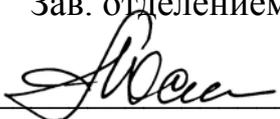


Министерство образования и науки российской федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

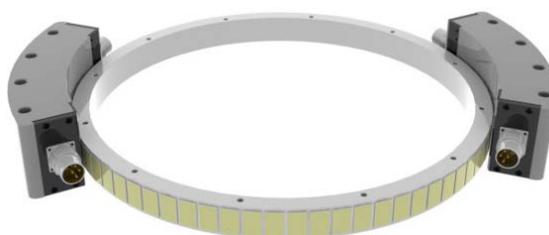
Утверждаю
Зав. отделением каф. ЮНЕСКО

 Ю.М. Осипов

" _____ " _____ 2012 г.

МИКРОМЕХАТРОНИКА. НАНОМЕХАТРОНИКА

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплинам: "**Микромехатроника**" и "**Наномехатроника**" для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 "Мехатроника и робототехника" по магистерской программе "Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения"



Томск 2012

УДК 621.396.6.671.7

Микромехатроника. Наномехатроника: Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплинам: "**Микро-мехатроника**" и "**Наномехатроника**" для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 "Мехатроника и робототехника" по магистерской программе "Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения". – Томск: Изд-во ТУСУР, 2012. – 26 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром отделения кафедры ЮНЕСКО
«27» марта 2012 г.

Составитель к.т.н., доц.

 С.В. Щербинин

Зав. кафедрой ОКЮ
доктор техн. наук,
доктор экон. наук
профессор

 Ю.М. Осипов

Рецензент

Кандидат технических наук,
доцент кафедры МИГ ЮТИ ТПУ

И.Ф. Боровиков

Введение

Научно-техническая революция связанная с нанотехнологиями, коснулась практически всех сфер научно-исследовательской деятельности и породила целый ряд научных направлений: нанофизику (включая наномеханику и наноэлектронику), нанохимию, нанобиологию и наноинформатику (именуемую также квантовой информатикой), являющихся новыми и наиболее динамично развивающимися специальными разделами соответствующих традиционных наук, ориентированных на изучение нанообъектов — наноразмерных объектов с размерами в диапазоне от единиц до сотен нанометров.

Наряду сданными науками нанореволюция затронула и мехатронику [8] — одну из самых молодых технических наук XX века, связанную с компьютерным управлением в технических системах и, фактически, являющуюся компьютерной парадигмой развития технической кибернетики [9]. В специальной научно-технической литературе и в сети Интернет появился термин "наномехатроника" который уже включен в словарь Международной федерации содействия наукам о машинах и механизмах (Online IFT of MM Dictionaries) для обозначения раздела мехатроники, относящегося к системам, соизмеримым с молекулами. При этом следует отметить, что:

- бельгийский международный институт информатики (ICST) объявил наномехатронику одним из перспективных направлений развития коммуникационных технологий в условиях их слияния с нанотехнологиями;

- Софийский технический университет ввел наномехатронику в качестве самостоятельной дисциплины в учебный план подготовки магистров по мехатронным системам;

- всемирный Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) уже несколько лет проводит международные симпозиумы "Micro-Nano Mechatronics and Human Science";

- международный журнал "International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems" открыл рубрику "Micro and Nanomechatronics Systems for Manufacturing";

- немецкое издательство "Springer" начало выпускать международный журнал "Journal of MicroNano Mechatronics";

- американский университет Юта (University of Utah) организовал свой тематический веб-сайт "The World of Nanomechatronics".

Хотя "нанонауки" сегодня "на слуху" и покоряют все новые умы, не все представляют, с чем же эти науки имеют дело. Это касается, прежде всего, наномехатроники, поскольку, с одной стороны, бытует мнение, что эта "фантастическая" наука весьма привлекательна, но далека от практики, а с другой — категорически утверждается [10], что "в ближайшее время мехатроника должна быть наномехатроникой".

К сожалению, приходится констатировать, что в современных представлениях о наномехатронике часто распространяется множество неточных и ошибочных сведений, которые привели к появлению ряда заблуждений, а также к возникновению и укоренению так называемых "наномифов", превратно или неправильно трактующих грядущую конвергенцию мехатроники с нанотехнологиями [11]. Эти заблуждения вызваны, как правило, непониманием реального смысла термина "наномехатроника" (см. например, [10, 12]), либо преувеличением или ошибочным принятием на веру кажущихся на первый взгляд правдоподобными фактов или умозаключений футурологических прогнозов нанореволюции.

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ. ЗАДАНИЕ

Целью методических указаний является формирование у магистрантов знаний о современных технических средствах управления, применяемых в микромехатронике и наномехатронике.

Магистранты должны получить знания о тенденциях развития новых направлений в мехатронике – микро- и наномехатронике.

2. ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

2.1. Микромеханика и микросистемы

Промышленно развитыми странами в последнее время форсируется крупный научно-технический прорыв в новой области науки и техники - микроэлектромеханике (МЭМС), технологии, базирующейся на методах и средствах микромеханики, микроэлектроники (микросистемная техника), достижениях в области прецизионных технологий микропроизводства, определяющих возможность создания изделий субмиллиметрового и субмикронного уровня.

Актуальность проведения исследований и разработок в этой области вытекает из необходимости решения целого ряда проблем в промышленности, топливно-энергетическом, медицинском, аэрокосмическом и оборонном комплексах.

Западные эксперты убеждены в том, что в ближайшие 30 лет влияние микроэлектромеханики на мировой технический прогресс будет равноценно тому, которое оказала микроэлектроника за период своего существования.

Сегодня крупнейшие фирмы и университеты США, Германии, Японии сосредоточили значительные усилия на создании финальных изделий в области микросистем и микроробототехники, которая будет играть ведущую роль в развитии промышленного производства, медицины, военной техники в XXI веке.

Разработки и исследования микророботов связаны с проведением большого объема фундаментальных, экспериментальных и прикладных исследований с разработкой основ технологических приемов изготовления микрокомплектующих элементов, на базе которых будут создаваться эти устройства и системы. Техническая сложность создания микророботов заключается в том, что

в процессе их производства необходимо исключить сборочные процессы, так как для их осуществления требуется создание таких же сложных микроустройств, как и в производимом изделии.

Быстрый рост объема исследований и разработок за рубежом свидетельствует о том, что микроэлектромеханика уже стала, по существу, одним из новых научно-технических направлений, конструкторско-технологические решения которого позволят достигнуть принципиально новых решений в области автоматизации технологических процессов, адаптивности оборудования, его точности, надежности, безопасности и решения военных прикладных и антитеррористических задач.

Вопросы для самоконтроля

1. На чем базируется микроэлектромеханика?
2. В чем актуальность проведения исследований в области микромехатроники?
3. В чем техническая сложность создания микророботов?
4. Какие задачи решает микроэлектромехатроника?

2.2. Особенности микромеханики как научной основы микросистем, микромехатроники и микроробототехники

Методы микромеханики являются одной из базовых основ для разработки и проектирования устройств и микросистем в целом. При проектировании устройств и микросистем используются закономерности и особенности микромеханики, которая является, по существу, одним из разделов традиционной механики. Однако микромеханика интегрирует многие свойства и разделы традиционной механики твердого тела, механики жидкости и газа, механики управляемых систем, трибологии и динамики систем. К отличительным свойствам микромеханики по сравнению с традиционной механикой можно отнести:

- иное соотношение между действующими силами. Основной вклад в силовое рассмотрение процессов вносят силы вязкости, поверхностного натяжения, вязкого и сухого трения, электростатические и магнитные силы, а гравитационные силы при уменьшении массы объектов и их размеров оказывают относительно меньшее влияние [2];

- новые методы реализации движений, основанные на колебательных эффектах, возбуждаемых, например, в таких специальных материалах, как пьезоэлектрики, кварцевые пластины, электромагнитные системы;

- специфические особенности и закономерности процессов, происходящих в миниатюрных системах при их движении в различных средах, например, эффект самопродвижения миниатюрных роботов за счет генерации поперечных или продольных колебаний корпусов;

- возможность сочетания в едином интегрированном блоке управляющих и сенсорных компонент с механическими транспортными системами, двигателями или приводными механизмами;
- оригинальные методы расчета и проектирования устройств микромеханики;
- конструкционные материалы с необходимыми свойствами за счет разработки их новых наноструктур;
- возможность использования свойств микроуправления механическими динамическими системами.

В микросистемах наиболее полно проявляются свойства интегральной мехатроники, представляющие синергетическую совокупность механических, электронных, электрических, информационных, пневматических, гидравлических или иных связей в едином конструктивном выполнении [1]. Таким образом, в микросистемах осуществляются процессы восприятия, преобразования, обработки, хранения информации, которая используется для реализации различных целенаправленных движений, действий, процессов с твердыми телами, жидкостями в соответствии с принятыми алгоритмами управления. Функциональное назначение микросистем определяется осуществлением необходимых движений с заданными динамическими свойствами, преобразованием параметров физических или механических величин или передачей энергии.

Современные микросистемы отличаются интеграцией механических связей с совокупностью связей иной физической природы в едином законченном устройстве или блоке, например, интеграция механических с электрическими и оптическими (управляемые системы микрозеркал, датчики), механических с биотехнологическими и химическими (миниатюрные биохимические реакторы, распределительное управление потоками веществ), механических с жидкостными или воздушными, с электрическими и химическими (микронасосы, микрорегуляторы, микрореакторы, микрогенераторы, микротурбины).

Основные положения микромеханики используются не только в микросистемах, но и в мехатронике, при разработке современных и перспективных технологий, в робототехнике, системах автоматизации, управления и контроля (рис. 1).

Структуру микросистем составляют датчики, преобразователи, двигатели, исполнительные приводы, микромашины и законченные функциональные устройства и изделия.

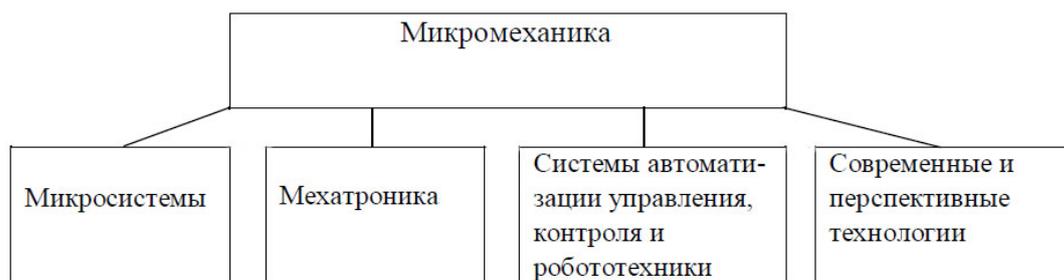


Рис. 1. Взаимосвязь микромеханики с микросистемами, мехатроникой, современными и перспективными технологиями

Вопросы для самоконтроля

1. Чем отличается микромеханика от традиционной механики?
2. Чем определяется функциональное назначение микросистем?
3. Какова взаимосвязь микромеханики с микросистемами, мехатроникой, современными и перспективными технологиями?
4. Какова структура микросистем?

2.3. Наномехатроника как результат конвергенции мехатроники с нанотехнологиями

Одной из основополагающих тенденций современного развития мехатроники является внедрение технологий миниатюризации, позволяющих создавать мехатронные системы с уникальными техническими и технологическими характеристиками: минимальными массогабаритными показателями, низким потреблением энергии и ресурсов, малым износом, максимальной чувствительностью, повышенными показателями точности и быстродействия, надежности и безопасности функционирования. Помимо соображений экономии материальных и энергетических затрат, при переходе к следующему этапу миниатюризации огромное значение приобретает массовое производство миниатюрных изделий, которые становятся всепроникающими элементами профессиональной и личной жизни человека (компьютеринга, телекоммуникаций, мониторинга физиологического состояния и т. д.).

Границы современной мехатроники охватывают все масштабы систем — от "макро" (размеры более 1 мм) до "микро" (размеры от 1 мк до 1 мм). Используемые при этом микротехнологии определяют лицо нынешней цивилизации и позволяют создавать новое поколение мехатронных систем различного назначения, в которых наиболее полно реализуется принцип синергетической интеграции механических, электронных и компьютерных компонентов в едином конструктивном исполнении для достижения цели управления [8]. Однако уже сегодня ясно, что в микротехнологиях в ближайшем будущем возникнут определенные барьеры, преодолеть которые на пути дальнейшей миниатюризации мехатронных систем позволят нанотехнологии. Согласно оценкам выдающегося футуролога Курцвейла (R. Kurzweil), каждое десятилетие усредненный показатель прецизионности возрастает в 5,6 раза, так что в 20-х годах XXI столетия все ключевые технологии станут "нано-".

Термин "нанотехнология" (nanotechnology), введенный в научно-технический обиход в 70—80-х гг. прошлого века японским профессором Танигучи (N. Taniguchi) [10] и американским студентом Дрекслером (E. K. Drexler) [114], в настоящее время означает [5] создание и модификацию производственных процессов, материалов и систем на основе контролируемого манипулирования отдельными атомами, молекулами и надмолекулярными образованиями.

Нанотехнологии охватывают процессы, материалы и системы. Нанопроцессы — это локальные атомно-молекулярные взаимодействия, включающие атомную сборку молекул и локальную стимуляцию химических реакций на молекулярном уровне. Наноматериалы — это материалы, содержащие наноструктурные элементы. Наносистемы — это полностью или частично созданные функционально законченные системы на основе наноматериалов и нанотехнологий.

Человек всегда стремится к большему, желая не просто повторить изобретения природы, но и превзойти их. До сих пор ему это не удавалось, и лишь с освоением нанотехнологий он может получить реальные шансы на воплощение своей давней "бредовой мечты" — присвоение функции Творца Вселенной, связанной с возможностью по своей воле создавать новый мир на основе биологии, соединившем физику и молекулярную биологию.

Действительно, все объекты на Земле, включая природные материалы и системы, состоят из молекул, и, следовательно, природа "программирует" основные характеристики веществ и явлений на молекулярном, наномасштабном уровне. Именно в связи с этим нанотехнологии сулят человечеству поистине фантастические перспективы "портала в новый мир", призванного обеспечить управляемое построение принципиально новой материи (как "мертвой", так и "живой") с любыми наперед заданными свойствами, причем из самого простого подручного материала, без отходов и с минимальными энергетическими затратами.

Гигантский потенциал и фантастические перспективы нанотехнологий связывают, прежде всего, с экзотическими характеристиками и уникальными свойствами наномира, которые определяются такими сложными физическими наноскопическими явлениями, как корпускулярно-волновой дуализм и квантово-механические эффекты. При переходе к нанометровому диапазону у материалов и систем возникает совокупность новых, ранее неизвестных механических, химических, электрофизических, оптических, магнитных и других свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов.

Микрореволюция привела к появлению микромехатронных систем и породила микромехатронику — специальный раздел мехатроники, занимающийся компьютерным управлением микропроцессами.

Очевидно, что грядущая конвергенция мехатроники с нанотехнологиями должна естественным образом привести к появлению наномехатронных систем и породить новый раздел мехатроники — наномехатронику, призванную заниматься теорией и практикой наномехатронных систем и проблемами управления нанопроцессами.

Фактически, наномехатроника — это молекулярная мехатроника", а наномехатронные системы — это "молекулярные машины", идея создания которых на основе "атомно-молекулярной сборки", именуемой наномехатронным подходом или молекулярным производством, предложена Фейнманом 117J и

получила широкое развитие в работах Дрекслера [5] и его последователей — Меркле (R. СС. Merkle), Фрейтаса (R. Л. Freitas) и др.

Поскольку наномехатронные системы представляют собой атомно-молекулярные образования, то они обладают определенной спецификой, обусловленной особенностями наномасштабной физики [5]:

- сверхсложностью, обусловленной астрономическим числом элементов (1 г наносистемы может содержать 10^{19} штук деталей, которые могут совершать более 10^{12} циклических перемещений в секунду);
- потребностью в энергии для функционирования и в каналах информационной связи с внешним миром;
- подверженностью тепловым колебаниям, а также воздействиям физических полей и излучений;
- функционированием посредством химических реакций, которые подразумевают электронные и/или ядерные перестановки;
- возможностью изменять положение своих элементов относительно друг друга в результате воздействия внешних факторов;
- информационной неопределенностью состояния вследствие корпускулярно-волнового дуализма в наномире.

Как известно [8], мехатронные системы интегрируют в единой конструктивной компоновке с использованием технологий максимального уплотнения механическую, энергетическую и управляющую части. Такая интеграция предполагает миниатюризацию основных элементов системы, выполняющих функции взаимодействия с внешней средой — чувствительных, исполнительных и информационно-управляющих. При этом отличительным признаком мехатронных систем является наличие средств интеллектуальной поддержки задач обработки информации и управления.

Поскольку наномехатронные системы наиболее полно реализуют замкнутую через внешнюю среду триаду "сенсоры—процессоры—актюаторы", сочетая в себе максимально возможные степень интеграции и уровень интеллектуализации, то они являются последней парадигмой развития мехатронных систем.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные технические и технологические характеристики мехатронных систем.
2. Каков показатель прецизионности за десять лет?
3. Какие материалы называют наноматериалами?
4. В чем отличительный признак мехатронных систем?
5. В чем заключается специфика наномехатронных систем?

2.4. Восходящее нанопроизводство

Нанопроизводство — это производство наноразмерных объектов с наперед заданной атомарно-молекулярной структурой, которое может строиться на двух нанотехнологических принципах, известных как технологии "сверху-вниз" (top-down) и "снизу-вверх" (bottom-up).

Технология "сверху-вниз" является "прямой" и основана на последовательном многократном уменьшении размеров объектов "высшего порядка" — макро- или микрообъектов — путем механической или иной обработки до требуемых нанометровых размеров. Технология "снизу-вверх" является "обратной" и основана на построении из объектов "низшего порядка" — отдельных атомов и молекул — путем их группировки требуемых наноразмерных объектов.

Нанопроизводство, реализующее технологию "сверху-вниз", именуется нисходящим, а "снизу-вверх" — восходящим. Процесс массового производства наноизделий может сочетать в себе оба нанотехнологических принципа, однако, по мнению разработчиков американской Дорожной карты в области нанотехнологий "Производственные наносистемы. Обзор технологических перспектив" [22], ключевым направлением дальнейшего развития нанопроизводства должны стать так называемые технологии атомарной точности, реализующие принцип "снизу-вверх", "по которому Великим Творцом создана вся Вселенная включая нас самих (от яйцеклетки к Венцу)". Поскольку свойства наноструктур определяются не только природой входящих в них атомов и молекул, но и архитектурой их группировки, то в рамках восходящего нанопроизводства возможны две концепции построения нанообъектов: первая — перестройка имеющихся наноструктур (например, перестроив порядок атомов угля, можно изготовить алмаз), вторая — сборка большей наноструктуры из меньшей (например, используя молекулы воды и углекислого газа, можно изготовить сахар или крахмал).

Заметим, что впервые идея предельной миниатюризации технических систем путем построения их не из куска вещества, а непосредственно из атомов и молекул, была высказана в 1959 г. Фейнманом.

Он предложил идти не "в ширь", а "в глубь" материи путем многоступенчатого проникновения в наномир: макросистема воздействует в пределах своего масштаба точности на микросистему, которая, в свою очередь, воздействует в пределах своего масштаба точности на наносистему. Последняя представляет собой управляемую молекулу, которая, воздействуя в пределах своей точности на атомы, осуществляет механическим путем управляемый химический синтез молекул. В 1977 г. Дрекслер указал на бесперспективность данной концепции, считая, что никакая обработка не сможет отсечь от куска вещества лишнее и оставить нужную молекулярную цепочку. Он предложил другой — прямой путь проникновения в наномир: сначала на молекулярном уровне строятся довольно простые наносистемы, подобные наноструктурам живой материи, отли-

чающимся от неживой способностью к самосборке и самоорганизации, а уже затем на их основе строятся более сложные наносистемы.

Для реализации восходящего цанопроизводства необходимо иметь проект наносборки, наносырье и наноборудование.

Проект наносборки — это поатомное описание производимого нанообъекта, включающее описание как взаимного расположения атомов и их типов, так и химических связей между ними.

Наносырье — это исходные "мелкие" (атомы и молекулы) и "крупные" (нанокластеры) сборочные единицы (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Атомы — наименьшие частицы химического элемента, являющиеся носителями его свойств.

Всего существует немногим более 100 атомов, причем самый легкий — атом водорода с одним электроном, а самый тяжелый элемент, встречающийся в природе, — атом урана с 92 электронами. Размер атомов приблизительно одинаков и колеблется в диапазоне 0,1...0,22 нм.

Молекулы — наименьшие устойчивые частицы вещества, обладающие всеми его химическими свойствами. Они состоят из атомов, скрепляемых в особом порядке химическими связями. Самые простые молекулы содержат всего два или три атома, самые крупные неорганические молекулы могут содержать тысячи атомов, а органические молекулы — миллионы атомов. Размер молекулы, состоящей из более 30 атомов, превышает 1 нм. Существует несколько миллионов молекул, и каждый год открывают либо синтезируют сотни новых молекул.

Нанокластеры (мегаатомы) — это разновидность наночастиц упорядоченного строения, состоящая из сотен или тысяч атомов. Нанокластеры имеют размеры порядка десятков нм. Особую роль строительных блоков играют специальные углеродные нанокластеры с каркасной структурой — фуллерены (выпуклые многогранные нанообразования) и нанотрубки (протяженные цилиндрические нанообразования) [5].

Наноборудование — это нанотехнологические системы, именуемые наноассемблерами (сборщики атомов. Atomic Assembler), предназначенные для реализации наносборочных процессов на атомно-молекулярном уровне. Различают атомные и молекулярные наноассемблеры, отвечающие соответственно "физической" (атомарной) и "химической" (молекулярной) парадигмам восходящего нанопроизводства. Молекулярные наноассемблеры оказываются более предпочтительными для наносборки, поскольку молекулы: являются более стабильными образованиями; обладают четкими формами; имеют необходимые для манипуляции свойства; они могут быть соединены извне или собираться самостоятельно для образования наноструктур. Нанопроизводство и нанотехнологии, основанные на молекулярных ассемблерах, часто именуют соответственно молекулярным производством и молекулярными технологиями. При этом следует заметить, что молекулярная нанотехнология не означает создание

технологий, которые могут быть встроены в продукты, а означает создание всего продукта через молекулярное производство.

В развитии восходящего нанопроизводства выделяют два возможных направления, различающихся используемыми типами наноассемблеров для управляемого механосинтеза — химического синтеза атомно-молекулярных структур, управляемого механически путем позиционирования реагирующих веществ до тех пор, пока не вступят в действие соответствующие химические связи. Первое направление основано на использовании в качестве наноассемблеров сканирующих зондов, а второе — нанороботов.

Для организации массовой сборки нанообъектов нанопроизводство должно быть автоматизировано и поставлено на поток. Существуют две парадигмы автоматизации восходящего нанопроизводства:

- ◆ автоматизированная наносборка на основе управляемого оператором-техпологом механосинтеза с использованием сканирующих зондов;
- ◆ автоматизированная наносборка на основе управляемого оператором-техпологом механосинтеза с использованием нанороботов.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое нанопроизводство?
2. В чем отличие технологий "снизу-вверх" от "сверху-вниз"?
3. Что называют нанокластерами?
4. Назовите две парадигмы автоматизации восходящего нанопроизводства.
5. Что называют молекулярными наноассемблерами?

2.5. Особенности автоматизированной наносборки на основе сканирующих зондов

Первое поколение наноассемблеров, позволяющих на основе законов квантовой физики измерять, "видеть" и манипулировать нанообъектами, появилось в 1980-х гг. в виде специальных нанотехнологических установок, в которых методами сканирующей зондовой микроскопии проводятся нанотехнологические операции на атомарном уровне [5].

К данным установкам относятся туннельные, атомно-силовые, магнитно-силовые, электросиловые и оптические ближнего поля сканирующие микроскопы.

Несмотря на многообразие видов и применений, существующие сканирующие зондовые микроскопы имеют схожие принципы работы. Основными общими их узлами являются: зонд в виде металлической микроиглы, сканирующий механизм и нанореактор в виде образования между наконечником зонда и поверхностью обрабатываемого образца.

Нанореактор обеспечивает целенаправленные межатомно-молекулярные связи вещества "зонд—подложка" и инжектируемой в его объем технологиче-

ской среды (газообразной или жидкой) для формирования требуемых наноструктур. Сканирующий механизм обеспечивает подвод зонда к поверхности образца и его пространственное прецизионное позиционирование. Зонд в процессе сканирования "ощупывает" поверхность образца, обеспечивая ее "визуализацию" с высоким нано- и субнанометровым разрешением (до атомарного уровня по вертикали и существенно выше по горизонтали). Важнейшие фазы нанопроцессов связаны с фиксацией (локализацией) и активацией (изменением структуры) атомов и молекул в неоднородном электрическом поле между зондом и подложкой, которые могут быть обеспечены механическими, электрическими, тепловыми, оптическими, ультразвуковыми, электромагнитными воздействиями и их комбинацией. Следует заметить, что сканирующие микроскопы позволяют изучать нанообъекты не только в вакууме, но и в различных газах и жидкостях.

В современной наноинженерии основным технологическим инструментом наноскопического анализа и синтеза являются сканирующие туннельный (Scanning Tunneling Microscope — STM) и атомно-силовой (Atomic-Force Microscope — AFM) микроскопы, различающиеся типами взаимодействия зонда с поверхностью обрабатываемого образца. В процессе сканирования в туннельном микроскопе измеряется туннельный ток, а в атомно-силовом микроскопе — сила взаимодействия между зондом и образцом. На основе данных измерений компьютер микроскопа строит трехмерное графическое изображение, воспроизводящее рельеф поверхности образца с рекордным вертикальным (0,01...0,05 нм) и горизонтальным (0,1 нм) разрешениями. Применение туннельного микроскопа, в отличие от атомно-силового микроскопа, ограничивается лишь проводящими образцами.

Методы зондовой микроскопии позволяют реализовать основные функции наносборки — манипуляции отдельными атомами и молекулам. При этом используются два способа манипуляции атомами с помощью зонда сканирующего микроскопа — горизонтальный (параллельный) и вертикальный (перпендикулярный). В процессе вертикальной манипуляции, в отличие от горизонтальной, после захвата иглой зонда нужный атом отрывается от поверхности, поднимается на несколько десятых долей нанометра, переносится в нужную позицию и "сбрасывается". Данный процесс требует больших усилий, чем "перекатывание" атома по поверхности, но зато он не зависит от встречающихся на ней препятствий в виде ступеней, ям, адсорбированных атомов и т. п.

Автоматизация зондовой наносборки обеспечивается мехатронной двухконтурной системой управления, реализующей двухступенчатое (грубое и точное) позиционирование нанозонда. Система включает: трехкоординатный привод зонда, обеспечивающий его грубое позиционирование; зондовый датчик; трехкоординатный сканирующий пьезоактюатор стола для размещения обрабатываемого образца, обеспечивающий тонкое позиционирование зонда. В системе достигается точность позиционирования иглы зонда относительно образца в сотые доли нанометра на десятки микрометров по горизонтали и на едини-

цы микрометров — по вертикали. Управление процессом сканирования, а также визуализация и интерпретация результатов осуществляются с помощью персонального компьютера.

Безусловно, в настоящее время сканирующая зондовая микроскопия по точности обнаружения и контроля нанообъектов не имеет себе равных. Однако с ее помощью практически невозможно создать даже самые простейшие трехмерные наноструктуры, а удастся создавать лишь плоские наноструктуры, состоящие из десятка атомов, причем с неизбежно низкой производительностью и высокой дефектностью. Методы сканирующей зондовой микроскопии являются методами индивидуальной обработки. Обратимся, например, к сканирующему туннельному микроскопу. Объем атома примерно равен 10^{-24} см³ и, следовательно, он занимает площадь порядка 10 см. Очевидно, что при непрерывной работе микроскопа в течение 100 часов для полного заполнения его операционного поля размером 1 см необходимо за одну секунду обеспечить "высадку" на поверхность обрабатываемого образца в строго индивидуальном порядке 1016 атомов, на операционное поле в 1 мм² — 10^8 атомов, а на операционное поле в 1 мкм² — 10^2 атомов, что абсолютно нереально.

Таким образом, зондовая наносборка демонстрирует лишь принципиальную возможность манипуляции нанообъектами и никак не может считаться технологией, пригодной для массового производства наноструктур. Неслучайно в нанотехнологической Дорожной карте США [22, с. 156] особо подчеркивается, что "к текущему моменту ни один из подходов сканирующего зондирования не достиг уровня, достаточного для его практического применения".

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего предназначен нанореактор?
2. Какие установки для совершения нанотехнологических операций вы знаете?
3. С чем связаны важнейшие фазы нанопроцессов?
4. Что демонстрирует зондовая наносборка?
5. Что обеспечивает автоматизация зондовой наносборки?

2.6. Особенности автоматизированной наносборки на основе нанороботов

Второе поколение наноассемблеров (наносборщиков) в виде специальных наноразмерных систем — программируемых нанороботов, способных самостоятельно или по приказам "свыше" (с использованием акустических, электромагнитных, световых сигналов) целенаправленно манипулировать отдельными атомами или молекулами, — было предложено в 1980 гг. в работах Дрекслера. Такие нанороботы призваны по заданной программе собирать из произвольного подручного наносырья любые нанообъекты, причем из-за сверхмалых размеров они смогут работать с частотой до миллиона операций в секунду. За счет этой скорости и параллельной работы миллионов нанороботов практически любой

материальный макрообъект можно будет произвести быстро и недорого в неограниченных количествах. Наноассемблеры могут работать в паре с нандизассемблерами — нанороботами, способными по заданной программе разбирать любые объекты на атомы и молекулы для получения необходимого наносырья. Наноассемблеры и нанодизассемблеры — это, фактически, "Адам и Ева" автоматизированного восходящего нанопроизводства.

Следует заметить, что в нанороботах в качестве своеобразного молекулярного позиционирующего устройства для атомно-молекулярной сборки, являющегося аналогом руки сборочного робота, наиболее часто используются альтернативные варианты: двойной трипод, "рука" Дрекслера и платформа Стюарта.

Самой важной особенностью нанороботов-сборщиков является реализованная в них функция самосборки, т. е. возможность запрограммировать их как репликатор — систему, способную к "размножению" (самовоспроизведению, самокопированию). Природа использует репликаторы повсеместно — как в клеточной машинерии клетки, так и при репликации живых организмов. Например, бактерии вполне целенаправленно пытаются "разбирать все вокруг себя на атомы" и создавать из этого свои копии, причем они, используя репликативные свойства ДНК, способны размножаться за считанные часы от нескольких особей до миллионов.

Следует особо подчеркнуть, что нанопроизводство, не использующее самореплицирующиеся структуры, фактически ограничится созданием лишь микроскопических объектов. Для создания макроскопических объектов необходима технология создания и управления реплицирующимися структурами. Фундамент теории таких структур был заложен в теории самовоспроизводящихся автоматов фон Неймана [J. von Neumann) 126]. Опираясь на фон неймановскую модель, можно сделать интересные выводы о самореплицирующихся структурах. Если представить себе репликатор как "конструктор", то при изготовлении третьего репликатора двумя другими процесс репликации будет проходить в два раза быстрее. Увеличивая число репликаторов и специализируя их, мы будем получать сложную систему, скорость репликации которой будет увеличиваться по экспоненциальному закону.

Репликаторы могут быть простыми и сложными. Например, простейший репликатор, предложенный Меркле и представляющий собой управляемый наноманипулятор со встроенным нанокomпьютером, состоит из 10^7 атомов. Если такой репликатор работает со скоростью 10^6 шагов в секунду и при наносборке для требуемой манипуляции атомом ему необходимо сделать 10^4 шагов, то для сборки своей копии он должен сделать 10^{11} шагов, что займет 10^5 секунд, или около 28 часов. При изготовлении макроскопических объектов данному репликатору придется выполнять уже 10^{20} операций в секунду. Для этого необходима популяция репликаторов в количестве 10^{18} штук (каждый из них в отдельности работает со скоростью 10^2 шагов в секунду). Следовательно, для производства такого числа репликаторов потребуется 60 генераций, что займет

около 69 дней. Заметим, что исследования NASA показали, что репликатор можно построить, причем он будет конструктивно не сложнее, чем процессор Pentium IV.

Итак, для обеспечения управляемого механосинтеза необходимо создание универсального наноробота-сборщика, управляемого макрокомпьютером либо встроенным нанокompьютером. Именно с момента создания данного управляемого "наносборщика" нанотехнологию можно будет считать окончательно получившей прикладную основу. В принципе, самый первый наноробот можно будет собрать с помощью сканирующего туннельного микроскопа, и, если в него загрузить программу самовоспроизводства, он сможет создавать подобных себе нанороботов.

В американском Институте молекулярного производства (ИММ) разработаны дизайны ряда подобных "наносборщиков". Расчеты доказывают их осуществимость, однако их создание планируется не ранее 2020 г. Наноманипулятор имеет шесть степеней свободы и управляется храповиками, приводимыми в действие давлением инертного газа. В его конструкции задействованы следующие атомы, окрашенные разными цветами: азота (синий), углерода (серый), кремния (желтый), кислорода (красный) и водорода (белый). Отметим, что если наносборка осуществляется не отдельными нанороботами, а в рамках единой производственной системы жестко зафиксированных нанороботов, то речь идет о нанофабрике — самой сложной производственной наносистеме, предназначенной для создания по заданной программе различных макрообъектов. Именно нанофабрикам — "машинам изобилия" — отводится ведущая роль в грядущей нанореволюции, поскольку столь мощного орудия производства у человечества еще не было.

Основой работы нанофабрики является множество фабрикаторов — управляемых устройств, способных комбинировать атомы, создавая между ними химические связи. Готовая нанофабрика состоит из триллионов отдельных фабрикаторов разных уровней. Сначала фабрикаторы первого уровня создают из атомов элементарные блоки, затем фабрикаторы второго уровня соединяют их друг с другом в более крупные блоки, которые, в свою очередь, соединят между собой фабрикаторы третьего уровня и т. д. Этот процесс повторяется до тех пор, пока необходимый макрообъект не будет собран полностью. Подобная технология "производственного роста" предусмотрена и для сборки нанофабрик макроскопического уровня.

С помощью нанороботов предполагается строить различные нанофабрики, представляющие собой нечто вроде нанотехнологической "скатерти самобранки", способной практически из любых веществ: земли, химических и бытовых отходов (содержащих в достаточном количестве все химические элементы, входящие в состав производимого объекта) строить все — не только одежду, пищу, лекарства и бытовую технику, но и любые органические живые существа.

Модель виртуальной автоматизированной молекулярной нанофабрики третьего тысячелетия, разработана в Институте молекулярного производства Фениксом (Ch. J. Phoenix) [27]. Эту "настольную нанофабрику" с размерами $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м, весом в 60 кг и мощностью около 200 кВт планируется изготовить из алмазоида — материала с прочностью и химической инертностью алмаза. Она способна не только изготавливать макрообъекты (например, объект размером $10 \times 10 \times 10$ см и массой около 4 кг производится примерно за три часа), но и реплицироваться, т. е. размножаться путем создания своей копии.

Если триллион нанороботов собирать последовательно, тратя на сборку одного всего микросекунду, то на всю партию придется убить миллион секунд, т. е. две недели. Именно по этой причине было предложено организовывать нанопроизводство по схеме размножения дрожжевых бактерий: сначала всем миром делается одна универсальная нанофабрика, а затем она настраивается на изготовление себе подобных. Согласно оценкам, за два дня можно создать одну копию нанофабрики Криса, а затем их становится уже 4, 8, 16, 32, 64 и так далее в геометрической прогрессии. В итоге, на 62-й день после начала ее репликации каждого жителя Земли можно будет обеспечить собственной нанофабрикой.

Конечно, восходящее нанопроизводство на основе нанороботов выглядит очень привлекательно и перспективно. Основные его положения представлены в книге Дрекслера "Наносистемы: молекулярные машины, производство и вычисления" [5], равной которой по полноте и глубине изложения до сих пор нет. Однако все это далекое будущее, всего лишь демонстрация предельных теоретических возможностей атомно-молекулярной сборки. В ближайшем же будущем нанопроизводство должно опираться на природные принципы самосборки (Self-Assembling) и самоорганизации (Self-Organization), связанные с наномасштабным явлением самопроизвольного образования тех или иных наноструктур [128]. Самосборка (самоупорядочение) — это процесс адсорбции и формирования специфического расположения молекул на твердой поверхности. Ее движущей силой является хемосорбция, которая проявляется в высокоэнергетических реакциях между адсорбатом и адсорбирующей поверхностью. В отличие от сильного взаимодействия между адсорбируемой молекулой и поверхностью, взаимодействие между самими молекулами остается слабым.

Принцип самосборки заключается в том, что молекулы всегда самопроизвольно стремятся перейти на самый нижний из доступных для них уровень энергии. Следуя данному принципу, для обеспечения управляемого механосинтеза достаточно создание искусственных условий, при которых атомы и молекулы, самоорганизовываясь, будут собираться, а точнее, группироваться в определенные заранее известные наноструктуры.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называют нанодизассемблерами?

2. Что используют в нанороботах в качестве своеобразного молекулярного позиционирующего устройства?
3. В чем заключается принцип самосборки?
4. Что такое нанофабрика Криса?
5. Из каких элементов состоит готовая нанофабрика?

2.7. Первые достижения наномехатроники

Поскольку скорость работы механических компонентов обратно пропорциональна их линейному размеру, то нанопроцессы характеризуются огромным быстродействием. Так, например, в наноразмерных системах частоты могут достигать 10 ГГц, а амплитуда колебаний — лежать в диапазоне пикометров (10~12) или фемтометров (10~15). Если движение "руки" макроскопического робота занимает секунды при киловаттных затратах энергии, то "ручки" наноробота способны выполнять те же движения за миллиардные доли секунды, затрачивая всего лишь миллиардные доли ватт. Даже такое примитивное изобретение 1830-х гг., как механическая "аналитическая машина" Бэббиджа (Ch. Babbage), демонстрирует достойную по нынешним меркам производительность, будучи уменьшенной до наномасштабов, поскольку его крохотные рычажки смогут двигаться с терагерцовыми частотами. В своих работах Дреклер оценил приблизительные возможные параметры основных механических наноустройств и показал, в частности, что молекулярная сборка макрообъекта массой 1 кг возможна всего за 10^4 с с производительностью около 10^6 операций в секунду.

В настоящее время наряду с успехами в области "инкрементных" (наноприемки и нанодобавки) и "эволюционных" (нанодатчики) нанотехнологий все чаще обсуждаются первые шаги в области "радикальных" нанотехнологий, направленных на разработку, создание и внедрение наномехатронных систем, т. е. наносистем, обладающих сенсорными, процессорными и актюаторными функциями. Идея первого наноустройства была предложена еще в 1959 г., однако за полвека никому так и не удалось ни создать подобное устройство, ни опровергнуть возможность его создания. Сегодня за терминами "наномашин" и "нанороботы" стоят лишь теоретические выкладки и экзотические лабораторные исследования. Единственное, о чем можно говорить с практической точки зрения, так это о некоторых, созданных на основе технологии наносборки, компонентах и примитивных прототипах данных наносистем. Здесь следует указать на разработанный в последние годы целый ряд механических элементов, узлов и модулей будущих наномехатронных систем: нанозатвор, способный открываться и закрываться для захвата и высвобождения молекул [29]; наноподшипник из двух совместно вращающихся нанотрубок [30]; нанопружина [31]; нанорычаг [32]; роботизированный рычаг [33]; наноносильщик с двумя "нога-

ми", способный переносить молекулярный груз [34]; нанореечная передача [35]; нанопереключателъ (одноатомное реле) [36] и др.

Весьма интересными разработками в области молекулярного синтеза исполнительных элементов наномехатронных систем являются: наномотор [37], изготовленный на основе нанотрубки, способный работать на гигагерцовых частотах (ротор длиной 100...300 нм, подшипник диаметром 10...40 нм) и наноактюатор [38], способный обратимо раздвигать две углеродные нанотрубки на расстояние 0... 150 нм (площадь поперечного сечения нанокристалла 36 нм², усилие 2,6 нН, скорость выдвигения > 1900 нм /с).

Впечатляют также и первые разработки в области молекулярного синтеза собственно наномехатронных систем. В Университете Раис создан наноавтомобиль [39] шириной 4 нм, который не скользит, а катится по атомам золотой микроскопической "трассы" с помощью световой энергии. Он является самой маленькой молекулярной машиной и содержит в своей конструкции: раму в виде большой молекулы из трехсот атомов, две оси из углеродных нанотрубок, четыре шарообразных фуллереновых колеса и автономный нереверсивный мотор. Последний представляет собой установленную в центре рамы крестообразную лопасть, которая, вращаясь, отталкивает ее от "трассы". Здесь используется эффект преобразования поглощенной энергии кванта света в энергию механического движения. Если припарковать 25 тысяч таких машин колесо к колесу, то все они смогут уместиться на ребре листка бумаги. Следует заметить, что на создание данного наноавтомобиля ушло почти восемь лет. Наряду с данной разработкой следует указать и на созданный в сингапурском Институте исследования и разработки материалов молекулярный механизм размером 1,2 нм, вращением которого можно уже управлять.

Несмотря на первые успехи в области наносборки молекулярных машин, говорить о создании наномехатронных систем еще рано: они пока пребывают на стадиях концептуальной разработки либо компьютерного моделирования. В настоящее время с помощью компьютерных программ моделируются наносистемы и их элементы, содержащие десятки тысяч атомов. Наиболее интересные проекты компьютерных моделей молекулярных механических элементов будущих нанороботов разрабатываются в Институте молекулярного производства. В этих проектах главное внимание уделяется "техногенным" наномеханизмам, созданным по типу обычных машин, поскольку нет смысла отказываться от богатейшего арсенала идей, накопленных долгим развитием макротехнологии.

2.8. Основные проблемы наномехатроники

Конвергенция мехатроники с нанотехнологиями связана с постижением предельно возможного, "молекулярного" масштаба, который настолько мал, что человеческое воображение практически неспособно его сколько-нибудь адекватно представить. В отличие от традиционных технологий нанотехнологий характеризуются повышенной наукоемкостью, затратностью, а также междисци-

плинарностью и неэффективностью решения задач методом "проб и ошибок", который, как правило, и используется в сложных прикладных разработках. В связи с этим использование традиционного стиля мышления и общепринятой методологии при проектировании наномехатронных систем оказывается чрезвычайно сложным. Это сопряжено с проведением большого объема фундаментальных и прикладных научных и технологических исследований, направленных на разработку способов изготовления необходимых наноконструктивных элементов и создание технологических инструментов и установок для осуществления соответствующих наносборочных процессов. Укажем лишь на некоторые принципиальные теоретические и прикладные проблемы современной наномехатроники.

Основной теоретической проблемой наномехатроники является отсутствие удовлетворительного научного фундамента [5]. Имеются лишь некоторые инструменты эмпирического исследования и накоплена богатая феноменология. В частности, до сих пор отсутствует теория молекулярного синтеза. Более того, отсутствуют даже параметрические модели атомов и молекул, отражающие их размеры, энергию связи и энергию парных взаимодействий, на основе которых должен проводиться расчет синтезируемых молекулярных образований.

Принципиальная трудность создания наномехатронных систем заключается в их проектировании, которое основывается на методах компьютерного моделирования. Расчет конструкции системы настолько трудоемок и сложен, что для его осуществления не хватает мощности даже современных суперкомпьютеров. Например, для моделирования эволюции наносистемы, состоящей из трех десятков молекулярных образований, могут понадобиться гигабайтные объемы оперативной памяти. Дело в том, что на молекулярном уровне вместо макроскопических законов классической механики, используемых для расчета обычных мехатронных систем, вступают в действие законы квантовой механики. Здесь приходится учитывать силы вязкости, поверхностного натяжения, сухого трения, электростатические и магнитные силы, а также собственные колебания, диффузию атомов, броуновское движение, ядерный распад, "горячие" частицы и т. п. Кроме этого, любая молекулярная структура может иметь несколько энергетически выгодных состояний, а поскольку ее образование в реальных условиях протекает вдали от равновесия, то на нее существенное влияние оказывают даже незначительные возмущающие воздействия. В связи с этим при синтезе молекулярных систем необходимо учитывать их неустойчивость и высокую реакционную способность, которые могут привести к изменению структуры и потере необходимых свойств при взаимодействии с окружающей средой.

Кстати, компания Nanorex (Nanorex) разработала программу "НаноИнженер", позволяющую быстро и легко проектировать молекулярные системы размером до 100 тыс. атомов на основе квантово-механических расчетов. На

рис. 9 (см. четвертую страницу обложки) представлены некоторые окна данной программы.

Следует сделать замечание, касающееся проблемы самих технологических нанороботов. Основными их функционально необходимыми элементами являются: система энергопитания для получения и/или аккумуляции энергии; система связи для приема и передачи информации; сенсорная система для навигации и управления технологическими операциями; интеллектуальная информационно-управляющая система на основе встроенного нанокomпьютера и исполнительная система для выполнения технологических операций. Все это должно уместиться в пределах одного наноробота примерно в одном миллиарде атомов. Ясно, что реализация каждого из этих элементов представляет собой огромную проблему не только прикладного, но и фундаментального характера. Например, при обмене наноробота информацией с макросистемой (человеком) встает вопрос о достоверности этой информации, поскольку, в силу принципа неопределенности, она может быть либо неопределенной, либо искаженной в результате действия "эффекта наблюдения". Далее, при движении наноробота он будет испытывать на себе воздействие броуновского движения, т. е. принимать на себя толчки хаотически перемещающихся молекул, поэтому встает вопрос о направленности его движения, поскольку он будет постоянно сбиваться с заданного курса.

Основной прикладной проблемой наномехатроники является организация массового производства наномехатронных систем. Все существующие нанотехнологии, связанные с манипуляциями отдельными атомами и молекулами, характеризуются большой громоздкостью, низкой производительностью и малой эффективностью, что является не только их слабым местом, но и принципиально неустранимым недостатком. Это касается, в частности, зондовых технологий на основе СТМ/АСМ-манипуляций. Наряду с низкой производительностью, здесь имеются такие проблемы, как прилипание зонда к грязной поверхности, нелинейность и крип (эффект ползучести) пьезокерамики, а также вездесущие вибрации и т. д.

Имеются проблемы, связанные с наносборочными операциями. Автор метода мягкой литографии Уайтсайдс (G. Whitesides) подчеркивает, что для прецизионного манипулирования отдельными атомами шупальцы наноробота должны быть меньше атомов, что в принципе невозможно, так как "у них должны быть еще и механизмы, приводящие их в движения, которые не могут состоять ни из чего, кроме тех же самых атомов". Здесь же уместно упомянуть и проблему "толстых" и "липких" пальцев, выдвинутую Смолли в дискуссии с Дрекслером. Наконец, следует указать также и на проблему извлечения наноманипулятором конкретного атома из прочной "атомной связки": здесь значительная энергия потребуется для самой операции, и еще дополнительная энергия потребуется для отделения атома от захватов наноманипулятора.

Для ускорения процесса молекулярного синтеза природа использует массовый параллелизм, реализуемый самосборкой на основе самоорганизации, са-

мовосстановления и эволюционного отбора хорошего решения. Однако в существующих нанотехнологиях подобные способы параллельной атомно-молекулярной сборки пока не найдены. Согласно мнению специалистов, для реализации массовой молекулярной сборки в наибольшей степени подходит так называемое гибридное производство, которое комбинирует литографию, наноманипулирование и электронную микроскопию.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем трудности реализация нанотехнологий?
2. Назовите основную теоретическую проблему наномехатроники.
3. В чем принципиальная трудность создания наномехатронных систем?
4. Что используют для ускорения процесса молекулярного синтеза?
5. Каковы проблемы, связанные с наносборочными операциями?

2.9. Перспективы развития наномехатроники

Предсказание будущего — сомнительное и неблагодарное дело, поскольку слишком большое число факторов, лежащих на поверхности, могут неожиданно радикально изменить известные, казалось бы очевидные тенденции. В связи с этим известный фантаст Кларк (А. С. Clarke) считал, что практически невозможно предсказать детали будущих технологий на срок больше, чем половина столетия вперед. Касаясь перспектив развития наномехатроники, укажем, прежде всего, на два его оптимистических прогноза: 2015 г. — расцвет нанотехнологий и полный контроль над атомным строением вещества, а 2040 г. — воспроизведение с помощью "универсального репликатора" молекулярных копий любых заданных структур из практически любого сырья, обладающего должным набором химических элементов.

Ведущие американские специалисты предсказывают видимые последствия нанотехнологической революции уже в период 2015—2020 гг., когда будет осуществлен переход к практическому освоению технологий самосборки на основе атомного дизайна и появится четвертое поколение продуктов с использованием нанотехнологий — "молекулярных систем". При этом по прогнозам CRN (Центр ответственных нанотехнологий, США), молекулярное производство (наноассемблеры или нанофабрики), а также молекулярные системы могут стать реальностью уже к 2015 г., а по прогнозам NNI (Национальная нанотехнологическая инициатива, США) — около 2020 г. В то же время по мнению Берубе (D. Berube), автора известной книги "Наношумиха" (Na-no-Nupe: The Truth Behind the Nanotechnology Buzz), "в США слово "нанотехнологий" в общественном восприятии связано с нанороботами, всякими наноустройствами, к которым мы даже близко не подошли" и от наноустройств типа дрекслеровских машин "нас отделяет примерно сотня лет". Кстати сам Дрекслер, все прогнозы

которого сбывались с опережением, объявил, что к 2020 г. станет возможной промышленная сборка наноустройств.

У отечественных специалистов также нет единого мнения о перспективах развития молекулярных систем. Так, например, прогноз развития нанотехнологий до 2050 г., проведенный экспертами компании Nanotechnology News Network, выявил в качестве основной проблемы разработку и создание наноасSEMBлера. В. В. Лучинин прогнозирует создание кластерных макромолекулярных систем с конвергенцией объектов живой и неживой природы уже в 2015—2020 гг. Согласно оптимистическому прогнозу Ю. Свидиненко, поскольку "инструментов для производства наномашин пока нет и они появятся лет через 10—20, то не стоит ждать реально работоспособных нанороботов и прочих чудес нанотеха раньше, чем через 40—50 лет", а по пессимистическому прогнозу расцвет нанотеха произойдет лишь к концу этого столетия. Кстати, в основных концепциях развития отечественной и зарубежной робототехники военного назначения до 2030 г. [см. 5] нет упоминаний не то что о нанороботах, но даже о микророботах.

Прогнозы показывают, что направления нанотехнологий, связанные с созданием наноматериалов на основе традиционных химических и микроэлектронных методов, а также с попытками создания активных наноструктур на основе органики с использованием образцов живой природы, привлекательны в относительно краткосрочной перспективе. Потенциально более совершенным и перспективным является направление, связанное именно с молекулярным производством. В отличие от Кларка, по ожиданиям ученых, ориентировочно к 2030-м гг. нанотехнологий сделают возможным чрезвычайно дешевое автоматизированное производство с атомарной точностью любой заданной структуры из практически любого сырья, обладающего должным набором химических элементов. При этом каждый оператор "нанофабрики" сможет производить все, что позволит ее программное обеспечение. В 2006 г. Фрейтас опубликовал книгу "Экономическое влияние персональной нанофабрики" [6], представляющую собой анализ общественных последствий грядущей конвергенции мехатроники с нанотехнологиями. Автор указывает на прямую угрозу обществу со стороны молекулярного производства: фактически исключается человеческий труд, резко растет безработица, теряется смысл понятий стоимости, цены и денег. Как считает Дрекслер, в таком полностью обновленном обществе каждый человек получит максимальное разнообразие вариантов существования, возможность свободно избирать и менять образ жизни, экспериментировать, ошибаться и начинать все сначала.

Следует отметить, что в обсуждениях светлого будущего на околонучных и футурологических сайтах во всей красе предстает наномифология: грядущие наносистемы представляются наподобие маленьких человечков, которые способны делать за нас все и бесплатно. Очевидно, что все эти прогнозы и рассуждения основывается на аналогиях, а не на каких-либо строгих расчетах. Поскольку нанотехнологий пришли из мира будущего в мир настоящий, то можно

надеяться, что наномехатроника — это не миф, а красивая мечта, которая в недалеком будущем станет явью, и "молекулярные мехатронные системы" прочно войдут в нашу жизнь.

Последняя четверть прошлого века ознаменовалась появлением четырех новых революционных направлений, которые призваны определять вектор технологического развития человечества. Речь идет о так называемых NBIC-технологиях (nano-bio-info-cogno) [7], объединяющих нано-, информационные, биологические и когнитивные технологии. Здесь сначала на основе нанотехнологий создается "под заказ" любой материал. Далее использование биотехнологий дает гибридный материал. Затем подключение информационных и когнитивных технологий превращает гибрид в интеллектуальную систему. Наномехатронные системы как раз окажутся ярким примером взаимопроникновения и сближения всех четырех составляющих NBIC-технологий.

3. ИЗУЧЕНИЕ INTERNET-РЕСУРСОВ ПО МИКРОМЕХАТРОНИКЕ

Найти в Internet статью по микро, наномехатронике. Дать реферативное описание содержания этой статьи. Объем отчета 8-10 стр.

Список литературы

1. Кобаяси П. Введение в нанотехнологию. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.
2. Гусев Б. В. Развитие нанонауки и нанотехнологий // Промышл. и гражданское строит. 2007. № 4. С. 45—46.
3. Жоаким К., Плевер Л. Нанонауки. Невидимая революция. М.: Изд-во КоЛибри, 2009.
4. Подураев К). В. Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2006.
5. Теряев Е. Д., Филимонов И. Б., Петрин К. В. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики // Мехатроника. автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 2-11.
6. Пупков К. А. Интеллектуальные системы в мехатронике. URL: <http://iul.bmstu.ru/research/rcs20.htm>.
7. Теряев Е. Д., Филимонов И. Б., Петрин К. В. Мифы и реалии наномехатроники // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XI Междунар. коиф. Самара: Изд-во Самарский НЦ РАН. 2008. С. 11-21.
8. Ермолов И. Л. Автономность мобильных наномехатронных устройств // Приводная техника. 2008. № 2. С. 48—54.
9. Кузнецов П. Л., Баксанский О. Е., Гречишкина П. Л. Нанотехнологий: наука, технология, системы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды X Междунар. конф. Самара: Самарский НЦ РАН. 2008. С. 11—21.

10. Теряев Е. Д., Филимонов П. Б., Петрин К. В. Современный этап развития мехатроники и грядущая конвергенция с нанотехнологиями // Мехатроника. автоматизация, управление: Материалы 5-й науч. конф. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". 2008. С. 9-20.

МИКРОМЕХАТРОНИКА. НАНОМЕХАТРОНИКА

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплинам: "Микромехатроника" и "Наномехатроника" для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 "Мехатроника и робототехника" по магистерской программе "Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения"

Составитель

Щербинин Сергей Васильевич

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага офсетная

Печать RISO. Усл.печ.л. Уч.-изд.л.

Тираж 50 экз. Заказ . Бесплатно