

С. Г. БУНИН, А. И. МИНОЧКИН, В. А. РОМАНЮК

## ПЕРСПЕКТИВЫ БЕСПРОВОДНЫХ ЯЧЕЙСТЫХ СЕТЕЙ

Сегодня беспроводный доступ все более широко применяется как в сотовых сетях связи, так и в беспроводных локальных сетях (Wireless Local Area Networks — WLAN), которые обычно ассоциируются с семейством стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi). Одна из самых заметных тенденций последних лет в Европе в данной сфере — чрезвычайно быстрый рост беспроводных сетей, подкрепляемый потребительским спросом на ноутбуки со встроенной поддержкой Wi-Fi.

Данные технологии (совершенно различные по принципам построения) предназначены для обеспечения связности между абонентами и могут использоваться при работе со многими приложениями. Однако **превращение Wi-Fi в действующий инструмент корпоративной коммуникации и в подлинно массовую технологию обмена данными ставит перед разработчиками непростую задачу: обеспечить «бесшовный» межсетевой роуминг. Эта проблема решается в рамках ячеистой (mesh) архитектуры, с внедрением которой аналитики связывают очередной виток роста беспроводных сетей** [1; 2].

В сотовых сетях при относительно большом покрытии скорость передачи информации сравнительно невысока: даже в сетях третьего поколения (3G) она не превышает 2 Мбит/с. В беспроводных локальных сетях этот показатель составляет более 50 Мбит/с для протоколов IEEE 802.11a и IEEE 802.11g, однако при этом покрытие у WLAN, как правило, значительно меньше (что ограничивает мобильность абонентов), и для его увеличения необходимо построить соответствующую проводную магистраль.

Беспроводные городские сети (Wireless Metropolitan Area Networks — WMAN), основанные на семействе стандартов IEEE 802.16, частично устраняют указанные недостатки, обеспечивая высокую скорость передачи с гарантированным качеством обслуживания значительному количеству пользовательских баз — при расстоянии до десятков миль между базовыми станциями (БС). Основной недостаток WMAN — отсутствие (на сегодня) поддержки мобильности и необходимость прямой видимости с БС, при отсутствии которой (а в такой ситуации оказываются более половины пользователей, обычно из-за высокой плотности преград, таких как многоэтажные здания или деревья) получение данного сервиса маловероятно. К тому же оборудование БС — довольно сложное и дорогостоящее.

Беспроводные ячеистые сети (БЯС), или Wireless Mesh Networks (WMN), потенциально исключают многие из перечисленных проблем, обеспечивая при этом дешевый беспроводный доступ к Интернету для фиксированных и/или мобильных абонентов (действующий протокол БЯС — IEEE 802.11s). Такая сеть (типовой вариант построения которой представлен на рис. 1) состоит из беспроводных маршрутизаторов (mesh-маршрутизаторов), шлюзов и абонентов. Для подключения к Интернету (проводной сети) достаточно одного шлюза.



Рис. 1. Вариант построения ячеистой сети

Каждый абонент снабжен радиооборудованием для связи с mesh-маршрутизаторами, которые образуют беспроводную магистраль ячеистой сети и обеспечивают динамическую маршрутизацию пакетов между собой. Фактически mesh-маршрутизаторы являются стационарными узлами; обычно они монтируются на видимых участках крыш домов (рис. 2). Их оборудование отличается от оборудования абонентов следующими характеристиками:

- ◆ большей мощностью передачи;
- ◆ наличием нескольких приемопередающих устройств и антенн;
- ◆ обеспечением поддержки нескольких беспроводных протоколов;
- ◆ отсутствием ограничений на потребляемую мощность;
- ◆ реализацией протоколов маршрутизации.

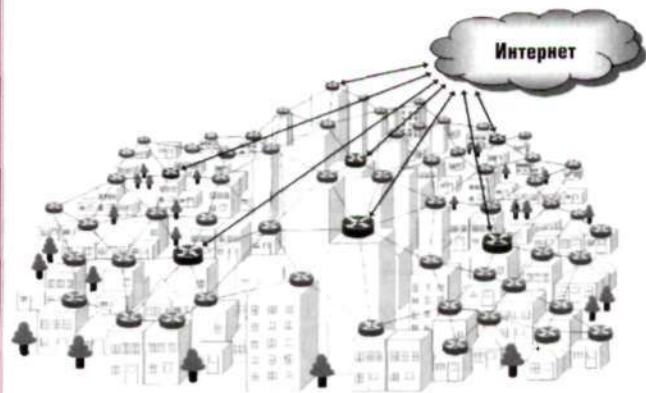


Рис. 2. Пример БЯС

Архитектура ячеистой сети в общем случае иерархична и представлена следующими элементами:

- ◆ **верхний уровень** — шлюзы (специфические маршрутизаторы), связанные с Интернетом высокоскоростными проводными каналами;
- ◆ **средний уровень** — магистральная сеть стационарных беспроводных маршрутизаторов;
- ◆ **нижний уровень** образуют стационарные или мобильные пользователи, связанные в ячейке с беспроводным маршрути-

затором, приче абоненти також можуть виступати в ролі маршрутизаторів, т. е. передавати дані друг через друга, фактично образуєть мережу типу MANET (Mobile Ad-hoc Network).

Алгоритм обміну інформацією складається в наступному. Якщо mesh-абоненту потрібно передати дані адресату (mesh-абоненту або шлюзу), не знаходячись з ним в зоні безпосередньої радіосвязності, пакет передається найближчому mesh-маршрутизатору, а потім (згідно прийнятому протоколу маршрутизації) — по маршруту безпроводної магістралі, поки не досягне mesh-маршрутизатора, який має радіосвязність з адресатом і передасть йому пакет.

При організації БЯС звичайно вдаються до використання в радіоканалах окремих стандартів (для зменшення перешкобок) між маршрутизаторами магістралі і каналами маршрутизатор-абонент. Наприклад, стандарт IEEE 802.11a може бути застосований для каналів магістралі, а IEEE 802.11b — для зв'язку між абонентом і маршрутизатором.

**Благодаря БЯС відкривається можливість перейти до локалізованих точок доступу в повністю безпроводних зонах, охоплюючи будівлю (кампус) або навіть місто.** Мережові архітектори і системні інтегратори отримують беспрецедентну свободу і гнучкість в інсталяції високопродуктивної мережі, яка може бути виконана в рекордно короткий час. При цьому відпадає необхідність в кабелях, що суттєво знижує вартість і спрощує поточні операції по налаштуванню мережі.

Відсутність додаткових вимог до БЯС (за винятком маршрутизації) пояснюється гнучкістю і багатовариантністю їх побудови. Наприклад, доступ до Інтернету може бути проводним або безпроводним (типу «точка-точка» або «точка-многоточка»). Користувачі можуть входити в мережу по внутрішнім безпроводним каналам, використовуваним для зв'язку мобільних абонентів, або використовувати інші технології (мережі Wi-Fi, сотові, WiMAX, MANET, сенсорні) і працювати з різними додатками (рис. 3).

### Характеристики БЯС

Характеристики БЯС відображають специфіку її природи: одні з них присущі ячеїстим мережам, інші розширюють поняття гібридних MANET [1–3].

**Беспроводність.** З однієї сторони, БЯС обмежена в дальності передачі внаслідок затухання при розповсюдженні радіохвиль, а також потенційно має високі показники помилок і втрат пакетів, з іншої — забезпечує мобільність абонентів.

**Многоскачковість.** Якщо покриття, забезпечуване звичайною безпроводною мережею, збільшують, підвищуючи потужність передачі або додаючи додаткові точки доступу, то вузли БЯС, використовуючи многоскачкову маршрутизацію, передають дані без збільшення радіуса передачі.

**Избыточность.** При формуванні безпроводної магістралі ячеїстої мережі створюються додаткові канали (маршрути) між mesh-маршрутизаторами, mesh-шлюзами і mesh-абонентами, завдяки чому відмова каналу або вузла не призводить до відмови в передачі повідомлення.

**Мобільність.** В загальному випадку mesh-маршрутизатори і mesh-шлюзи також можуть бути мобільними; тоді БЯС фактично стає двохуровневою мережею MANET (проблеми управління якою описані в [3]). В відмінність від MANET ячеїстим мережам притаманна визначена ієрархічна архітектура. Mesh-шлюзи і mesh-маршрутизатори формують квазістатичну магістраль, не обмежені в потужності передатчиків і продуктивності процесорів, можуть оснащуватися кількома прийомопередатчиками. Абонент, не реалізуючий функції маршрутизації, може бути введений в БЯС без будь-яких обмежень — в протилежність MANET, де кожен вузол повинен виконувати функції маршрутизатора.

### Сфери використання БЯС

Ячеїсті мережі завдяки своїм особливостям можуть застосовуватися в різних сферах.

**Широкополосний доступ до Інтернету.** Значительне кількість користувачів все ще не мають можливості

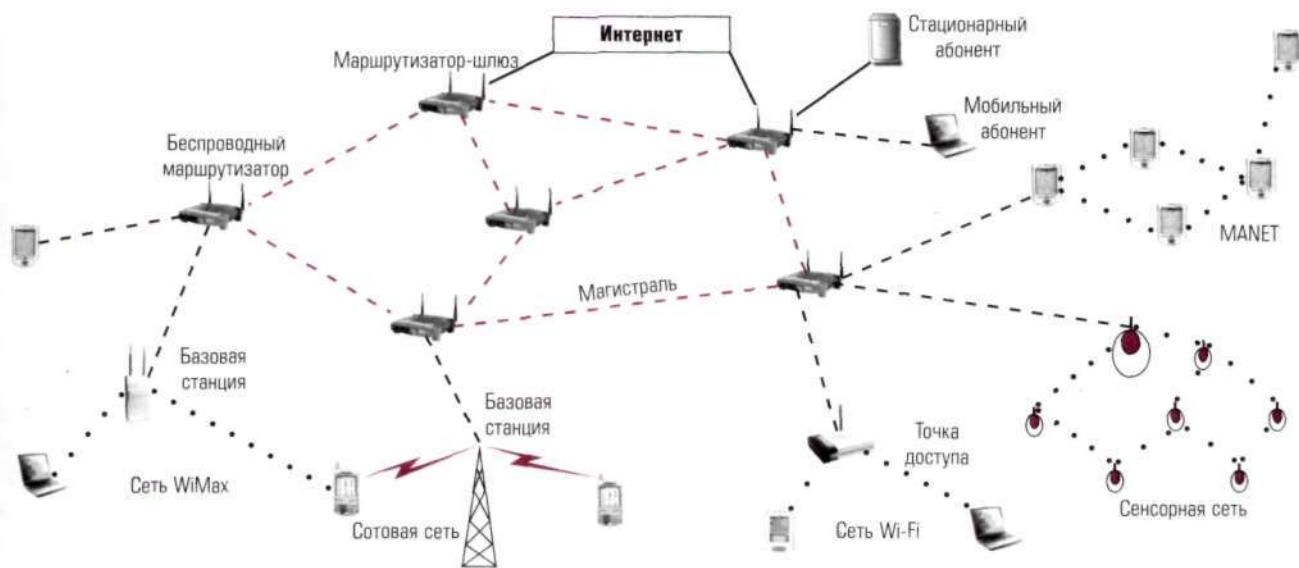


Рис. 3. Варіант побудови гібридної ячеїстої мережі

подключиться к Интернету по кабелю или DSL-каналам. Решить эту проблему позволяет применение БЯС. В Европе публичный доступ к Интернету пока предоставляют несколько городских БЯС; в США эта услуга гораздо более развита. В Москве сейчас сооружается ячеистая сеть стандарта Wi-Fi, насчитывающая более 6 тыс. БС. В Тайбэе (Тайвань) развернута ячеистая сеть, включающая 10 тыс. точек беспроводного доступа на территории около 75 тыс. км<sup>2</sup>.

**Сети поселков.** Локальные сети стремительно шагнули за пределы крупных городов, где конкуренция очень велика. Многие Интернет-провайдеры занялись обслуживанием коттеджных и дачных поселков, где беспроводные решения являются единственным рентабельным способом подключения клиентов (как и в районах с малозэтажной застройкой, поскольку тянуть кабель в каждый дом ради подключения нескольких пользователей просто невыгодно).

**Сети предприятий, арендуемых помещений.** Для получения покрытия с использованием протокола IEEE 802.11 требуется значительное количество точек доступа, которые, в свою очередь, связаны сетью Ethernet. Ячеистые сети позволяют обеспечить связность точек доступа без прокладки кабеля.

Гетерогенные сети ячеистой топологии, объединяющие большое число беспроводных датчиков и сравнительно немногочисленные точки доступа с кабельными каналами, могут стать практичным и экономически выгодным решением на предприятиях. Объединение датчиков в сеть дает возможность автоматизировать сбор данных, сократить затраты, связанные с ручным сбором информации.

Особенно целесообразно разворачивание БЯС, например, в арендуемых помещениях, где создавать кабельные сети было бы непрактично и дорого.

**Домашние сети.** В данной среде существенным преимуществом использования ячеистой сети является ее способность поддерживать приложения, требующие большой пропускной способности (например, для передачи видео высокого разрешения). В домашних условиях с помощью БЯС можно связать настольный ПК, ноутбук и карманные компьютеры, телевизионные приемники высокого разрешения, проигрыватели DVD, игровые приставки, видеокамеры и другие бытовые электронные устройства, что не потребует прокладки кабелей, установки сетевых розеток и специальной настройки устройств.

**Городские сети.** В городской среде с неоднородным покрытием или в корпоративной среде с оборудованием различного типа БЯС решаются также проблемы взаимодействия разных беспроводных (или проводных и беспроводных) сетей. Внедрение БЯС в большинстве случаев устраняет необходимость прокладки магистральной линии связи.

Экстренные службы в городах и мегаполисах обычно используют собственные, закрытые коммуникационные системы, работающие на разных радиочастотах. Это не позволяет сотрудникам таких служб связываться друг с другом в экстремальных условиях стихийного бедствия или техногенной катастрофы. Если же на территории города функционирует БЯС, то работники всех экстренных служб могут подключать свои коммуникационные устройства к данной единой сети, что способствует улучшению координации их действий.

**Доступ мобильных абонентов.** Сети 3G обеспечат относительно высокую скорость передачи данных (для стационарных пользователей — от 2 Мбит/с, для высокоподвижных — 144 кбит/с), однако они находятся на стадии развития, и ожидать желаемого результата предстоит еще не один год. А пока пользователь может реально рассчитывать на передачу со скоростью 19,2 кбит/с (с учетом GPRS — 20...30 кбит/с или теоретически 171,2 кбит/с). Между тем с внедрением БЯС удастся уже сейчас добиться более высоких значений скорости передачи без получения дополнительных лицензий и при незначительных инвестициях.

**Ячеистые сети коммунальных служб.** В качестве узлов выступают счетчики электроэнергии, газа и воды в одной сети, которые образуют самоорганизующуюся и самовосстанавливающуюся БЯС, управляемую через шлюз. Эти узлы периодически передают в шлюз накопленные данные. Один шлюз может поддерживать до нескольких тысяч приборов учета. Хранение данных в каждом узле, автоматическая синхронизация времени и реорганизация сети в обход отказавших каналов связи позволяют получить надежное, мощное, экономичное и отказоустойчивое решение для учета расхода ресурсов.

**Ячеистые сети военного применения (обеспечения общественной безопасности).** Перспективны, в частности, ячеистые тактические сенсорные сети. Каждый из миниатюрных сенсоров, оснащенных приемопередатчиками с функциями маршрутизации, обеспечивает беспроводную передачу информации (например, координат танка) по сенсорной сети командованию для ее анализа и принятия решения.

**Ячеистые сети для передачи развлекательной информации.** В течение ближайших пяти лет на автострадах появятся действительно мобильные ячеистые сети, где в качестве узлов будут выступать тысячи транспортных средств, оснащенных этой технологией. Например, фирма Moteran оснащает автомобили широкополосным оборудованием для ячеистых сетей, которые используются как для связи, так и для передачи развлекательной информации.

### **Преимущества БЯС**

**Небольшие объемы инвестиций.** Технология ячеистых сетей открывает перспективы развертывания беспроводной среды, не требующей особого планирования архитектуры. В итоге создание такой сети требует меньших финансовых затрат по сравнению с традиционными WLAN; так, установка и подключение точки доступа обходится в сумму менее 500 дол. Поэтому БЯС вызывают большой интерес муниципалитетов и организаций с ограниченным бюджетом.

**Значительная зона покрытия.** Благодаря многоскачковой маршрутизации не требуется наличие прямой связности между абонентом и БС.

**Быстрое развертывание и масштабируемость.** Новый абонент может быть подключен к БЯС за несколько минут (тогда как на построение новой кабельной сети уходят месяцы). Такая оперативность чрезвычайно ценна при целом ряде обстоятельств, в частности при проведении выставок, конференций и других подобных мероприятий. В этой области БЯС, без сомнения, найдут широкое применение.

**Живучість.** БЯС обычно использует несколько шлюзов для подключения к Интернету, маршрутизаторы обеспечивают децентрализованное построение и поддержание маршрутов в зависимости от ситуации на сети. Способствуют повышению живучести и такие особенности ячеистой сети, как отсутствие центра управления, возможность самоорганизации и самоадаптации в соответствии с изменяющимися параметрами среды (автоматическое конфигурирование и реконфигурирование).

**Высокая пропускная способность.** Ввиду физических свойств беспроводных каналов пропускная способность сети выше на более коротких расстояниях. Один из способов ее повышения — передача данных через несколько ретрансляторов, находящихся на малых расстояниях. Поэтому БЯС может обеспечить рост пропускной способности сети (требуя при этом меньшей мощности передатчика и удовлетворяя всем законодательным нормам, ограничивающим максимальную мощность передатчиков).

**Пространственное разделение.** Еще одно преимущество БЯС по сравнению с одноузловыми сетями (устройствами, совместно использующими одну точку доступа) — пространственное разделение. Множество устройств в БЯС могут подключаться одновременно через разные узлы, а малые расстояния передачи данных позволяют уменьшить влияние помех и вести одновременную передачу пространственно разделенных потоков данных.

**Интеллектуальность.** Интегрированная непосредственно в БЯС интеллектуальность обеспечивает автоматизацию процесса администрирования и оперативного управления сетью. Каждая точка доступа при включении автоматически обнаруживает другие точки доступа и «выясняет» свою роль в сети. Это устраняет необходимость ручного администрирования сети и имеет большое значение для оперативного развертывания оборудования. Как только сеть запускается в эксплуатацию, она начинает автоматически управлять своей работой.

### Проблемы создания и развития БЯС

Повсеместному распространению БЯС, несмотря на их большой потенциал, все еще препятствует ряд проблем, среди которых можно выделить несколько основных, к которым относятся: функциональная совместимость; эффективность протоколов на каждом из уровней эталонной модели OSI; управление сетью; качество обслуживания; безопасность передачи.

**Функциональная совместимость.** Одно из важных качеств БЯС (благодаря которым она получает все более широкое распространение) — способность к взаимодействию с существующими сетевыми стандартами и протоколами (Ethernet, VPN, VLAN, OSPF), что позволяет множеству БЯС разных производителей взаимодействовать на канальном и сетевом уровнях OSI, включая протоколы IPv4 и IPv6. Сеть должна объединять множество устройств с разными интерфейсами беспроводной связи. Поэтому в настоящее время в корпорации Intel ведутся работы по решению этой задачи на уровне устройств — создаются перенастраиваемые радиопередающие системы, адаптирующиеся к любой среде беспроводной связи. Это более дешевый подход по сравнению с реализацией нескольких беспроводных интерфейсов в каждом устройстве.

**Физический уровень.** К физическому уровню БЯС предъявляются следующие требования:

- ◆ адаптация радиоканала (минимизация ошибок за счет комбинации различных типов модуляции и способов кодирования);
- ◆ регулировка мощности передачи (для минимизации помех и минимизации задержки передачи);
- ◆ наличие нескольких приемопередатчиков; использование направленных антенн.

В перспективе рассматривается использование программируемых радиосредств (soft radio), применение MIMO-технологий, сверхширокополосных сигналов (UWB).

**Канальный уровень.** MAC-протоколы, применяемые для БЯС (в отличие от классических беспроводных WLAN), требуют децентрализованного кооперативного функционирования узлов на расстояние, большее, чем одна ретрансляция; они также должны учитывать мобильность абонентов и направленность трафика абонент—шлюз. Использование случайных протоколов доступа в БЯС неэффективно, поэтому перспективными являются, в частности, такие подходы:

- ◆ применение гибридных схем временного и кодового разделения каналов;
- ◆ использование нескольких каналов вместо одного (в одном маршрутизаторе несколько радиоинтерфейсов);
- ◆ интеграция в беспроводные маршрутизаторы различных протоколов (IEEE 802.11, IEEE 802.16, IEEE 802.15).

**Сетевой уровень (маршрутизация).** Основная задача уровня — обеспечить передачу пакета от отправителя к адресату посредством нескольких ретрансляций. В этом отношении БЯС радикально отличаются от технологий 3G, WLAN, WMAN, которые используют единственный беспроводный канал и потому не требуют сетевого уровня. В БЯС (как и в MANET) узлы строят и поддерживают маршруты для передачи пакетов. К основным требованиям, предъявляемым к методам маршрутизации, относятся [2; 4]:

- ◆ масштабируемость;
- ◆ эффективность;
- ◆ надежность;
- ◆ адаптивность;
- ◆ обеспечение заданного качества обслуживания (QoS).

На сегодня большое количество методов маршрутизации предложено для MANET [4]. Однако в MANET трафик может существовать между любой парой узлов и все узлы мобильны, тогда как в БЯС трафик имеет направленность абонент—шлюз, а абоненты могут быть как мобильными, так и стационарными. Очевидно, что ряд протоколов маршрутизации, предложенных для MANET, с определенными доработками может быть использован и БЯС [5]. Для максимизации производительности при передаче трафика могут применяться различные метрики, учитывающие полосу пропускания, уровень сигнала, его стабильность, задержку или другие параметры канала (узла).

**Транспортный уровень.** Протоколы транспортного уровня специально для БЯС пока не предложены, но многие из протоколов, предназначенных для MANET, могут служить основой для создания протокола транспортного уровня, ориентированного на БЯС [6].

**Управление сетью.** Большинство из функций управления сетью (например, мониторинг сети, управление мощностью передачи) должны быть реализованы в БЯС [3].

**Качество обслуживания.** Различные приложения генерируют потоки данных разной интенсивности и имеют различные требования к пропускной способности [7]. В этой области предстоит решить проблемы классификации и приоритизации трафика в узлах (и в объеме всей сети) для достижения максимальной производительности и обеспечения максимума удобства для пользователей.

**Безопасность.** Специфика обеспечения безопасности в БЯС определяется следующими их особенностями:

- ◆ децентрализованной сетевой архитектурой;
- ◆ уязвимостью радиоканала;
- ◆ динамичностью топологии.

Сервисы безопасности (секретность, подлинность, целостность, контроль доступа) должны учитывать эти и другие особенности подобных сетей и обеспечиваться теми или иными механизмами безопасности для защиты от определенного множества атак [8; 9].

\* \* \*

**Беспроводные ячеистые сети предлагают наиболее экономически выгодное и гибкое решение беспроводной связи. Хотя эта технология пока что находится в стадии развития, она уже демонстрирует значительный потенциал в области создания эффективных беспроводных вычислительных сред, которые отвечают требованиям бизнеса, могут использоваться в домашних условиях, в промышленности и среди поставщиков услуг широкополосной связи.**

Технология успешно сочетается с традиционными технологиями (3G, WLAN, WMAN). Основной ее недостаток — отно-

сительная сложность комбинирования с другими беспроводными технологиями при сочетании функций хоста и маршрутизатора в каждом узле сети. Однако **научные исследования последних лет дают основания ожидать создания эффективных беспроводных ячеистых сетей в ближайшем будущем.**

#### Литература

1. Sichertiu M. L. *Wireless mesh networks: opportunities and challenges // Proc. of the Wireless World Congress, May 2005.*
2. Akyildiz F., Wang X. *A Survey on Wireless Mesh Networks // IEEE Communications Magazine.— Vol. 43, № 9.— 2005.*
3. Миночкин А. И., Романюк В. А. *Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв'язок.— 2005.— № 2.— С. 53–58.*
4. Миночкин А. И., Романюк В. А. *Маршрутизация в мобильных радиосетях: проблема и пути ее решения // Зв'язок.— 2006.— № 6.— С. 15–21.*
5. Ramachandram K. N., Buddhikot M. M., Miller S. *On design and implementation of infrastructure mesh networks // Proc. of WiMesh'05.— 2005.*
6. Міночкін А. І., Романюк В. А., Сова О. Я. *Аналіз методів управління навантаженням в мобільних радіомережах на транспортному рівні моделі OSI // Зб. наук. праць ВІПІ НТУУ «КПІ».— 2006.— № 3.— С. 55–65.*
7. Миночкин А. И., Романюк В. А. *Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях // Зв'язок.— 2005.— № 8.— С. 17–24.*
8. Salem N. B., Hubaux J.-P. *Securing Wireless Mesh Networks // IEEE Wireless Communications.— Vol. 13, № 2.— 2006.*
9. Міночкін А. І., Романюк В. А., Шаціло П. В. *Виявлення атак в мобільних радіомережах // Зб. наук. праць ВІПІ НТУУ «КПІ».— 2005.— № 1.— С. 102–111.*

М. Ю. АРТЕМЕНКО, Л. Н. БЕРКМАН, С. В. ТОЛЮПА, І. О. ГЛАДКИХ

## ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

*Розглянуто інформаційні технології, які дають змогу підвищити ефективність системи TMN при реалізації завдань управління та забезпечити потрібні властивості інтелектуальної системи.*

Актуальною проблемою для телекомунікаційних мереж в Україні є створення інтелектуальних систем управління (ІСУ). Адекватною платформою для таких систем є TMN (Telecommunication Management Network). Проте традиційні технології керування, до яких можна віднести й TMN (у класичному виконанні), уже не гарантують необхідної якості управління, оскільки не враховують усіх невизначеностей, що впливають на систему. Удосконалення відомих алгоритмів адаптивного управління через їхню складність не завжди дає бажаний результат [1; 3].

З огляду на істотні переваги інтелектуальних технологій управління важливими передумовами

впровадження ІСУ на телекомунікаційних мережах України є наявність фундаментальної теоретичної бази — нових розробок із теорії мереж і систем зв'язку. Термін «інтелектуальна» система управління вживатимемо в тому розумінні, як це прийнято в дослідженнях зі створення інтелектуальних систем автоматичного управління та інтелектуальних мереж. Тобто *ІСУ має характеризуватися низкою особливих інтелектуальних властивостей, не притаманних традиційній системі управління.* Як базові для створення ІСУ відзначимо такі інтелектуальні технології: інформаційно-ентропійний метод, метод експертних оцінок при виборі показників якості, методи багатокритерійної оптимізації, інплементация в систему TMN локальних систем управління.

Особливу увагу доцільно приділити розрахунку такого показника, як мінімально необхідна кількість управляючої інформації, без чого неможливо спроектувати ІСУ з належною точністю параметрів. Розглянемо, наприклад, інтелек-