

УДК 620.9:658.26

DOI: 10.46548/21vek-2021-1055-0008

ИНТЕРНЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЩЕЙ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНОГО LPWAN

© 2021

Михайлов Петр Григорьевич, доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник «Центра сопровождения научных исследований»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, 1А/11 e-mail: pit_mix@mail.ru)

Зикирбай Куаныш, PhD докторант Института автоматизации и информационных технологий

Базарбай Лашын, PhD докторантка Института автоматизации и информационных технологий

Бактыбаев Мурат Кыргызбаевич, кандидат физико-математических наук,
ассоциированный профессор Института автоматизации и информационных технологий

Алимбаев Шынгыс, PhD, старший научный сотрудник
кафедры «Робототехника и технические средства автоматизации»

НАО КазННТУ имени К.И. Сатпаева

(050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22,

e-mails: kuanish_921@mail.ru, lashyn_7754@mail.ru, m.baktybayev@satbayev.university, chigiz_kopa@mail.ru)

Аннотация. Мировой энергетический сектор способствует интеграции возобновляемых источников энергии во взаимосвязанные энергетические системы. Управление спросом в энергетических системах привлекло значительное внимание промышленности и академических кругов к возможностям сформировать новые гибкие методики для реагирования на изменения в вводе возобновляемой энергии в систему. Однако зачастую концепции управления спросом все еще находятся на стадии экспериментов. Одним из препятствий для использования управления спросом является то, что текущая информационная инфраструктура в основном предназначена для централизованных систем и не соответствует требованиям УС. Чтобы преодолеть этот барьер, предлагается новая информационная инфраструктура, обозначенная как *Internet of Energy Things (IoET)*, позволяющая сделать УС практичным, основываясь на новейшей технологии беспроводной связи – маломощной глобальной сети (*LPWAN*). Основным преимуществом *LPWAN* перед общими услугами пакетной радиосвязи (*GPRS*) и зональным Интернетом вещей (*IoT*) является широкая зона покрытия, обеспечивающая минимальное энергопотребление и затраты на обслуживание. На этом фоне в статье кратко рассматриваются репрезентативные технологии *LPWAN* узкополосного Интернета вещей (*NB-IoT*) и технологии дальнего действия (*LoRa*), а также сравнение их с *GPRS* и технологиями зонального Интернета вещей. Для *IoET* предлагается архитектура «от беспроводной сети к облаку», основанная на использовании технических характеристиках *LPWAN*. Кроме того, в статье рассматривается потенциал *IoET* в различных сценариях приложений УС.

Ключевые слова: глобальная сеть, интернет вещей, узкополосный, технология *LoRa*, управление.

INTERNET OF ENERGY THINGS BASED ON WIRELESS LPWAN

© 2021

Mikhailov Petr Grigorievich, doctor of Technical Sciences, professor,
leading researcher at the Center for Support of Scientific Research

Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, Baidukova proezd / Gagarina street, 1A / 11 e-mail: pit_mix@mail.ru)

Zikirbai Kuanysh, PhD, doctoral student of the Institute of Automation and Information Technologies

Bazarbai Lashyn, PhD, doctoral student of the Institute of Automation and Information Technologies

Baktybaev Murat Kyrgyzbaevich, candidate of Physical and Mathematical Sciences,
associate professor of the Institute of Automation and Information Technologies

Alimbaev Shyngys, PhD, senior researcher Department of "Robotics and technical means of automation"

NAO KazNRTU named after K.I. Satpayev

(050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev st., 22,

e-mails: kuanish_921@mail.ru, lashyn_7754@mail.ru, m.baktybayev@satbayev.university, chigiz_kopa@mail.ru)

Abstract. The global energy sector promotes the integration of renewable energy sources into interconnected energy systems. Demand management in energy systems has drawn considerable industry and academic attention to the potential to shape new flexible methodologies to respond to changes in the introduction of renewable energy into the system. However, demand management concepts are often still in the experimental stage. One of the barriers to using Demand Management (*Demand Management*) is that the current information infrastructure is primarily designed for centralized systems and does not meet the requirements of Demand Management. To overcome this barrier, a new information infrastructure, designated the Internet of Energy Things (*IoET*), is proposed to make the CA practical by building on the latest wireless technology, the Low Power Wide Area Network (*LPWAN*). The main advantage of *LPWAN* over General Packet Radio Service (*GPRS*) and Zonal Internet of Things (*IoT*) is its wide coverage, ensuring minimal power consumption and maintenance costs. Against this background, the article briefly examines representative *LPWAN*

technologies of narrowband Internet of things (*NB-IoT*) and long-range technologies (*LoRa*), as well as comparing them with *GPRS* and zone *IoT* technologies. For the *IoET*, a wireless-to-cloud architecture is proposed based on the *LPWAN* specification. In addition, the article discusses the potential of *IoET* in various CA application scenarios.

Keywords: global network, internet of things, narrowband, *LoRa* technology, management.

Введение. Под сильным давлением защитников окружающей среды, мировой энергетический сектор переходит к чистому и устойчивому развитию. Концепция интеллектуальных сетей получила широкое распространение в последнее десятилетие как средство интеграции более высоких объемов возобновляемых источников энергии [1, 2]. В 2013 г. правительство Казахстана объявило о новой концепции по переходу к зеленой экономике для демонстрации новых методов генерации чистой энергии [3]. Правительство и энергетические предприятия признают, что создание магистрали энергии – интернета через умные сети является ключевой стратегией продвижения новых технологий в области чистой энергии для новой энергосберегающей стратегии.

Чистая энергетическая система требует надежной коммуникационной инфраструктуры, которая может принимать большие вариации от возобновляемых источников энергии [4]. С точки зрения теории управления, максимизация наблюдаемости системы повышает ее управляемость. Следовательно, чтобы сбалансировать сложную энергетическую систему, необходимо получить обширную информацию как со стороны предложения, так и со стороны спроса. Информационный интернет – это надежный инструмент, с помощью которого можно получать информацию с минимальными затратами. Тем не менее, энергетические системы по-прежнему ограничены закрытой информационной средой из-за управленческих и технических проблем.

В частности, со стороны спроса, например, коммуникация инфраструктуры не завершена на уровне распределения электроэнергии [5], и еще меньше коммуникационной инфраструктуры доступной для использования системы на более низких уровнях электрического напряжения. Несмотря на наработки в смарт сети, за последнее десятилетие периферийные энергосети все еще не работают в сфере действия системных операторов.

Управление – это не единственная проблема, поскольку технологии также играют критически важные роли в вопросе управления спросом (УС). В современной архитектуре автоматизации энергетики, управление было разработано на основе стандартов для удовлетворения особых требований централизованных систем генерации и передачи электрической больших объемов электроэнергии. Благодаря быстрой интеграции и объединения энергопотребления, текущий дизайн не может соответствовать требованиям быстрых изменений, которые происходят по запросу разных потребителей. Между тем, у конечных пользователей нет необходимого опыта для эксплуатации и обслуживания таких сложных систем. Под влиянием этих обстоятельств, техническая сложность стала ос-

новным узким местом ограничения приема приложений УС, например, таких как реагирование на запросы в реальном мире [6, 7].

Чтобы преодолеть этот барьер, используется глобальная сеть с низким энергопотреблением (*LPWAN*), которое является новым техническим решением в области беспроводного управления в секторе связи. В отличие от *Wi-Fi* и *ZigBee*, *LPWAN* позволяет формировать объемные беспроводные соединения на большие расстояния с минимумом энергопотребления и обслуживания [8]. Два представителя технологии *LPWAN* – это узкополосный Интернет вещей (*NB-IoT*) [9] и технология *Long Range (LoRa)* [10]. *NB-IoT* – эта технология унаследована от сотовой связи и без проблем работает на существующих глобальных системах мобильной связи (*GSM*), и в дальнейшем предполагается эксплуатация в сети лицензионных диапазонов частот [11, 12].

Материалы и результаты исследования. 1. Технологии *LPWAN*. *LPWAN* представляет собой новую тенденцию в развитии технологий Интернета вещей. В отличие от *3G/4G* или *Wi-Fi*, эта система не ориентирована на эксплуатацию с высокими скоростями передачи данных или минимизации задержки. Для *LPWAN* определены основными такие показатели производительности, как энергоэффективность, масштабируемость и покрытие. На рынок вышло много разработчиков *LPWAN*, из которых двумя наиболее широко признанными являются технологии *LoRa* и *NB-IoT*. Поясним особенности указанных технологий.

1.1. Технология *LoRa*. Технология *LoRa*, разработанная *Semtech*, является наиболее широко используемой технологией для *LPWAN* в нелицензируемой полосе частот ниже 1 ГГц диапазона. Благодаря использованию нелицензионных диапазонов сеть *LoRa* открыта для клиентов, у которых нет разрешения от регуляторов радиочастоты. В результате сеть *LoRa* можно легко использовать в диапазоне более нескольких километров и затратами клиентов с минимальными вложениями и эксплуатационными расходами.

Технология *LoRa* значительно улучшила существующие технологии для достижения поставленной цели. Первый из них модуляция *LoRa* на основе схемы с расширенным спектром линейная частотная модуляция (ЛЧМ), в котором используются широкополосные линейные импульсы с частотной модуляцией, частота которых увеличивается или уменьшается в зависимости от кодированной информации. Максимальные потери связи (МПС) для модуляции *LoRa* достигают 148 дБ – на 20 дБ больше, чем у существующей связи на суб-ГГц – в чтобы увеличить дальность покрытия до километров и увеличить емкость сети. Модуляция *LoRa* имеет шесть факторов расширения, которые обеспечивают адаптивную скорость передачи данных.

Эта функция позволяет одновременно передавать несколько сигналов с разным расширением спектра по одному и тому же частотному каналу.

Другим улучшением является оптимизация сетевого протокола *LoRa* для датчиков с ограничением энергии, поскольку трафик восходящего канала обычно превышает трафики нисходящих каналов для сетей *IoT*. В этой среде спецификация технологии *LoRa* определила три режима разных окон приема данных для разных сценариев приложений.

К настоящему времени технология *LoRa* была протестирована в 56 странах на демонстрациях интеллектуальных счетчиков, отслеживания потребления электроэнергии, интеллектуальных устройств и интеллектуального здравоохранения. В Казахстане оператор связи Казахтелеком развернул сеть *LoRa*, которая охватывает всю страну. Кроме того, *LoRa Alliance*, насчитывающий более 300 организаций, сотрудничает с целью определения открытого глобального стандарта для безопасного и операторского подключения *LPWAN*, представляющего различные уровни экосистемы, от наборов микросхем, модулей, устройств и шлюзов до сетей и серверов приложений.

1.2. Технология NB-IoT. *NB-IoT* – это новая узкополосная система *IoT*, основанная на существующих функциях *LTE*. Технологический стандарт был объявлен в рамках партнерского проекта третьего поколения (*3GPP*) в 2016 году, который обещает обеспечить улучшенное покрытие для огромного количества недорогих устройств с низкой пропускной способностью и низким энергопотреблением в приложениях, устойчивых к задержкам.

Технология *NB-IoT* использует узкополосные каналы для обеспечения более высокой чувствительности и большого радиуса действия за счет ограниченной скорости передачи данных – обычно ниже нескольких сотен бит в секунду (бит/с). Демодулированный спектр намного шире, чем у отдельных передач, так что несколько восходящих линий связи могут функционировать одновременно. Базовая станция несет сложность одновременного декодирования нескольких узкополосных каналов, не зная точной частоты этих каналов. Преимущества технологии *NB-IoT* включают в себя расширенное покрытие внутри помещений, которое нацелено на МПЧ 164 дБ, и ее способность подключать огромное количество устройств с низкой пропускной способностью с адаптированной скоростью передачи данных [13, 14].

1.3. Сравнение с технологией GPRS. До *LPWAN* многие бизнес-приложения *IoT* работали в сетях *GPRS*. Технология *GPRS* обычно называется мобильной связью «2.5G»; последующие технологии *3G* и *4G* нацелены на высокие скорости передачи данных на устройство или на минимальную задержку, чтобы поддерживать высококачественную передачу голоса, изображения и видео. В таблице 1 сравниваются основные характеристики технологий *GPRS* и *LPWAN*.

1.4. Сравнения с областью технологии IoT. Что касается соединений между личными устройствами,

то на текущем рынке Интернета вещей доминируют *ZigBee* и *WiFi*. Эти технологии обладают разными функциями и характеристиками. *Wi-Fi* имеет высокую скорость передачи данных и низкую задержку, но его энергопотребление намного выше, чем у *ZigBee* [15, 16].

Таблица 1 – Сравнение технологий GPRS и LPWAN

Технология	Потребляемая мощность	Задержка	Покрывтие	Скорость
GPRS	Высокая	Низкая	МСП 130 дБ	Максимум 171,2 кбит/с
LPWAN	Низкая		МСП 150 дБ	Адаптивный от 0,1 кбит/с до 250 кбит/с

В таблице 2 сравниваются расстояние связи, максимальное соединение и скорость передачи данных между *WiFi*, *ZigBee* и *LPWAN*. *LPWAN* обеспечивает гораздо большее расстояние покрытия и более широкие возможности подключения для сетей *IoT*.

Таблица 2 – Сравнение технологий ZigBee, Wi-Fi и LPWAN

Технология	Расстояние связи	Максимальное соединение	Скорость передачи данных
ZigBee	10–75 м	≤ 255	Максимум 171,2 кбит/с
Wi-Fi	100 м	≤ 255	> 10 Мбит/с
LPWAN	3 км в масштабе города	≤ 50 000 (<i>NB-IoT</i>), ≤ 200 000 (<i>LoRa</i>)	Адаптивный от 0,1 до 250 кбит/с

2. Архитектура IoET на основе LPWAN. 2.1. Архитектура беспроводного подключения к облаку. В разделе 2 представлены ключевые особенности *LPWAN* и сравниваются *LPWAN* с технологиями сотовой связи (*GPRS*) и территорией Интернет вещей (*ZigBee* / *WiFi*). Основные преимущества *LPWAN* заключаются в его широком покрытии связи и низком энергопотреблении; его недостатками являются относительно низкая скорость передачи данных и ограниченные вычислительные возможности его оконечных устройств. Поэтому для *IoET* предлагается архитектура «от беспроводной сети к облаку», чтобы интегрировать облачные вычисления в конечные устройства через *LPWAN*, как показано на рисунке 1а [16, 17].

Как показано на рисунке 1, *IoET* обеспечивает связь между конечными устройствами и облачную платформу через беспроводные соединения. По сравнению с областью архитектуры *IoT*, показанной на рисунке 1б, основное различие заключается в экономии на шлюзе *IoT* области, связанном с сетевым уровнем шлюза. В результате архитектура *IoET* на основе *LPWAN* становится управляемой как для операторов сети, так и для конечных пользователей. Эта упрощенная сетевая топология удобно расширяет возможности интеграции датчиков и устройств управления в реальные энергетические системы. Кроме того, функции конечных устройств могут быть расширены за счет вычислительных мощностей, предоставляемых облачным центром.

Три функциональных уровня архитектуры беспроводной связи в облаке, как показано на рисунке 1а, обобщаются в следующих подразделах.

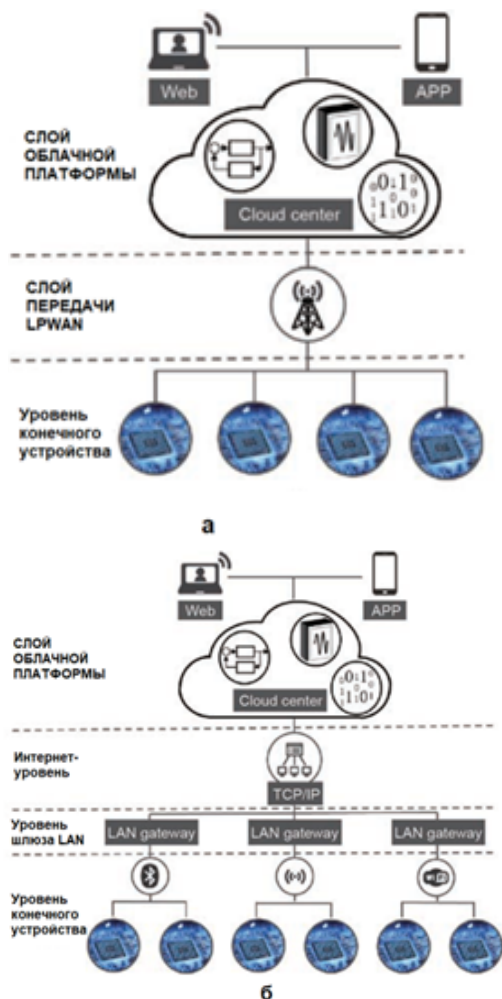


Рисунок 1 – Архитектура IoT на основе LPWAN(a);
область архитектуры Интернета вещей LAN локальная
(б) сеть

2.2. Уровень дистанционного зондирования и контроля. Фактические устройства, связанные с энергопотреблением, подключаются через уровень удаленного контроля и управления, который связан с огромным количеством датчиков энергии, контроллеров, встроенных компьютеров и модулей беспроводной связи. Датчики энергии отслеживают состояния устройств и отправляют их в облачный центр, а контроллеры доставляют инструкции, предоставленные облачным центром.

Встроенные системы компактно включают встроенный центральный процессоры (ЦП), память, периферийные устройства и беспроводные коммуникационные модули в качестве носителя датчиков энергии и контроллеров для межмашинного преобразования связи. Они также контролируют действия, связанные с требованиями к качеству обслуживания (*QoS*). Следовательно, в дополнение к функциям обнаружения и управления, услуги в реальном времени предоставляются через встроенные системы, чтобы повысить чувствительность *QoS* связи к беспроводной передаче и облачным вычислениям. Эта концепция, получившая название «туманные вычисления», заполняет технические пробелы облачных вычислений [18, 19].

2.3. Уровень передачи LPWAN. Устройства с распределенной энергией обычно географически рассредоточены, что затрудняет использование таких технологий Интернета вещей, как *ZigBee* и *WiFi*. При таких сценариях альтернативой становится *LPWAN*.

Уровень передачи *LPWAN* устанавливает беспроводные каналы между конечными устройствами и облачной платформой. В качестве репрезентативных технологий технологии *NB-IoT* и *LoRa* подходят для различных сценариев приложений. В отдаленных районах без покрытия сотовой связью сеть *LoRa* является практическим выбором, поскольку она образует звездообразную топологию вокруг оконечных устройств, которые обслуживаются одной базовой станцией (*BS*). В примере, показанном на рисунке 2а, базовая станция *LoRa*, установленная на подстанции в сельской местности, обменивается данными с распределенными фотоэлектрическими (*PV*) панелями. В городе с сотовыми сетями конечные устройства просто подключаются к облачному центру через сотовую сеть *NB-IoT*, выплачивая плату за передачу данных телекоммуникационным компаниям. На рисунке 2б показан сценарий, в котором облачный центр координирует бытовую технику и электромобили (*EV*), рассредоточенные по всему городу через сотовую сеть *NB-IoT*. Для систем с особыми требованиями к безопасности одним из решений является создание виртуальной частной сети с защищенными каналами в сотовой сети *NB-IoT*. Другой вариант – построить частную сеть *LoRa* для физической защиты соединений.

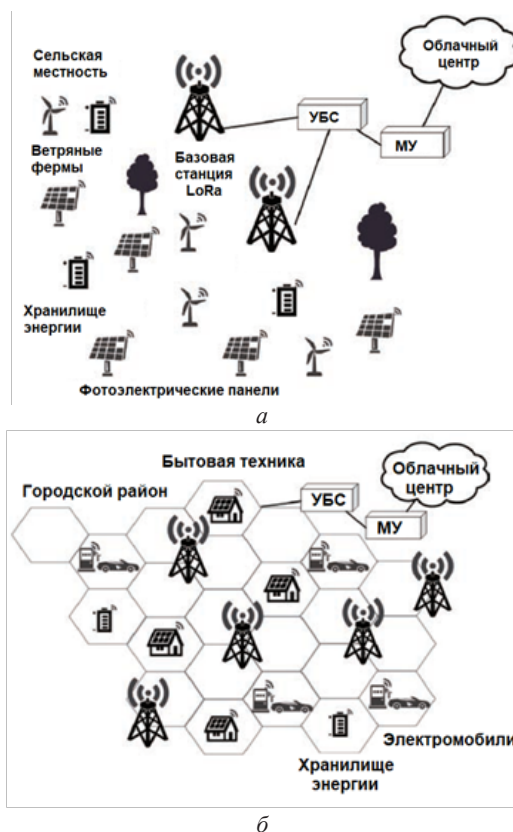


Рисунок 2 – Сценарии использования сети LoRa в сельской местности (а) и в городе (б) УБС: управление базовой станцией; МУ: мультисервисное управление

2.4. Слой облачной платформы. Уровень облачной платформы служит областью, на которой размещаются энергетические приложения посредством обмена данными и связи между устройствами. Более конкретно, платформа объединяет функции преобразования информации, интеграции и взаимодействия, как показано на рисунке 3. Соответствующие функции описаны ниже [20].

(1) **Разбор протокола.** *IoET* должен иметь дело с коммуникациями между различными конечными устройствами, имеющими разные протоколы. Нельзя реалистично предположить, что каждое устройство понимает все протоколы в сети. Вместо этого протоколы анализируются облаком. платформу, кроме полевых устройств. Поэтому удобно разделять фактические устройства и протоколы связи под централизованным управлением и обслуживанием. Для достижения большей гибкости облачная платформа также предоставляет программный интерфейс для включения определяемых пользователем протоколов для соединений с неизвестными устройствами.

(2) **M2M-связь.** M2M-коммуникация среди энергетических устройств – это основная функция *IoET*, позволяющая расширить взаимодействие сетей между устройствами. Ограничено беспроводной пропускной способности, шаблон «подписка/публикация» подходит для связи M2M. Многие технологии промежуточного программного обеспечения, управляемые событиями, имеют реализован этот шаблон, который обеспечивает практически неограниченную адресацию устройств и эффективное использование полосы

пропускания. Шифрование данных есть также поддерживается промежуточным программным обеспечением для повышения безопасности связи.

(3) **Хранение и анализ больших данных.** Доступ к огромному количеству датчики неизбежно приводят к огромным требованиям к хранению и анализу данных. Облачная платформа поддерживает доступ как к данным в реальном времени, так и к историческим данным для конкретных приложений энергосистемы. Доступ к данным в реальном времени осуществляется из базы данных памяти, чтобы удовлетворить требованиям низкой задержки и высокого параллелизма. Доступ к историческим данным осуществляется распределенными файловыми системами, чтобы удовлетворить потребности в хранении больших объемов данных и анализе больших данных.

(4) **Взаимодействие с конечным пользователем.** В настоящее время энергетические системы ограничено закрытой информационной средой, чтобы защитить управленческие операции. Однако негибкий обмен информацией затруднит решение разнообразных взаимодействий между различные роли конечных пользователей в эпоху чистой энергии. Облачная платформа расширяет возможности взаимодействия пользователей, визуализируя энергетические устройства в облачный пул для обеспечения доступа независимо от платформы. Также настроен облачный инструмент для программирования рабочего процесса для определяемые пользователем операции путем редактирования графики, модели и данных визуализировал энергетические устройства на платформе.



Рисунок 3 – Структура слоя облачной платформы

Закключение. Технологии *NB-IoT* и *LoRa* – являются новыми приложениями беспроводной *LPWAN* в области связи и управления. По сравнению с *GPRS*, *LPWAN* является лучшим решением с точки зрения низкого энергопотребления и улучшенного покрытия. По сравнению с *IoT ZigBee* и *WiFi*, *LPWAN* обеспечивает массовые соединения на большие расстояния

при минимальных затратах на строительные работы и техническое обслуживание. *IoET*, основанный на *LPWAN*, обеспечивает широкие подключения энергетических устройств в рамках архитектуры «беспроводное соединение-облако» по очень низкой цене и без экспертных знаний. Таким образом, *IoET* расширяет доступность энергетической информационной систе-

мы, чтобы соответствовать требованиям приложений на стороне спроса.

Статья поступила в редакцию 20.06.2021

Статья принята к публикации 15.09.2021

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Farhangi H. The path of the smart grid. IEEE Power Energy M 2010;8(1):18–28.
2. Massoud Amin S, Wollenberg BF. Toward a smart grid: Power delivery for the 21st century. IEEE Power Energy M 2005;3(5):34–41.
3. <https://vie.korem.kz/uploads/koncepciya-po-perehodu.pdf> - КОНЦЕПЦИЯ по переходу Республики Казахстан к «зеленой экономике».
4. Bui N, Castellani AP, Casari P, Zorzi M. The Internet of energy: A web-enabled smart grid system. IEEE Network 2012;26(4):39–45.
5. Palensky P, Dietrich D. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. IEEE Trans Ind Inform 2011;7(3):381–8.
6. Mohsenian-Rad AH, Wong VWS, Jatskevich J, Schober R, Leon-Garcia A. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. IEEE Trans Smart Grid 2010; 1(3):320–31.
7. Lopes JAP, Soares FJ, Almeida PMR. Integration of electric vehicles in the electric power system. Proc IEEE 2011;99(1):168–83.
8. Petajajarvi J, Mikhaylov K, Roivainen A, Hanninen T, Pettissalo M. On the coverage of LPWANs: Range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. In: Proceedings of the 14th International Conference on ITS Telecommunications; 2015 Dec 2–4; Copenhagen, Denmark. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2015. p. 55–9.
9. Ratasuk R, Vejlgard B, Mangalvedhe N, Ghosh A. NB-IoT system for M2M communication. In: Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops; 2016 Apr 3–6; Doha, Qatar. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2016. p. 428–32.
10. Mikhaylov K, Petajajarvi J, Haenninen T. Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology. In: Proceedings of the 22th European Wireless Conference on European Wireless; 2016 May 18–20; Oulu, Finland. Frankfurt am Main: VDE Press; 2016.
11. Zigbee, “Zigbee resource guide,” 2016, http://www.nxtbook.com/nxtbooks/webcom/zigbee_rg2016/#/0, (accessed February 24, 2017).
12. EnOcean, “EnOcean – The World of Energy Harvesting Wireless Technology,” 2015, <https://www.enocean.com/en/technology/white-papers/>, (accessed February 24, 2017).
13. <https://kapital.kz/tehnology/89788/sotovyye-operatory-vnedryayut-internet-veshchey.html>
14. Jin T, Noubir G, Sheng B. WiZi-Cloud: Application-transparent dual ZigBee-WiFi radios for low power internet access. In: Proceedings of 2011 IEEE INFOCOM; 2011 Apr 10–15; Shanghai, China. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2011. p. 1593–601.
15. Alanne K, Saari A. Distributed energy generation and sustainable development. Renew Sust Energ Rev 2006; 10(6): 539–58.
16. Djapic P, Ramsay C, Pudjianto D, Strbac G, Mutale J, Jenkins N, et al. Taking an active approach. IEEE Power Energy M 2007;5(4):68–77.
17. Albadi MH, El-Saadany EF. A summary of demand response in electricity markets. Electr Pow Syst Res 2008;78(11):1989–96.
18. Kempton W, Tomić J. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. J Power Sources 2005;144(1):268–79.
19. N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, and O.Hersent, “Lorawan specification,” LoRa Alliance, January 2015, <https://www.loraalliance.org/portals/0/specs/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf>, (accessed February 24, 2017).
20. I. Poole, “Weightless wireless — m2m white space communications-tutorial,” 2014, <http://www.radioelectronics.com/info/wireless/weightless-m2m-white-space-wireless-communications/basics-overview.php>, (accessed February 24, 2017).