

# Фундаментальные и прикладные проблемы информатики и информационных технологий

УДК 004.25; 004.27; 004.382.2

А.В. Палагин, В.П. Боюн, Ю.С. Яковлев

## Проблемы создания компьютерных систем с применением наноэлементной базы

Показан перечень проблем с их взаимосвязями при переходе элементной базы на уровень нанотехнологии. Определены особенности нанотехнологии каждого типа (молекулярной, оптической – фотонной, квантовой, ДНК, НЭМС, МЭМС), порождающие эти проблемы. Разработан фрагмент онтологии, устанавливающий взаимосвязи между указанными проблемами. Сформулированы направления для их решения.

Показано перелік проблем з їх взаємозв'язками під час переходу елементної бази на рівень нанотехнології. Визначено особливості нанотехнології кожного типу (молекулярної, оптичної – фотонної, квантової, ДНК, НЕМС, МЕМС), що породжують ці проблеми. Розроблено фрагмент онтології, що встановлює взаємозв'язки між вказаними проблемами. Сформульовано напрями для їх вирішення.

**Введение.** Нанотехнологией называется междисциплинарная область науки, изучающая закономерности физико-химических процессов в пространственных пределах нанометровых размеров с целью управления атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами [1].

Как правило, движущим фактором в повышении производительности компьютерных систем служит возрастающая сложность пользовательских задач, что приводит не только к созданию новых средств и способов распараллеливания алгоритмов решаемых задач, но и к повышению технологического уровня используемой элементной базы.

В настоящее время активно проводятся разработки молекулярных устройств, оптических и квантовых компьютеров, ДНК-компьютеров, а также наноэлектромеханических (НЭМС) и микроэлектромеханических (МЭМС) структур. Сложность разработки таких систем заключается в необходимости создавать заново (в сравнении с известными подходами) основные узлы и блоки, а также алгоритмическое и программное обеспечение:

- принципы организации, архитектуры и структуры центрального процессора, элементов памяти, устройств ввода–вывода;
- пакеты прикладных программ и операционных систем;
- новую парадигму организации вычислительного процесса для массовых потоков данных и программ;
- новые конструктивно-технологические решения непосредственно для микросхем и базовых узлов и блоков;
- принципы, методологию и алгоритмы обеспечения надежности и достоверности полученных результатов;
- принципы и алгоритмы обеспечения *SMART*-технологий взаимодействия пользователя с компьютерной системой;
- принципы и методологию построения баз данных и баз знаний;
- принципы и алгоритмы обеспечения виртуальных рабочих мест, ориентированных на сбор и предварительную обработку данных для компьютерных систем контроля и управления.

На рис. 1 приведен фрагмент онтологии, который с некоторыми приближениями указывает на возможные взаимосвязи при решении перечисленных проблем.

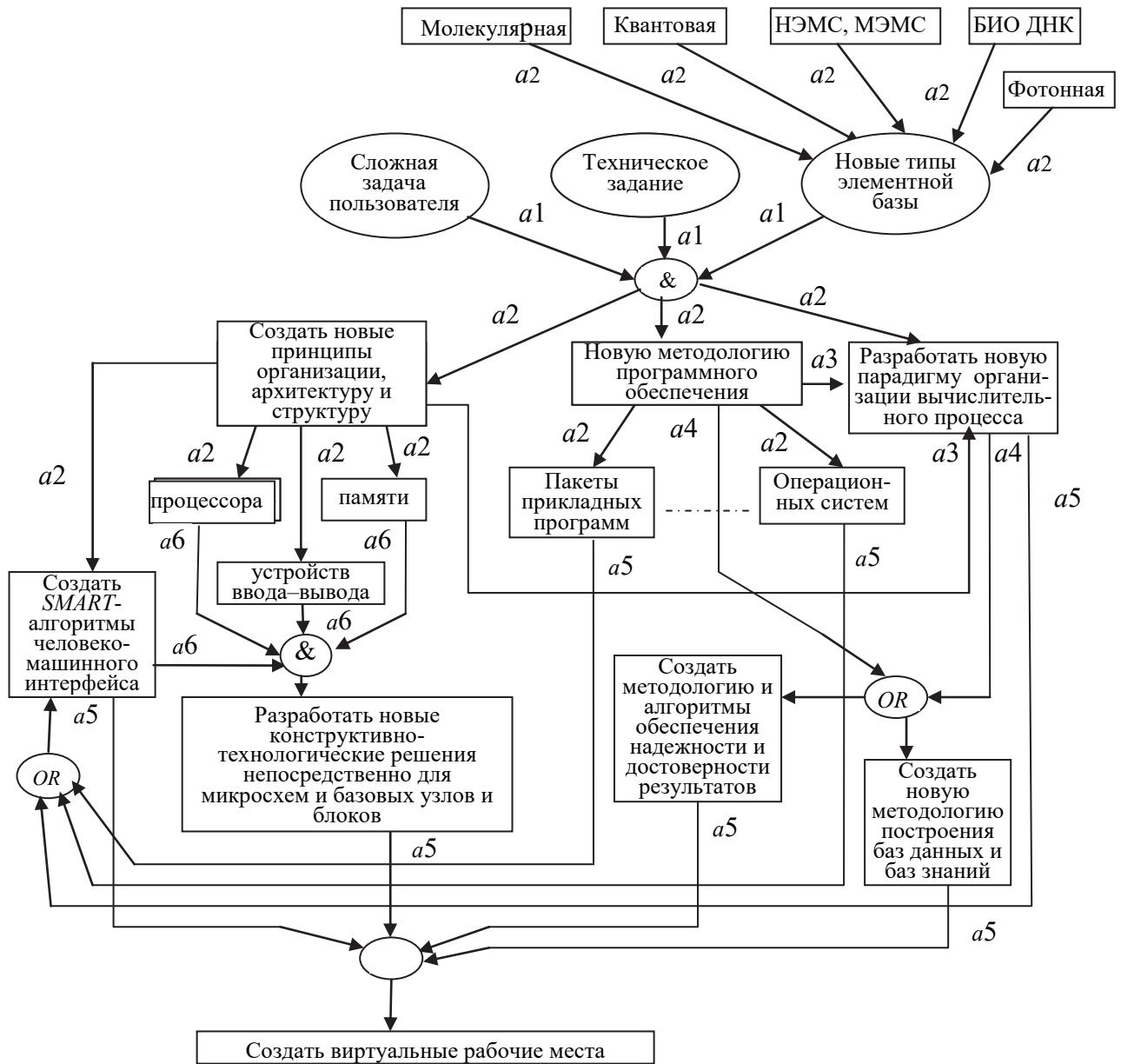


Рис. 1.  $a1$  – определяет;  $a2$  – содержит;  $a3$  – входит в состав;  $a4$  – поддерживает;  $a5$  – обеспечивает;  $a6$  – приводит к решению

При этом следует учитывать, что решение этих проблем, как правило, смещается в области квантовой техники (твердотельной и оптической), молекулярных, химических, биологических принципов хранения и обработки информации. Согласно рис. 1, чтобы обеспечить условия для создания новой парадигмы организации вычислительного процесса необходимо создать на новой элементной базе новые архитектуры и структуры процессора, памяти, средств ввода-вывода, человеко-ма-

шинного интерфейса, а также новую методологию программного обеспечения. При этом целесообразно выполнить комплекс исследований возможного перехода к единице информации, соответствующей огромной степени интеграции, характерной для нанотехнологии.

Пока решены только некоторые частные задачи создания средств в области нанотехнологий, оставляя без внимания системные проблемы [2–4].

**Актуальность исследования** продиктована необходимостью решения совокупности проблем в связи с переходом технологических процессов создания элементной базы на уровень нанотехнологии.

Цель работы – определить особенности нанотехнологий рассмотренных ниже типов.

### **Постановка задач**

Выполнить исследование нанотехнологии каждого типа (молекулярной, квантовой, оптической, ДНК, МЭМС и др.), определить их особенности и примеры реализации.

Определить особенности развития элементной базы, выполненной по нанотехнологии.

### **Решение задачи**

Рассмотрим особенности реализации упомянутых технологий наноуровня.

*Молекулярная элементная база.* В основу молекулярных компьютеров положены бистабильные молекулы, которые могут пребывать в двух устойчивых термодинамических состояниях. Каждое такое состояние обладает собственными химическими и физическими свойствами. Переводить молекулы из одного состояния в другое можно посредством света, тепла, химических агентов, электрических и магнитных полей [2, 3]. Благодаря малым размерам бистабильных молекул можно увеличить количество элементов на единицу площади. Другим достоинством молекул является малое время отклика. Бистабильные переключатели управляются световыми, электрическими импульсами или электрохимическими реакциями.

Существенным шагом в развитии молекулярной схмотехники стал отказ от простого копирования полупроводниковых схем с заменой в них обычных транзисторов на молекулярные [4]. Существует множество как природных, так и синтезированных человеком молекул, которые сами по себе могут служить логическими элементами. Их разделяют на два типа. К первому относятся молекулы, обладающие двумя устойчивыми состояниями, которым можно приписать значения «ноль» и «единица». Молекулы второго типа содержат фрагменты, способные выполнять роль управ-

ляющих группировок. Одна такая молекула может работать как логически активный элемент НЕ–И, НЕ–ИЛИ и др. При этом получены следующие результаты.

- Разработаны и запатентованы переключающие элементы на зеркально-симметричных изомерах, которые можно применять также для хранения и обработки информации: функции логических «ноль» и «единица» выполняют «правая» и «левая» формы молекулы. Переключение такого триггера из одного состояния в другое происходит при одновременном действии света и электрического поля: свет сообщает молекуле энергию, необходимую для перехода в новое состояние, а электрическое поле задает направление переключения. Считывание информации проводится оптическим способом.

- Созданы логические вентили на основе молекул ротаксанов. Такой вентиль состоит из молекул двух типов: циклической («бусины») и линейной («нити»). В работающем устройстве «бусина» оказывается нанизанной на «нить», располагаясь на ней в одном из двух возможных устойчивых положений. Переход из одного положения в другое, т.е. переключение вентилля, происходит в результате изменения кислотно-щелочного баланса среды. Такой переход обратим, и им можно управлять посредством электрических сигналов

- Еще один вариант молекулярных устройств, способных выполнять логические операции, рассмотрен в [4]. Имеется длинная молекула, состоящая из двух типов чередующихся структурных группировок, одни из которых служат потенциальными ямами, а другие – потенциальными барьерами для прохождения электрона вдоль молекулы. Исходное состояние молекулы задается так, что электрон может легко пройти ее (эффект резонансного туннелирования). Однако стоит только воздействием на одну из группировок изменить высоту барьера или глубину ямы, – и прохождение электрона станет невозможным. Предположим, что молекула имеет четыре потенциальные ямы, глубиной которых можно управлять путем оптического или электрического

воздействия. Тогда она способна работать как логический элемент НЕ–И с четырьмя входами, т.е. электрон через молекулярную цепочку будет проходить только тогда, когда сигнал на всех четырех входах отсутствует. Используя в качестве строительных блоков хотя бы одно из перечисленных молекулярных устройств, теоретически можно построить схему, выполняющую любые сколь угодно сложные логические операции и вычисления. Из этих же элементов можно создавать и блоки оперативной памяти (ОЗУ), а также постоянные запоминающие устройства (ПЗУ). Для работы последних необходимо, чтобы время жизни используемых в них молекул в том или ином состоянии было достаточно велико. Только тогда информация сможет храниться длительное время.

Теоретически можно также соединять отдельные молекулярные компоненты «проводами», например, из так называемых углеродных нанотрубок – цилиндрических структур диаметром в несколько нанометров – или из токопроводящих полимеров, называемых иногда «органическими металлами».

Остается проблема ввода и вывода информации. Устройства ввода информации пользователем в молекулярный компьютер в принципе могут остаться теми же, что и в настоящее время (клавиатура, мышь, входные порты и пр.). Однако, поскольку процессы хранения и переработки информации в молекулярной электронике носят специфический характер (отдельные части одного и того же компьютера могут работать с информацией, представленной в разных формах – электрической, оптической, химической и др.), встает проблема сопряжения вычислительных блоков между собой, а также с внешними электронными устройствами, т.е. необходимо иметь преобразователи сигнала из одной формы в другую. Вместе с тем молекулярная электроника предлагает свои пути решения этой проблемы.

Хотя теоретические основы нанохимической элементной базы уже достаточно разработаны и созданы прототипы практически всех элементов логических схем, на пути реального

построения молекулярного компьютера встают значительные сложности [4]. Внешне очевидная возможность использования отдельных молекул в качестве логических элементов электронных устройств оказывается весьма проблематичной в силу специфических свойств молекулярных систем и требований, предъявляемых к логическим элементам.

В первую очередь логический элемент должен обладать высокой надежностью срабатывания при подаче управляющего воздействия. Кроме того, элемент должен однозначно переключаться в требуемое состояние и пребывать в нем достаточно долго – до следующего воздействия. Для сравнительно простых молекул это требование, как правило, не выполняется: если переходом в возбужденное состояние можно управлять, то обратный переход может происходить спонтанно. Эффективной работы будущего компьютера можно достичь, комбинируя принципы молекулярной элементной базы и параллельных вычислений. Для этого следует организовать параллельную работу нескольких одинаковых молекулярных логических элементов. Тогда неправильное срабатывание одного из них не приведет к заметному сбою в вычислениях.

Повышенный интерес к молекулярной элементной базе (молетронике) вызван не только перспективами построения компьютера, но и широкими возможностями развития новых технологий. Благодаря высокой чувствительности молекулярных электронных устройств к свету, их можно использовать для создания эффективных преобразователей солнечной энергии, моделирования процесса фотосинтеза, разработки нового класса приемников изображения, принцип действия которых будет напоминать работу человеческого глаза. Молекулярные устройства можно использовать также в качестве селективных сенсоров, реагирующих только на определенный тип молекул. Такие сенсоры необходимы в экологии, промышленности, медицине. Сенсор из органических молекул значительно легче вживлять в организм человека с целью контроля за его состоянием.

*ДНК (Дезоксирибонуклеиновая Кислота) как элементная база.* Биокомпьютеры представляют собой гибрид информационных технологий и биохимии. Исследователи различных областей науки (биологии, физики, химии, генетики, информатики) пытаются использовать реальные биологические процессы для создания искусственных вычислительных схем. Существует несколько принципиально различных типов биологических компьютеров, основанных на различных биологических процессах: эволюционное программирование, генетические алгоритмы, ДНК- и клеточные компьютеры. ДНК-компьютеры создаются в последние годы во многих научно-исследовательских центрах мира, пытающихся объединить потенциал биологии и информационных технологий. ДНК – это макромолекула (молекула с высокой массой, представляющая собой многократно повторяющиеся звенья по своей структуре). ДНК – это одна из трех основных макромолекул (две другие – это РНК – Рибонуклеиновая Кислота и белки). РНК тесно связана с ДНК в биохимических процессах, связанных с информацией, которая хранится в клетках [5]. ДНК и РНК состоят из различных групп азотистых оснований, таких как: цитозин (Ц), гуанин (Г), аденин (А), урацил (У), тимин (Т). В ДНК-компьютерах роль логических вентилях выполняют подборки цепочек ДНК, образующих между собой прочные соединения. Для наблюдения состояния всей системы в последовательность этих цепочек внедрялись флуоресцирующие молекулы. При определенных сочетаниях свечения молекулы подавляли друг друга, что соответствовало нулю в двоичной системе. Единице же соответствовало усиленное свечение флуоресцентом. Возможно строить последовательности цепочек, в которых выходной сигнал одной цепочки служит входным для другой. При высокой параллельной скорости реакций, выполняемых ДНК, становится возможным решение ряда задач, ранее невыполнимых на мощных серверах. Если сравнивать потенциальные возможности биокомпьютера и обычного компьютера, то первый значительно опережает нынеш-

него. ДНК может параллельно выполнять до  $10^{20}$  операций в секунду, что сравнимо с современными терафлоповыми суперкомпьютерами [6]. Кроме ДНК в качестве компьютерной биопамяти могут выступать другие биологически активные молекулы, например, бактериородопсин, обладающий превосходными голографическими свойствами и способный выдерживать высокие температуры. На его основе уже создан вариант трехмерного запоминающего устройства. Молекулы бактериородопсина фиксируются в гидрогелевой матрице и облучаются двумя лазерами. Первый лазер (направленный аксиально на гидрогелевый образец) инициирует фотохимические реакции в молекуле и записывает информацию. Второй, направленный перпендикулярно, считывает информацию, записанную на молекулах бактериородопсина, находящегося в объеме гидрогеля.

Биопроектор имеет три преимущества, благодаря которым возможно применение для построения ЭВМ [6]:

*Быстродействие.* Как было сказано, ДНК имеет мгновенную реакцию, что не под силу цифровому процессору.

*Надежность.* Если кремниевый процессор мог допускать ошибки при вычислениях, биопроектор практически не ошибается в преобразованиях (максимальная расчетная относительная погрешность колеблется от 0,001 до 0,02 процента).

*Компактность.* Благодаря тому, что производители научились наслаивать белковую структуру, габариты такого ДНК-компьютера могут быть сопоставимы по размеру с каплей воды.

Однако в разработке биокомпьютеров ученые столкнулись с рядом серьезных проблем [7, 8]. *Первая* связана со считыванием результата – современные способы секвенирования (определения кодирующей последовательности) не совершенны: нельзя за один раз секвенировать цепочки длиной хотя бы в несколько тысяч оснований. Кроме того, это весьма дорогостоящая, сложная и трудоемкая операция. *Вторая* проблема – ошибки в вычислениях. Для биологов

точность в один процент при синтезе и секвенировании оснований считается очень хорошей. Для ИТ она неприемлема, так как решения задачи могут потеряться, когда молекулы просто прилипают к стенкам сосудов; нет гарантий, что не возникнут точечные мутации в ДНК и пр. И еще – ДНК с течением времени распадаются, и результаты вычислений исчезают. Теоретические расчеты дают основание предполагать, что так называемые ДНК-компьютеры в конечном счете способны превзойти кремниевые чипы в решении массиво-параллельных задач, требующих одновременного выполнения множества сходных операций. Но еще более заманчивые перспективы биологические нанокompьютеры прогнозируют в специальных приложениях, таких как медицина и фармакология. Вынудить ДНК работать в качестве полноценного микропроцессора – задача, пока еще очень далекая от разрешения и многие ученые полагают, что биомолекулярные вычисления скорее будут дополнять, а не заменять компьютеры на основе кремниевых чипов. В настоящее время область ДНК-вычислений пребывает на этапе подтверждения концепции.

*Оптическая элементная база.* Работает на оптических процессах, и все операции выполняются посредством манипуляции оптическим потоком. Оптические компьютеры – новое поколение вычислительной техники (компьютеров) на основе использования оптического излучения в качестве носителя информации. Составными частями таких компьютеров служат устройства, формирующие, передающие, преобразующие и осуществляющие другие операции над информацией и управляющими световыми потоками. Применение оптического излучения в качестве носителя информации имеет ряд потенциальных преимуществ (в сравнении с электрическими сигналами) благодаря следующим очевидным свойствам световых потоков [9]:

- в линейной среде световые потоки не взаимодействуют, проходя в непосредственной близости или даже пересекаясь;
- световые потоки могут быть локализованы в поперечном направлении до субмикрон-

ных размеров и передаваться как по световодам, так и по свободному пространству;

- скорость распространения светового сигнала выше скорости электрического, зависящего от соотношения активных и реактивных компонент проводимости тракта передачи;
- взаимодействие световых потоков с нелинейными средами не локализовано, а распределено во всей среде, что дает новые степени свободы (в сравнении с электронными системами) в организации связей и создании параллельных архитектур.

Построение оптических компьютеров, в которых носителем информации на всех этапах ее обработки и передачи является только оптическое излучение, исключает необходимость многократного преобразования электрической энергии в световую и обратно. В результате сокращаются энергетические затраты, устраняются многочисленные преобразовательные элементы, увеличивается быстродействие. Развитие оптических компьютеров связано, в частности, с созданием оптических элементов вычислительной техники на основе оптической бистабильности. Экспериментально реализованы оптические логические устройства и усилители, комбинации которых позволяют создавать сложные информационные системы. К таким устройствам относятся элементы булевой логики, трансфазоры – оптические транзисторы, триггеры, они же – ячейки запоминающих устройств и др.

Перечисленные свойства позволяют оптическим компьютерам преодолевать ограничения по быстродействию и параллельной обработке информации, свойственные современным ЭВМ. Например, цифровой оптический процессор с числом параллельных каналов  $\sim 10^5 - 10^6$  может выполнять до  $10^{13} - 10^{15}$  операций в секунду (при времени переключения в одном канале  $\sim (10^{-8} - 10^{-9})$  с), что значительно превосходит электронные системы.

В 2017 г. китайские ученые предполагают представить прототип фотонного квантового компьютера [10]. По результатам испытаний, частота квантования (обработки сигналов) у китайского прототипа в 24 раза выше, чем в

других зарубежных разработках. Такой вычислительный блок может стать основой для компьютеров будущего, которые заменят классические компьютеры.

Световой компьютер превосходит традиционные по двум существенным параметрам: их вычислительная мощность предельно высока, а энергопотребление минимально. Уже имеются прототипы оптических процессоров, способные выполнять элементарные операции, но полноценных и готовых к производству компьютеров нет.

Однако уже к 2020 г. ожидаются модели мощностью 17,1 эксафлопс (17,100 петафлопс). Прототип будет обладать производительностью 340 Гигафлопс [11].

*Квантовый компьютер* [2, 3, 12–14] основан на законах квантовой механики. Для выполнения операций такой компьютер использует не биты, а кубиты – квантовые аналоги битов. В отличие от битов, кубиты могут одновременно пребывать в нескольких состояниях. Такое свойство кубитов позволяет квантовому компьютеру за единицу времени выполнять больше вычислений.

Основные работы над аппаратным обеспечением (*hardware*) квантового компьютера продвигаются в следующих направлениях:

- создание квантового процессора;
- создание устройств для хранения квантовой информации (квантовая память);
- разработка квантовой шины для обмена информацией.

При разработке квантового процессора необходимо прежде всего выбрать физическую основу процессора, при этом предполагаемые преимущества квантового компьютера перед классическим заключаются в том, что в отличие от последних квантовый компьютер оперирует при вычислениях не числами, а квантовыми состояниями, которые соответствуют следующим требованиям [12–14]:

- Физическая система, представляющая собой квантовый процессор, должна содержать достаточно большое число  $N > 100$  хорошо различаемых кубитов для выполнения соответствующих квантовых операций.

- Обеспечивать условие для установки входного регистра в исходном базисном состоянии.

- Ограничивать процесс декогеренции квантовых состояний (обусловленный взаимодействием системы кубитов с окружающей средой), который приводит к разрушению суперпозиций квантовых состояний и делает невозможным выполнение квантовых алгоритмов.

- Обеспечивать за время такта выполнение требуемой совокупности квантовых логических операций, определяющей унитарное преобразование, поскольку любую математическую операцию как арифметическую, так и логическую («и», «или»), можно свести к ограниченному числу логических операций.

- Выбор физической основы квантового процессора следует согласовать с достаточно простым устройством ввода–вывода информации.

В настоящее время ведутся работы над следующими основными вариантами элементной базы квантового процессора [12–14]:

- использование в качестве квантового процессора *пробирки с органической жидкостью*, где кубитами служат ядра отдельных атомов со спинами  $1/2$ , связанные косвенными спин-спиновыми взаимодействиями, что обеспечивает возможность применить к макроскопическим объемам жидкости отработанные методики и техники ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

$N$  кубитов заменяет  $2^N$  обычных битов, а, например, 30 кубитов – уже  $10^9$  классических единиц информации, а 100 кубитов заменят  $10^{30}$  обычных битов, 30-кубитный квантовый компьютер был бы, ориентировочно, эквивалентен обычному компьютеру, выполняющему 10 триллионов операций в секунду.

Такое быстроедействие сопоставимо с производительностью самых мощных суперкомпьютеров, состоящих из тысяч процессоров.

Однако помимо положительных свойств *пробирки с органической жидкостью* существуют технические и чисто физические ограничения. Так, косвенные спин-спиновые взаимодействия, необходимые для организации основных логических операций, сами по себе очень слабы. В

### Ситуация в создании квантовой элементной базы

№	Производители	Результаты разработки
1	В компании <i>Hewlett Packard</i> создан фотонный процессор с тысячей компонентов на чипе. (5 янв. 2017)	Группе исследователей из лаборатории <i>Hewlett Packard</i> удалось создать оптический процессор, на чипе которого обозначено 1052 оптических компонента, способных быстро и эффективно выполнять сложные вычисления.
2	В продажу поступил новый квантовый компьютер стоимостью 15 млн дол. (26 янв. 2017)	Канадская компания <i>D-Wave</i> считается одним из первопроходцев в области производства коммерчески доступных квантовых компьютеров; выпуск первых моделей состоялся в 2007 г.; тогда это был 16-кубитный и 28-кубитный компьютер <i>Orion</i> ; в мае 2011 г. в продажу поступила модель <i>D-Wave One</i> с 128-кубитным чипом, а затем и <i>D-Wave Two</i> с 512-кубитным чипом; на этом <i>D-Wave</i> решила не останавливаться; в продажу поступает компьютер <i>D-Wave 2000Q</i> с процессором на 2000 кубит по цене 15 млн дол.
3	Доказана возможность создания компьютеров на основе ДНК (2 марта 2017)	Исследователи Университета Манчестера разработали вычислительное устройство на основе дезоксирибонуклеиновой кислоты.
4	В Китае начата разработка квантового компьютера (14 апр. 2017)	В 2015 г. на эти цели израсходовано более ста млрд дол.; результатом этих работ стал запуск первого в мире спутника квантовой связи, затем появился разработанный китайскими специалистами квантовый радар; теперь ученые из Китайской академии наук начали создание квантового компьютера, превосходящего по мощности все современные суперкомпьютеры.
5	Открыто новое квантовое состояние материи (23 апр. 2017)	Физики кафедры квантовой информации и материи Калифорнийского технологического института обнаружили новое состояние материи – трехмерные жидкие квантовые кристаллы; открытие обещает прогресс в разработке технологий сверхбыстрых квантово-компьютерных вычислений.
6	<i>Google</i> приступила к созданию 50-кубитного квантового компьютера (25 апр. 2017)	<i>Google</i> объявила, что исследователи компании занимаются разработкой технологии квантовых вычислений. Компания уже имеет рабочий образец шестикубитного квантового процессора, но сейчас специалисты нацелены на создание компьютера с 50 кубитами – самого мощного в мире на данный момент.
7	В Китае планируют создать 20-кубитную квантовую систему уже 8 мая 2017 г.	Группа исследователей из Китайского университета Науки и техники и Чжэцзянского университета на основе имеющейся 10-кубитной квантовой системы планирует к концу 2017 г. увеличить количество кубитов в ней в два раза.
8	Ученые России и Канады нашли способ упростить архитектуру квантовых компьютеров (июнь 2017)	Квантовые компьютеры способны выполнять сложные вычисления благодаря уникальной архитектуре, но, несмотря на то, что за ними будущее, крайне непростое устройство квантовых компьютеров не позволяет создать достаточно мощную систему; группе физиков из России и Канады удалось создать первый кремниевый чип, способный и хранить многомерные кубиты, и манипулировать ими; новый подход позволит упростить архитектуру квантовых компьютеров и ускорить их создание.
9	Создан первый перепрограммируемый квантовый компьютер	Ученые из Университета Мэриленда создали первый в мире программируемый и перепрограммируемый квантовый компьютер сверхвысокой производительности.
10	Совершен прорыв в развитии квантовых компьютеров	Команда инженеров из Университета Нового Южного Уэльса создала первый в мире квантовый логический вентиль на основе традиционного кремния; американский производитель процессоров компания <i>Intel</i> объявила о планах инвестировать 50 млн дол. в развитие квантовых компьютерных вычислений; помимо <i>Intel</i> в проекте предполагают участвовать Политехнический институт в Дельфте и голландская Организация прикладных исследований; ученые <i>IBM</i> объявили, что сделали шаг вперед и решили одну из крупнейших проблем: разработали лучший способ определения и исправления ошибок.

результате время выполнения логических операций оказывается большим, снижающим быстродействие компьютера [13]. Поэтому более

перспективными оказываются твердотельные квантовые компьютеры на основе ЯМР, поскольку диполь-дипольные взаимодействия ядерных



спинов в несколько тысяч раз превосходят косвенные спин-спиновые взаимодействия.

Предлагается использование в качестве кубитов уровней энергии ионов, захваченных *ионными ловушками*, создаваемыми в вакууме определенной конфигурацией электрического поля в условиях их лазерного охлаждения до микрокельвиновых температур. Взаимодействие между заряженными ионами в одномерной цепочке этих ловушек осуществляется посредством возбуждения их коллективного движения, а индивидуальное управление ими – с помощью лазеров инфракрасного диапазона. Основными недостатками этого типа квантовых компьютеров являются необходимость создания сверхнизких температур, обеспечение устойчивости состояний ионов в цепочке, а также ограниченность возможного числа кубитов значением  $N < 40$ .

Далее используются в качестве кубитов *зарядовые состояния куперовских пар* в квантовых точках, связанные переходами Джозефсона. Предполагается, что перспективность этого направления состоит в возможности создавать электронные квантовые устройства высокой степени интеграции на одном кристалле, когда для управления кубитами не требуются громоздкие лазерные или ЯМР-установки. Однако создание квантовых компьютеров по-прежнему сопряжено со многими трудностями – не решенным остается ряд весомых проблем, в частности, устойчивости состояний кубитов и декогеренции. В таблице приведен фрагмент структурированной информации [13, 14] по разработкам квантовых узлов и блоков как основы квантовых компьютеров.

Все микрочастицы (кванты, атомы или молекулы) могут быть описаны волновой функцией состояния, которые подчиняются единым законам квантовой механики. Таким образом, работы над каждым типом компьютеров базируются на одном фундаменте. Но у них есть и общие проблемы.

Необходимо освоить объединение частиц в совокупности и работать как с каждой частицей, так и с совокупностью в целом. К сожалению, сегодня технологии не позволяют

проводить такие манипуляции. К тому же системе управления следует поддерживать масштабируемость системы частиц, благодаря которой можно наращивать мощность компьютера. В настоящее время для разработчиков некоторых стран пока поставлена цель – создать квантовый компьютер, оперирующий 1 тыс. кубитов с возможностью его масштабирования.

Область применения квантового компьютера – переборные задачи с большим числом итераций. Квантовый компьютер не будет конкурентом нынешним, скорее, он предназначен для решения задач с множеством исходной информации и переменных. Такие задачи характерны для систем криптографии и безопасной передачи данных, биологии и медицины, моделирования квантовых систем, оптимизации различных процессов.

*Микроэлектромеханические структуры (МЭМС), наноэлектромеханические структуры (НЭМС).*

Одна из основных тенденций развития МЭМС и НЭМС – дальнейшая миниатюризация, уменьшение энергопотребления и увеличение числа функций системы, что во многом связано с возможностью использования в составе систем элементов, созданных на основе нанотехнологии [15–20]. Особенность МЭМС-компонент состоит в чрезвычайно малых расстояниях между проводниками, поэтому при их проектировании и моделировании велика роль специализированного программного обеспечения. Наиболее известные программные пакеты проектирования МЭМС (*COVENTOR, VeloceRF, ANSYS, SUGAR, FEM-LAB, Momentum ADS, CSTMicrowave Studio*) поддерживают анализ электростатических эффектов в двух- и трехмерной неоднородной среде с потерями, расчет термомеханических параметров и переходных процессов с учетом гистерезиса, тепловых деформаций, упругих эффектов; эффектов, связанных с упаковкой изделия в корпус, а также трехмерный электродинамический анализ полей в неоднородной среде с потерями. В пакеты обычно входит модуль разработки структурных и принципов

альных схем с использованием поведенческих моделей устройств и типовых радиоэлементов.

Технологической базой МЭМС служат технологии микроэлектроники с возможностью создания трехмерных структур [19].

Следующий шаг развития – перенос электромеханических систем в наномир, т.е. создание нанoeлектромеханических систем (НЭМС).

НЭМС представляют собой совокупность электронных и механических элементов, выполненных в наноразмерном варианте на основе интегрированных технологий. Эти объекты запускают в работу под действием электрического поля или света, или, наоборот, при приложении внешней силы создают электромагнитный отклик [15, 16]. При этом часто используют пьезо- и сегнетоэлектрический, электростатический, туннельный эффекты в зависимости от выбора принципа работы наноустройств. Подвод энергии к микро- или нанoeлектромеханической системе может осуществляться электрическим, термическим или химическим путем.

Одним из эффективных применений НЭМС является создание датчиков (сенсоров) различных величин – химических, биологических, радиационных, действие которых основано на наномасштабных эффектах.

Принцип работы НЭМС показан на рис. 2, где обозначения компонентов приняты такие, как и в [16].

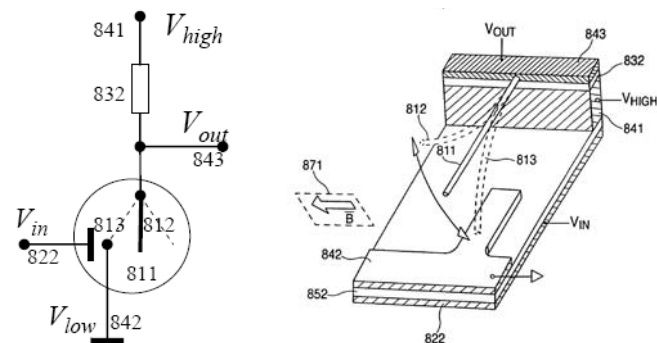


Рис. 2

На рис. 2 справа показана схема инвертора, представляющая собой многослойную структуру с закрепленной наверху консолью из нанотрубки, а слева приведено условное обозначение этого инвертора. Здесь обозначены: проводящий слой (входной контакт) 822, изоляци-

онный слой 852, проводящий слой (соединенный заземленный контакт) 842, контактный слой (соединенный с источником питания) 841, резистивный слой 832 и контактный слой 843, который служит выходным полюсом инвертора, куда вмонтирована консоль из нанотрубки 811. В исходном состоянии консоль 811 заряжена противоположно (положительно, например) по отношению к электроду 841. Поэтому при подаче на вход 822 высокого отрицательного уровня напряжения ( $-3V$ ), нанотрубка 811 притянется к электроду 822 (в позицию 813), не прикасаясь к нему, но прижавшись к электроду 842, что приведет к появлению на выходе 843 низкого отрицательного уровня напряжения ( $0V$ , т.е. «земли»). И, наоборот, при подаче на вход 822 низкого отрицательного уровня напряжения ( $0V$ ) нанотрубка 811 оттолкнется от электрода 842 (в положение 812), что приведет к появлению на выходе 843 высокого отрицательного уровня напряжения ( $-3V$ ). То же самое произойдет при приложении внешнего магнитного поля (см. 871 на рис. 2). Известно, что на основании инвертора могут быть построены логические схемы и элементы памяти компьютера. Процесс изготовления нанoeлектромеханических элементов такого типа описан в [17].

Существенное, но не последнее, достоинство названных изделий (по мнению авторов [16]) – это то, что размеры устройств на основе резонансных нанотрубок позволяют их размещать, например, внутри кровеносных сосудов человека. Значение последнего обстоятельства сегодня трудно оценить в полной мере.

Общеизвестное достоинство НЭМС – высокая, недоступная традиционным элементам чувствительность НЭМС-датчиков и работа этой системы с низким уровнем сигналов. Поэтому актуальна проблема предотвращения искажений полученных сигналов низкого уровня. Очевидный подход – сокращение длины и времени передачи слабого сигнала требует решения проблемы объединения на одном чипе высокочувствительного НЭМС-датчика с усилителем.

Подробный анализ изделий, выполненных с применением МЭМС и НЭМС с акцентом на

зарубежные результаты экспериментальных исследований и экспериментальных образцов, позволяет подтверждать достойное их применение в различных областях науки и техники в [16].

НЭМС развиваются стремительно благодаря научным открытиям и их применениям. Механические устройства уменьшаются в размерах, при этом снижается их масса; увеличивается резонансная частота и уменьшаются их константы взаимодействия. Нововведения в этой области предусматривают улучшения в процессе изготовления и новые методы для детектирования движения и привода наносистем. С использованием методов литографии стало возможным создание автономных объектов в кремнии и других материалах с толщиной и длиной менее 20 нанометров (нм). Подобными методами можно изготовить каналы или поры молекулярных размеров. Это позволит получить доступ в новый экспериментальный режим и ожидать новых применений таких устройств для считывания (сканирования) и молекулярного взаимодействия.

Возможность создавать механические структуры с произвольной геометрией из многих материалов обеспечит новые возможности для экспериментирования в наномасштабах и даст возможность реализовать устройства, способные взаимодействовать с отдельными молекулами [18]. Сегодня нанотрубки из углерода и другие «безупречные» структуры широко используются и имеют интересные механические характеристики. НЭМ-системы, изготовленные посредством литографических подходов, достигают размеров углеродных нанотрубок, но, в отличие от них, могут быть изготовлены из различного набора материалов, и способны интегрироваться с электрическими и оптическими системами для создания многофункциональных устройств. Связь с действующими молекулами, такими как рецепторные молекулы, мембранные поры, двигательные молекулы и другие функциональные молекулярные системы значительно расширят области применения НЭМС-устройств. НЭМС-структуры могут быть изготовлены и с использованием химии поверхностей, на них можно накладывать шаблоны для

взаимодействия с молекулярными системами, объединяя мощь биохимии с разработанными устройствами. Можно ожидать, что за десятилетие или раньше, НЭМС-устройства вытеснят на том же уровне миниатюризации МЭМС-системы. Новым физическим свойством, появившимся благодаря малым размерам, отведена ведущая роль в операциях, выполняемых этими устройствами, поэтому для их изготовления потребуются новые подходы.

**Заключение.** Переход на элементную базу, выполненную по нанотехнологии неизбежен, поскольку уменьшение размеров твердотельных элементов как средства повышения производительности системы, приближается к атомарным, а требования к скорости решения пользовательских задач постоянно повышается. При этом необходимо решить для каждой элементной базы ряд специфических задач, которые отодвигают промышленное изготовление узлов, блоков и в целом компьютеров, выполненных по нанотехнологии, для некоторых типов изделий. К основным проблемам при создании компьютеров относится то, что все узлы и блоки проектируемого компьютера (процессор, память, средства ввода-вывода и др.) должны быть спроектированы заново с использованием новой методики и новых принципов, основанных на особенностях новой элементной базы. Аналогично заново должно быть спроектировано и программное обеспечение (в первую очередь пакеты прикладных программ и при необходимости – операционной системы), ориентированное на хранение и параллельную обработку огромных массивов данных. Кроме того, необходимо решить и другие упомянутые проблемы, характерные для каждой элементной базы, выполненной по нанотехнологии. Аналогично, существует ряд проблем (например, необходимость создания сверхнизких температур для квантовой элементной базы), а также проблемы, подлежащие решению при создании фотонных, молекулярных, НЭМС и МЭМС, которые также отодвигают промышленное внедрение нанокomпьютеров. Однако при этом есть и положительные результаты. Так, используя НЭМС-технологии, можно ожидать через несколько лет появления высокофункциональных сенсоров, атравматичных ме-

дицинских диагностических устройств и сверх-емких устройств для хранения информации. Уже теперь предложена [20] оригинальная схема двоичного сумматора для нанокomпьютеров, в котором реализован нетрадиционный способ двоичного сложения. Рассмотрены вопросы синтеза двоичного сумматора, построенного на основе резонансных электромеханических элементов. Продолжается изучение методов изготовления наносистем. В результате можно утверждать, что в ближайшее десятилетие нанотехнология заявит о себе, продемонстрировав реальные возможности.

1. Еленин Г.Г. Нанотехнологии, наноматериалы, наноустройства. – <http://spkurdyumov.ru/mathmethods/nanotexnologii-nanomaterialy-nanoustrojstva/>
2. Яковлев Ю.С. Новые парадигмы построения компьютерных систем // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – № 1. – С. 51–61.
3. Основные концепты компьютеров будущего. – [http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/kompyutery\\_budushch\\_ego\\_osnovnye\\_kontsepty](http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/kompyutery_budushch_ego_osnovnye_kontsepty)
4. Зайцев В., Шишлова А. Молеотроника. – <https://www.nkj.ru/archive/articles/5199/>
5. ДНК-компьютеры. Ч. 1. – <http://www.geometria.by/blogs/technology/50548>
6. ДНК-компьютеры. – [http://www.odessapassage.com/passage/magazine\\_details.aspx?lang=eng&id=33256](http://www.odessapassage.com/passage/magazine_details.aspx?lang=eng&id=33256)
7. Рыбак Эля. Генетические и клеточные биокомпьютеры. – <http://www.computer-museum.ru/technlgyl/gene-comp.htm>
8. Биологический нанокomпьютер // PC Week/RE. – 2003. – № 19. – С. 32.
9. Карпушенко Ф.В. Оптические компьютеры. – [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/2632.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/2632.html)
10. Самуилкина А. Топ-6 научно-технических достижений Китая за последние пять лет. – <https://high-tech.fm/2017/06/17/china>

11. Громова Т. Лазерные суперкомпьютеры, работающие со скоростью света, скоро появятся на рабочих столах / 2014. – <http://www.dsnews.ua/future/lazernye-superkompyutery-rabotayushchie-so-skorostyu-sveta--20082014212800>
12. Доронин С.И. Квантовая магия. Гл. 4. Квантовые компьютеры. Практическая реализация. – [http://www.sir35.ru/kvant\\_magia/book/cont.html](http://www.sir35.ru/kvant_magia/book/cont.html)
13. Квантовые компьютеры. – Квантовые компьютеры\_1.html
14. Неизвестный И. Г. Квантовый компьютер и его полупроводниковая элементарная база. – <https://psj.nsu.ru/lector/neizvestniy/2.html>
15. Грабченко А.И., Пупань Л.И., Товажнянский Л.Л. Введение в нанотехнологии: текст лекций для студентов инженерных специальностей дневной и заочной форм обучения. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. – 272 с.
16. Белик В.К., Климовская А.И., Журавская И.О. Нанокomпьютер: перспективы создания. Обзор // УСиМ. – 2013. – № 5. – С. 65–71.
17. Pinkerton J.F., Harlan J.C., Mullen J.D. Nanoelectromechanical transistors and systems (US 2004/0238907, WO2004/108586 A1, US 2005/0104085 A1, US 7256063 B2). – Ambient Systems, Inc. (US).
18. Крэйгхед Х.Г. Immortality Corp. team. Нанoeлектро-механические системы. – [http://inquest.kngraphics.ru/nanomedicine\\_electromechanical.htm](http://inquest.kngraphics.ru/nanomedicine_electromechanical.htm)
19. Клепиков В.Б., Пиеничников Д.А. Состояние и тенденции развития микро- и нанoeлектро-механических систем. – <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/23287>
20. Синтез сумматора нанокomпьютера на основе резонансных электромеханических элементов / В.К. Белик, В.П. Боюн, А.И. Климовская, и др. // УСиМ. – 2014. – № 1. – С. 48–56.

Поступила 04.10.2017

Тел. для справок: +38 044 526-3207 (Киев)

E-mail: palagin\_a@ukr.net, yakyurlen@ukr.net

© А.В. Палагин, В.П. Боюн, Ю.С. Яковлев, 2017

UDC 004.25; 004.27; 004.382.2

A.V. Palagin, V.P. Boyun, Yu.S. Yakovlev

<sup>1</sup> Academician of National Academy of Sciences of Ukraine, Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine, E-mail: palagin\_a@ukr.net

<sup>2</sup> Doctor of Technical Sciences, V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine, Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine, E-mail: vboyun@gmail.com

<sup>3</sup> Doctor of Technical Sciences, V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine, Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine, E-mail: yakyurlen@ukr.net

## The Problems of Creation the Computer Systems with Nanoelement Base Application

**The purpose.** In connection with necessity of increasing the productivity of computer systems at the expense of the sizes of elements reduction, the computers constructed on the fourth generation element base have appeared incapable. The further reduction of the solid-state element base executed on chips of the big integrated schemes (BIS) cannot render the essential influence on increasing the systems productivity as the sizes of elements come nearer to the atomic. There was a necessity of transition to the fifth generation element base, which is executed in nanotechnology. In this connection the purpose can be formulated as follows: to show

the list of problems with their interrelations at transition of element base to the nanotechnology level and to define the features of each type nanotechnology (molecular, optical - photon, quantum, neural, DNA), generating these problems. Thus, the ontology fragment is developed, establishing interrelations between the specified problems. The directions for their decision are formulated. Examples of concrete scopes using the separate products executed on nanotechnology are presented where their use shows the greatest effect.

**Methods.** We used the methods of the modern status analysis of every specified type of the element base executed in nanotechnology, and the problems, which are subject to the decision while creation the units and blocks using such element base. Thus, the ontological approach is applied for establishing the interrelations between the problems.

**Result.** Peculiarities of each type of nanotechnology (molecular, optical - photon, quantum, neural, DNA) are allocated, generating the problems which are necessary for solving while creation the units and blocks, and also the computers using element base, executed in nanotechnology. The ontology fragment is developed, establishing interrelations between these problems.

**The conclusion.** Speaking about the system approach for solving the set of the above listed problems, it is possible to notice its high complexity demanding the big financing, that only under the force to the large companies such as Intel, Microsoft, etc. Therefore, so far only some private problems on creation the means in nanotechnology area are solved, disregarding the system problems.

All prototypes of the computers of the future (DNA-computers, molecular and photon, etc.) are the different sides of a single whole – an idea of creation the full-function quantum computer. All microparticles, whether it is quanta, atoms or molecules - can be described by the wave state function and submit to uniform laws of quantum mechanics. Thus, jobs over each type of computers are based on the one theoretical base. Now the area of DNA-calculations stays at a stage of acknowledgement of the concept. The quantum computer will not be the competitor to the present ones, more likely, it is intended for the decision problems with a large quantity of the initial information and the big number of variables. Such problems characterize the cryptography systems and safe data transmission, biology and medicine, modelling of quantum systems, optimization of various processes. However, with confidence it is possible to assert, that nanotechnologies will declare itself, having shown the real possibilities, in the next decades.

1. *Elenin G.G.* Nanotekhnologii, nanomaterialy, nanoustrojstva, <http://spkurdyumov.ru/mathmethods/nanotekhnologii-nanomaterialy-nanoustrojstva/> (In Russian).
2. *Yakovlev Yu.S.* Novye paradigmy postroeniya komp'yuternyh sistem. Informacijni tekhnologii ta komp'yuterna inzheneriya, 2012, N 1, P. 51–61. (In Russian).
3. *Osnovnye koncepty komp'yuteroi budushchego*, [http:// zoom.cnews.ru/rnd/article/item/kompyutery\\_budushchego\\_osnovnye\\_kontsepty](http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/kompyutery_budushchego_osnovnye_kontsepty) (In Russian).
4. *Zajcev V., Shishlova A.* Moletronika, <https://www.nkj.ru/archive/articles/5199/> (In Russian).
5. *DNK-komp'yutery*. Part 1., <http://www.geometria.by/blogs/technology/50548> (In Russian).
6. *DNK-komp'yutery*, [http://www.odessapassage.com/passage/magazine\\_details.aspx?lang=eng&id=33256](http://www.odessapassage.com/passage/magazine_details.aspx?lang=eng&id=33256)
7. *Rybak Ehlyu.* Geneticheskie i kletochnye biokomp'yutery, <http://www.computer-museum.ru/technlg/genecomp.htm> (In Russian).
8. *Biologicheskij nanokomp'yuter*. PC Week/RE, 2003, N 19, P. 32. (In Russian).
9. *Karpushenko F.V.* Opticheskie komp'yutery, [http:// femto.com.ua/articles/part\\_2/2632.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/2632.html) (In Russian).
10. *Samuilkina A.* Top-6 nauchno-tekhnicheskikh dostizhenij Kitaya za poslednie pyat' let, <https://hightech.fm/2017/06/17/china> (In Russian).
11. *Gromova T.* Lazernye superkomp'yutery, rabotayushchie so skorost'yu sveta, skoro poyavyatsya na rabochih stolah, 2014, <http://www.dsnews.ua/future/lazernye-superkompyutery-rabotayushchie-so-skorostyu-sveta-20082014212800> (In Russian).
12. *Doronin S.I.* Kvantovaya magiya. Gl. 4. Kvantovye komp'yutery. Prakticheskaya realizaciya, [http://www.sir35.ru/kvant\\_magia/book/cont.html](http://www.sir35.ru/kvant_magia/book/cont.html) (In Russian).
13. *Kvantovye komp'yutery*, [Kvantovye komp'yutery\\_1.html](http://www.sir35.ru/kvant_magia/book/cont.html) (In Russian).
14. *Neizvestnyj I.G.* Kvantovyy komp'yuter i ego poluprovodnikovaya ehlementarnaya baza, <https://psj.nsu.ru/lector/neizvestnyj/2.html> (In Russian).
15. *Grabchenko A.I., Pupan' L.I., Tovazhnyanskij L.L.* Vvedenie v nanotekhnologii: tekst lekcij dlya studentov inzhenernyh special'nostej dnevnoj i zaochnoj form obucheniya, Har'kov: NTU «HPI», 2012, 272 p. (In Russian)
16. *Belik V.K., Klimovskaya A.I., Zhuravskaya I.O.* Nanokomp'yuter: perspektivy sozdaniya. Obzor. USiM, 2013, N 5, P. 65–71. (In Russian).
17. Pinkerton J.F., Harlan J.C., Mullen J.D. Nanoelectromechanical transistors and systems (US). 2004/0238907, WO2004/108586 A1, US 2005/0104085 A1, US 7256063 B2), Ambient Systems, Inc. (US).
18. *Krehjghed H.G.* Immortality Corp. team. Nanoehlektromekhanicheskie sistemy, [http://imquest.kngraphics.ru/nanomedicine\\_electromechanical.htm](http://imquest.kngraphics.ru/nanomedicine_electromechanical.htm) (In Russian).
19. *Klepikov V.B., Pshenichnikov D.A.* Costoyanie i tendencii razvitiya mikro- i nanoehlektromekhanicheskikh sistem, <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/23287> (In Russian).
20. *Sintez summatora nanokomp'yutera na osnove rezonansnyh ehlektromekhanicheskikh ehlementov*. V.K. Belik, V.P. Boyun, A.I. Klimovskaya, et al., Upr. sist. maš., 2014, N 1, P. 48–56. (In Russian).

