

Перспективы применения наноструктурного материаловедения и наноэлектроники в системах электромеханических преобразователей энергии

С. В. Гандилян, О. И. Поддаева, М. И. Панфилова, О. В. Новоселова

В работе дан краткий обзор современного состояния электромеханической науки. Анализируются широкие спектры практического применения и перспективы дальнейшего развития её совершенно нового направления – микросистемной электромеханики. Рассмотрены некоторые перспективные направления применения новейших достижений нанонауки и наноструктурного материаловедения электротехнического назначения в тех отраслях жизнедеятельности человека (от медицинской робототехники до средств освоения космоса), в которых сегодняшний научно-технический и технологический прогресс базируется на комплексном применении электромеханических преобразователей энергии специального назначения и их систем. Подробно обсуждаются два основных пути создания микроминиатюрных и наноэлектромеханических преобразователей энергии, как базовых элементов микросистемной электромеханики: «сверху вниз» и «снизу вверх». Описаны основные технологические приемы конструирования базовых функциональных элементов микросистемной электромеханики, охарактеризованы области их применения в традиционной и новой технике (информационных и компьютерных технологиях, медицине, в аэрокосмических и системах и т. д.).

Ключевые слова: микросистемная электромеханика, нанонаука, наноэлектроника, наноструктурное материаловедение, наноэлектромеханика, природа подобная робототехника.

Ссылка: Гандилян С. В., Поддаева О. И., Панфилова М. И., Новоселова О. В. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 2. С. 124.

Reference: S. V. Gandilyan, O. I. Poddaeva, M. I. Panfilova, and O. V. Novoselova, Usp. Prikl. Fiz. **8** (2), 124 (2020).

Введение

Прогресс электромеханики, который в современной научной литературе толкуется как наука о движении и взаимодействии веще-

ственных (инерциальных) макроскопических и микроскопических тел, связанных с электрическими и магнитными полями, базируется на максимальном использовании новейших достижений классической механики и электродинамики, физики полупроводников, атомной физики, термодинамики, физики низко- и высокотемпературной сверхпроводимости, энергетики, наноструктурного материаловедения электротехнического назначения, наноэлектроники, прикладной математики, кибернетики и т. д., следуя общим тенденциям мирового научно-технического и технологического прогресса, развивается по двум магистральным направлениям:

1. В настоящее время, как в области физико-математического моделирования и автоматизированного проектирования электромеха-

Гандилян Сейран Варгович, преподаватель, к.ф.-м.н.
Поддаева Ольга Игоревна, зав. кафедрой, доцент, к.т.н.
Панфилова Марина Ивановна, доцент, к.х.н.
Новоселова Ольга Викторовна, старший преподаватель, к.ф.-м.н.
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (кафедра физики и аэродинамики).
Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.
E-mail: GandilyanSV@mgsu.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2020 г.

© Гандилян С. В., Поддаева О. И., Панфилова М. И., Новоселова О. В., 2020

нических преобразователей энергии (ЭМП-энергии) и их систем, так и в практике их технологического изготовления решаются множество задач, связанных с улучшением их энергетических характеристик и массо-габаритных показателей, созданием новых видов ЭМП-энергии и их систем разного предназначения. Наряду с традиционным электромашиностроением, являющимся отправной базой для революционных изменений в XX веке в

областях электромашиностроения, промышленности, транспорта, бытовой техники и т. д., в настоящее время интенсивно развивается электромашиностроение специального назначения (быстро возрастает роль электро-механики в возобновляемой энергетике, в перспективной авиакосмической технике, в высокоскоростном транспорте с магнитной левитацией, в новых системах вооружения и т. д.) (рис. 1) [1–3].

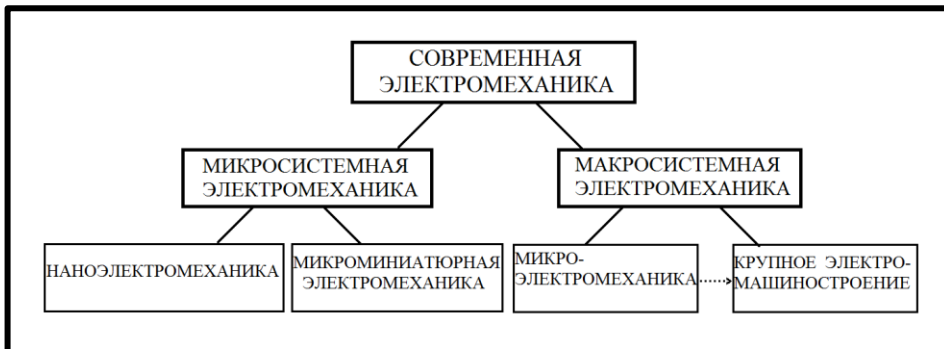


Рис. 1. Классификация ЭМП-энергии по энергетическим и массогабаритным показателям.

Первое направление современной электромеханики в научной литературе традиционно трактуется как «макросистемная электромеханика». Сегодняшняя макросистемная электромеханика охватывает ЭМП-энергии, процессы энергопреобразования в которых подчиняются законам классической (линейной) механики и электрофизики (общеизвестным фундаментальным принципам Фарадея-Максвелла). Этим критериям соответствуют ЭМП-энергии: от микро электродвигателей с мощностью не выше ≈ 1 кВт, являющийся основой современной миниатюрной робототехники и автоматизации технологических процессов, до самых мощных электрических машин с мощностью $P \approx 10^6$ кВт (гидро- и турбогенераторов для энергогенерирующих систем) [4].

2. Наряду с микроэлектроникой, компьютерной техникой, телекоммуникационными системами и т. д., в области современной электромеханики наиболее ярко проявляется необходимость миниатюризации (и сверхминиатюризации) функциональных элементов ЭМП-энергии. В настоящее время в передовых научных центрах разных стран (США, стран ЕС, России, Японии, Китае и др.) развивается совершенно новое направление современной электромеханической науки – микро-системная электромеханика, обещающее в

ближайшие десятилетия революционные изменения в важнейших областях жизнедеятельности человека (медицинская и пищевая промышленность, возобновляемая энергетика, робототехника, аэрокосмическая и военная техника, информационные и компьютерные технологии, генетика и т. д.). Базовыми объектами исследования современной микро-системной электромеханики являются микро-миниатюрные ЭМП-энергии и их системы (Microminiature electromechanical systems – MEMS, МЭМС) и нанозлектромеханические ЭМП-энергии и их системы (Nanoelectromechanical systems – NEMS, НЭМС) [5–7].

Почти все виды энергии, используемые человеком (электрический, механический, тепловой и световой), сводятся к солнечной энергии, так как основная масса процессов на Земле происходит благодаря коротковолновой солнечной радиации, падающей на Землю. Так как первоисточником процессов взаимного преобразования механической и электромагнитной энергии в созданных человеком технических системах ЭМП-энергии является окружающая нас природа, то в начале рассмотрим некоторые фундаментальные вопросы природного электромагнетизма, являющегося генератором природного энерго-

преобразования электромеханического характера.

Электромеханическое преобразование энергии в природе

Процесс электромеханического преобразования энергии в природе, обусловленный непосредственным взаимодействием электромагнитных и гравитационных полей – всеобщее и фундаментальное явление. Если сильные и слабые взаимодействия, как короткодействующие силы в микромире определяют квантовый характер природы, то электромагнитные и гравитационные поля, определяющие дальнедействующий характер взаимодействия вещественных (инерционных) микроскопических и макроскопических тел, обуславливают самоорганизационные и эволюционные явления во всех просторах окружающего нас мира.

В природных процессах энергообразования одновременно участвуют и магнитные и электрические поля. Если в том или ином природном процессе превосходят магнитные силы, а действие электрических сил можно пренебречь, то можно сказать, что «действуют» индуктивные ЭМП-энергии с рабочим магнитным полем. Если превосходят электрические силы, а действие магнитных сил можно пренебречь, то можно утверждать, что «действуют» емкостные ЭМП-энергии с рабочим электрическим полем. Если мощность магнитных и электрических сил, действующих в общем объеме, соизмерим друг с другом, то можно говорить о действии совмещенных индуктивно-емкостных ЭМП-энергии с рабочим электрическим полем. По сути дела, любой природный процесс энергопреобразования электромеханического характера можно моделировать как действие некоего совмещенного индуктивно-емкостного ЭМП-энергии, подсистемами которого является нелинейно взаимодействующие индуктивные и емкостные ЭМП-энергии [8, 9].

Если представить шкалу мощностей для природных преобразователей электромагнитной энергии, действующих от микромира до космических макрообъектов, и выделить на ней предпочтительные области действия индуктивных и емкостных ЭМП-энергии (рис. 2), то можно утверждать, что:

1. В природных микроструктурах, осо-

бенно в биологических и физиологических явлениях в мире клеточных и субклеточных структур живой природы, в процессах преобразования электромагнитной энергии основная роль принадлежит электрическому полю (действуют емкостные ЭМП-энергии, которые занимают область от точки минимума до примерно нескольких ватт).

2. Индуктивные ЭМП-энергии имеют решающую роль в природных макросистемах (начиная с макросистем живых организмов до космических объектов) и господствуют в области больших мощностей (начиная от нескольких ватт до 10^{26} Вт и выше).

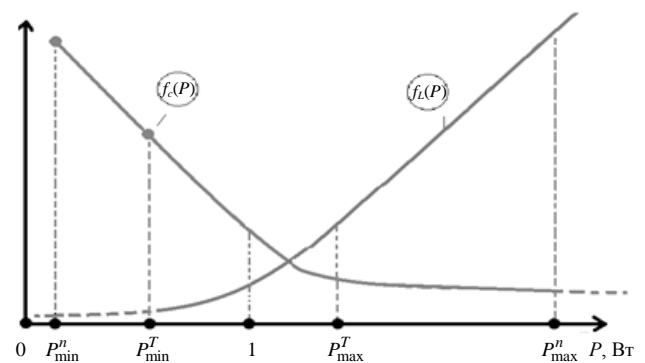


Рис. 2. Предпочтительные области распределения электро-механических преобразователей энергии.

На шкале мощностей имеются две «магические» точки: точка минимума – $P_{\min}^n \approx 10^{-17}$ Вт – мощность самого маленького биологического двигателя ворсинки бактерии (самого маломощного емкостного ЭМП-энергии, созданного природой) и точка максимума – $P_{\min}^n \approx 6,5 \times 10^{29}$ Вт – мощность униполярной «электрической динамомшины» планеты Земля [10].

В настоящее время человечество освоило некоторые участки узкого интервала шкалы мощностей, экспериментальными точками которого являются точка минимума – $P_{\min}^T \approx 0,6 \times 10^{-8}$ Вт – мощность самого маломощного нанодвигателя, и точка максимума – $P_{\max}^T \approx 10^9$ Вт – мощность турбогенератора (самой мощной электрической машины, созданной человеком на сегодня). В таблице приведена оценочная классификация ЭМП-энергии по энергетическим показателям по всему спектру мощностей.

Таблица

Классификация ЭМП-энергии по энергетическим показателям по спектру мощностей

Тип ЭМП	Мощность P , Вт	ЭМП по принципу действия
Нанoeлектромеxанические преобразователи энергии	$10^{-9} < P < 10^{-6}$	пьезоэлектрические, электростатические
Сверхминиатюрные электромеxанические преобразователи	$10^{-6} < P < 10^{-3}$	магнитоиндукционные (емкостные)
Миниатюрные электромеxанические преобразователи	$10^{-3} < P < 10$	магнитоиндукционные (емкостные)
Микроэлектромеxанические преобразователи	$10 < P < 10^3$	индуктивные, емкостные
Электромеxанические преобразователи энергии средней мощности	$10^3 < P < 10^5$	электроиндукционные (индуктивные)
Крупные электромеxанические преобразователи энергии	$10^5 < P < 10^6$	электроиндукционные (индуктивные)
Сверхмощные электромеxанические преобразователи	$10^6 < P < 10^9$	электроиндукционные (индуктивные)

Как в природных явлениях электромеxанического преобразования энергии, технические ЭМП-энергии и их системы во всей диапазоне энергетического спектра, в зависимости от принципа осуществления взаимного преобразования электромагнитной и механической энергии, подразделяются на три больших класса (рис. 3):

1. Индуктивные (электро-индукционные) ЭМП-энергии, в которых рабочим является магнитное поле, так как в соответствии с их принципиальными конструктивными особенностями взаимное преобразование электромагнитной и механической энергии осуществляется в основном за счет изменяющегося магнитного потока взаимной индукции, а влиянием электрических потоков взаимной емкости на процессы энергопреобразования можно пренебречь;

2. Емкостные (магнито-индукционные) ЭМП-энергии, в которых рабочим является электрическое поле, так как в соответствии с их принципиальными конструктивными особенностями (электрические цепи образованы электродами) преобразование электромеxанической энергии осуществляется в основном за счет изменяющегося электрического потока взаимной емкости, а влиянием магнитных потоков взаимной индукции на процессы энергопреобразования можно пренебречь;

3. Совмещенные индуктивно-емкостные (электро-магнитоиндукционные) ЭМП-энергии, в которых рабочим является электромагнитное поле (в процессах энергопреобразования участвуют и магнитные, и электрические поля).

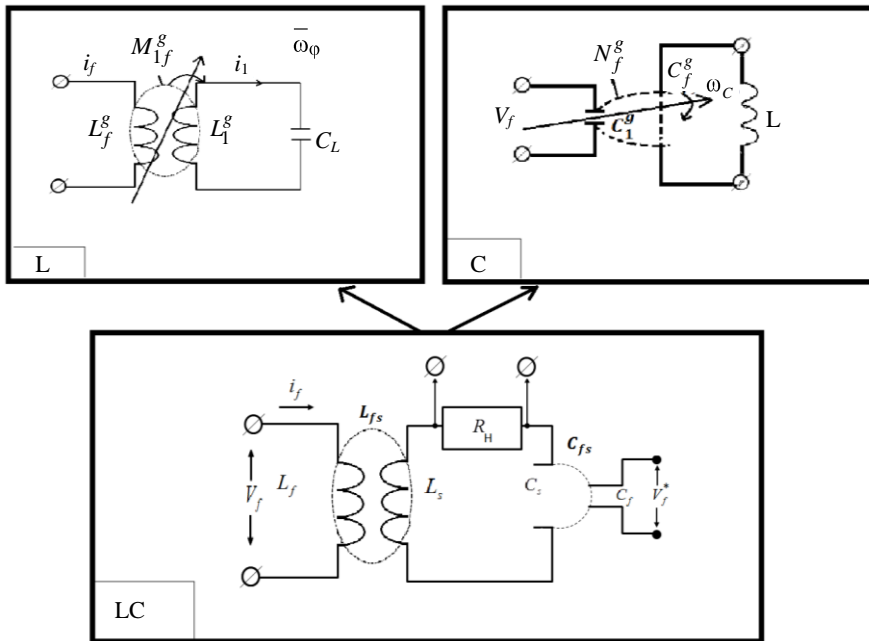


Рис. 3. Классификация ЭМП-энергии по принципу действия.

Некоторые перспективные вопросы развития макросистемной электромеханики

Общеизвестно, что занимающие весь интервал мощностей макросистемной электромеханики индуктивные ЭМП-энергии, которые в научно-технической литературе часто толкуются как электрические машины и аппараты, до сегодняшнего дня на себя носили почти весь груз научно-технической и технологической развитий мировой цивилизации.

Как в практике электромашиностроения, так и в области теории индуктивных ЭМП-энергии сделано уже многое и достигнуты несомненные успехи. Но нельзя думать, что все основное уже сделано и остается только изучить и применять созданное старым поколением электромехаников научно-техническое наследие. Сегодня перед индуктивной электромеханикой стоят трудные и интересные проблемы, которые требуют глубокого знания теории, оптимального проектирования и технологии изготовления индуктивных ЭМП-энергии и их систем, с разными динамическими и энергетическими характеристиками и разного предназначения.

Для решения стоящих перед современной электромеханикой научно-технических и технологических проблем первостепенной задачей является развитие электротехнического материаловедения. Это требует от физиков и химиков дальнейшего 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, создание проводников и полупроводников на базе полимеров и других химических соединений, резкое повышение качества атомно молекулярных композиций, а также углубленное изучение электромагнитных и тепловых полей, развитие специальных нелинейных теорий, описывающих переходные процессы в специальных электрических машинах, уточнение численных методов исследования электромагнитных полей в задачах автоматизированного проектирования ЭМП-энергии.

На практическое воплощение этих идей может оказать сильнейшее воздействие бурно развивающаяся на стыке ряда, считавшихся ранее независимыми естественных и инженерных наук и технологий, совершенно новая научно-техническая отрасль, получившая название «нанонаука и нанотехнология» [11]. Масштаб проблемы не позволяет рассмотреть ее в рамках отдельной статьи, поэтому мы обращаем внимание на часть аспектов, связанных с созданием оборудования электромеханического назначения на основе разработки и синтеза новых электротехнических материалов со специфическими физико-химическими свойствами с помощью нанотехнологий.

Среди наноструктурных материалов, перспективных в применении к электромашиностроению, следует выделить: аморфные сплавы,

графен, магнитную ферробумагу, углеродные нанотрубки, металлические порошки в электропроводящих слоях, новые фрикционные и электроизоляционные материалы и др. Удельные магнитные потери магнитопроводов из аморфных и нанокристаллических сплавов имеют значительно меньшие значения по сравнению с электрической сталью и ферритами (менее 0,1 Вт/кг при $f = 60$ Гц). Они обладают высокой относительной начальной магнитной проницаемостью, а также индукцией насыщения на промышленных и высоких частотах ($B_S = 1,2-1,3$ Тл). Например, графен – новейший наноструктурный материал, обладающий уникальными токопроводящими свойствами, которые позволяют ему служить как очень хорошим проводником, так и полупроводником. Кроме того, графен чрезвычайно прочен и выдерживает огромные нагрузки как на разрыв, так и на прогиб. Указанные свойства актуальны для проводниковых материалов ЭМП-энергии, работающих в условиях интенсивных динамических нагрузок [12–14].

Среди многообразия материалов, применяемых в конструкциях ЭМП-энергии (особенно в крупном электромашиностроении), ведущая роль принадлежит электротехническим сталям. По накопленным в процессе эксплуатации электрических машин данным, потери в стали энергетических электрических машин составляют 10–20 % от общих потерь, а масса электротехнической стали составляет 40–45 % от общей массы машины. Как показано в исследованиях [15, 16], имеются достаточно большие возможности широкого воздействия на свойства электротехнических сталей. Так, например, присадка кремния существенно изменяет свойства материала, вызывая образование больших кристаллов, для которых характерна меньшая площадь петли гистерезиса. Соответственно, для получения минимума потерь и требуемой для проведения магнитного потока через магнитопровод магнитной проницаемости материалов, содержание кремния в электротехнической стали целесообразно увеличивать. Увеличение содержания кремния с 1 до 4 % приводит к возрастанию удельного электрического сопротивления сплава в 2,5 раза, что приводит к соответствующему уменьшению потерь от вихревых токов. По условиям механической прочности содержание кремния практически

ограничено 4,5 %, при этом предел текучести увеличивается почти в пять раз, предел прочности возрастает в 2,5 раза. При дальнейшем увеличении доли кремния материал становится хрупким и плохо обрабатываемым, что объясняется высоким сопротивлением сплава малым пластическим деформациям и низкой прочностью.

Создание новых материалов магнитопровода становится возможным при использовании нанотехнологий путем синтеза их по принципу многофазных композиционных материалов. Для получения высококонцентрированных многофазных сред, определяющих свойства материала, необходимые для создания роторов турбогенераторов, работающих при высоких центробежных нагрузках, исследованы материалы, содержащие фуллереновые компоненты. В настоящее время уникальные физико-химические свойства электрических и магнитных наночастиц интенсивно изучаются исследователями. Для электромехаников на сегодняшний день представляет интерес выявление факторов, влияющих на магнитные свойства материала магнитопровода электрической машины; определение влияния фуллереновых компонент на структуру и свойства сплавов; исследования возможности формирования требуемого уровня магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления, а также возможных диапазонов изменения удельного веса сплава [17].

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по внедрению в индуктивной электромашиностроении обмоточных проводов из ферромагнитного материала (взамен медных и алюминиевых проводов). Примером применения нанотехнологии в этой области является изготовление обмоточного провода с использованием тонкодисперсного порошка оксида кремния, введенного химическим способом в полиамидную изоляцию. Этот метод позволил увеличить качество готового провода и повысить температурный индекс до 280 °С [18].

Создание надежных наноструктурных изоляционных материалов позволяет резко повысить эксплуатационные характеристики в области крупного электромашиностроения (особенно механической прочности, износостойкости и нагревостойкости).

Новейшие достижения в создании наност-

руктурных материалов и открывающиеся перспективы разработки их промышленных образцов предсказывают эволюционный толчок в развитии современных емкостных макро ЭМП-энергии специального назначения.

Следует отметить, емкостные макро ЭМП-энергии появились задолго до индуктивных, но ввиду целого ряда специфических особенностей (ограниченная электрическая прочность функциональных элементов, малая удельная мощность и т. д.) они не нашли широкого распространения и применения. Их физико-математическая теория также не получила достаточного развития, хотя начало ей с точки зрения электродинамики Лагранжа-Максвелла было положено еще в 1920–30-х годах [19, 20].

Сравнительно недавно в различных областях современной электротехники возник интерес к емкостным электрическим машинам с вакуумной изоляцией. Успехи в создании суперконденсаторов с вакуумной изоляцией, научно-технические и технологические достижения в области современного электромашиностроения позволяют создавать автономные емкостные генераторы с вакуумной изоляцией, для которых при промышленно приемлемой напряженности рабочего электрического поля 50 кВ/мм реально получение удельной объемной мощности 500 кВт/м. При этом необходимо преодолеть ряд технологических трудностей, связанных с применением в качестве активных электродов, имеющих максимальную чистоту поверхности, выдерживающих частоту вращения выше 1200 об/мин, а также учесть возможную работу ряда узлов в условиях глубокого вакуума (устройства коммуникаций, опоры вала, изоляционные выводы и т. д.) [21].

Перспективным направлением развития емкостного электромашиностроения является конструирование таких машин, у которых рабочее электрическое поле можно концентрировать в веществе с высокими диэлектрическими характеристиками, такими как титанат бария, дигидрофосфат калия или другие жидкие или твердые сегнетодиэлектрические материалы. И поэтому новые возможности для развития емкостной электромеханики открывает новые возможности разработки и создания наноструктурных сегнетодиэлектрических

материалов с высокими электромеханическими характеристиками и достижений в области порошковой технологии [22].

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что внедрение наноструктурных электротехнических материалов в производстве ЭМП-энергии в макросистемной электромеханике может способствовать комплексному повышению уровня современного электромашиностроения (особенно крупному). Однако этот процесс пока ограничивается технологическими трудностями изготовления и высокой стоимостью указанных материалов [23].

Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики

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

При этом разнообразные приборы, схемы, устройства и подсистемы, в которых динамические процессы энергообразования носят электромеханический характер, а структурные функциональные элементы имеют размер (по меньшей мере в одном направлении) $0,1 \text{ мкм} < l < 0,1 \text{ мм}$, могут быть частью или законченным изделием МЭМС. Бурное развитие микроминиатюрной электромеханики в последние 15–20 лет связано прежде всего с широким использованием микроэлектронных технологий и сотовой микроструктуры. 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.

Это обеспечило прорыв в области микродвигателей микророботов, микронасосов для микрофлюидики, сверхчувствительных сенсоров различных физических величин (давления, ускорения, температуры и др.), микрооптики. Так, микромеханические датчики в современных автомобилях являются основой систем безопасности (воздушные подушки), контроля за состоянием колес, подвески и т. п. Но наиболее ярким представителем микроэлектромеханических систем являются сканирующие зондовые микроскопы – основа не только ряда измерительных систем в нанометровом диапазоне, но и технологических устройств для нанотехнологии [24, 25].

Главные трудности создания и эксплуатации микроминиатюрных ЭМП-энергии заключаются в следующем:

1. Изменение электродинамических и механических характеристик электротехнических материалов в рассматриваемых микро-размерах.

2. Возникновение краевых электростатических полей высокого напряжения и микрозарядов на выступах кремниевых заготовок, из которых изготавливаются функциональные элементы микроминиатюрных ЭМП-энергии (почти по той же технологии, что и чипы для электронных микропроцессоров).

3. Быстроходность микроминиатюрных систем (до 25000 об/мин и больше), приводящая к очень быстрому нагреву тонких стенок и возникновению деформаций.

4. Возможность эффекта Унилоу – загустевания ряда жидкостей при воздействии внешних электрических полей, которые могут возникать как при трении, так и при деформации, а также наводиться от внешних источников питания и т. д.

На шкале мощностей ниже «магической» точки R_m законы классической электрофизики и соответствующая теория электрических цепей должны быть скорректированы в соответствии с законами квантовой электрофизики. Это происходит при тех значениях размеров и мощностей, при которых созданные человеком электромеханические преобразователи энергии имеют мощность, соизмеримую с мощностью биологических преобразователей энергии (при этом происходит слияние наименьших из сделанных человеком устройств и наибольших молекул живых организмов), так

как уровень развития современной науки позволяет на уровне наноструктур конструировать такие электромеханические преобразователи энергии, в которых электродинамические процессы энергопреобразования протекают в соответствии с природными явлениями. На этом уровне мощностей господствует одно из стратегических направлений современной наноинженерии – наноэлектромеханика, которая рассматривает электромеханические системы (НЭМС) со структурными элементами размером от 10 до 100 нм. К одному из важнейших классов НЭМС можно отнести природные наноактюаторы – молекулярные моторы [26, 27].

В работах [28, 29] осуществлен сравнительный анализ динамических и структурных характеристик и классификация по принципу действия базовых функциональных элементов МЭМС и НЭМС – микроминиатюрных и нано-ЭМП-энергии с точки зрения бинарно-сопряженной трактовки основных принципов и теоретических положений современной электрофизики. Было установлено, что несмотря на имеющиеся между МЭМС и НЭМС сходные характеристики по функциональным принципам в МСТ, между ними имеется кардинальное отличие по узловым признакам динамического и энергетического состояния.

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

1. В наносистемной технике используется 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»).

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

3. 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 теория электрических цепей) должны быть скорректированы в соответствии законов квантов электрофизики.

4. Если изделия микросистемной техники в области МЭМС по структуре чисто технические, то в области наносистемной техники появляются фундаментальные исследования, в которых устанавливается возможность создания изделий НЭМС с совмещением действующих гармонично технических и природных функциональных элементов. 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.). Так как в отличие от биомоторов, созданные человеком по базе их технической аналогии НЭМС, могут функционировать в широком диапазоне температур (от низких температур вплоть до нескольких сотен градусов) и в различных агрессивных сре-

дах, то естественно, что в настоящее время один из главных мотивов, побуждающих нас к изучению живого вещества в наномасштабе – это мотив технологический. Можно утверждать, что сегодняшнее развитие наносистемной электромеханики предопределяет путь к созданию природоподобной техники.

Развитию НЭМС способствовали следующие открытия последнего двадцатилетия:

Создание углеродных нанотрубок и применение зондов микроскопов и литографических методов для сборки получаемых трубок в отдельные устройства; возможность размещения сконструированных отдельных молекул в зазоре между электродами и измерения переноса заряда через эти молекулы; развитие зондовых методов для манипулирования отдельными атомами вещества и создания наноструктур; разработка химических методов синтеза нанокристаллов и методов их объединения в более крупные упорядоченные структуры; выделение биохимических «молекулярных двигателей» и их включение в небиологическую среду [28].

Элементарной базой НЭМС и наноробототехники является углеродные нанотрубки (обладающих исключительными физическими и электрическими свойствами) углеродные каркасные структуры (например – фуллерен C_{60}), молекулярные моторы, молекулярные переключатели, комплексы ДНК и т. д., или их подсистемы, которые могут быть частью или законченным изделием НЭМС. Общая структура НЭМС включает в себя чувствительные элементы (датчики информации или наносенсоры), каналы передачи энергии и информации, управляющие устройства и исполнительные механизмы (например – наноактюаторы) (рис. 4) [29, 30].

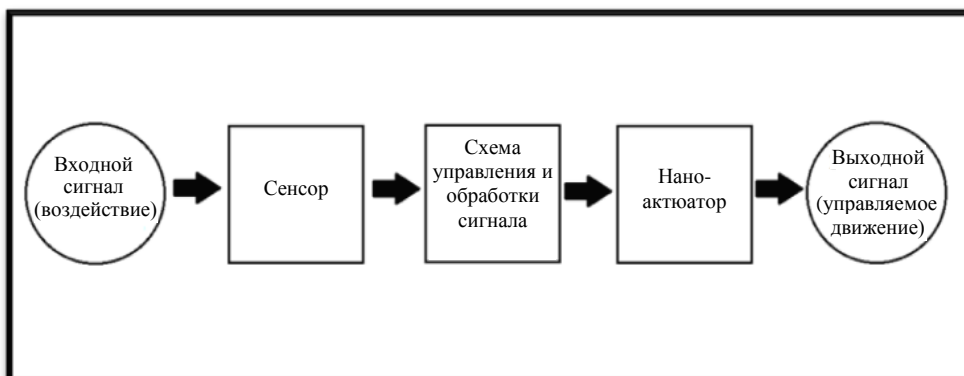


Рис. 4. Общая структура НЭМС.

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-энергии в общем объеме одного агрегата в макросистемной электромеханике не эффективно, так как индуктивные ЭМП-энергии являются источниками ЭДС, а емкостные – источниками тока. Такая совмещенная система представляла бы гибрид источников низкого и сверхвысокого напряжения и имела бы низкий КПД.

В макросистемной электромеханике определенный интерес представляют совмещенные системы, состоящие из последовательного и параллельного соединения индуктивных и емкостных ЭМП-энергии. При возникновении резонансных режимов в таких системах их энергетические характеристики наилучшие, так как происходит обмен реактивной мощностью между индуктивной и емкостной подсистемами, и для создания магнитного и электрического полей совмещенный ЭМП-энергии перестает потреблять реактивную мощность от внешних источников энергии [31].

Совершенно иная ситуация в современной микросистемной электротехнике. В настоящее время в передовых научных центрах развитых стран (США, Япония, страны ЕС, Россия, Китай и др.) ведутся интенсивные исследования по созданию новых электротехнических материалов с достаточно высокими свойствами как ферромагнитной составляющей, так и сегнетоэлектрической составляющей, в которых при отсутствии внешних электромагнитных полей наблюдаются и остаточная намагниченность, и электрическая поляризация.

Сегодняшние модификации этих материалов, которые изначально назывались магнитными сегнетоэлектриками (сегнетомангнетиками), могут быть с успехом применены в разработке и создании новых схем и компонентов микросистемного электрооборудования, в которых базовыми элементами являются совмещенные индуктивно-емкостные микроминиатюрные- и наноэлектромеханические

преобразователи энергии и их системы (МЭМС и НЭМС). При этом на практическое воплощение идеи индуктивно-емкостной микросистемной электромеханики сильное воздействие может оказывать развитие магистрального направления современной наноинженерии-наноструктурированного материаловедения (нанокристаллическое, нанокомпозитное, нановолокнистое и т. д.) [32, 33].

Хорошим примером является создание совмещенных наноструктур на основе проявления эффекта самоорганизации при одновременном осаждении на подложку двух веществ: магнитострикционного (например, шпинели – CoFe_2O_4) и пьезоэлектрического (например, титанита бария – BaTiO_3 или феррита висмута – BiFeO_3), так как изменяя кристаллографическую ориентацию подложки, можно выращивать как магнитострикционные столбики в пьезоэлектрической матрице, так и пьезоэлектрические столбики в магнитострикционной матрице. В результате удастся осуществить атомную инженерию (атомную сборку) и получится искусственный магнитоэлектрический материал, как совмещенная система нелинейно взаимодействующих электрических и магнитных подсистем.

Технологии такого типа вызывают интерес исследователей в различных областях науки и техники, особенно в электронике и медицине – отраслях, где получаемые уже сегодня результаты выглядят наиболее впечатляюще. В частности, медицина предлагает адресную доставку лекарств непосредственно к больному органу организма, например, к злокачественным опухолям, с целью уничтожить дефектные белки раковых клеток. Наноманипуляторы смогут проникать в клетки организма, исправляя повреждения его на молекулярном уровне, справляясь как с вирусными и бактериальными болезнями, так и с генетическими проблемами [34, 35].

В конце отметим, что получение и применение нанокомпозитных материалов в электротехнике может оказаться мощным средством энергосбережения. Кроме того, эти материалы выполняют и ряд других функций, обеспечивающих эффективную работу систем безопасности, в частности, создают условия для надежной подкритичности системы,

уменьшают выход наиболее опасных радионуклидов в атомных электроустановках. Важным требованием, которому должны удовлетворять новые функциональные материалы, является прогнозируемость их поведения при широком варьировании параметров внешних химических, термических и механических воздействий [36].

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект: Теоретико-экспериментальное конструирование новых композиционных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз FSWG-2020-0007).

ЛИТЕРАТУРА

1. Иосифьян А. Г. Вопросы электромеханики. – М.: Энергия, 1975.
2. Копылов И. П. // Электротехника. 2007. № 12. С. 50.
3. Караян Г. С., Гандилян С. В., Гандилян В. В. // Электротехника. 2013. № 3. С. 2.
4. Караян Г. С., Гандилян С. В., Гандилян В. В. // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 6. С. 370.
5. Гандилян С. В. // Нано- и микросистемная техника. 2015. Т. 8. С. 15.
6. Алферов Ж. И., Асеев А. Г., Гапонов С. В. // Микросистемная техника. 2005. Т. 181. № 8. С. 3.
7. Вардан В., Виной К. Д., Джозе К. А. ВЧ МЭМС и их применение. – М.: Техносфера, 2004.
8. Нано- и микросистемная техника: от исследований к разработкам / Под ред. Мальцева П. П. – М.: Техносфера, 2005.
9. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Чаплыгина Ю. А. – М.: Техносфера, 2005.
10. Gallacher B. J., Burdess J. S., Harris A. J., McNie M. E. // Proc. of the Symposium Gyro Technology. Stuttgart, Germany, 2001. P. 10–20.
11. Murali P. // Rep. Prog. Phys. 2001. Vol. 64. P. 1339.
12. Драгунов В. П., Киселев Д. Е., Синицкий Р. Е. // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 16. № 6. С. 360.
13. Губин С. П., Ткачев С. В. Графен и родственные наноструктуры углерода. – М.: URSS, 2014.
14. Андриевский Р. А., Рагуля А. В. Наноструктурные материалы. – М.: Изд. центр Академия, 2005.
15. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления развития / Под ред. Роко М. К., Уильямса Р. С., Аливисатоса П. / пер. с англ. – М.: Мир, 2002.
16. Мартин-Пальма Р., Лахтакия А. Нанотехнологии – ударный вводный курс / пер. с англ. – Долгопрудный: Издат. дом Интеллект, 2017.
17. Karayun H. S., Gandilyan S. V. // Argn. J. Phys. 2016. Vol. 9. № 3. P. 244.
18. Ковшов А. Н., Назаров Ю. Ф., Ибрагимов И. М. Основы нанотехнологии в технике. – М.: Издат. центр Академия, 2009.
19. Альтман Ю. Военные нанотехнологии: Возможности применения и превентивного контроля вооружений. – М.: Техносфера, 2006.
20. Гандилян С. В. // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 8. С. 15.
21. Харис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. – М.: Техносфера, 2003.
22. Елецкий А. В. // УФН. 2002. Т. 172. № 4. С. 401.
23. Serafi A. M., Kar N. C. // IEEE Tr. Energy Conver. 2005. Vol. 20. № 1. P. 197.
24. Sobczyk T. J. // Arch. El. Eng. 2011. Vol. 60. № 1. P. 142.
25. Иосифьян А. Г. // Электричество. 1987. № 12. С. 26; 1989. № 9. С. 19.
26. Копылов И. П., Гандилян С. В., Гандилян В. В. // Электротехника. 1998. № 9. С. 25.
27. Ulrich A. S. // Bioscience Rep. 2002. Vol. 22. № 2. P. 328.
28. Воронов В. К., Подоплелов А. В., Сагдеев Р. З. Физические основы нанотехнологии. – М.: URSS, 2010.
29. Данилевич Я. Б., Иванова А. В., Кручинина И. Ю., Хозиков Ю. Ф. // Электротехника. 2004. № 5. С. 25.
30. Кручинина И. Ю. // Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. Вып. 6. 2004. С. 110.
31. Пятков А. П., Звездин А. К. // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. Вып. 1. С. 593.
32. Фраерман А. А. // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. Вып. 12. С. 1345.
33. Ter-Oganessian N. V. // Ferroelectrics. 2012. Vol. 438. № 1. P. 101.
34. Zvezdin A. K., Vlasov A. M., Sechin D. A., Calvet L. E. // Ferroelectrics. 2012. Vol. 438. № 1. P. 79.
35. Stratulat S. M., Xiaoli Lu. // NanoLatt. 2013. Vol. 13. № 8. P. 3884.
36. Гандилян С. В., Гандилян Д. В. // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 7. С. 975.

PACS: 81

Some perspective issues of application of nanostructured material science and nanoelectro-nics in the systems of electromechanical energy converters for special purpose

S. V. Gandilyan, O. I. Poddaeva, M. I. Panfilova, and O. V. Novoselova

Moscow State University of Civil Engineering (department of physics and aerodynamics)
26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia

Received May 12, 2020

Brief overview of the current state of electromechanical science is given in this article. There is an analysis of the wide range of practical applications and prospects for the further development of its completely new direction - microsystem electromechanics. Some promising areas of applying the latest achievements of nanoscience and nanostructured materials science for electrical engineering in those areas of human life (from medical robotics to space exploration tools), in which today's scientific, technical and technological progress is based on the integrated use of special purpose electromechanical energy converters their systems are considered.

Two main ways of creating microminiature and nano-electromechanical energy converters as the basic elements of microsystem electromechanics are discussed in detail: from top to bottom and from bottom to top. The basic technological methods of designing the basic functional elements of microsystem electromechanics and their applications in traditional and new technology (information and computer technologies, medicine, aerospace and systems, etc.) are described.

Keywords: microsystem electromechanics, nanoscience, nanoelectronics, nanostructured material science, nanoelectromechanics, robotics similar to nature.

REFERENCES

1. A. G. Iosifyan, *Voprosy elektromekhaniki* (Energiya, Moscow, 1975) [in Russian].
2. I. P. Kopylov, *Elektrotehnika*, No. 12, 50 (2007).
3. G. S. Karayan, S. V. Gandilyan, and V. V. Gandilyan, *Elektrichestvo*, No. 3, 2 (2013).
4. G. S. Karayan, S. V. Gandilyan, and V. V. Gandilyan, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* **19** (6), 370 (2017).
5. S. V. Gandilyan, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* **8**, 15 (2015).
6. Zh. I. Alferov, A. G. Aseev, and S. V. Gaponov, *Mikrosistemnaya tekhnika* **181** (8), 3 (2005).
7. V. Varadan, K. D. Vinoy, and K. A. Dzhoze, *VCh MEMS i ikh primeneniye* (Tekhnosfera, Moscow, 2004) [in Russian].
8. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika: ot issledovaniy k razrabotkam* / Pod red. P. P. Mal'tseva (Tekhnosfera, Moscow, 2005) [in Russian].
9. *Nanotekhnologii v elektronike* / Pod red. Yu. A. Chaplygina (Tekhnosfera, Moscow, 2005) [in Russian].
10. B. J. Gallacher, J. S. Burdess, A. J. Harris, and M. E. McNie, *Proc. of the Symposium Gyro Technology* (Stuttgart, Germany, 2001).
11. P. Muralt, *Rep. Prog. Phys.* **64**, 1339 (2001).
12. V. P. Dragunov, D. E. Kiselev, and R. E. Sinititskiy, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* **16** (6), 360 (2017).
13. S. P. Gubin and S. V. Tkachev, *Grafen i rodstvennye nanoformy ugleroda* (URSS, Moscow, 2014) [in Russian].
14. R. A. Andrievskiy and A. V. Ragulya, *Nanostrukturnye materialy* (Izd. tsentr Akademiya, Moscow, 2005) [in Russian].
15. *Nanotekhnologiya v blizhayshe desyatiletii. Prognoz napravleniya razvitiya* / Pod red. M. K. Roko, R. S. Uil'yamsa, P. Alivisatos / Per. s angl. (Mir, Moscow, 2002) [in Russian].
16. R. Martin-Pal'ma and A. Lakhtakiya, *Nanotekhnologii — udarnyy vvodnyy kurs* / Per. s angl. (Izdat. dom Intellect, Dolgoprudnyy, 2017) [in Russian].
17. H. S. Karayn and S. V. Gandilayn, *Arm. J. Phys.* **9** (3), 244 (2016).
18. A. N. Kovshov, Yu. F. Nazarov, and I. M. Ibragimov, *Osnovy nanotekhnologii v tekhnike* (Izdat. tsentr Akademiya, Moscow, 2009) [in Russian].
19. Yu. Altman, *Voennye nanotekhnologii: Vozможности primeneniya i preventivnogo kontrolya vooruzheniy* (Tekhnosfera, Moscow, 2006) [in Russian].
20. S. V. Gandilyan, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. No. 8, 15 (2015).
21. P. Kharis, *Uglerodnye nanotrubby i rodstvennye struktury* (Tekhnosfera, Moscow, 2003) [in Russian].
22. A. V. Eletskiy, *UFN* **172** (4), 401 (2002).
23. A. M. Serafi and N. C. Kar, *IEEE Tr. Energy Conver.* **20** (1), 197 (2005).
24. T. J. Sobczyk, *Arch. El. Eng.* **60** (1), 142 (2011).
25. A. G. Iosifyan, *Elektrichestvo*, No. 12, 26 (1987);

No. 9, 19 (1989).

26. I. P. Kopylov, S. V. Gandilyan, and V. V. Gandilyan, *Elektrotehnika*, No. 9, 25 (1998).

27. A. S. Ulrich, *Bioscience Rep.* **22** (2), 328 (2002).

28. V. K. Voronov, A. V. Podoplelov, and R. Z. Sagdeev, *Fizicheskie osnovy nanotekhnologii* (URSS, Moscow, 2010) [in Russian].

29. Ya. B. Danilevich, A. V. Ivanova, I. Yu. Kruchinina, and Yu. F. Khozikov, *Elektrotehnika*, No. 5, 25 (2004).

30. I. Yu. Kruchinina, *Problemy sozdaniya i ekspluatatsii novykh tipov elektroenergeti-cheskogo oborudovaniya*, Vyp. 6, 110 (2004).

31. A. P. Pyatkov and A. K. Zvezdin, *Uspekhi fizicheskikh nauk* **182** (1), 593 (2012).

32. A. A. Fraerman, *Uspekhi fizicheskikh nauk* **182** (12), 1345 (2012).

33. N. V. Ter-Oganessian, *Ferroelectrics* **438** (1), 101 (2012).

34. A. K. Zvezdin, A. M. Vlasov, D. A. Sechin, and L. E. Calvet, *Ferroelectrics* **438** (1), 79 (2012).

35. S. M. Stratulat, Lu. Xiaoli, *NanoLatt.* **13** (8), 3884 (2013).

36. S. V. Gandilyan and D. V. Gandilyan, *ZhTF*, **89** (7), 975 (2019).