



УДК 681.3:621.39:51

**А.О. Лунтовский<sup>1</sup>, И.В. Мельник<sup>2</sup>**, доктора техн. наук

<sup>1</sup> Саксонская академия, отделение информатики и системотехники  
(Германия, 01307, Дрезден, Ханс-Грундиг штрассе, 25,  
тел. (49351) 44722703, e-mail: Andriy.Luntovsky@gmх.net),

<sup>2</sup> Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический ин-т»  
(Украина, 03056, Киев, пр. Победы, 37, корпус 12, 2203,  
тел. (044) 4549505, e-mail: imelnik@edd.ntu-kpi.kiev.ua)

## **Современные системы туманных вычислений и методы их проектирования**

Рассмотрены основы организации в современных компьютерных сетях туманных вычислений, которые отличаются от известных облачных вычислений тем, что большая часть вычислительной работы выполняется на микрокомпьютерах. Определены основные проблемы, связанные с проектированием сетей на основе микрокомпьютеров. Описаны используемые в них протоколы передачи данных и их связь с современными сетями управления распределением электроэнергии Smart Grid. Приведены результаты проектирования проводных, беспроводных и комбинированных компьютерных сетей туманных вычислений, включая сети автоматизации зданий с использованием специализированных средств САПР.

Розглянуто основи організації в сучасних комп'ютерних мережах туманних обчислень, які відрізняються від відомих хмарних обчислень тим, що більша частина обчислювальної роботи виконується на мікрокомп'ютерах. Визначено головні проблеми, пов'язані з проектуванням мереж на основі мікрокомп'ютерів. Описано протоколи передавання даних та їх зв'язок із сучасними мережами керування розподілом електроенергії Smart Grid. Наведено результати проектування проводних, безпроводових та комбінованих мереж туманних обчислень, включно з мережами автоматизації будівель, з використанням спеціалізованих засобів САПР.

*Ключевые слова: интернет вещей, туманные вычисления, Smart Grid, беспроводные сети автоматизации, средства автоматизированного проектирования, оптимизация компьютерных сетей.*

Развитие параллельных вычислений в компьютерных сетях непосредственно связано с понятием туманных вычислений (ТВ) (Fog Computing), что объясняется развитием таких перспективных сетевых технологий, как облачные вычисления (Cloud Computing) в компьютерных сетях и сетей управления электропитанием Smart Grid, которые используются в совре-

© А.О. Лунтовский, И.В. Мельник, 2015

менных микрокомпьютерах. При этом микрокомпьютеры рассматриваются как интеллектуальные сетевые узлы, между которыми устанавливается беспроводная цифровая связь, что обеспечивает их высокую производительность и мобильность. Перенос мобильных вычислений на мобильные сетевые узлы (Radio Network Edge) позволяет эффективно управлять домашними электроприборами и промышленным оборудованием, обеспечивая экономию электроэнергии. Малое энергопотребление делает использование мобильных вычислительных устройств привлекательным с точки зрения соблюдения экологических норм. Однако организация ТВ в развитой сети микрокомпьютеров, связанных по беспроводным каналам, требует соблюдения повышенных норм по защите людей от вредных факторов электромагнитного излучения и обеспечения конфиденциальности передаваемой информации. Кроме того, важной проблемой является также увеличение числа мобильных устройств, каждое из которых должно иметь свой уникальный числовой адрес в глобальной сети Интернет.

Решение проблем эффективности использования микрокомпьютеров в сетях ТВ невозможно без применения специализированных средств САПР для проектирования таких сетей. Поэтому рассмотрим задачи автоматизированного проектирования современных мобильных микрокомпьютерных вычислительных сетей [1—6].

**Постановка задачи. Понятие ТВ и общие основы их организации.**

Понятие ТВ включает в себя понятие облачных вычислений, появившееся в прошлом десятилетии, и распространяется на высокопроизводительные мобильные сетевые устройства с малым потреблением энергии. Поэтому ТВ связывают также с сетями управления потреблением электроэнергии Smart Grid. Для организации ТВ созданы специальные мобильные приложения и программные сервисы. Связь между облачными и туманными вычислениями представлена на рис. 1.

Основные свойства ТВ следующие:

- широкая география внедрения;
- явно выраженная гетерогенность узлов;
- быстрая активация и деактивация узлов (low-latency, location-awareness);
- энергетическая эффективность и долговечность узлов (low-energy);
- огромное количество узлов сети и их мобильность, что приводит к необходимости использования межсетевого протокола IP шестой версии IPv6;
- беспроводный доступ (wireless access);
- использование мобильных приложений типа Streaming и Realtime с повышенными требованиями к качеству обслуживания QoS.

Туманные вычисления создают необходимую платформу для перехода от Интернета сервисов (Internet of Services, IoS) к Интернету вещей (Internet of Things, IoT). В частности для сетей Smart Grid доступны следующие сервисы:

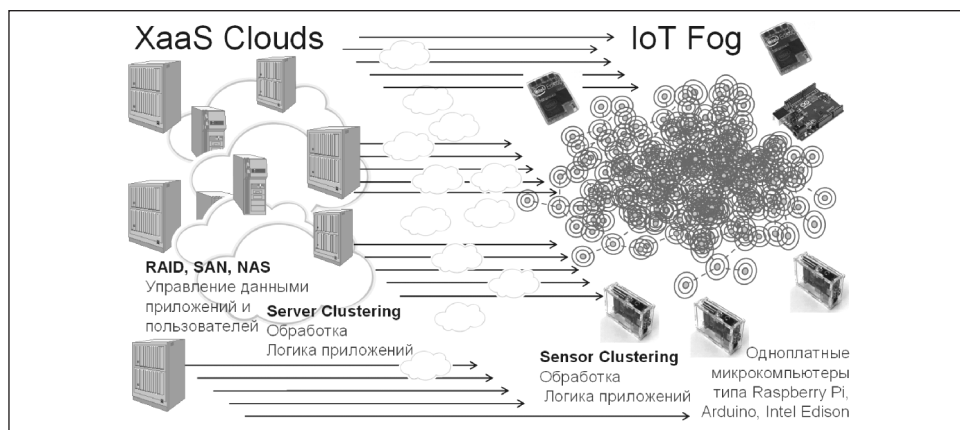


Рис. 1. Переход от облачных вычислений к ТВ

создание беспроводных сенсорных сетей небольшого размера и их глобализация вследствие подключения к Интернет (Wireless Sensors and Actuators Networks, WSN);

создание сетей управления электроэнергией и компьютерных энерго-сберегающих сетей на основе технологии Smart Grid (Smart Cities, Connected Vehicle, Car-2-Car).

**Перспективные технологии передачи данных при организации ТВ.**

Важнейшими для развития IoT и ТВ считаются такие технологии передачи данных [1—8]:

1. Мобильные сети новых поколений (HSDPA, LTE, 5G).
2. Системы глобального позиционирования и навигации (Global Positioning System, GPS).
3. Современные технологии беспроводных сетей (WiMAX).
4. Локальные и городские энергетические сети для передачи данных (Powerline, Homeplug).
5. Электропитание через локальные компьютерные сети (Power over Ethernet, PoE).
6. Шинные протоколы передачи данных Konnex (KNX) и Local Operating Network (LON).
7. Персональные беспроводные пикосети Bluetooth и Infrared Data Association (IrDA).
8. Беспроводные сети автоматизации WSN (ZigBee, EnOcean).
9. Внедрение новых адресов Интернет протокола IPv6 в энергетически эффективных беспроводных сетях автоматизации (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks, 6LoWPAN).

10. Использование энергетически эффективных технологий передачи данных на короткие расстояния: Radio Frequency ID (RFID), Near Field Communication (NFC), Quick Response (QR).

11. Водяные метки Watermarks как стеганографические приложения.

***Связь ТВ с системами управления электропитанием Smart Grid.***

Общим для систем ТВ и Smart Grid является использование энергетически эффективных протоколов передачи данных. Это не только снижает стоимость вычислительных работ, но и способствует эффективному решению глобальной экологической проблемы. В настоящее время в экономически развитых странах по принципу построения Интернет ускоренными темпами создается интегрированная интеллектуальная сеть Smart Grid, в которой предусмотрены возможности использования стандартных интерфейсов программного обеспечения Интернет, а также мобильных приложений Apps посредством обеспечения доступа к сервисам IoS / Web Services / Cloud.

Созданные стандарты для систем Smart Grid, приведенные в сети Интернет на форумах NIST, IEEE, VDE, CENELEC и в других источниках, обеспечивают программно-независимый и аппаратно-независимый доступ к электрооборудованию и коммуникацию между его компонентами, которые рассматриваются в данном случае как узлы компьютерной сети.

Стандартизация структуры открытых сетей Smart Grid — одно из самых приоритетных направлений развития как энергетики, так и телекоммуникационной сферы в Европе и США. По прогнозам специалистов в ближайшем будущем, в 2020—30 годах, комбинированные услуги этих сетей станут доступны широкому кругу пользователей. Однако уже сегодня пользователям предоставляется возможность создания, по образцу Интернет, большого числа собственных интеллектуальных приложений и служб в рамках сетей Smart Grid.

Взаимное проникновение технологий IoT, Smart Grid, облачных и туманных вычислений, происходит на основе энергетически эффективных и энергосберегающих протоколов персональных беспроводных сетей 6LoWPAN. Особенность этого протокола состоит в том, что он реализует адресацию Интернет-протокола IPv6 поверх MAC-протоколов сетей IEEE 802.15.4 и PLC. Открытый протокол PLC является важным протоколом в Интернете вещей, поскольку он стандартизован международной организацией IETF.

***Системы RFID, NFC и метки QR.*** Рассмотрим такие недорогие и простые устройства и системы, как ретрансляторы Radio Frequency ID (RFID), системы ближней коммуникации NFC и метки QR. Их задача — локализовать подключаемые к Интернету устройства (рис. 2). Системы RFID, NFC, QR работают на небольшом расстоянии, приблизительно от 10 см до 10 м. Впервые их стали эффективно использовать в логистике и сельском

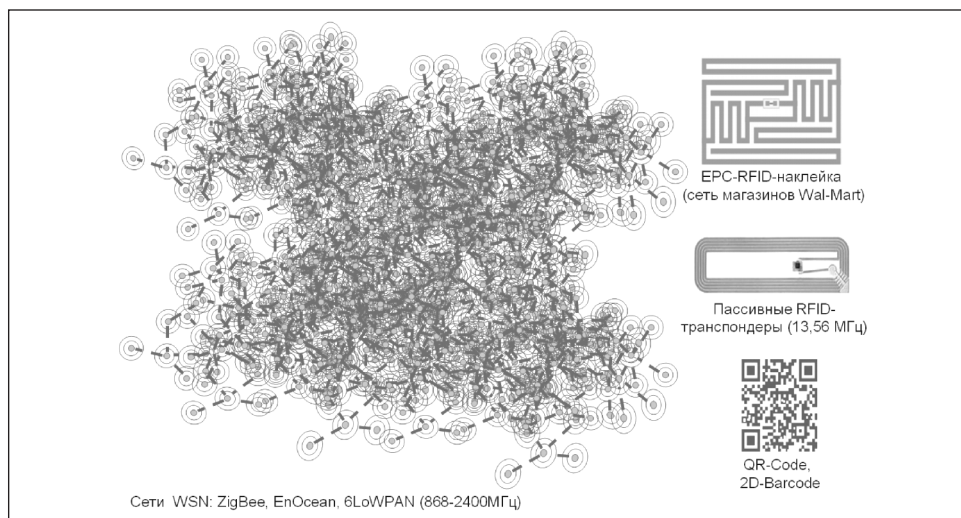


Рис. 2. Актуальные примеры ТВ

хозяйстве. Вследствие энергетической эффективности системы RFID и NFC имеют относительно большой срок службы, в среднем от 12 до 72 месяцев. Протокол IPv6 предоставляет широкие возможности для свободной адресации большого числа устройств.

Устройствами доступа к информации в технологии RFID являются специально предназначенные RFID-ридеры (аналоги банковских карт) и современные смартфоны. В ретрансляторах RFID используются координированные Международным телекоммуникационным союзом ИТУ-Т следующие частотные диапазоны: километровых волн — 125—134 кГц; декаметровых волн — 13,56 МГц; дециметровых волн — 865—869 МГц (Европа), 950 МГц (США и Азия); сантиметровых волн — 2,45 ГГц и 5,8 ГГц.

Вариантом ретранслятора RFID является интеллектуальная система с памятью, микроконтроллером и аккумулятором. Такие программируемые устройства имеют меньший срок службы, однако их можно конфигурировать. Они чаще всего используются в системах Smart Grid и для ТВ.

В пассивных высокочастотных ретрансляторах RFID-Tags применяется известный в радиолокации принцип радара. В результате активации и модуляции магнитного поля происходит опрос кода, который улавливается RFID-считывателем. Антенны высокочастотных ретрансляторов представляют собой катушку индуктивности с большим числом витков.

Ретрансляторы RFID с сенсорикой предназначены для измерения определенных физических и химических параметров. Как правило, это ускорение, деформации, влажность или электропроводность. Для таких систем



Рис. 3. Принцип работы мобильного программного QR-приложения

необходим считыватель RFID (RFID-Reader), который конструктивно может быть выполнен по-разному: ручной, мобильный, стационарный или комбинированный со считывателем штрих-кода.

Коммерческое и логистическое кодирование с длиной кода 64, 96 и 128 бит в формате Electronic Product Code (EPC) предназначено для использования в массовых ретрансляторах RFID и нашло применение в муниципальных и складских хозяйствах, на железной дороге и в аэропортах, в супермаркетах и библиотеках.

Большинство популярных операционных систем для смартфонов и планшетов, в частности Win Phone 8 и Android, поддерживают системы ближней коммуникации (Near Field Communication, NFC). Существует два типа таких систем.

1. Без установления соединения в пассивных высокочастотных ретрансляторах RFID в соответствии со стандартами ISO 14443 или ISO 15693. Такой метод применим для приложений, некритичных с точки зрения информационной безопасности, так как в момент активации антенны ретранслятора возможно его несанкционированное прослушивание.

2. С установлением соединения между двумя активными передатчиками.

Метки быстрого ответа (Quick Response, QR) созданы для считывания универсальных адресов URI приложений WWW. Принцип работы программы мобильного приложения с меткам QR приведен на рис. 3. Метки QR аппаратно поддерживаются смартфонами и планшетами, для чего используются специальные мобильные средства Apps.

Считают, что Интернет вещей — потенциально опасная технология с точки зрения защиты информации, так как речь идет о преобразовании таких вещей, как автомобили, стены квартир и офисов, электротовары, мебель, ценные и обычные бумаги в вычислительные узлы с мобильным доступом в Интернет. Следовательно, при несанкционированном доступе к конфиденциальной информации, передаваемой по беспроводным кана-



лам связи, Интернет вещей может представлять угрозу не только для анонимности и безопасности частной сферы граждан, но и для национальной безопасности государства. Поэтому переход к Интернету вещей и ТВ изучается ведущими политическими структурами и органами национальной безопасности, в частности комиссиями ЕС и службой национальной безопасности США. Для решения этой серьезной технической и социальной проблемы необходимо использовать в беспроводных сетях соответствующие протоколы передачи данных, обеспечивающие защиту конфиденциальной информации.

Рассмотрим задачу автоматизированного проектирования современных компьютерных систем, в том числе систем Smart Grid и систем ТВ.

**Средства САПР для решения задач оптимизации производительности, энергетической эффективности и стоимости комбинированных локальных сетей (КЛС). Проектирование КЛС.** Технические требования к проектированию КЛС часто имеют противоречивый и компромиссный характер. Обычно это относится к таким характеристикам, как производительность (QoS), эффективность энергопотребления и оптимальность финансовых затрат на прокладку и эксплуатацию сети. Например, для обычных офисных локальных сетей стандартов Ethernet и WLAN, а также для проводных сетей автоматизации стандартов LON и KNX наиболее важным является соответствие условиям минимума стоимости при соблюдении накладываемых ограничений на качество обслуживания QoS. Для современных беспроводных сенсорных сетей стандарта WSN (Wireless Sensor Networks IEEE 802.15.4) чрезвычайно важна также проблема обеспечения энергетической эффективности узлов и экономии электроэнергии.

С помощью САПР решаются задачи автоматизации проектирования КЛС с учетом стандартов на структурированные кабельные системы (СКС) (Structured Cabling System, SCS), а также стандартов на сетевое оборудование: IEEE 802.3, IEEE 802.11, IEEE 802.16, и IEEE 802.15.4. Созданная методология проектирования КЛС предназначена для решения задачи оптимизации общей стоимости проекта сети (capital expenditures, CAPEX) при соблюдении ограничений на такие параметры качества обслуживания QoS, как скорость передачи данных (data rate, DR), задержка, вариация задержки (jitter, J), процент потерянных пакетов (packet losses, PL), а также при выполнении условия использования долговечных аккумуляторов с накоплением энергии (energy harvesting) [4, 6—8]:

$$\min K(N, L, t) \wedge \max \text{QoS}(DR, \Delta, J, PL, \dots) \wedge \min(E), \quad (1)$$

где  $N$  — общее число используемых сетевых устройств;  $L$  — общая длина СКС;  $\{DR, \Delta, J, PL\}$  — принятый уровень качества обслуживания QoS;  $t$  —

время эксплуатации сети. Общее решение оптимизационной задачи (1) — очень сложное, часто она носит оптимально-компромиссный характер и имеет только субоптимальное решение [7—12].

Беспроводные сенсорные сети и сети автоматизации зданий. В состав КЛС могут входить различные сети автоматизации на основе полевых шин (fieldbus) с заранее заданными свойствами [1]. Такие сети имеют шинную топологию, а их архитектура — следующие уровни иерархии (табл. 1):

1) полевой (Field Level), на котором описывается работа используемых регистрирующих устройств, датчиков;

2) автоматизации (Automation Level), на котором описывается работа контролеров, мостов и шлюзов;

3) менеджмента (Management Level), или приложений, который объединяет программные средства конфигурации, поддержки и мониторинга сетей автоматизации. Такое объединение обычно происходит на основе служб или фреймворков, таких, как EJB (Enterprise Java Beans), OSGi (Open Services Gateway initiative), Web Services (Apache Axis 2) [1—3, 7, 8].

Важное и перспективное направление развития сетей автоматизации — использование стандарта компьютерных сетей Ethernet 802.3 для поддержки родственного стандарта PROFINET на уровнях 1 и 2. Альтернативными являются сети Powerline Homeplug AV и AV2, разработанные в 2010 г. ассоциацией Universal Powerline Association (номер стандарта P1901). Скорость передачи данных в таких сетях от 200 до 600 Мбит/с. Кроме того, очень часто в сетях автоматизации используют протокол беспроводной компьютерной связи, в том числе его новые стандарты IEEE 802.11n, 802.11ac, что свидетельствует о полной интеграции офисных сетей и сетей автоматизации.

Таблица 1. Классические стандарты сетей автоматизации

Стандарт полевых шин	Область использования
BACnet	Автоматизация на третьем уровне иерархии процессов в автомобильной промышленности, встроенных систем (Embedded systems), процессов управления, в том числе в медицине зданий и помещений медицинских приборов, обеспечение безопасности приложений в сетях автоматизации зданий и помещений на первом и втором уровнях иерархии технологических процессов
CAN/CANopen	
KNX	
INTERBUS-S	
LON	
PROFIBUS	



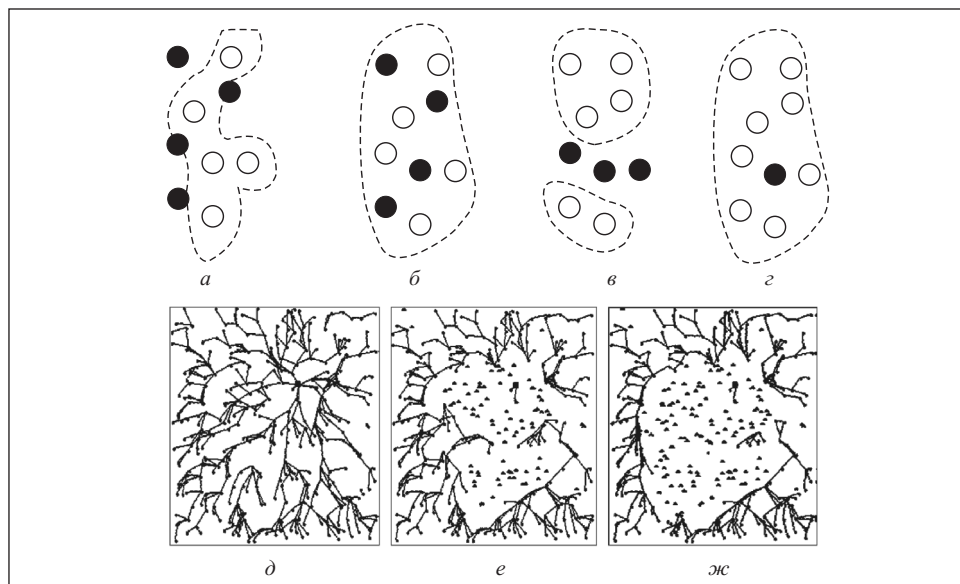


Рис. 4. Разновидности неисправностей сетей WSN от первых отказов и до полной потери функциональности сети: *а* — один датчик вышел из строя; *б* — 50 % датчиков вышло из строя; *в* — раздел сети; *г* — потеря покрытия; *д* — все датчики работают; *е* и *ж* — вышло из строя соответственно 20 % и 50 % датчиков

Интерес к сетям автоматизации возрастает в связи с их невысокой стоимостью и относительной простотой установки. Одна из наиболее перспективных областей их применения — автоматизация зданий и помещений [1—7] (например, автоматизированные системы контроля температуры и освещения (temperature / illumination control)). Число проводных датчиков (wired sensors), необходимое для создания микроклимата в системе «интеллектуальный дом», достаточно велико, что приводит к большим затратам труда на установку проводных систем автоматизации зданий и прокладку кабеля при строительстве или реконструкции домов.

Эффективной альтернативой проводным датчикам, в которых используются полевые шины и указанные выше протоколы, являются современные беспроводные пикосети (Wireless Sensor Networks, WSN). Недостаток всех современных беспроводных датчиков — высокое энергопотребление. Замена вышедших из строя датчиков стоит достаточно дорого и требует больших затрат труда. Время бесперебойной работы аккумуляторов, имеющих ограниченную энергоёмкость, зависит от мощности микропередатчика и частоты передаваемых сообщений. Постепенный выход из строя сети WSN в результате последовательного отключения датчиков схематически показан на рис. 4.

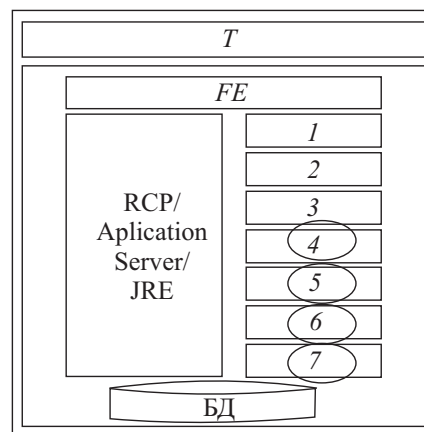
Актуальной проблемой является обеспечение эффективного энергопитания беспроводных сетей WSN. Для этого часто используют альтернативные источники электроэнергии, например ветряные, солнечные или источники, основанные на отборе энергии фонового электромагнитного излучения. Однако существенным недостатком альтернативной энергетики является ее зависимость от времени суток, от сезонных изменений погоды и других факторов. Основные характеристики наиболее распространенных беспроводных сетей автоматизации зданий приведены в табл. 2 [1—7].

**Функции системы CANDY Framework и примеры проектирования сети. Архитектура системы.** Для решения задач оптимизации производительности и энергетической эффективности локальных компьютерных сетей были использованы средства САПР CANDY Framework [8—12]. Эта

Таблица 2. Сравнительные характеристики наиболее распространенных беспроводных сенсорных сетей

Параметр	EnOcean	KNX-RF	Z-Wave	ZigBee 802.15.4	Scatterweb	NanoNET
Частотный диапазон, МГц	868	868	868	2400	868	2400
Способ доступа к среде передачи данных	Beacon	—	CSMA	Beacon, CSMA	—	CSMA/CA, TDMA, ALOHA
Топология	Звезда/ячейка	Звезда	Звезда/ячейка	Звезда/ячейка	Дерево/ячейка	Ячейка
Скорость передачи данных DR, кБит/с	125	16,4	9,6/40	250	20	2000
Максимальное число датчиков в сети	2 <sup>32</sup>	256	2 <sup>32</sup>	2 <sup>16</sup>	255	2 <sup>48</sup>
Обеспечение информационной безопасности	—	—	+	+(WEP, WPA2, AES)	—	+
Оценка энергопотребления	Очень низкое	Низкое	Низкое	Низкое	Низкое	Среднее
Усредненная оценка вероятности коллизий	Очень малая	Существуют	Существуют	Малая	Малая	Очень малая
Отбор электроэнергии из эфира, безаккумуляторные сенсорные решения	Возможен	Невозможен	Невозможен	Невозможен	Невозможен	Невозможен
Максимальный радиус действия, м	30—300	10—100	20—200	10—75	10—100	40—250

Рис. 5. Архитектура системы CANDY Framework: 1 — менеджмент проектов (Project Manager); 2 — редактор сети (Network Editor); 3 — просмотр компонентов (Component Browser); 4 — модуль трассировки кабельных систем (CTR); 5 — модуль проектирования участков беспроводной сети (Wireless Site Finder); 6 — модуль анализа рабочей нагрузки (Workload Analyzer); 7 — модуль формирования отчета о стоимости проекта (Bill Reporter); FE — интерфейс Front-end с использованием языков NDML XML; T — дополнительные свободно связанные средства, например NS-3; БД — устройства, сетевые продукты, материалы



САПР имеет модульную структуру, все модули реализованы как свободно подключаемые приложения на платформах Eclipse Rich Client Platform (ERCP plug-ins), JRE (Java Runtime Environment), Application Server, Middleware (Apache, Tomcat /JSP, Java Server Pages, EJB), Web Services (Apache Axis 2). Структура САПР CANDY представлена на рис. 5. Назначение всех модулей системы CANDY подробно описано в работах [7, 8]. Рассмотрим работу модулей 4—7, а также следующие системные средства проектов сетей, реализованные с помощью языка программирования NDML: список компонентов, список соединений, отчет о производительности, формирование сметы.

**Язык проектирования.** Один из способов интеграции разработанных средств проектирования в единую САПР CANDY Framework — разработка и использование нового проблемно-ориентированного языка проектирования NDML (Network Design Markup Language), который построен на основе XML-нотаций. Язык NDML, специально разработанный для представления данных при описании проектов КЛС [9, 10], имеет все необходимые лингвистические средства для описания структуры и особенностей работы КЛС, поддерживает процедуры анализа и моделирования с помощью алгоритмов обработки событий и математических методов теории массового обслуживания. Язык NDML обеспечивает сохранение и обработку данных в реляционных объектно-ориентированных базах данных (БД).

В работах [7—12] обоснована целесообразность использования NDML как языка проектирования комбинированных компьютерных сетей. Более того, этот язык в определенной мере является объединяющей структурой для соответствующих средств проектирования.

**Трассировка структурированной кабельной системы.** Модуль CANDY Trace Router (CTR) предназначен для автоматической трасси-

ровки структурированной кабельной системы в локальных сетях зданий при заданном расположении серверных помещений и коммутационного оборудования, включая коммутаторы, шлюзы, маршрутизаторы и кросс-панели. При создании проектной документации используются графические форматы САПР, в частности IFCXML для AutoCAD [7, 8]. Структурированная кабельная система состоит из первичной, вторичной и третичной областей. Модуль CTR оптимизирует прокладку кабеля в соответствии со стандартом Ethernet LAN IEEE 802.3 с учетом участков беспроводной сети стандарта WLAN IEEE802.11. Проблема разводки кабельных систем в зданиях связана с использованием алгоритма минимального дерева Дайкстра, а задача оптимизации прокладки кабеля решается с использованием алгоритма динамического программирования Беллмана — Форда и других ресурсоемких алгоритмов, в частности волнового алгоритма Ли и алгоритмов штрафных функций. Входные данные об особенностях архитектуры зданий также представляются в формате инженерной САПР AutoCAD, что значительно упрощает и ускоряет весь процесс проектирования.

**Проектирование беспроводных сетей.** Для проектирования беспроводных участков сети предназначен специальный модуль системы CANDY Wireless Site Finder (CSF), поддерживающий импорт файлов из форматов AutoCAD, Python CAD, NDML, IFCXML, PDF, в которых представлены поэтажные планы зданий, а также географические карты и планы местности. Кроме того, поддерживается экспорт информации в файлы стандартных текстовых и графических форматов, в частности XML, JPEG, BMP и PNG.

Модуль CSF имеет удобный графический интерфейс, позволяющий копировать, редактировать и удалять объекты и устанавливать перегородки в помещении и на местности [11, 12]. В нем реализованы функции автоматического размещения точек доступа, базовых станций или датчиков. Модуль включает функции расчета и визуализации для таких эмпирических моделей распространения электромагнитных волн, как потери в свободном пространстве (Free Space Loss), многократное отражение от стен (Multi Wall), модель COST 231 Икегами (COST 231 Walfish Ikegami), модель предсказания основного пути (Dominant Path Prediction), линейная лучевая модель, основанная на законах геометрической оптики (Line of Sight Models) [7, 8]. В графических средствах модуля CSF предусмотрены визуализация ослабления сигнала, принимаемой мощности, битовой скорости и характеристик покрытия. При этом данные о распределении частот и электромагнитных помехах представлены в специфических форматах графических САПР, в частности IFCXML для AutoCAD.

**Проектирование WSN.** По сравнению с классическими сетями LAN и WLAN [1, 8] сенсорные пикосети [4—6] имеют существенную особен-

ность, которая состоит в необходимости оптимизации эффективности энергопотребления с учетом сохранения качества обслуживания QoS. Тогда найденное оптимальное решение обеспечивает заданный компромисс. Плотность мощности составляет от 10 до  $5 \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>3</sup>. Общий критерий оптимизации времени жизни пикосети (time-to-live, TTL), зависит от многих факторов и записывается в следующем виде [3, 7, 8, 11, 12]:

$$\max TTL = \alpha \frac{\partial q}{\partial t} (PTx, F, d, DR, SNR, TL, OH, \xi),$$

где  $q$  — заряд батареи, Ач;  $PTx$  — мощность передатчика;  $F$  — частота сигнала;  $d$  — среднее расстояние между узлами пикосети  $SN$  (hop distance);  $DR$  — скорость передачи данных;  $TL$  — средняя длина отправляемых сообщений, называемых телеграммами;  $OH$  — длительность служебных сообщений в телеграмме (overhead);  $\xi$  — централизованная случайная величина по Гауссу;  $\alpha$  — логарифмический декремент.

Алгоритм оптимизации расположения точек доступа, или датчиков, написанный в псевдокоде, следующий.

### Пример 1.

START:

INPUT DATA:

Geometry (x,y): Building Plans, Digital Maps;

User Area: User Quantity, DRmin;

Location Area: Building (Height), Walls;

Material Data: Gypsum, Wood, Glass, Concrete,  
Reinforced Concrete of Database

Device Data: BS-Data, AP-Data, SN-Data of Database;

Interface-Data: WLAN-NIC, WiMAX-NIC, ZigBee-GW of Database;

Adjusting: Raster Segment Size, H;

FOREACH AP/BS/SN:

Place New Device: Manually || Automatically Manually: BS (Srf, H, ...);

Automatically: extended Site Finder Algorithm; LOS Optimizer;

FOREACH Obstacle:

    Compute Propagation: FS, MWM, LOS, NLOS, COST WI, DPP;

    Display Results;

    IF Constellation Optimal THEN GOTO END;

    OTHERWISE Place AP/BS/NS || no optimal solution;

END:

OUTPUT:

Resulted AP/BS/SN -Constellation (x,y): {Power, Attenuation, Covering, DR};

Display Legends;

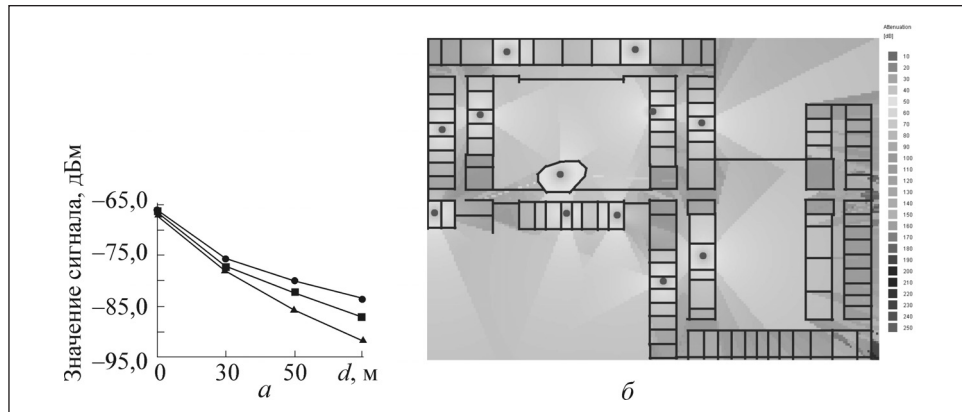


Рис. 6. Пример проектирования сети WSN 802.15.4 ZigBee с помощью модуля CSF: *a* — теоретические результаты: ● — для ZigBee; ■ — с потерями LOS; ▲ — с потерями NLOS; *б* — результаты моделирования

Пример проектирования сети автоматизации WSN стандарта IEEE 802.15.4 ZigBee с использованием модуля CANDY Site Finder приведен на рис. 6. Фрагмент описания сети WSN IEEE 802.15.4 ZigBee с БД сетевых устройств на языке проектирования NDML имеет следующий вид:

### Пример 2.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<deviceProduct schemaVersion="3.0">
  <name>Wireless Sensor
  Z-Aperture ZA07-200-ESP
  </name>
  <manufacturer>Comverge
  </manufacturer>
  <moreInformation>
  <uri>http://www.zigbee.org/</uri>
  </moreInformation>
  <prices>
  <price quantity="1" currency="EUR"
  vendor="ZigBee">12</price>
  </prices>
  <category>Wireless Sensor</category>
  <interfaces>
  <interface number="1">
  <portGroups>
    <radioproperties>
      <transmit>
        <transmitpower>
          <power standard="IEEE802.15.4"
          unit="dBm">4</power>
        </transmitpower>
      </transmit>
      <receiver>
        <receivesensitivity standard="IEEE802.15.4">
          <sensitivity unit="dbm"
          datarate="0,7">-66</sensitivity>
          <sensitivity unit="dbm"
          datarate="0,5">-75,5</sensitivity>
          <sensitivity unit="dbm"
          datarate="0,25">-80</sensitivity>
          <sensitivity unit="dbm"
          datarate="0,038">-83,5</sensitivity>
        </receivesensitivity>
      </receiver>
    </radioproperties>
  </interface>
  </portGroups>
  </category>
  </prices>
  </moreInformation>
  </manufacturer>
  </name>
  <deviceProduct schemaVersion="3.0">

```



```

<ports technology="technology4"           </receiver>
plugType="wireless">1</ports>          </radioproperties>
</portGroups>                           </deviceProduct>
</interface>
</interfaces>

```

Описание производительности сети, выполненное на языке NDML с использованием программных средств CANDY Framework [7—12], приведено в следующем примере.

### Пример 3.

```

<?xml...>
<ndml>
...
<node id=8>
  <device>AccessPoint1</device>
  <arrivalrate>3398.1481</arrivalrate>
  <servicerate>3703.7037</servicerate>
  <queuelength>10.2037</queuelength>
  <usage>0.9174</usage>
</node>
...
</ndml >

```

Для осуществления событийного моделирования и многовариантного анализа TCP/IP-инфраструктуры с помощью средств моделирования NS-2, NS-3 и OMNet++ [11, 12] использован модуль CANDY Workload Analyser. Для определения нагрузки сети использованы методы экспертных оценок трафика и алгоритмы обхода дерева для заданного проекта сети, представленного в виде СКС.

**Расчет стоимости проекта сети.** Модуль CANDY Bill Reporter (CBR) как средство для расчета стоимости сети основан на данных об использованных сетевых компонентах, СКС и о стоимости сетевых продуктов, которые содержатся в БД модуля CANDY Component Browser (CCB). Модуль CCB позволяет рассчитывать динамические целевые функции стоимости сети  $K(t)$  для заданного периода ее эксплуатации, а также прогнозировать стоимость сети через определенный промежуток времени и рентабельность ее модификации. Например, для обычных офисных локальных сетей (Ethernet, WLAN) [7, 8] и проводных сетей автоматизации (LON, KNX) [1] основной оптимизационной задачей является минимизация стоимости проекта сети при сохранении ограничений на качество обслуживания QoS.

Для современных беспроводных сенсорных сетей WSN чрезвычайно важной является проблема обеспечения эффективного энергопотребления узлов сети и управление распределением электроэнергии. Тогда целевая функция оптимизации общей стоимости сети имеет вид [8]  $K = K(N_1, N_2, QoS(DR), L, t)$ , где  $N_1$  — оптимальное число введенных в сеть функциональных устройств, включая коммутаторы и маршрутизаторы;  $N_2$  — оптимальное число введенных в сеть точек беспроводного доступа и беспроводных датчиков, определяемое моделированием сенсорной сети на физическом уровне. Модуль CBR использует константы конфигурации  $\{a, \alpha, \varphi, \gamma, \eta, \theta, \mu, w, z\}$ , определяющие коэффициент амортизации сети и сетевых компонент [7, 8].

### Выводы

Для ведущих мировых компаний, занимающихся реализацией Smart Grid и ТВ, например для компании Google, одной из важных проблем является исследование возможностей использования альтернативных источников энергии с целью создания экологически чистых компьютерных технологий и улучшения климатических условий на Земле. Технические требования к проектированию таких сетей имеют противоречиво-компромиссный характер и состоят в решении оптимизационной задачи для таких взаимосвязанных параметров, как производительность, энергетическая эффективность и стоимость.

САПР комбинированных локальных сетей CANDY позволяет объединять в одном проекте участки компьютерных сетей и сетей автоматизации зданий и рассчитывать их параметры, в том числе производительность сети, эффективность ее работы, вероятность ошибок передачи данных, энергопотребление и стоимость проекта. САПР CANDY поддерживает стандарты сетей Ethernet, LON, KNX, WLAN, WSN, ZigBee.

Эффективным является использование средств проектирования САПР CANDY для автоматизированного проектирования энергоэффективных пикосетей автоматизации зданий WSN.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mahalik N.P. Fieldbus Technology. — Springer Berlin-Heidelberg, 2010. — 595 p.
2. Gessler R., Krause T. Wireless-Netzwerke für den Nahbereich, Vieweg+Teubner. — Wiesbaden, 2009 (ISBN 978-3-8348-0247-7, 342 S, in German).
3. Otis B., Rabaey J. Ultra-low Power Wireless Technologies for Sensor Networks. 3rd edition. — Springer, 2013. — 184 p.
4. Стандарты беспроводных сетей автоматизации зданий EnOcean. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.enocean.com/>
5. Стандарты беспроводных сетей автоматизации зданий ZigBee. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.zigbee.org>

6. Использование протокола IPv6 в беспроводных сетях автоматизации зданий 6LoWPAN. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/charter/>
7. Luntovskyy A., Guetter D., Melnyk I. Planung und Optimierung von Rechnernetzen: Methoden, Modelle, Tools für Entwurf, Diagnose und Management im Lebenszyklus von drahtgebundenen und drahtlosen Rechnernetzen. Handbook, Springer/ Vieweg + Teubner Verlag Wiesbaden, 2011. — 435 p. (ISBN 978-3-8348-1458-6, in German).
8. Luntovskyy A. Integration Concepts for Computer-Aided Design Tools for Wired and Wireless Local-Area Networks // Shaker Verlag Aachen, 2008. — 196 p.
9. Описание системы проектирования компьютерных сетей CANDY Framework. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rn.inf.tu-dresden.de>
10. Описание языка проектирования компьютерных сетей NDML. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://candy.inf.tu-dresden.de/>
11. Luntovskyy A., Vasyutynskyy V., Kabitzsch K. Propagation Modeling and Placement Algorithms for Wireless Sensor Networks// IEEE ISIE 2010. Bari, Italy, July 4—7, 2010. ID: BD-011827. — P. 3493 — 3497 (ISBN: 978-1-4244-6390-9, IEEE Xplore).
12. Luntovskyy A., Vasyutynskyy V. On Computer-Aided Design of Energy Efficient Wireless Sensor Networks// IEEE and ACM supported IWCMC 2010. Caen, France, June 28—July 2, 2010. ID: 1569263815. — P. 311 — 315.

A.O. Luntovskyy, I.V. Melnyk

#### UP-TO-DATE SYSTEMS OF FOG COMPUTING AND METHODS OF THEIR DESIGN

The paper considers the basis of organization of Fog Computing Systems in the modern computer networks, which are different from the well-known Cloud Computing, because the majority of calculation work is performed by microcomputers. Main problems, connected with designing the microcomputer networks, using protocols of data transfer, as well as its connection with the modern networks of electric energy control Smart Grid are shown. For solving the task of designing of Fog Computing networks it is recommended to use specialized means of CAD-systems.

#### REFERENCES

1. Mahalik, N.P. (2010), *Fieldbus Technology*, Springer, Berlin-Heidelberg, Germany.
2. Gessler, R. and Krause, T. (2009), *Wireless-Netzwerke für den Nahbereich*, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, Germany.
3. Otis, B. and Rabaey, J. (2013), *Ultra-low Power Wireless Technologies for Sensor Networks*. 3rd edition, Springer, Germany.
4. “Standards of wireless networks of building automation EnOcean”, available at: <http://www.enocean.com/>
5. “Standards of wireless networks of building automation ZigBee”, available at: <http://www.zigbee.org>
6. “Using IPv6 protocol in wireless networks of building automation 6LoWPAN”, available at: <http://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/charter/>
7. Luntovskyy, A., Guetter, D. and Melnyk, I. (2011), *Planung und Optimierung von Rechnernetzen: Methoden, Modelle, Tools für Entwurf, Diagnose und Management im Lebenszyklus von drahtgebundenen und drahtlosen Rechnernetzen*, Handbook, Springer/ Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, Germany.
8. Luntovskyy, A. (2008), *Integration Concepts for Computer-Aided Design Tools for Wired and Wireless Local-Area Networks*, Shaker Verlag, Aachen, Germany.

9. “Describing the System of Computer Network Designing CANDY Framework”, available at: <http://www.m.inf.tu-dresden.de>.
10. “Describing the Language of Computer Network Designing CANDY Framework”, available at: <http://candy.inf.tu-dresden.de/>
11. Luntovskyy, A., Vasyutynskyy, V. and Kabitzsch, K. (2010), “Propagation Modeling and Placement Algorithms for Wireless Sensor Networks”, *IEEE ISIE*, Bari, Italy, July 4-7, 2010, pp. 3493-3497.
12. Luntovskyy, A. and Vasyutynskyy, V. (2010), “On Computer-Aided Design of Energy Efficient Wireless Sensor Networks”, *IEEE and ACM supported IWCMC 2010*, Caen, France, June 28-July 2, 2010, pp. 311-315.

Поступила 17.07.14;  
после доработки 18.11.14

*ЛУНТОВСКИЙ Андрей Олегович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационной безопасности и передачи данных Одесской академии связи им. А.С.Попова, зам. зав. отделением информатики и системотехники Саксонской академии г. Дрездена. В 1989 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — моделирование объектов и процессов, САПР, компьютерные сети и системы Clouds, Clustering, Mobile Computing, технологии программирования, распределенные системы и сервисы Web Services, SOA, мобильные и беспроводные сети и их приложения, виртуализация и мультисервисные платформы.*

*МЕЛЬНИК Игорь Витальевич, д-р техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т». В 1989 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — моделирование электронно-лучевых технологических устройств, теория газового разряда, программирование и теория алгоритмов, компьютерные сети и системы.*