



УДК 681.33(4);004.3

В.К. Белик, канд. техн. наук
(Украина, 03187, Киев, e-mail: BilykVK@gmail.com)

Применение наноэлектромеханических систем для создания информационных моделей и специализированных вычислительных устройств

Исследованы возможности применения резонансных наноэлектромеханических систем (НЭМС) для создания некоторых информационных моделей и специализированных вычислительных устройств, а именно для моделирования элементов нейросистем и производных систем линейных алгебраических уравнений. Рассмотрены возможности создания специализированных вычислителей для быстрого поиска чисел в фиксированном массиве данных и для спектрального анализа сигналов (преобразований Фурье). Описаны некоторые характерные свойства НЭМС.

Досліджено можливості застосування резонансних наноелектромеханічних систем (НЕМС) для створення деяких інформаційних моделей і спеціалізованих обчислювальних пристроїв, а саме для моделювання елементів нейросистем і довільних систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Розглянуто можливості створення спеціалізованих обчислювачів для швидкого пошуку чисел у фіксованому масиві даних і для спектрального аналізу сигналів (перетворень Фур'є). Описано деякі характерні властивості НЕМС.

К л ю ч е в ы е с л о в а: наноэлектромеханические системы, резонансные четырех-полюсники, нейрон, аксон, матричные структуры, колебания.

Развитие и совершенствование аппаратных средств компьютеров осуществлялось в двух направлениях: повышение быстродействия и уменьшение габаритов. Соответственно изменялось и основное применение компьютеров — от ЭВМ коллективного пользования до персональных компьютеров. Дальнейшее уменьшение габаритов вычислительных устройств (ВУ) обусловило создание компьютеров, встроенных в объекты различного назначения.

К сожалению, дальнейшее линейное уменьшение габаритов ВУ приостановлено по двум причинам:

1) «тепловая стена», т.е. увеличение плотности элементов в интегральной схеме приводит к тому, что количество выделяемого тепла при ее работе больше, чем способность рассеивать его в окружающую среду — схема сгорает;

© В.К. Белик, 2016

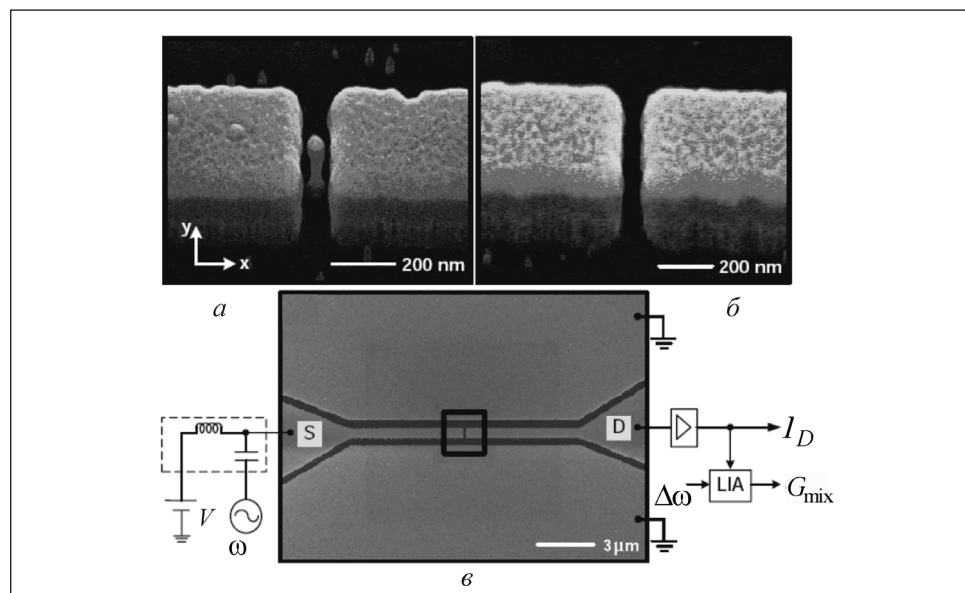


Рис. 1

2) необходимость учета физических явлений при размерах элементов схем менее 50 нанометров, что существенно усложняет синтез ВУ и обеспечение условий их надежной работы при нормальной температуре. Последнее связано, как правило, с применением громоздкой аппаратуры для создания низкой температуры и увеличивает общие габариты. (Последним достижением в уменьшении значения тока в логическом элементе является одноэлектронный транзистор, работающий при низкой температуре 10К [1].)

В результате научных исследований [2—5] одним из вариантов дальнейшего уменьшения габаритов устройств автоматики и ВУ стало применение нанoeлектромеханических систем (НЭМС), работа которых отличается от традиционных полупроводниковых элементов. При этом возможно снижение на порядок амплитуды (токов) информационных сигналов, что позволяет на два порядка уменьшить мощность нагрева ($P \sim I^2$) и соответственно увеличить плотность расположения элементов в интегральной схеме.

В работе [6] описан синтез сумматора для нанокomпьютера, построенного на основе НЭМС, в котором реализован оригинальный способ двоичного сложения, использующий аналоговое сложение (суперпозицию) синусоидальных сигналов резонансной частоты. Результаты этой работы защищены двумя патентами Украины [7, 8].

Рассмотрим возможность применения НЭМС для создания некоторых информационных моделей и специализированных ВУ.

Краткое описание НЭМС. В результате экспериментальных исследований (рис. 1) [2] было обнаружено протекание тока холодной электронной эмиссии между электродами, находящимися на расстоянии нескольких десятков нанометров один от другого (рис. 1, б). При этом размещение между электродами колебательного элемента (наностолбика с проводящей «шляпкой») (рис. 1, а) позволило уменьшить напряжение, при котором возникает ток, примерно в пять раз (рис. 2, кривые 1, 2).

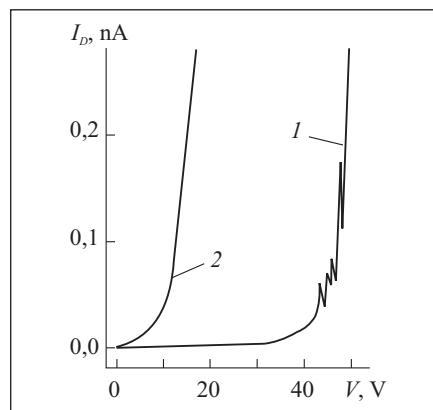


Рис. 2

На основании полученных результатов [9] запатентован прибор (рис. 3) (подобный транзистору) с электромеханическим переносом электронов, который на порядок меньше потребляет и рассеивает энергии по сравнению с обычным транзистором. К нему дополнительно может быть добавлен управляющий электрод G . Прилагаемое извне напряжение может быть постоянного и(или) переменного тока. Работа прибора в этом случае осуществляется в так называемом «мягком» режиме.

При изготовлении одного из электродов, например в виде заостренной спицы (см. рис. 4, а, слева внизу), в работе НЭМС обнаруживается гистерезис (рис. 4, б). Работу НЭМС в этом случае будем называть работой в «жестком» режиме. Это имеет существенное значение при создании пороговых элементов. Известно несколько видов возможной реализации колебательного элемента НЭМС, а именно: в виде наностолбика или нанотрубки (консоли), в виде наноструны или нанонити (закрепленных с двух сторон) и наномембраны [5].

НЭМС и резонансные четырехполюсники. Для построения на основе рассмотренного НЭМС ВУ и моделей рассмотрим два случая работы прибора: при питании переменным и постоянным током. С точностью до основной (резонансной) гармоники можно предположить, что при питании переменным током часть экспериментальной установки, находящаяся внутри прямоугольника (см. рис. 1, в), может быть представлена эквивалентным линейным пассивным четырехполюсником с П- или Т-схемой замещения [10]. Нетрудно понять, что элементами такого четырехполюсника являются реактивные сопротивления, а именно: емкости между электродами и наностолбиком и индуктивность, роль которой в данном случае выполняет ее механический аналог — колебательный элемент. При этом значения емкостей и индуктивности электрической схемы устанавли-

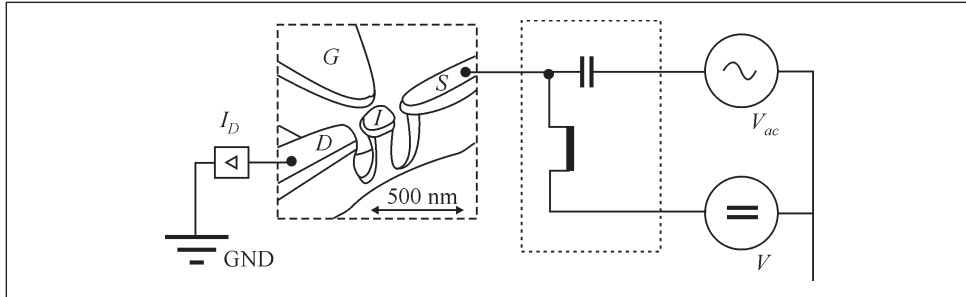


Рис. 3

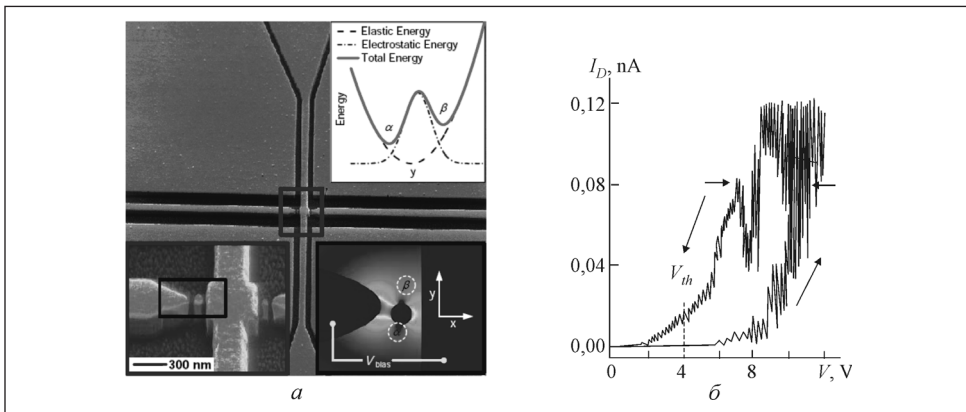


Рис. 4

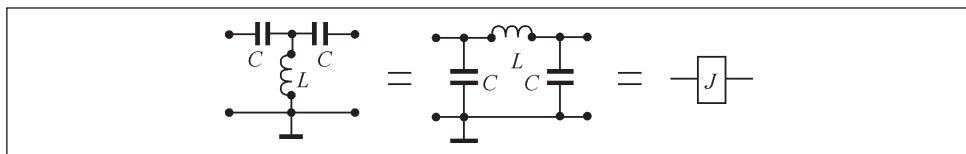


Рис. 5

ливаются в соответствии с известным условием резонанса $\omega L = 1/\omega C$. Следовательно, имеется резонансный четырехполюсник или электромеханический аналог обычного колебательного резонансного контура, схематически представленный на рис. 5, где символом J обозначен пассивный резонансный четырехполюсник.

В резонансном режиме, когда выполняется равенство $\omega L = 1/\omega C$, работа таких четырехполюсников описывается системами уравнений

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/j\omega C \\ 1/j\omega L & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix},$$

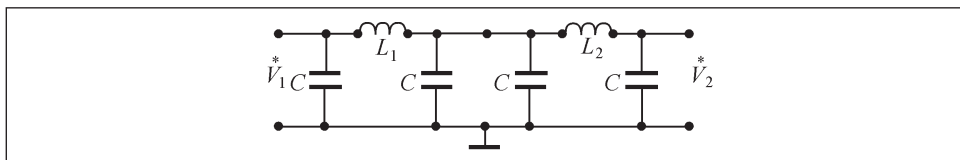


Рис. 6

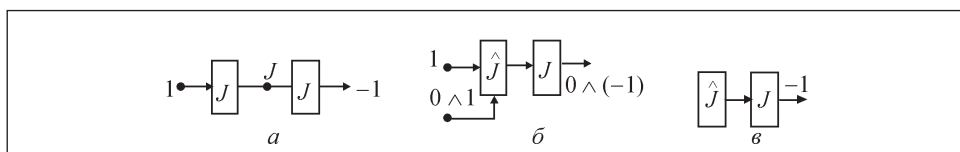


Рис. 7

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & j\omega L \\ j\omega C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix},$$

где \dot{V}_1, \dot{I}_1 и \dot{V}_2, \dot{I}_2 — входные и выходные комплексные значения напряжений и токов.

Рассмотрим последовательное соединение двух линейных резонансных четырехполюсников (рис. 6). Такому соединению соответствует математическое умножение матриц:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & j\omega L \\ j\omega C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & j\omega L \\ j\omega C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, получен инвертор входного сигнала: $\dot{V}_2 = -\dot{V}_1$. Если принять $\dot{V}_1 = 1$ и использовать условное обозначение J , то можно записать: $J \times J = -1$ (рис. 7, а). Если обозначить резонансный четырехполюсник, на вход которого подано постоянное напряжение (активный четырехполюсник), символом \hat{J} , то вариант применения электромеханического элемента с электродом управления (см. рис. 3) может быть изображен как показано на рис. 7, б. На рис. 7, в, с помощью принятых условных обозначений изображен источник синусоидальных колебаний (генератор, осциллятор).

Последовательному соединению многих четырехполюсников можно поставить в соответствие вращение вектора единичной длины на комплексной плоскости, принимающего значения $\{1, J, -1, -J\}$ (рис. 8). Проекция этого вектора на действительную ось будут соответствовать системе чисел $\{1, 0, -1\}$.

Рассмотрим параллельно-последовательное соединение резонансных четырехполюсников (рис. 9, а). Согласно первому закону Кирхгофа $\dot{V}_1 / L_1 + \dot{V}_2 / L_2 + \dot{V}_3 / L_3 = 0$. При условии $L_1 = L_2 = L_3$ для сигналов резонансной частоты (т.е. $\omega L = 1 / \omega C$) получим $\dot{V}_3 = -(\dot{V}_1 + \dot{V}_2)$.

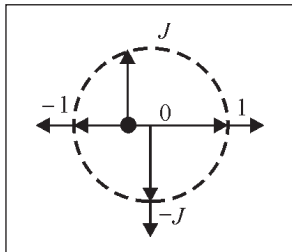


Рис. 8

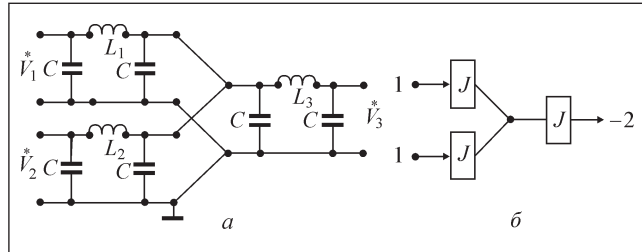


Рис. 9

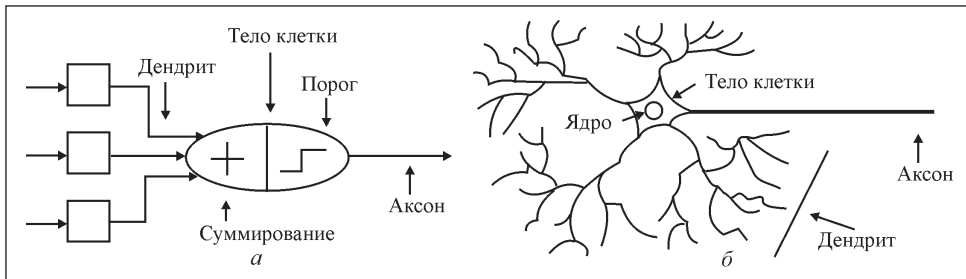


Рис. 10

Таким образом, получен сумматор амплитуд сигналов резонансной частоты с инверсией фазы. Если принять $\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = 1$, то с помощью принятых условных обозначений это может быть изображено, как на рис. 9, б.

Применение НЭМС для создания информационных моделей элементов нейронных сетей. На рис. 10, а, представлена схема биологического нейрона головного мозга, а на рис. 10, б, — его информационная модель. С учетом рассмотренных выше свойств НЭМС суммировать сигналы в линейном режиме, а также гистерезисных свойств — в нелинейном режиме, схему информационной модели нейрона, построенную на их основе, можно представить в виде, показанном на рис. 11, где X_i, Y — аналоговые (лучше — синфазные, но не обязательно) синусоидальные сигналы резонансной частоты, в общем случае разных амплитуд.

Как и в случае с нейроном, сигнал Y определенной амплитуды появится на выходе схемы лишь тогда, когда абсолютное значение суммы амплитуд входных сигналов X_i превысит значение порога соответствующего нелинейного элемента. При этом значения амплитуд входных сигналов X_i можно изменять, умножая их на весовые коэффициенты a_i в масштабных блоках: $a_i X_i$. Схема суммирования сигналов описана выше, а пороговый элемент приведен на рис. 4. Детектирование синусоидального сигнала может быть выполнено, например, посредством однополупериодного вы-

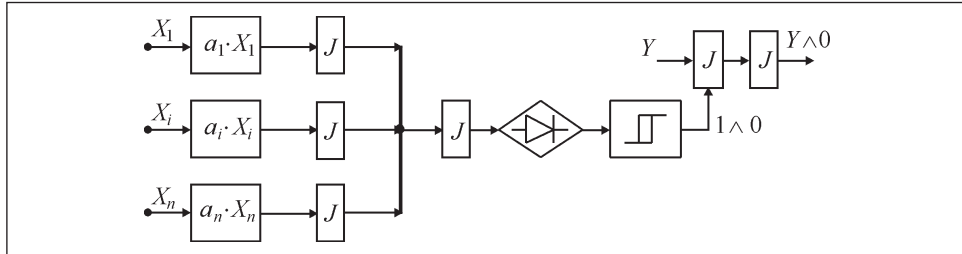


Рис. 11

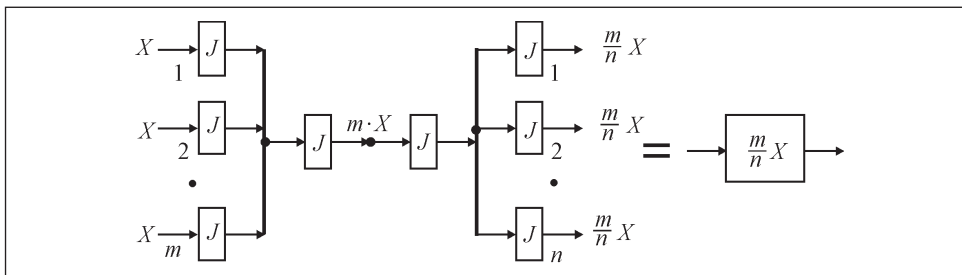


Рис. 12

прямления при параллельной подаче синхронно сигнала на управляющий вход НЭМС (см. рис. 3) или другим способом (см., например, [11]).

Необходимо отдельно рассмотреть схему масштабного блока. Предлагаемая схема масштабного блока $a_i X_i$ информационной модели нейрона на основе резонансных элементов — НЭМС приведена на рис. 12. Это — многополюсник с m входами и n выходами, состоящий из однородных J элементов. Очевидно, что масштабный коэффициент здесь может изменяться в пределах от $1/n$ до m . Возможно упрощение этой схемы (рис. 13) до двухполюсника.

Информационная модель аксона может быть представлена в виде модели электрической линии с распределенными параметрами. Из теории электротехники известно об аналогии уравнений, описывающих линии с распределенными параметрами, и схемой, представляющей собой последовательное соединение нескольких одинаковых симметричных четырехполюсников. В случае протекания переменного (синусоидального) тока однородная линия с распределенными параметрами с волновым сопротивлением $Z_c = \sqrt{L/C}$ может быть заменена схемой цепи из симметричных резонансных четырехполюсников, состоящих из реактивных сопротивлений L и C (при выполнении условия $\omega L = 1/\omega C$). Поэтому можно представить информационную модель аксона в виде последовательного (одномерного,

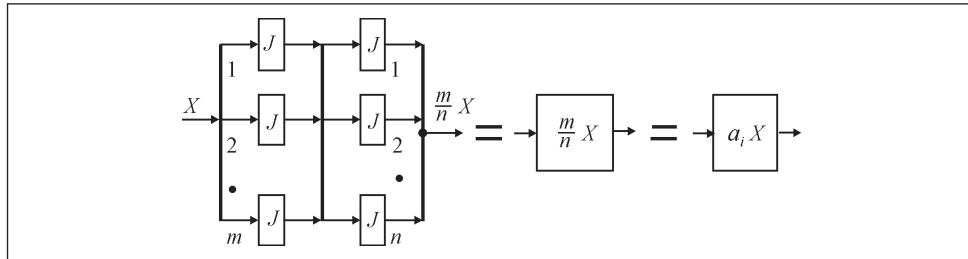


Рис. 13

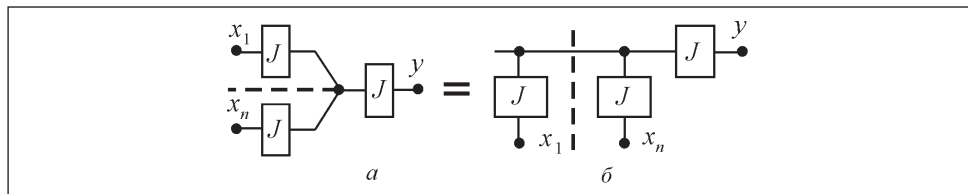


Рис. 14

нитевидного) соединения резонансных электромеханических элементов. Переходный процесс в таких схемах будет развиваться в виде амплитудно-модулированного сигнала в соответствии с одномерным волновым уравнением $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$, где u — напряжение, а v — скорость распространения волны.

Рассмотренное соединение четырехполюсников на практике может быть реализовано посредством соединения НЭМС в виде гребенки из наностолбиков (консолей) [4] или последовательного (цепного) соединения нитей (струн), или мембран [5].

Построение двухмерных, или матричных структур. На рис. 14, а, приведена схема аналогового сумматора, построенная на основе рассмотренных выше резонансных элементов, соответствующая рис. 9, б, а на рис. 14, б, — она же в виде, соответствующем уравнению $y = -\sum x_i$. Это схема скалятора.

На рис. 15 приведена построенная на основе резонансных электромеханических элементов НЭМС схема, моделирующая систему линейных алгебраических уравнений $Y = AX$, которая подобна известной схеме, состоящей из реактивных проводимостей: индуктивностей и емкостей [12]. Особенностью этой схемы является обратимость ее элементов и схемы в целом. Поэтому, например, если после установки в схеме значений коэффициентов матрицы A задать на ее входах (полюсы x) значения компонент вектора X , то в результате переходного процесса в схеме (по часовой стрелке) получим на выходах y значения компонент вектора Y , и наоборот, если подать на входы (полюсы y) схемы значения компонент вектора Y , то

в результате переходного процесса в схеме (против часовой стрелки на рис. 15) получим на оставшихся полюсах x значения компонент вектора X без обращения матрицы A .

Как известно из теории матриц, псевдообратная матрица существует для любого вида матриц и определяется единственным способом. Поэтому на основе обратимых резонансных электромеханических элементов могут быть построены аналоговые модели любой системы линейных алгебраических уравнений, в том числе недоопределенной, переопределенной и даже системы с особой матрицей коэффициентов [13]. При этом может быть получено приближенное решение уравнения, наилучшее по методу наименьших квадратов.

Достоинством предложенной схемы по сравнению с известной [12] является однородность используемых элементов (J). Недостатки она имеет такие же, как аналоговые моделирующие устройства, а именно: фиксированный размер матрицы, низкая точность результатов, необходимость в масштабировании и ограничение на диапазон задания исходных данных, которые могут быть связаны и с физической реализуемостью моделей.

Применение НЭМС при использовании частоты колебаний в качестве информационного признака. Использование сигналов переменного тока в резонансных нанозлектромеханических элементах, в отличие от потенциальных (импульсных) сигналов в традиционных элементах, дает дополнительные возможности для реализации ВУ. Рассмотрим несколько примеров использования частоты переменного тока в качестве информационного признака.

На рис. 16 изображен пример реализации низкочастотного фильтра для очищения полезного сигнала от высокочастотных помех [14]. Полоса пропускания фильтра определяется разбросом резонансных частот (высот) искусственно выращенных наностолбиков (консолей). Допустим, что достаточно отработана технология выращивания массивов наностолбиков, подобных приведенным на рис. 16, с заданными характеристиками, например длинами столбиков и, соответственно, резонансными частотами. Тогда можно (как в случае с постоянным запоминающим устройством) записать массив данных, реализованных на основе использования НЭМС. В этом случае длина столбика будет соответствовать конкретному числу информационного массива (значению частоты).

В результате понесенные на этапе формирования массива базы данных значительные начальные затраты могут оказаться компенсированными за счет простого и быстрого поиска требуемых данных. Действительно, в этом случае достаточно на вход такого устройства подать сигнал, частота которого соответствует искомому числу, как на выходе устройст-

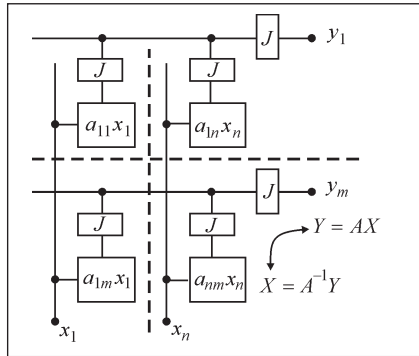


Рис. 15

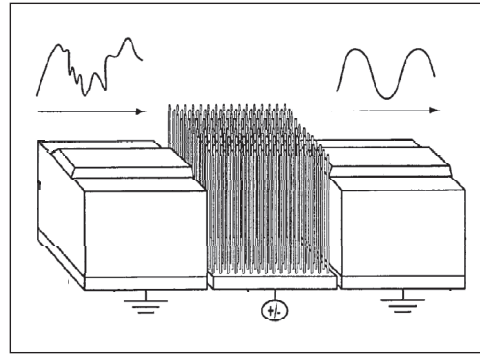


Рис. 16

ва почти мгновенно появится ответ «да» или «нет». По крайней мере, это интересный пример поиска «иголки в стоге сена» без перебора всего массива.

Далее, допустим, что технология позволяет выращивать массивы наностолбиков различной длины (частоты) и такие, что можно сосчитать адрес того наностолбика, резонансная частота колебаний которого равна основной частоте входного сигнала. В этом случае также значительные начальные затраты на изготовление устройства будут компенсированы затем простотой и скоростью гармонического анализа исследуемых сигналов (преобразования Фурье).

Вместо наностолбиков различной длины могут быть использованы различной длины нити (струны). На рис. 17 представлено изображение, полученное с помощью электронного микроскопа, где в качестве НЭМС использованы нанотрубки, закрепленные на двух концах [15]. Изображенный экспериментальный образец изготовлен с применением литографии и травления. Более перспективной в настоящее время является технология выращивания НЭМС [16]. Известно, что НЭМС широко применяются в качестве различных датчиков систем автоматики, которые обладают предельно высокими характеристиками.

Некоторые характерные свойства НЭМС. Использование колебательного элемента в составе резонансных электромеханических элементов придает им некоторые новые свойства по сравнению с традиционно используемыми элементами вычислительной техники.

Дискретизация. Информационный аналоговый сигнал $s_c(t)$ (рис. 18, а) на рис. 18, б, представлен в виде амплитудно-модулированного сигнала $S_{AM}(t)$, в котором он существует в резонансных электромеханических элементах [11]. Сравнивая эти кривые, видим, что в резонансных электромеханических

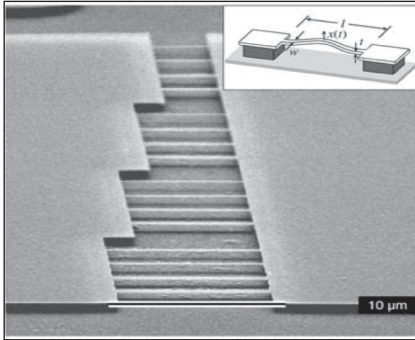


Рис. 17

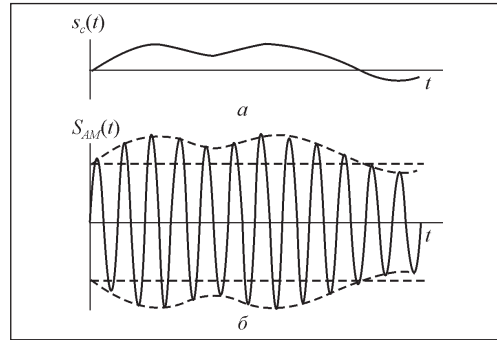


Рис. 18

ханических элементах информационный сигнал квантуется во времени. Действительно, измерение значения амплитуды информационного сигнала возможно лишь периодически, с частотой высокочастотного колебания. При этом измерение амплитуды информационного сигнала во время его распространения вдоль цепочки элементов возможно также лишь в дискретных точках и в пространстве, а именно с интервалом не меньше, чем размер одного четырехполюсника J . Если измерять лишь действительные значения амплитуды информационного сигнала, то минимальный шаг измерения равен размеру двух последовательных элементов.

Соотношение неопределенности. Из рис. 18 видно, что невозможно измерить одновременно значение «координаты» $s_c(t)$, т.е. амплитуды синусоиды $S_{AM}(t)$, и значение скорости $\dot{s}_c(t)$. Очевидно, необходимо дождаться хотя бы еще одного очередного значения синусоиды для того, чтобы определить хотя бы одно приращение $\Delta s_c(t)$. Поэтому временной интервал между измерениями координаты и скорости в данном случае не может быть меньше периода колебаний несущей частоты.

Информационная обратимость. Резонансные электромеханические элементы в целом и НЭМС в частности являются электрически (информационно) обратимыми элементами. Также обратимы и аналоговые модели на их основе (см. рис. 15). Поэтому, если, например, в модели алгебраических уравнений изменить значение сигнала на любом полюсе, то это неизбежно вызовет изменение на всех остальных полюсах в соответствии с матрицей уравнений и изменившимися условиями (значениями сигналов на полюсах).

Достоинства устройств на основе НЭМС. Первое достоинство НЭМС — обеспечение возможности качественного перехода от операций с действительными числами на числовом отрезке 0—1 (рис. 19) в двоичной системе «0» и «1» к операциям в комплексной плоскости. В частности,

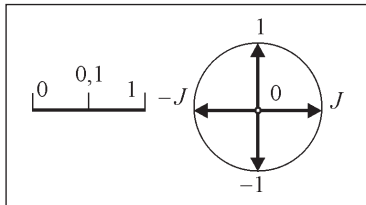


Рис. 19

переход к действиям с единичными векторами со значениями $\{1, J, -1, -J\}$ и (или) в системе исчисления в троичной (избыточной) логике $\{1, 0, -1\}$, известной также как знаковый код [17].

Вторым достоинством НЭМС является обеспечение качественного перехода от традиционно используемой управляемой проводимости для создания элементов вычислительной техники к элементам,

в которых используются явления колебаний и резонанса. Это, во-первых, существенно увеличивает арсенал средств для создания алгоритмов вычислений и технических средств для их реализации, например посредством дополнительного использования теории колебаний. Во-вторых, явления колебаний (вращений) и резонансов характерны для квантовых объектов, поэтому результаты исследования наномеханических устройств вычислительной техники могут оказаться полезными и при создании квантовых вычислительных устройств.

К другим достоинствам устройств на основе НЭМС по сравнению с традиционными полупроводниковыми элементами можно отнести возможность иной реализации «проблемных» алгоритмов (поиска чисел в массиве, преобразования Фурье).

Недостатком устройств на основе НЭМС является определенная сложность технической реализации.

Выводы

Таким образом, НЭМС позволяют осуществить качественный переход от традиционного использования управляемой проводимости для создания элементов вычислительной техники к применению элементов, в которых используются явления колебаний и резонанса. При этом стал возможен переход от двоичной логики к троичной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim S.J., Lee J.J., Kang H.J. et al. One electron-based smallest flexible logic cell// Appl. Phys. Lett. — 101. — 2012. — 183101. — P. 1—4.
2. Heun S. Kim, Hua Qin, Robert H. Blick. Self excitation of nano-mechanical pillar// New J. of Physics. — 2010. — No. 12. 033008. — P. 1—11.
3. Robert H Blick, Hua Qin, Hyun-Seok Kim, Robert Marsland. A nanomechanical computer—exploring new avenues of computing. New J. of Physics. — 2007. — No. 9. 241. — P. 1—9.
4. Patent US 2008 / 7,414,437 B1. Nanomechanical computer. / Robert Blick, Robert Marsland.
5. Белик В.К., Климовская А.И., Журавская И.О. Наноконьютер: перспективы создания. Обзор. // УСиМ. — 2013. — № 5. — С. 65—71.

6. Белик В.К., Боюн В.П., Климовская А.И., Палагин А.В. Синтез сумматора наноконьютера на основе резонансных электромеханических элементов // УСиМ. — 2014. — № 1. — С. 48—56.
7. Пат. UA №107131. Двійковий суматор /Палагін О.В., Боюн В.П., Клімовська А.І. та ін.— Опубл. 25.11.2014, Бюл. № 22.
8. Пат. UA № 107130. Спосіб двійкового додавання/віднімання / Палагін О.В., Боюн В.П., Клімовська А.І та ін. — Опубл. 25.11.2014, Бюл. № 22.
9. Pat. US 2005/6,946,693 B1. Electromechanical electron transfer devices / Dominik V. Scheible, Robert H. Blick.
10. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высш. шк, 1964. — 750 с.
11. Pat. US 2010/0271003 A1. Nanotube resonator devices/ Kenneth J. Jensen, Alexander K. Zettl, Jeffrey A. Weldon.
12. А.С. СССР № 141646. Матричная модель системы линейных алгебраических уравнений/Пухов Г.Е., Борковский Б.А. — Бюл. изобрет. — № 19, 1961.
13. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. — М.: Наука, 1988. — 548 с.
14. Pat. US 2007/7,157,990 B1. Radio frequency device and method using a carbon nanotube array / John Douglas Adam, Robert Miles Young.
15. Ekinci K. L. Electromechanical Transducers at the Nanoscale: Actuation and Sensing of Motion in Nanoelectromechanical Systems (NEMS)// Nanoelectromechanical systems, J. small 2005, 1, No. 8—9, P. 786—797.
16. Klimovskaya A.I., Sarikov A.V., Pedchenko Yu. N. et al. Growth of silicon nanowires suitable for NEM device applications // E-MRS 2012 Spring Meeting, Symposium L, L8P, 43.
17. Пухов Г.Е., Евдокимов В.Ф. Знаковый код и особенности его применения в разрядных неалгоритмических машинах//Сб. трудов семинара «Математическое моделирование и теория электрических цепей.» Под ред. Г.Е. Пухова. — 1973. — Вып. 11. — С. 18—20.

V.K. Belik

THE USE OF NANOELECTROMECHANICAL SYSTEMS TO CREATE SOME INFORMATION MODELS AND SPECIALIZED COMPUTING DEVICES

Possible application of resonant nanoelectromechanical systems (NEMS) for creation of some information models and specialized computing devices has been investigated. Namely, they were used for modeling the neurosystem elements and arbitrary systems of linear algebraic equations. The possibility of creating specialized calculators for fast search of numbers in a fixed array for spectral data and signal analysis (Fourier transform) were considered. We have described some characteristic properties of the NEMS.

Keywords: nanoelectromechanical system, resonant four-poles, neuron, axon, matrix structures, oscillations.

REFERENCES

1. Kim, S.J., Lee, J.J., Kang, H.J., Choi, Y.-S. Yu et al. (2012), One electron-based smallest flexible logic cell, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 101, 183101, pp. 1-4.
2. Heun, S. Kim, Hua Qin and Blick, R.H. (2010), Self excitation of nano-mechanical pillar, *New Journal of Physics*, no. 12, 033008, pp.1-11.
3. Blick, R.H., Hua Qin, Hyun-Seok Kim and Marsland, R. (2007), A nanomechanical computer-exploring new avenues of computing, *New Journal of Physics*, Vol. 241, no. 9, pp. 1-9.

4. Blick, R. and Marsland, R. (2008), Patent US 2008 / 7,414,437 B1, Nanomechanical computer.
5. Belik, V.K., Klimovskaya, A.I. and Zhuravskaya I.O. (2013), “Nanocomputer: creation prospects. Review”, *USiM*, no. 5, pp. 65-71.
6. Belik, V.K., Boyun, V.P., Klimovskaya, A.I. and Palagin, A.V. (2014), “Synthesis adder nanocomputer based on resonant electromechanical elements”, *USiM*, no. 1, pp. 48-56.
7. Palagin, O.V., Boyun, V.P., Klimovska, A.I. et al. (2014), Patent UA №107131, “Binary adder”, Bulletin no. 22.
8. Palagin, O.V., Boyun, V.P., Klimovska, A.I. et al. (2014), Patent UA No. 107130, “Method of binary addition / subtraction”, Bulletin no. 22.
9. Scheible, D.V. and Blick, R.H. (2005), Patent US 2005 / 6,946,693 B1, Electromechanical electron transfer devices.
10. Bessonov, L.A. (1964), *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering], Vysshaya shkola, Moscow, USSR.
11. Jensen, K.J., Zettl, A.K., Weldon, J.A. (2010), Patent US 2010/0271003 A1, Nanotube resonator devices.
12. Author's certificate of the USSR №141646 (1961), “Matrix model of a system of linear algebraic equations”, Pukhov, G.E. and Borkowski, B.A., Bull. izobret., no. 19.
13. Gantmakher, F.R. (1988), *Teoriya matrits* [The theory of matrices], Nauka, Moscow, USSR.
14. Adam, J.D. and Young, R.M. (2007), Patent US 2007 / 7,157,990 B1, Radio frequency device and method using a carbon nanotube array.
15. Ekinci, K.L. (2005), Electromechanical Transducers at the Nanoscale: Actuation and Sensing of Motion in Nanoelectromechanical Systems (NEMS), *Nanoelectromechanical systems J. small*, no. 8-9, pp. 786 -797.
16. Klimovskaya, A.I., Sarikov, A.V., Pedchenko, Yu.N. et al. (2012), Growth of silicon nanowires suitable for NEM device applications, *E-MRS 2012 Spring Meeting, Symposium L, L8P, 43*, Ukraine.
17. Pukhov, G.E. and Evdokimov, V.F. (1973), “The sign code and especially its application in non-algorithmic bit machines”, *Sbornik trudov seminar, Matematicheskoe modelirovanie i teoriya elektricheskikh tsepei*, ed by Pukhov, G.E., Iss. 11, pp. 18-20.

Поступила 05.05.16

БЕЛИК Виктор Кириллович, канд. техн. наук. В 1963 г. окончил Харьковский политехнический ин-т. Область научных исследований — аппаратные средства компьютера (устройства вычислительной техники).