

*Посвящается памяти
академика Андроника Гевондовича Иосифьяна*

Нанотехнология в современной электромеханике

КАРАЯН Г.С., ГАНДИЛЯН С.В., ГАНДИЛЯН В.В.

Дан краткий обзор современного состояния электромеханической науки, рассмотрены некоторые перспективные направления применения новейших достижений нанонауки и нанотехнологии в тех отраслях жизнедеятельности человека (от медицины до освоения космоса), в которых научно-технический прогресс базируется на комплексном применении электромеханических преобразователей энергии.

Ключевые слова: *микроминиатюрная электромеханика, наноэлектромеханика, емкостная электромеханика, пьезоэлектричество*

Современная электромеханическая наука, прогресс которой базируется на максимальном использовании новейших достижений классической механики и электродинамики, физики полупроводников, атомной физики, энергетике, оптоэлектронике, кибернетики и т.п., следуя общим тенденциям мирового научно-технического прогресса, развивается по двум магистральным направлениям.

1. В настоящее время как в практике электромашиностроения, так и в области теории электромеханических преобразователей энергии (ЭМП) ждет своего решения множество задач, связанных с повышением энергетических показателей, проектированием и созданием более экономичных (менее металлоемких и более технологичных) электрических машин.

2. Наряду с микроэлектронной, компьютерной техникой, телекоммуникацией и т.д. в области современной электротехники наиболее ярко проявляется жизненная необходимость миниатюризации (и сверхминиатюризации) функциональных структур электромеханических преобразователей энергии и их систем.

Еще в 1970–80-х годах крупнейший ученый в области электротехники, организатор науки и промышленности, один из основоположников советского ракетостроения и космонавтики А.Г. Иосифьян, анализируя в своих трудах состояние и перспективы развития советской электротехнической промышленности, наметил важнейшие задачи и проблемы, решение которых может способствовать комплексному повышению уровня электромашиностроения – от микроминиатюрных двигателей до мощнейших гидро- и турбогенераторов [1].

The modern state of electromechanical science is briefly reviewed, and some of prospective application fields of the newest achievements in nanoscience and nanotechnology are considered in the areas of human vital activity (from medicine to space exploration), the scientific-technical progress in which is based on a comprehensive use of electromechanical energy converters.

Key words: *microminiature electromechanics, nanoelectromechanics, capacitive electromechanics, piezoelectricity*

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 электромеханических преобразователей энергии.

Необходимо на основе критического взгляда на ряд важных вопросов физико-технических и технологических основ развития современного электромашиностроения разрабатывать совершенно новые физико-математические модели электромеханических преобразователей энергии в тесной связи с макро- или микроэлектродинамическими и макро- или микромеханическими явлениями.

Следует подчеркнуть, что в своих теоретических работах академик А.Г. Иосифьян обосновал возможности практического развития электроиндукционного (емкостного) электромашиностроения. В его работах емкостно-электрические машины специального назначения (в основном с электродной конструкцией) рассматриваются с точки зрения

электродинамики Максвелла в разделе «электростатика» в качестве одной из подсистем общего класса емкостных электромеханических преобразователей энергии.

Исследованиями была установлена возможность реализации и третьего типа электромеханических преобразователей энергии, которые можно отнести к индуктивно-емкостным машинам, в которых при энергообменных процессах существенную роль будут играть оба потока сцепления — магнитное и электрическое.

Существующие предпосылки практической реализации явлений сверхпроводимости в композитных электромагнитных конструкциях (способных генерировать или потреблять токи в миллионы ампер) и широкого применения их в электронной промышленности, физике высокотемпературной плазмы и медицине дают основание утверждать, что независимо от пути, по которому пойдет дальнейшее развитие электротехнической промышленности, магнитосверхпроводящая электротехника, в которой наблюдается примат магнитных явлений над электрическими, будет бросать решительный вызов сверхэлектропроводниковой технике. Нетрудно предсказать, что, по крайней мере, в обозримом будущем магнитосверхпроводящая электротехника будет способна обеспечивать предельные показатели устройств по быстродействию точности и чувствительности [2–8].

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 «нанотехнология» [9–11].

В статье рассматриваются некоторые перспективные идеи применения новейших достижений нанонауки и нанотехнологии в тех отраслях, базовыми элементами которых являются системы электромеханических преобразователей энергии.

Природные электромеханические преобразователи энергии. В окружающем нас мире (от вселенских микрообъектов, таких как галактики и звезды, до микрообъектов — биодвигателей, атомов и всего многообразия элементарных частиц) процесс электромеханического преобразования энергии, обусловленный непосредственным взаимодействием гравитационно-инерционных и электромагнитных сил, — всеобщее и фундаментальное явление, являющееся источником эволюции природы.

На шкале мощностей (рис. 1) для природных преобразователей электромагнитной энергии, действующих в земных масштабах, имеются две магические точки: точка минимума $P_{\min} = 10^{-17}$ Вт —

мощность самого маломощного биодвигателя (молекулярного мотора) — натрий-калиевого насоса и точка максимума $P_{\max} = 6,5 \times 10^{29}$ Вт — мощность совмещенной униполярной «электрической машины» — планеты Земля [12, 13].

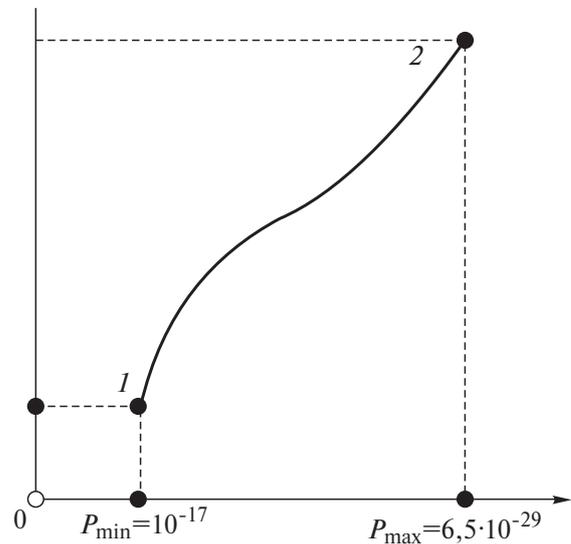


Рис. 1

В природе при взаимодействии материи и физического поля важную роль играют и электрические, и магнитные поля. Именно в эволюции природы нужно искать глубокий смысл совмещения индуктивных и емкостных электромеханических преобразователей энергии. В зависимости от того, какие силы превосходят, можно судить о «действии» в том или ином природном явлении индуктивных либо емкостных электромеханических преобразователей.

Если сильные и слабые взаимодействия в микромире определяют квантовый характер природы, то электромагнитные и гравитационные взаимодействия, определяющие характер взаимодействия вещественных инерционных макроскопических и микроскопических тел, связанных с электрическими и магнитными полями, обуславливают эволюцию природы.

В настоящее время бурно развиваются такие научные направления, как магнитобиология (исследование влияния электромагнитных полей на живые организмы и растения) и биомагнетизм (исследование слабых магнитных полей, создаваемых биотоками организмов). Еще в конце 50-х годов прошлого века лауреат Нобелевской премии Альберт Сент-Дьерди высказал интересную мысль о том, что клетки живых организмов представляют собой фактически электрический механизм, в котором электрическая энергия преобразуется в механическую работу (микроэлектромеханическое преобразование), а механическая энергия — в элект-

трическую, которая поддерживает и направляет пульс клеточной жизни [14]. За прошедшие два века электробиология сделала поразительные успехи, но всего лишь несколько десятилетий назад биологи доказали, что бактерии могут двигаться, минуя превращение энергии пищи в АТФ (аденозинтрифосфорную кислоту). За счет мембранного потенциала, образующегося при разделении зарядов, в биологических двигателях электрическая энергия преобразуется в механическую.

В 1961 г. английский ученый П. Митчелл выдвинул гипотезу, что энергия пищи сначала преобразуется в электрическую энергию и уже она затрачивается на производство АТФ. При этом АТФ является лишь накопителем и переносчиком зарядов и действует как молекулярный мотор (биоэлектродвигатель) [15, 16].

Схема одного из возможных механизмов молекулярного мотора (натрий-калиевого насоса) дана на рис. 2. Он состоит из ротора-белка 1 с активными центрами. Вращается в мембране 2, которая является статором. Активные центры ротора захватывают из наружной среды ион калия и из внутренней (цитоплазмы клетки) — ион натрия. При вращении ротора в электрическом поле освобождаются захваченные ионы. При этом натрий выходит наружу, а калий попадает внутрь клетки [17].

Другой молекулярный мотор — на основе АТФ синтеза — предназначен для синтеза или гидролиза молекул АТФ, а также переноса протонов (H^+) через мембрану клетки для поддержания необходимой кислотности цитоплазмы. Объяснение механизмов его функционирования отмечено Нобелевской премией в 1977 г. Интересно, что при синтезе или гидролизе АТФ одна из частей энзима совершает вращательное движение по или против часовой стрелки, впуская протоны внутрь клетки или выпуская их наружу. По эффективности работы и развиваемой силе АТФ синтеза существенно превосходит все известные в природе молекулярные моторы. Типичная сила, продуцируемая такой тур-

биной, составляет около 1 пкН, а мощность — порядка $1 \cdot 10^{-17}$ Вт [18].

Бактерии — самые маломощные электромеханические преобразователи на Земле. У них есть генераторы (клеточные мембраны), двигатели и линии передачи электроэнергии. Интересно, что электромотор бактерий обладает реверсом: если жгутик вращается по часовой стрелке, то бактерия плавает жгутиком вперед, если против часовой стрелки — жгутиком назад.

В настоящее время придумано несколько конкретных моделей, которые объясняют, как энергия преобразуется в механическое вращение жгутика. При этом показано, что мембранный потенциал, при котором работает молекулярный мотор бактерии, составляет примерно 200 мВ, а мощность мотора — примерно 10^{-17} Вт.

Следует отметить, что при электромеханическом толковании процессов энергопреобразования в биологических организмах первичным источником повышения температуры в органических объемах биоорганизмов является совместная «работа» миллиардов бактерий как многоэлементных систем нелинейно связанных биодвигателей (молекулярных моторов), в которых электрическая энергия преобразуется в механическую энергию и тепло.

Так как бактерии имеют достаточно сложную молекулярную структуру, обеспечивающую возможность осуществления процессов обмена веществ и энергией с окружающей средой, то для них характерно не только неотъемлемое свойство живой природы — явление самоорганизации, но и запрограммированная способность воспроизводить самих себя [19].

В [20—25] на базе критического анализа целого ряда задач моделирования электрофизических свойств живых организмов предложена обобщенная модель электромеханической интерпретации процессов энергообразования в них — как модель биосистемы достаточно большого множества нелинейно взаимодействующих биоэлектромеханических преобразователей энергии (молекулярных моторов).

В современной электроэнергетике заманчивым является создание энергетических установок, использующих энергию Космоса. Для того чтобы предложить технические конструкции энергетических установок для промышленного получения экологически чистой электрической энергии из Космоса, необходимо разобраться в энергетике планеты, ответить на множество вопросов. Таким образом, решение одной из центральных задач современной науки во многом будет зависеть от успехов наук о Земле.

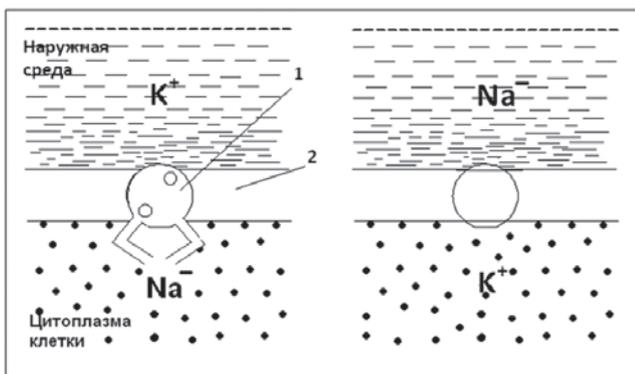


Рис. 2

Электромеханическая модель Земли дает более глубокое и последовательное объяснение глобальных энергетических процессов, протекающих в недрах Земли, океане и атмосфере, чем принятые до сих пор основные физико-математические модели о природе геомагнетизма Земли, где считается, что создание магнитного поля в ядре Земли происходит так же, как и в динамо-машине с самовозбуждением.

Созданные человеком электромеханические преобразователи энергии копируют природные процессы энергопреобразования и в возможных (при современном технологическом уровне развития электромашиностроения) значениях энергетических и массогабаритных показателей, а также в зависимости от принципа энергопреобразования занимают тот или иной интервал указанной на рис. 1 шкалы мощностей [26—27].

Классификация электромеханических преобразователей энергии. Общеизвестно, что классификацию электромеханических преобразователей энергии, как и других электротехнических устройств, можно осуществить по принципу действия, массогабаритным и энергетическим показателям, а также устройству.

Электромеханические преобразователи энергии по принципу действия на базе фундаментального анализа физических процессов энергопреобразования были классифицированы еще в 80-х годах прошлого века в работах советских ученых, установивших, что наряду с индуктивными и емкостными электромеханическими преобразователями можно конструировать индуктивно-емкостные, в которых рабочим является электромагнитное поле (в энергообменных процессах участвуют и электрические, и магнитные поля) (рис. 3) [28, 29].

В последнее время фирмами промышленно развитых стран мира ведутся исследования емкостного электромашиностроения. Успехи в создании суперконденсаторов с вакуумной изоляцией и теоретические достижения в области электромеханики 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.) [30].

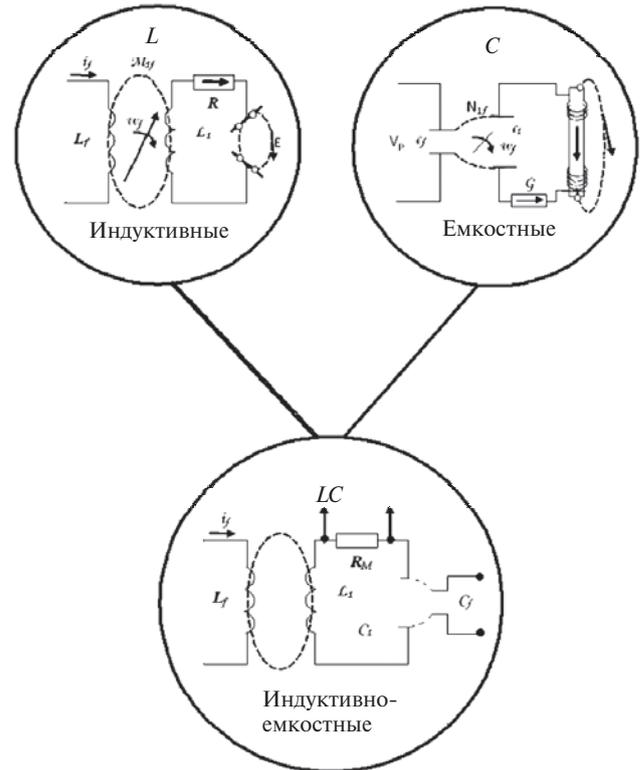


Рис. 3

Перспективным направлением развития емкостного электромашиностроения является конструирование таких машин, у которых рабочее электрическое поле можно концентрировать в веществе с высокими диэлектрическими характеристиками — применять диэлектрики со значением $\epsilon \gg 8, 10000$, такие как титанат бария, дигидрофосфат калия или другие жидкие или твердые сегнето-диэлектрические материалы [31].

Что же касается индуктивно-емкостных электромеханических преобразователей энергии, то здесь предстоит большая работа по созданию их теории и конструктивной реализации.

Если 1950–1970-е годы ознаменовались крупнейшими достижениями в области микроэлектромеханики (мощность не выше 1 кВт), являющейся базой автоматизации множества технологических процессов, то с 80-х годов прошлого века в большинстве промышленно развитых стран мира ведутся интенсивные разработки новых видов электромеханических преобразователей энергии со структурными размерами от микрона до нескольких миллиметров как совокупность микроминиатюрных электронных и механических элементов (компонентов).

Направление электромеханической науки, исследующее микроминиатюрные электромеханические системы (Microminiature electromechanical systems — MEMS, МЭМС), называется микроми-

ниатюрной электромеханикой, которая в сущности является емкостной электромеханикой [32].

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 микроботов, 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 [33].

Главные трудности создания и эксплуатации микроминиатюрных электромеханических преобразователей энергии заключаются в следующем:

изменение электродинамических и механических характеристик электромеханических материалов в рассматриваемых микро размерах;

возникновение краевых электростатических полей высокого напряжения и микрозарядов на выступах кремниевых заготовок, из которых изготавливаются части микроминиатюрных электрических машин (почти по той же технологии, что и чипы для электронных микропроцессоров);

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

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.

В зависимости от предназначения микроминиатюрные электромеханические преобразователи могут возбуждаться от разных источников энергии: звуковых волн, теллурических или земных токов, атмосферного электричества, разностей температур и т.д.

Если в электромеханических преобразователях энергии стандартных размеров (включая микрома-

шины) используются в основном электромагнитные силы, то в микроминиатюрных электромеханических преобразователях господствуют электрические силы взаимодействия, а магнитные силы незначительны. С уменьшением размеров указанные различия между микроэлектромеханическими (особенно сверхминиатюрными МЭМС) и макроэлектромеханическими преобразователями становятся более значительными.

Схема типичного микроминиатюрного электромеханического преобразователя энергии приведена на рис. 4, где показан индуктор двухкоординатного линейного двигателя, имеющего ярмо и две взаимно перпендикулярные обмотки с числом фаз (заходов), равным трем (A, B, C). Обмотки выполнены в виде тканого полотна с переплетением перпендикулярно расположенных микропроводов. При этом фазы обмоток двух слоев размещаются в шахматном порядке. При подаче трехфазного напряжения создается бегущее магнитное поле в одном направлении, а при подаче напряжения на вторую обмотку – в перпендикулярном. Одновременная подача напряжения на обе обмотки с изменением его частоты по определенному закону обеспечивает перемещение вторичного элемента в плоскости индуктора по заданной траектории.

Наноэлектромеханические преобразователи энергии. Дальнейшая миниатюризация электромеханических систем, когда еще действуют законы классической электрофизики, охватывает область мощностей, в которой структурные элементы имеют, по меньшей мере, один размер от 1000 до 1000000 нанометров ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Основой этого направления электромеханики является объединение поверхностной микрообработки (развитой в мик-

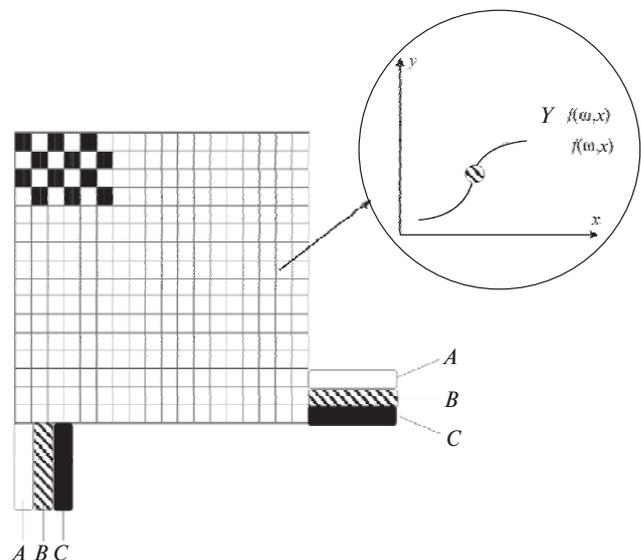


Рис. 4

роэлектронной технологии) с объемной обработкой.

На шкале мощностей (и соответствующих частот) ниже «магической» точки P_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 [34–37].

На этом уровне мощностей господствует одно из стратегических направлений современной нанонауки — наноэлектромеханика, которая рассматривает электромеханические системы (НЭМС) со структурными элементами размером от 1 до 100 нм. К одному из важнейших классов НЭМС можно отнести природные наноактюаторы — молекулярные моторы.

Если до границы между сверхминиатюрной электромеханикой и наноэлектромеханикой процесс миниатюризации электромеханических изделий можно осуществить с помощью моделей и технологий 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 главенствующее значение принимают технологии типа «снизу—вверх» (восходящее производство), основой которых служит атомный или моле-

кулярный синтез (так называемый «молекулярный монтаж» или «атомная сборка») [38, 39]. При этом следует отметить, что роль силы тяжести, имеющая значение для более крупных электромеханических преобразователей энергии (включая МЭМС), в наноструктурах (и, соответственно, в наноэлектромеханических системах) незначительна по сравнению с силами химических связей и межмолекулярного взаимодействия.

В наноэлектромеханических системах вместо электромагнитного или магнитоэлектрического принципов (эффектов) преобразования энергии, используемых повсеместно в «макроэлектромеханике», часто применяют пьезоэлектрический эффект. В зависимости от выбора принципа работы наноустройств подвод энергии к наноэлектромеханической системе может быть электрическим, термическим или химическим. Ключевое преимущество наноустройств и наносистем в том, что они работают при крайне малых уровнях мощности — от нановатт до микроватт.

В таблице приведена классификация электромеханических преобразователей энергии по энергетическим показателям.

Области характерных размеров для микро- и наноэлектромеханических преобразователей энергии приведены на рис. 5 (1 — наноэлектромеханические; 2 — сверхминиатюрные; 3 — микроминиатюрные).

В настоящее время стоит вопрос о создании новых видов наноэлектромеханических преобразователей энергии, часть функций в которых («ротора» или «статора») выполняют элементы биологических объектов (например, бактерии). Ведутся интенсивные разработки по созданию наноэлектромеханических систем, способных управлять движением и поведением живых биологических объектов (мышей, тараканов, пчел, мух и т.п.), при этом системы могут быть как встраиваемыми в биологический объект, так и находящимися вне его [40].

Тип ЭМП	Мощность P , Вт	ЭМП по принципу действия
Наноэлектромеханические преобразователи энергии	$10^{-9} \leq P < 10^{-6}$	пьезоэлектрические, электростатические
Сверхминиатюрные электромеханические преобразователи	$10^{-6} \leq P < 10^{-3}$	магнитоиндукционные (емкостные)
Миниатюрные электромеханические преобразователи	$10^{-3} < P \leq 10$	магнитоиндукционные (емкостные)
Микроэлектромеханические преобразователи	$10 < P \leq 10^3$	индуктивные, емкостные
Электромеханические преобразователи энергии средней мощности	$10^3 < P \leq 10^5$	электроиндукционные (индуктивные)
Крупные электромеханические преобразователи энергии	$10^5 < P \leq 10^6$	электроиндукционные (индуктивные)
Сверхмощные электромеханические преобразователи	$10^6 < P \leq 10^9$	электроиндукционные (индуктивные)

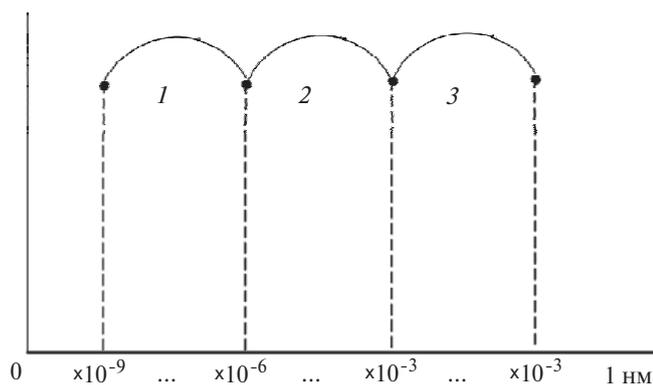


Рис. 5

Переход к нанoeлектромеханике связан с использованием нанотехнологий и новых физических эффектов. Так, при создании полостей – важного компонента различных устройств – все в большей мере используются самоорганизующиеся процессы (углеродные нанотрубки, пористые мембраны на основе оксида алюминия). Это позволяет увеличить воспроизводимость, повысить надежность, поскольку малейшие изменения размеров, связанные с использованием традиционных технологий, ведут к экспоненциально быстрому изменению параметров.

В развитых зарубежных странах этому уделяется большое внимание – создаются исследовательские институты, развернута подготовка специалистов. В США этими вопросами занимаются такие известные фирмы, как Intel, MEMS Industry Group, Sandia national Labs. Агентство перспективных разработок МО США реализует программу «Умная пыль», направленную на создание сверхминиатюрных устройств, способных генерировать энергию, проводить мониторинг окружающей среды, накапливать и передавать информацию.

Разработанные за последнее десятилетие в научно-исследовательских центрах развитых стран мира некоторые уникальные конструкции нанoeлектромеханических преобразователей энергии разных модификаций (микродвигателей, микронасосов, микроприводов и т.д.) начали широко применяться в важнейших областях жизнедеятельности человека (информационных и компьютерных технологиях, машиностроении, биологии и медицине, наносистемах для вредных производств, ядерной энергетике и др.) [41–43].

Например, учеными из Технологического института Джорджии (США) создан прототип наногенератора, представляющего собой систему вертикальных нанопроволочек (гексагональных кристаллов) из оксида цинка, обладающего свойствами пьезоэлектрика и полупроводника и помещенного над ней прямоугольного электрода с ребристой нижней поверхностью. Соединение пьезоэлектри-

ческих нанонитей в электроде зигзагом при колебательных движениях электрода под действием внешних сил (например вибрации пульса человека или акустических волн) обеспечило их совместное изгибание и, соответственно, одновременное вырабатывание электрического тока. Мощность такого наногенератора на единицу занимаемого им объема составляет 4 Вт/см^3 .

По мнению ученых, действие таких внешних сил, как, например, вибрации внутри человеческого тела (в мышцах или в кровеносных сосудах) будет достаточно, для того чтобы наногенератор выработал необходимую энергию для работы медицинских имплантантов или биологических сенсоров.

Наноструктурные материалы в электромеханике. Прогресс в области современного машиностроения по всем интервалам энергетических и массогабаритных показателей во многом зависит от развития техники электромеханических материалов. Новейшие достижения в создании наноструктурных материалов и открывающиеся перспективы разработки их промышленных образцов предсказывают эволюционный толчок в развитии современного электромашиностроения во всем диапазоне энергетического спектра.

Перечислим лишь некоторые приоритетные направления в этой области:

- создание надежных наноструктурных изоляционных материалов позволяет резко повысить эксплуатационные характеристики в области крупного машиностроения (особенно механической прочности, износостойкости и нагревостойкости);

- создание наноструктурных магнитных, электрических и проводниковых материалов с высокими энергетическими характеристиками позволяет резко повысить показатели индуктивных электромеханических систем;

- достижения последних лет в области наноструктурных материалов открывают новую эпоху в технике преобразования электрической энергии, которая оказывает мощное влияние на дальнейшее развитие систем автоматики и электропривода;

- создание наноструктурных материалов создает новые возможности для развития емкостной электромеханики, разработки сегнетоэлектрических материалов с высокими электромеханическими характеристиками, достижений в области порошковой технологии;

- достижения в области материаловедения (особенно наноструктурных материалов) открывают путь для развития совершенно нового направления – индуктивно-емкостной электромеханики. Решение этой задачи может способствовать созданию

магнитоэлектрических наноструктурных материалов с высокими и магнитными, и электрическими характеристиками [44–46].

Вопросы физико-математического моделирования микроминиатюрных и нанoeлектромеханических преобразователей энергии будут затронуты в дальнейших работах авторов настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иосифьян А.Г. Вопросы электромеханики. — М.: Энергия, 1975.
2. Копылов И.П. Электрические машины. — М.: Высшая школа, 2006.
3. Бертинов А.И., Бут Д.А., Мизюрин С.Р. и др. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии. — М.: Энергоатомиздат, 1993.
4. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. — М.: Изд-во МЭИ, 2003.
5. Гандилян С.В., Гандилян В.В. Некоторые проблемы создания микроминиатюрных электромеханических преобразователей энергии. — Электричество, 1999, № 3.
6. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. — М.: Высшая школа, 1985.
7. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах/Под ред. А.В. Иванова-Смоленского. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Криогенные электрические машины/Под ред. Н.Н. Шереметьевского. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Нанотехнологии в электронике/Под ред. Ю.А. Чаплыгина. — М.: Техносфера, 2005.
10. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. — М.: Академия, 2005.
11. Рамбиди Н.Г., Березкин А.В. Физические и химические основы нанотехнологий. — М.: Физматлит, 2008.
12. Топорцев Н.Д. От опытной модели Фарадея до электрической машины планеты Земля. — М.: Энергоатомиздат, 2002.
13. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. — М.: Высшая школа, 2005.
14. Ивков В.Г., Брестовский Г.Н. Липидный слой биологических мембран. — М.: Наука, 1982.
15. Беркинблит М.Б., Глаголева Е.Г. Электричество в живых организмах. — М.: Наука, 1988.
16. Волькенштейн М.В. Биология и биофизика. — Успехи физических наук, 1973, т. 109, вып. 3.
17. Lew H.S. Electro-Tension and Torque in Biological Membranes Modelled as a Dipole Sheet in Fluid Conductors. — Biomechanics, 1972, vol. 5, № 4.
18. Corneliu T. Handbook Techniques and Applications Design Methods; Fabrication Techniques; Manufacturing Methods; Sensors and Actuators; Medical Applications. — Springer, 2007.
19. Шеперд Г. Нейробиология. — М.: Мир, 1987, т. 1 и 2.
20. Биопотенциалы мозга человека/Под ред. В.С. Русинова. — М.: Медицина, 1987.
21. Мозг/Под ред. П.В. Симонова. — М.: Мир, 1982.
22. Хокинг С. Мир в ореховой скорлупе. — М.: Амфора, 2008.
23. Кларк Дж. Свидиды, мозг и гравитационные волны/Физика за рубежом. — М.: Наука, 1987.
24. Николс Дж. Г., Мартин А.Р., Валлас Б. Дж. От нейрона к мозгу. — М.: Едиторнал УРСС, 2003.
25. Хайкин С. Нейронные сети. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2006.
26. Копылов И.П., Гандилян С.В., Гандилян В.В. Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования электромеханических преобразователей энергии. — Электротехника, 1998, № 9.
27. Бушуев В.В., Копылов И.П. Космос и Земля. — М.: ИАЦ «Энергия», 2005.
28. Иосифьян А.Г., Арешян Г.Л. Основы теории синхронных емкостных машин переменного тока. — ДАН Арм. ССР, 1981, т. 73.
29. Иосифьян А.Г. Эволюция физических основ электротехники и электродинамики. — Электричество, 1987, № 12; 1989, № 9.
30. Sunborn P.F. The prospects for vacuum-insulated electric machines in the generation of HVDC power. — Conf. Rec. IEEE Inter. I Symp. «Electrical Insulation», Montreal, 1976.
31. Гандилян С.В. Совмещенные магнитно-электроиндукционные (индуктивно-емкостные) электромеханические преобразователи энергии. — Электричество, 1988, № 8.
32. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. — М.: Техносфера, 2004.
33. Knobel R., Cleland A. New NEMS device. — Nature, 2003, vol. 424.
34. Poole C.P., Owens F.J. Introduction to Nanotechnology Wiley. — Interscience, 2003.
35. Direct-Current Nanogenerator Driven by Ultrasonic Waves. — Xudong Wang, Jinhui Song, Jin Liu and Zhong Lin Wang in Science, 2007, vol. 316, April 6.
36. Nanowire Piezoelectric Nanogenerators on Plastic Substrates as Flexible Power Sources for Nanodevices. — Pu Xian Gao, Jinhui Song, Jin Liu and Zhong Lin Wang in Advanced Materials, 2007, vol. 19.
37. Knobel R., Cleland A. New NEMS device. — Nature, 2003, v. 424.
38. Татаренко Н.И., Кравченко В.Ф. Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. — М.: Физматлит, 2006.
39. Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ибрагимов И.М. Основы нанотехнологии в технике. — М.: Академия, 2009.
40. Минкин В.И. Молекулярная электроника на пороге нового тысячелетия. — Российский химический журнал, 2004, т. 44, № 6.
41. Нано- и макросистемная техника: от исследований к разработкам/Под ред. П.П. Мальцева. — М.: Техносфера, 2005.
42. Пул Ч. Мир материалов и технологии: Нанотехнологии. — М.: Техносфера, 2004.
43. Харрис П. Углеродные нанотрубки и родственные структуры: Новые материалы XXI века. — М.: Техносфера, 2003.
44. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы — состояние разработок и перспектив. — Перспективные материалы, 2001, № 6.
45. Рыхонов Д.Н., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Наноматериалы. — М.: БИНОМ. Лаборатория знания, 2010.
46. Волков Г.М. Особенности наноматериалов. — М.: КНО-РУС, 2011.

[09.07.12]

Авторы: Караян Гамлет Суренович окончил Ереванский государственный университет (ЕГУ) в 1969 г. Доктор физ.-мат. наук (1986). Профессор факультета физики ЕГУ, чл.-корр. НАН Республики Армения.

Гандилян Сейран Вартович окончил ЕГУ в 1983 г. Защитил кандидатскую диссертацию по емкостным электрическим машинам в 1999 г. Директор ООО «АНГАСТРОЙ».

Гандилян Ваган Вартович окончил ЕГУ в 1982 г. Защитил кандидатскую диссертацию по оптимизации динамических режимов биологических экосистем. Доцент ЕГУ.