

# СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ<sup>1</sup>

А. П. Адамов, А. А. Адамова

## *Введение*

Современные мировые тенденции развития микроэлектронной промышленности связаны с повышением надежности и непрерывным улучшением показателей качества перспективных изделий микро- и нанoeлектроники. Микроэлектронная промышленность является мета-системой для электронной компонентной базы изделий. Для оценки надежности системы, выбора показателей качества, описания связей системы и мета-системы используется системный анализ и системный подход [1]. Проблема компактного визуального представления многофакторной и сложносвязанной информации является одной из основных в современных проектных процедурах. Рассмотрим методы и подходы визуального семантического анализа сложных систем и процессов на примерах перспективных объектов и процессов микро- и нанoeлектроники.

Системный подход представляет собой совокупность методов и средств, позволяющих исследовать свойства, структуру и функции объектов и процессов в целом, представив их в качестве систем со сложными межэлементными взаимосвязями, взаимовлиянием самой системы на ее структурные элементы [2].

Системный подход заключается в рассмотрении элементов системы как взаимосвязанных и взаимодействующих для достижения глобальной цели функционирования системы. Особенностью системного подхода является оптимизация функционирования не отдельных элементов, а всей системы в целом.

В последние годы для прорывных решений в микро- и нанoeлектронике наибольшее значение приобретают электромеханические свойства используемых материалов. Одним из новых материалов является графен – двумерная аллотропная модификация углерода. Уникальные свойства графена обуславливаются особенностями взаимодействия электронов в двумерной кристаллической структуре. Атомы углерода в кристаллической структуре графена обладают четырьмя валентными электронами. Три электрона образуют  $sp^2$ гибридизованные орбитали, формирующие ковалентные связи с соседними атомами.  $sp^2$ гибридизованные орбитали расположены в одной плоскости под углами  $120^\circ$ . Четвертый электрон атома углерода отвечает за низкоэнергетические электронные свойства графена. Данный электрон образует  $2p_z$  орбиталь, перпендикулярную к плоскости  $sp^2$ гибридизованных орбиталей. Кристаллическая решетка графена имеет гексагональную структуру, являющуюся совокупностью двух треугольных подрешеток. В кристаллической решетке графена электроны ведут себя как безмассовые переносчики тока, что позволяет использовать эффекты квантовой физики для описания поведения материала при различных внешних воздействиях. Для графена характерны парадокс Клейна, эффект дрожания электронов, квантовый эффект Холла, амбиполярность.

Модуль Юнга одного слоя графена равен  $\sim 1,0$  ТПа. Коэффициент жесткости графена превышает коэффициент жесткости алмаза. Экспериментально подтвержденный предел прочности графена на разрыв составляет  $\sim 42$  Н·м<sup>-1</sup>. На сегодняшний день графен является одним из самых прочных материалов, исследованных в лаборатории.

Открытие графена, сделанное в 2004 г. двумя учеными-физиками Андреем Геймом и Константином Новоселовым, подтвердило положения, сформулированные П. Воллеса о свойствах графита, который еще в 1947 г. показал, что структура этого материала аналогична металлам и некоторые его характеристики подобны тем, какими обладают ультрарелятивистские частицы, нейтрино и безмассовые фотоны. Российские ученые создали углеродную пластину, более твер-

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по Гранту РФФИ №17-07-00689.

дую, чем алмаз, толщина которой при этом составила всего один атом. Полученный углерод в свободном состоянии исследователи назвали графеном. В новом материале обнаружилось уникальные физические свойства. Результаты своей работы вместе с описанием способа получения графена на подложке окисленного кремния Гейм и Новоселов опубликовали в журнале Science [4–8].

Несмотря на высокие прочностные характеристики, графен обладает гибкостью и эластичностью. Для графена допустима 20 %-я деформация без нарушения его кристаллической структуры.

Монослой графена обладает чрезвычайно высокой теплопроводностью  $\sim 5000$  Вт/(м·град). По теплопроводности графен в 3 раза превосходит медь, активно используемую в теплоотводных устройствах [9].

Наибольший интерес представляют уникальные электрические свойства графена. Максимальная подвижность носителей тока в монослое графена  $\mu \sim 10^6$ – $10^7$  см<sup>2</sup>/Вт·с. При размещении слоя графена на поверхности оксида кремния подвижность носителей заряда более чем в 20 раз превышает аналогичный показатель для кремния. Столь большие значения  $\mu$  обусловлены нулевой массой носителей заряда – амбиполярных пар «электрон-дырка» в графене. Также графен позволяет получать экстремально высокие магнитные поля.

Проблема широкого применения материала с такими феноменальными свойствами кроется в методах получения графеновых наноструктур. Наиболее прорывные исследования направлены на разработку перспективных технологий синтеза графеновых структур и конструкций из них. В своей работе К. С. Новоселов и А. К. Гейм предложили метод получения графена методом пилинга – расслоения графита. При трении графитового стержня об окисленную поверхность кремния на SiO<sub>2</sub> остаются чешуйки наноструктур, которые можно наблюдать в оптический микроскоп по интерференционной картине [4–8]. Метод пилинга прост и позволяет получать образцы высокого качества для лабораторных исследований. Однако данный метод не позволяет осуществлять производство графена в промышленных масштабах. Метод промышленного производства графена был описан и запатентован группой американских ученых лишь в 2016 г. Следует ожидать, что внимание ученых в ближайшее время будет сконцентрировано на вопросах технологической подготовки производства и адаптации технологических процессов к требованиям синтеза графеновых структур.

#### ***Анализ методов подготовки производства с точки зрения повышения надежности и увеличения ключевых показателей качества изделия***

Совокупность уникальных свойств графена, обусловленных его кристаллической структурой, позволяет отнести данный материал к метаматериалам. Графен как метаматериал является средой для управления плазмонами в терагерцовой части спектра электромагнитных волн. Плазмон (квант плазменных колебаний) является квазичастицей, возникающей в приповерхностном слое в результате коллективных колебаний электронов относительно ионов. В случае графена возникновение плазмонов обуславливается внешним облучением поверхности. Плазмоны могут быть рассмотрены как средство передачи информации на сверхвысоких частотах. Данная информация требует систематизации и формализации.

С позиции системного анализа для формализации разнородной информации по межпредметной области следует использовать когнитивные семантические конструкции, например в виде СМАП карт (рис. 1) [10, 11]. Маршруты проектирования микро- и наносистем можно представить в виде иерархического семантического дерева, верхним уровнем декомпозиции которого является блок «Маршруты проектирования микро- и наносистем».

Создание новых видов продукции осуществляется в процессе подготовки производства [12]. Задача подготовки производства состоит в том, чтобы обеспечить необходимые условия для функционирования производственного процесса. Подготовка производства – это процесс непосредственного приложения труда коллектива работников в целях разработки и организации выпуска новых видов продукции или модернизации изготавливаемых изделий. Процесс подготовки производства представляет собой особый вид деятельности, совмещающий выработку научно-технической информации с ее превращением в материальный объект – новую продукцию [13].

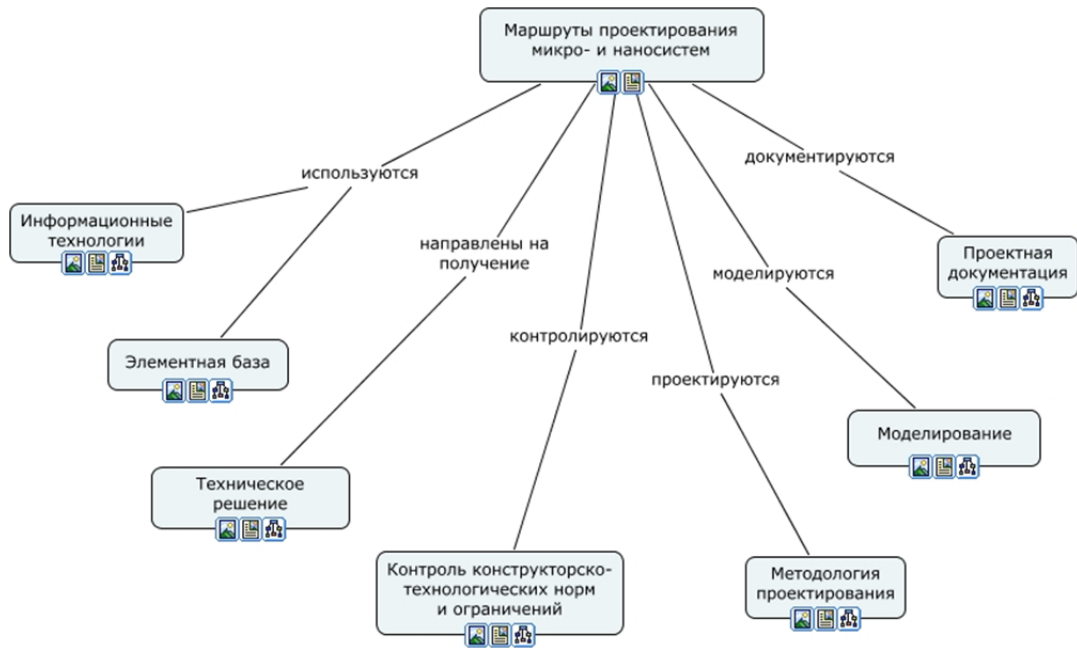


Рис. 1. Структура области знаний «Маршруты проектирования микро- и наносистем»

Аналогично маршруты производства могут быть представлены в виде семантического дерева на рис. 2.

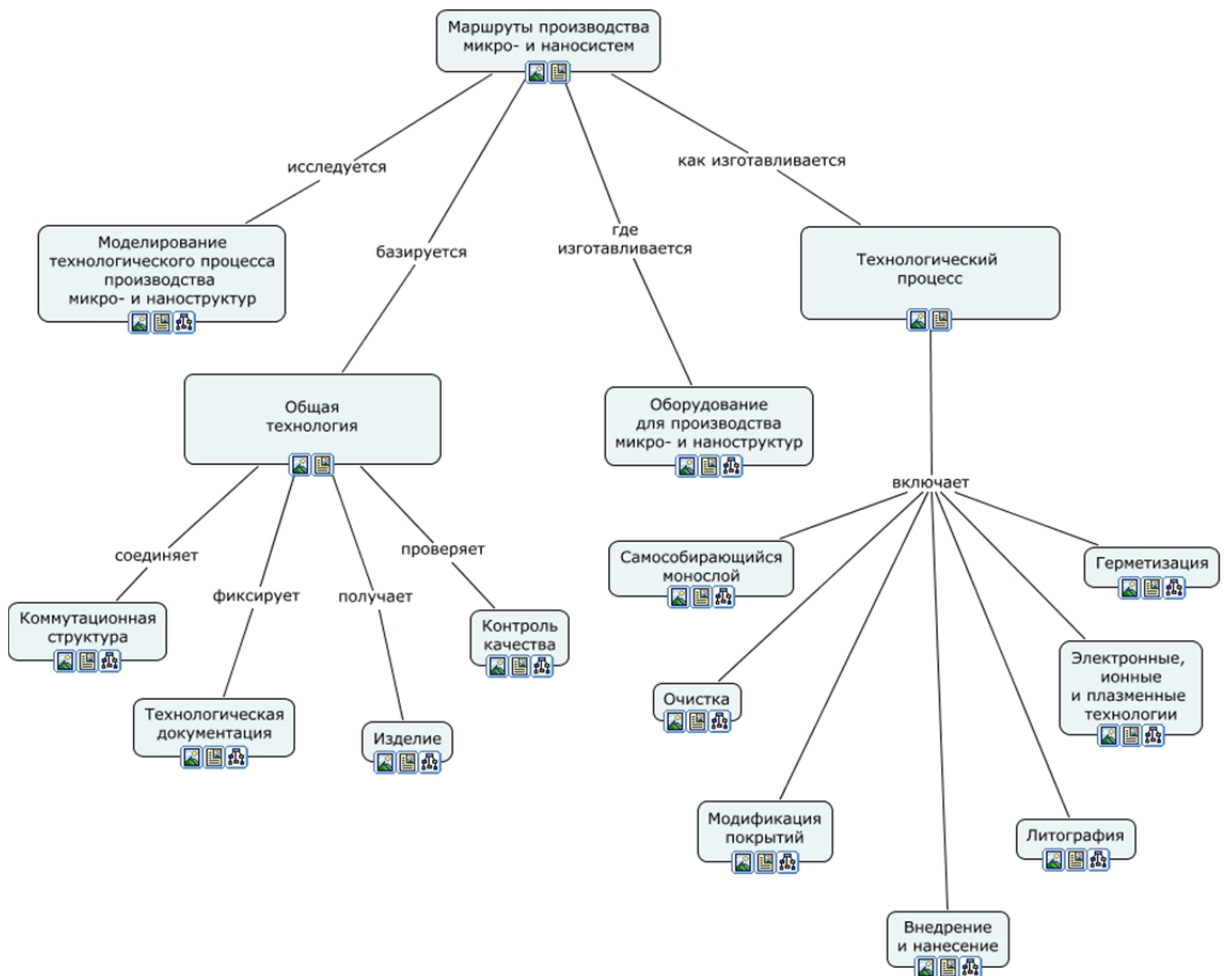


Рис. 2. Структура области знаний «Маршруты производства микро- и наносистем»

При синтезе новой компонентной базы, в том числе на основе графена, необходимо уделять повышенное внимание вопросам технологической подготовки производства, обеспечения качества и технологичности. Технологичность должна обеспечиваться с самых ранних стадий конструкторско-технологического проектирования и производства. Для нормирования технологичности и ее формирования в процессе разработки изделий электронной техники установлена система оценок технологического качества (ТК) изделий. Под оценкой ТК изделия понимают комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающих последовательное выявление технологичности отдельных составных элементов изделия в целом на основе сопоставления выявленных свойств данного изделия со свойствами изделия-аналога, которое принято в качестве базы сравнения, и представление результатов сопоставления в форме, приемлемой и, по мнению специалистов, оптимальной для принятия управленческих решений по совершенствованию анализируемой конструкции разрабатываемого изделия и технологии его изготовления [14–18]. Достоверные и своевременные оценки ТК изделий занимают важное место в комплексной системе обеспечения их технологичности, так как влияют непосредственно на эффективность обработки изделий на технологичность.

### Анализ подходов к синтезу элементной базы на основе графена

Синтез новой элементной базы – сложная, многовариантная задача, которая может быть обобщена в виде следующей иерархии, отражающей вариативность решений (рис. 3).

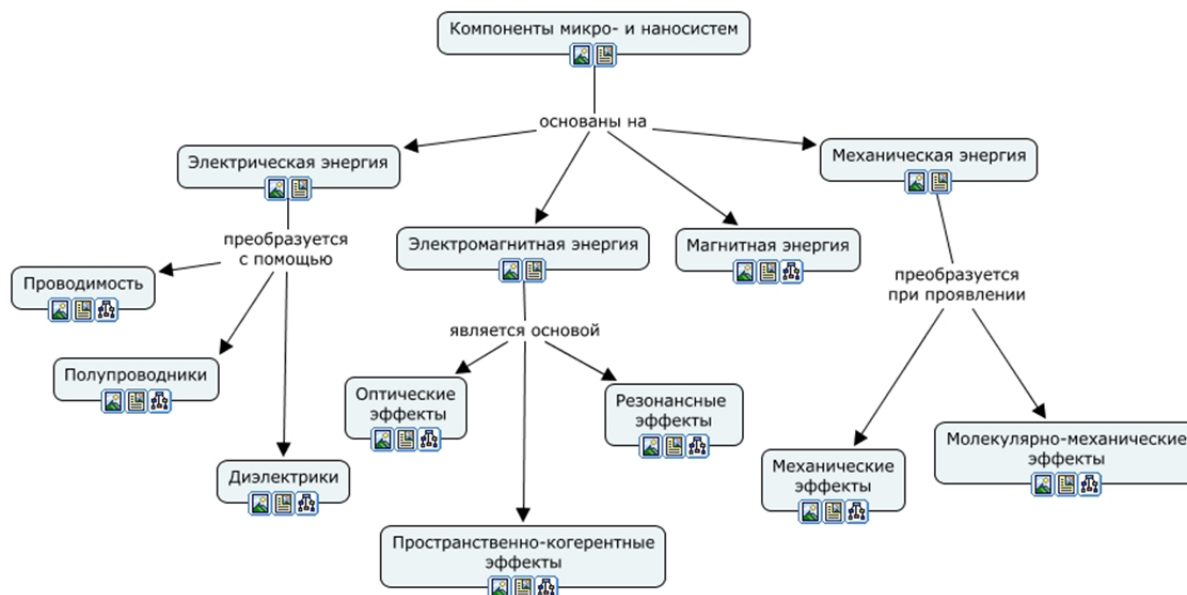


Рис. 3. Структура области знаний «Компоненты микро- и наносистем»

На сегодняшний день основой любого микроэлектронного устройства является транзистор. Использование графена для формирования транзисторных структур позволяет не только значительно увеличить механическую прочность структуры, но и значительно повысить предельную частоту работы транзистора.

Графеновые транзисторы могут корректно работать в гигагерцовом диапазоне частот, что соответствует миллиметровому диапазону длин волн. В терагерцовом диапазоне у графена проявляются свойства метаматериала. На сегодняшний день в лабораторных условиях получен транзистор с предельной частотой  $f_{\text{пред}} = 155$  ГГц. Стоит отметить, что предельная частота работы транзистора остается практически неизменной при охлаждении до сверхнизких температур, что делает возможным использование графеновой микроэлектроники в космосе [19].

Использование свойств графена как метаматериала позволяет не только улучшать параметры элементов микросхем, но и создавать новые элементы с уникальными свойствами. Амбиполярность графена позволяет управлять типом основных носителей заряда, т.е. переключаться между электронами и дырками посредством соответствующего управляющего воздействия. Опи-

санное свойство дает начало развитию новой отрасли схемотехники, получившей название амби-полярная схемотехника.

Амбиполярный транспорт квазичастиц позволяет дозированно использовать как электронную, так и дырочную проводимость в рамках одного транзистора без изменения его конфигурации. В качестве примера рассмотрим МДП-усилитель на графеновом транзисторе (рис. 4).

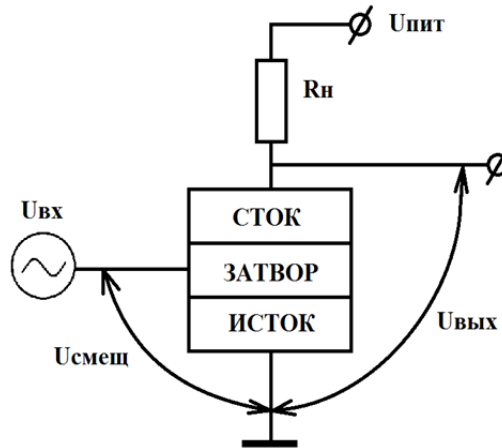


Рис. 4. Универсальная усилительная схема с графеновым МДП-транзистором

При изменении управляющего сигнала на затворе в цепи может быть сконфигурирован *n*-канальный транзистор, *p*-канальный транзистор, транзистор, использующий суперпозицию двух типов проводимости. На амбиполярной вольт-амперной характеристике выделяют три характерные рабочие точки: минимум ВАХ (точка с минимальной проводимостью), точка, в которой напряжение смещения больше минимального, точка, в которой напряжение смещения меньше минимального (рис. 5).

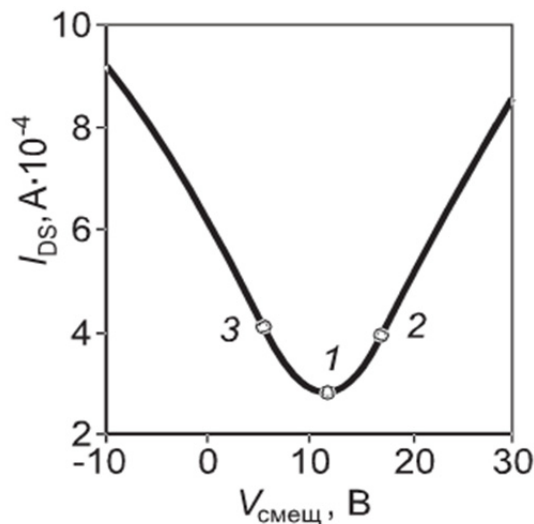


Рис. 5. ВАХ мемристора [1]

Устанавливая рабочую точку транзистора в одно из трех положений, можно получить три режима работы схемы только лишь путем изменения управляющего воздействия. В случае амби-полярного МДП-усилителя этими режимами будут режимы усилителя, инвертора и нелинейного преобразователя напряжения.

Амбиполярная структура может быть использована как для аналоговой, так и для цифровой схемотехники. Специализация структуры определяется симметричностью ВАХ относительно минимального значения напряжения (точки Дирака, в которой вклад электронов и дырок в перенос заряда одинаков). Специализация амбиполярной структуры производится путем сдвига точки

Дирака вдоль оси напряжения смещения. Следовательно, амбиполярный характер проводимости графена позволяет создавать универсальные сверхбыстрые транзисторы, что может существенно сократить габаритные размеры микросхем и повысить их частотные характеристики [19].

Уникальная кристаллическая структура графена позволила создавать новые элементы. Принципы реализации графенового гибкого сенсорного экрана с интегрированным аналого-цифровым преобразователем рассмотрены в [20]. Создаются новые сенсорные элементы с чувствительными элементами на основе графена [21, 22]. В 2008 г. появились работы по созданию пассивных элементов – мемристоров, теоретическое описание которого было дано профессором Леоном Чуа в 1974 г. Мемристор представляет собой двухполюсник с нелинейной ВАХ, обладающей гистерезисом. Мемристор устанавливает связь между зарядом и магнитным потоком. Наличие гистерезиса в ВАХ мемристора позволяет использовать данный схемный элемент в качестве ячейки памяти.

Мемристор может выступать в качестве универсального схемного элемента. Его сопротивление зависит от того, как долго по элементу протекал электрический ток. Теоретически мемристоры могут не только заменить собой транзисторы, но и увеличить их функциональные возможности.

Сверхвысокие частоты работы графеновых мемристоров позволяют использовать их вместо ячеек флеш-памяти. При отключении напряжения питания на мемристоре будет сохраняться последнее установленное значение электрического сопротивления. При этом состояние мемристора останется неизменным при протекании по нему коротких импульсов тока. Следовательно, использование мемристоров позволяет получить новый высоконадежный и сверхбыстрый тип энергонезависимой памяти.

Использование мемристоров позволяет многократно перепрограммировать готовую систему для расширения или даже полного изменения ее функциональных возможностей. Возможность полного изменения системы с помощью изменения управляющих воздействий может быть использована для эмулирования работы нейронов и создания на основе мемристоров нейросетей и гибких реконфигурируемых систем искусственного интеллекта [23].

Предложенный системный подход с применением визуальных семантических инструментов формализации знаний к решению задач генерационного синтеза элементной базы и технологических маршрутов микро- и наносистем на основе контекстной модели базисных типов сущностей предметной области технологий микро- и наносистем зарекомендовал себя эффективным и комплексным методом. Руководствуясь им, появляется уникальная возможность структуризации, комплексного анализа и обобщения знаний в виде онтологии комплекса научных, технических и технологических знаний по технологиям микро- и наносистем. Возможности системной каталогизации и обеспечения доступа к семантическим ресурсам по предметной области способствуют решению задач обеспечения качества синтеза новых технических решений в сфере технологий микро- и наносистем.

### **Библиографический список**

1. Лаврушина, Е. Г. Теория систем и системный анализ / Е. Г. Лаврушина, Н. Л. Слугина. – Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2007. – 100 с.
2. Татарова, Г. Г. Методологическая травма социолога. К вопросу интеграции знания / Г. Г. Татарова // Социологические исследования. – 2006.– № 9. – С. 3–12.
3. Булатова, И. М. Графен: свойства, получение, перспективы применения в нанотехнологии и наноконпозициях / И. М. Булатова // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 10. – С. 76–81.
4. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov // Science. – 2004. – Vol. 306. – P. 666–669.
5. Fior, G. Lateral Graphene hBCN Heterostructures as a Platform for Fully Two-Dimensional Transistors / G. Fior, A. Betti, S. Bruzzone, G. Iannaccone // ASC Nano. – 2012 – Vol. 6, № 3. – P. 2642–2648.
6. NanoTCAD ViDES. – URL: <http://vides.nanotcad.com/vides> (дата обращения: 14.01.2017).
7. Novoselov, K. S. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov, et al. // Science. – 2004. – Vol. 306. – P. 666. DOI:10.1126/science.1102896
8. Novoselov, K. S. The electronic properties of grapheme / K. S. Novoselov, A. K. Geim ; Department of Physics and Astronomy, University of Manchester, Manchester, M13 9PL. – United Kingdom, 2009. – 54 p.
9. Алексеенко, А. Г. Графен / А. Г. Алексеенко. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 168 с.

10. Адамова А. А. Применение инструментов когнитивной графики в преподавании конструкторско-технологических дисциплин / А. А. Адамова // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2016. – № 3 (163). – С. 79–85.
11. Шахнов, В. А. Онтология наноинженерии / В. А. Шахнов и др. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 12-1 (19). – С. 50–67.
12. Адамова, А. А. Визуальное моделирование адаптации подготовки производства к выпуску новой продукции / А. А. Адамова, А. И. Власов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2014. – № 2 (154). – С. 46–56.
13. Юрков, Н. К. Методология управления качеством сложных систем / Н. К. Юрков, А. К. Гришко, И. И. Кочегаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 377–379.
14. Адамова, А. А. Методика оценки технологичности электронных изделий на этапах проектирования и производства / А. А. Адамова, А. П. Адамов, В. А. Шахнов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 352–356.
15. Адамов, А. П. Дифференциальные коэффициенты оценки технологичности электронных средств и их применение при структурно-функциональном моделировании производственных систем / А. П. Адамов, А. А. Адамова, А. И. Власов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2015. – № 5 (104). – С. 109–123.
16. Адамова, А. А. Формирования технологичности электронных средств на этапах проектирования и производства / А. А. Адамова, А. П. Адамов // Евразийский союз ученых. – 2014. – № 6-3. – С. 6–8.
17. Адамова, А. А. Многоуровневая модель формирования технологичности электронных средств на этапах проектирования и производства // А. А. Адамова, А. П. Адамов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 11 (23). – С. 12.
18. Адамова, А. А. Проведение научных экспериментов в наноинженерии / А. А. Адамова, В. М. Башков, В. А. Шахнов и др. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 426 с.
19. Волкова, Я. Б. Транзисторные структуры на основе графена : автореф. дис. ... техн. наук / Волкова Я. Б. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. – 16 с.
20. Власов, А. И. Графеновый гибкий сенсорный экран с интегрированным аналого-цифровым преобразователем / А. И. Власов, Д. С. Терентьев, В. А. Шахнов // Микроэлектроника. – 2017. – Т. 46, № 3. – С. 1–9.
21. Власов, А. И. Анализ влияния формы мембраны на механическую прочность и стабильность параметров МЭМС-сенсоров давления / А. И. Власов, Т. А. Цивинская, В. А. Шахнов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2016. – № 4. – С. 65–70.
22. Прототип нейросети создан из пластиковых мемристоров. – URL: <http://www.nanonewsnet.ru/news/2016/prototip-neiroseti-sozdan-iz-plastikovykh-memristorov>

**Адамов Александр Петрович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра микроэлектроники,  
Дагестанский государственный технический  
университет  
(367006, Россия, Республика Дагестан,  
г. Махачкала, ул. Пирамидальная, 49)  
E-mail: info@iu4.bmstu.ru

**Адамова Арина Александровна**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра проектирования и технологии производства  
электронной аппаратуры,  
Московский государственный  
технический университет им. Н. Э. Баумана  
(105005, Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская 5, стр. 1)  
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

**Аннотация.** Данная статья посвящена перспективному направлению использования в семантическом анализе перспективных изделий микро- и наноэлектроники. Основное внимание уделено показателям качества и технологичности. Для оценки надежно-

**Adamov Aleksandr Petrovich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of microelectronics,  
Dagestan State Technical University  
(367006, 49 Piramidal'naya street, Mahachkala,  
Dagestan, Russia)

**Adamova Arina Aleksandrovna**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of design and production technology  
of electronic equipment,  
Bauman Moscow State Technical University  
(105005, page 1, apartment 5, 2-ya Baumanskaya street,  
Moscow, Russia)

**Abstract.** His article is devoted to perspective direction of use in the semantic analysis of advanced products for micro-and nanoelectronics. Attention is paid to indicators of quality and technology. To assess the reliability of the system, choice of quality indicators to describe

сти системы, выбора показателей качества, описания связей системы и мета-системы используется системный анализ и системный подход. Проблема компактного визуального представления многофакторной и сложносвязанной информации является одной из основных в современных проектных процедурах. Рассмотрим методы и подходы визуального семантического анализа сложных систем и процессов на примерах перспективных объектов и процессов микро- и нанoeлектроники.

**Ключевые слова:** показатели качества, технологичность, нанoeлектроника, семантический анализ, надежность системы.

the connection of the system and meta-system used system analysis and system approach. Problem compact visual representation of multivariate information is one of the major in modern design procedures. Consider the methods and approaches of visual analysis of complex systems and processes examples of promising targets and processes for micro – and nanoelectronics.

**Key words:** indicators of quality, technology, nanoelectronics, semantic analysis, the reliability of the system.

УДК 658.52

Адамов, А. П.

**Семантический анализ перспективных изделий микро- и нанoeлектроники с точки зрения увеличения ключевых показателей качества и технологичности / А. П. Адамов, А. А. Адамова // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 94–101. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-14.**