Zhukova S.A., Riskin D.D.** Reaktivnye Mikrodvigateli, Izgotavlivaemye po Tekhnologii MST. Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika. 2014;12:7—21. (in Russian).

24. **Karayn H.S. Gandilayn S.V.** Several Issues of Generalized Physical and Mathematical Modeling of Micro- and Nano-Electromechanical Systems (MEMS and NEMS). Armenian J. Phys. 2016;9 (3):244—259.

25. **Kovshov A.N., Nazarov YU.F., Ibragimov I.M.** Osnovy Nanotekhnologii v Tekhnike. M.: Akademiya, 2009. (in Russian).

26. **Al'tman Yu.** Voennye Nanotekhnologii: Vozmozhnosti Primeneniya i Preventivnogo Kontrolya Vooruzheniy. M.: Tekhnosfera, 2006. (in Russian).

27. **Gandilyan S.V.** Nekotorye Voprosy Obobshchennogo Fiziko-matematicheskogo Modelirovaniya Mikro- i Naoelektromekhanicheskikh Sistem. Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika. 2015;8:15—32. (in Russian).

28. **Haris P.** Uglernodnye Nanotrubki i Rodstvennyye Struktury. Novye Materialy XXI Veka. M.: Tekhnosfera, 2003. (in Russian).

29. **Eletskiy A.V.** Uglernodnye Nanotrubki i ih Emissionnye Svoystva. UFN. 2002;172;4:401—438.

30. **Nanotekhnologiya v Blizhayshem Desyatiletii. Prognoz Napravleniya Issledovaniy / Pod Red. M. Roko, P. Alivistosa.** M.: Mir, 2002. (in Russian).

Сведения об авторах

Караян Гамлет Суренович — доктор физико-математических наук, чл.-корр. НАН РА, профессор Ереванского государственного университета (г. Ереван, Армения), e-mail: hsKarayan@yandex.ru

Гандилян Сейран Вартович — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Ереванского государственного университета (г. Ереван, Армения), e-mail: angastroi@mail.ru

Гандилян Ваган Вардович — кандидат физико-математических наук, доцент Ереванского государственного университета (г. Ереван, Армения)

Information about authors

Karayan Gamlet S. — Dr.Sci. (Phys-Math.), corresponding member of NAS RA, Professor of Yerevan State University (Yerevan, Armenia), e-mail: hsKarayan@yandex.ru

Gandilyan Seyran V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor, Head of Laboratory, Yerevan State University (Yerevan, Armenia), e-mail: angastroi@mail.ru

Gandilyan Vagan V. — Ph.D. (Phys-Math.), Assistant Professor, Yerevan State University (Yerevan, Armenia)

Статья поступила в редакцию 06.01.2017