

## Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 005.8:615.478

### РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ СЕТЯХ ГАЗО-, ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ\*

*Д.С. Будаев, В.Б. Ларюхин, Д.С. Косов, Е.В. Симонова*

ООО «НПК «Разумные решения»  
443013, г. Самара, ул. Московское шоссе, 17, оф. 1201  
E-mail: simonova@smartsolutions-123.ru

*Описываются принципы и тенденции развития концепции интеллектуальных сетей энергетических ресурсов Smart Grid. В качестве решения задач указанной проблематики предлагается создание интеллектуальной сетевцентрической клиентоориентированной системы газо-, тепло- и электроснабжения, прототипом которой является система имитационного моделирования и адаптивного распределения ресурсов в интегрированных сетях ресурсного снабжения.*

**Ключевые слова:** *Smart Grid, мультиагентные технологии, сетевцентризм, интегрированные сети ресурсного снабжения.*

#### Введение

Идеология построения интеллектуальных сетей энергообеспечения, называемых Smart Grid (SG) [1] (термин введен Майклом Барром (Michael T. Burd) в 2003 году [2]), является в настоящий момент одним из наиболее существенных и развиваемых направлений модернизации глобальной энергетики. Предпосылки интереса мирового сообщества к идее развития концепции SG очевидны: растут показатели потребления ресурсов, повышается стоимость производства электроэнергии, увеличение количества и мощности площадок производства ресурсов негативно влияет на состояние окружающей среды, существующие сети поставки энергоресурсов резко реагируют на колебания в экономической сфере.

С ростом требований мирового сообщества используемые модели производства и поставки энергетических ресурсов перестают быть удовлетворительными; например, текущий объем потерь электроэнергии в сетях Российской Федерации составля-

---

\* Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки РФ, поддержавшему разработку по созданию интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий в реальном времени по государственному контракту Минобрнауки РФ № 14.514.11.4093.

*Денис Сергеевич Будаев, ведущий разработчик.*

*Владимир Борисович Ларюхин, директор по разработкам.*

*Даниил Сергеевич Косов, аналитик.*

*Елена Витальевна Симонова (к.т.н.), доцент кафедры «Информационные системы и технологии» Самарского государственного аэрокосмического университета, ведущий аналитик ООО «НПК «Разумные решения».*

ет более 10 % [3, 4]. Эти и другие причины подталкивают правительства и бизнес-круги различных стран к скорейшей реализации принципов концепции SG.

Стоит отметить, что трактовка термина Smart Grid геоинвариантна [5-8]. Однако в целом к сетям энергоснабжения, развиваемым в рамках концепции SG, можно выдвинуть следующие требования: адаптивность, эффективность, доступность и возможность обратной связи, надежность, информационная обеспеченность, использование интеллектуальных счетчиков, динамическая тарификация (Demand Response), усложнение и интеграция функций SG, развитие микросетей, объединение идей SG и «умного дома», альтернативные источники энергии [9, 10].

В настоящий момент наиболее остро стоит проблема развития сетей электроснабжения. Правительство РФ в целях экономии энергоресурсов, в частности, проводит в ряде областей России эксперимент по установке норм потребления электроэнергии [11]. Однако не менее актуальной является задача интеграции сетей газо-, тепло- и электроснабжения (ресурсного снабжения) для повышения эффективности использования энергоресурсов и снижения цен для потребителей. Совмещение концепций SG и интеграции сетей ресурсного снабжения позволит сделать их более гибкими, надежными и устойчивыми за счет возможности компенсации одних ресурсов другими.

В данной работе рассматривается система имитационного моделирования и адаптивного распределения ресурсов в интегрированных сетях газо-, тепло- и электроснабжения с использованием принципов сетецентризма и мультиагентных технологий [12].

#### **Мультиагентный подход к разработке интеллектуальной сетецентрической клиентоориентированной системы ресурсного снабжения**

В рамках развития концепций SG и интеграции сетей ресурсного снабжения необходимо разработать интеллектуальную сетецентрическую клиентоориентированную систему (ИСКС) газо-, тепло- и электроснабжения, которая позволила бы обеспечить следующие функции:

- полноценный мониторинг сетей электроснабжения;
- эффективное распределение ресурсов в системе электроснабжения;
- соответствие производимого числа ресурсов потребляемому;
- быструю адаптацию сетей к происходящим событиям;
- возможность прогнозирования и работы с планом управления сетями на длительный горизонт.

Данная система должна учитывать тенденции развития SG, быть рассчитанной на работу с современными элементами сетей (в том числе интеллектуальными счетчиками и т. п.) и предусматривать интеграцию с существующими информационными системами.

Для построения подобных систем предпочтительно использование мультиагентных технологий, которые позволят внести элементы самоорганизации на основе принципов конкуренции и кооперации в работу рассматриваемых сетей для оперативной, гибкой и эффективной реакции на изменение потребностей в электроэнергии или предоставляемых сетями ресурсах.

Однако сложность подобного рода систем не позволит создать одну масштабируемую систему, пригодную для использования на всех уровнях: от отдельной квартиры в доме – до целого региона.

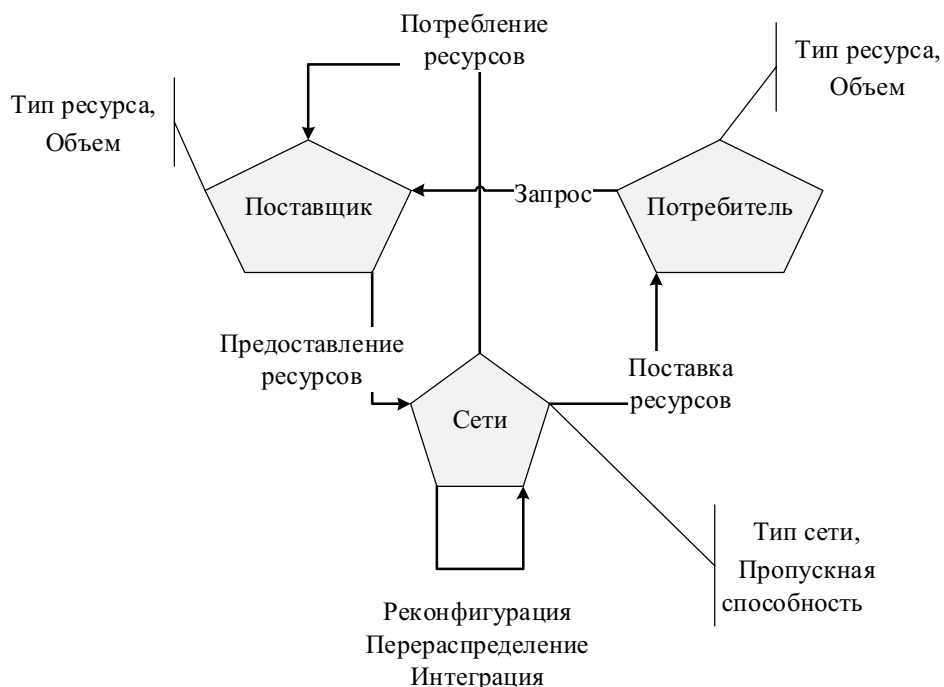
В этой связи в настоящем проекте предлагается изначально создавать такую систему, как сетецентрическая («система систем»), построенная как адаптивная р2р-

сеть планировщиков отдельных ресурсов, причем с рекурсивной вложенностью для развертывания на любом уровне («матрешечная архитектура»).

Сетецентрический подход в разработке ИСКС позволит обеспечить эффективное распределение ресурсов в сетях энергоснабжения и повысить общий уровень удовлетворения запросов потребителей, а также обеспечит адекватность производственных затрат уровню потребления за счет согласованного построения планов производства и поставки ресурсов с учетом всех параметров потребителей и поставщиков. Более подробно принципы и преимущества сетецентрического подхода и мультиагентных технологий описаны в [12]. При разработке ИСКС сети ресурсного снабжения моделируются как динамическая сеть агентов потребностей и возможностей, которые договариваются между собой, достигая баланса интересов (консенсуса). Важным достоинством мультиагентных технологий является их ориентация на работу в режиме реального времени [13].

### Онтология для описания сетей ресурсного снабжения

Для описания базовых понятий предметной области и связей между ними разработана онтология. Онтология позволяет описывать объекты и процессы, законы поставки, формирования спроса и производства ресурсов, учитывая структуру сетей, а также детализировать и накапливать информацию о конкретных объектах сетей. На рис. 1 показан верхний уровень онтологии управления сетями ресурсного снабжения, который включает три базовых концепта, соответствующих объектам потребления, производства и распределения ресурсов («Потребитель», «Поставщик» и «Сеть» соответственно). Принципы проектирования и использования онтологии в информационных системах описаны в [14].



Р и с. 1. Верхний уровень онтологии управления сетями ресурсного снабжения

На основе использования простейших базовых онтологических сущностей в совокупности с практически неограниченными возможностями онтологии к расширению [14] создан конструктор топологии сетей, позволяющий учесть все их необходимые параметры.

### Архитектура ИСКС

ИСКС реализована в виде следующих программных модулей:

- мультиагентная платформа, включающая подсистему передачи сообщений, диспетчер агентов, подсистему формирования и доступа к сцене (модели конкретной ситуации), инспектор агентов, журнал переговоров агентов;
- модуль задания начальной конфигурации сети;
- модуль интеграции;
- модуль адаптивного планирования заказов и ресурсов;
- модуль построения отчетов;
- модуль разграничения прав доступа.

Укрупненная архитектура системы, включающая основные модули и компоненты, представлена на рис. 2.



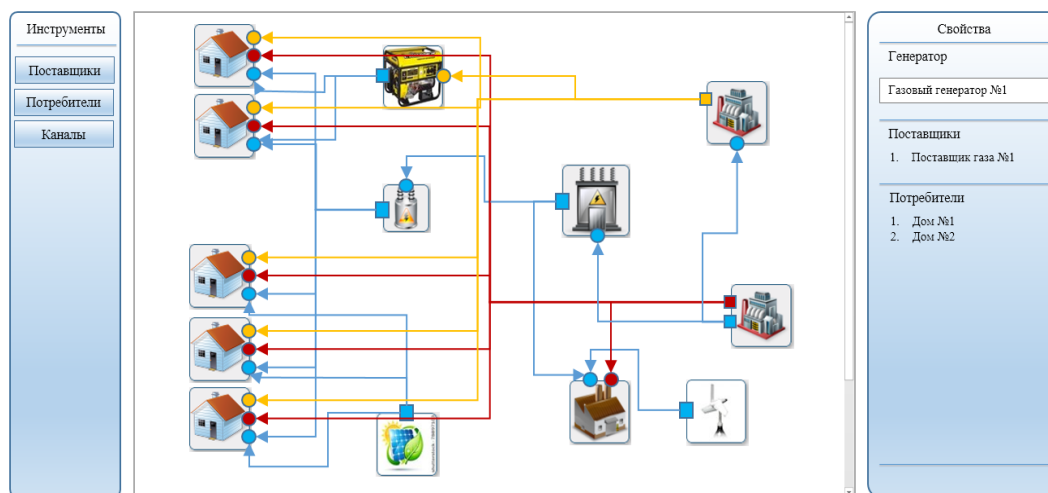
Р и с. 2. Архитектура ИСКС

Первоначально администратор сети задает общую конфигурацию сетей ресурсного снабжения через автоматизированное рабочее место (АРМ). Данная конфигурация загружается в мультиагентную платформу, где при помощи диспетчера агентов каждому объекту сетей сопоставляется программный агент, представляющий

интересы этого объекта. С использованием модуля интеграции осуществляется сбор реальных данных с оборудования сетей ресурсного снабжения, а также из существующих информационных систем, выполняющих сетевой мониторинг.

Потребители и поставщики через соответствующие АРМы указывают свои параметры потребления и производства ресурсов. После этого при помощи модуля передачи сообщений агенты, представляющие объекты сети, начинают переговоры, которые путем торгов и уступок завершаются достижением консенсуса – решения, устраивающего все стороны. Если такое решение невозможно, программные агенты вырабатывают рекомендации потребителям об изменении объемов спроса или предложения поставщикам, которые отправляются пользователям системы через АРМы. В такой диалоговой форме общение системы с пользователем продолжается до тех пор, пока не будут сгенерированы предложения, устраивающие всех «игроков». В ходе работы с системой ее пользователи могут получать доступ к различным статистическим данным. Доступ пользователя к функциям системы и данным определяется модулем разграничения прав доступа.

Пользователям ИСКС предоставляется удаленный доступ к системе с любого устройства, обладающего связью с Интернет и допускающего использование браузера (ПК, ноутбуки, планшеты, мобильные телефоны). Для этого разработан пользовательский интерфейс ИСКС на языке HTML 5 с ориентацией на web- и облачные технологии. На рис. 3 представлено окно конструктора сетей ресурсного снабжения, доступного администратору сети через соответствующий АРМ.



Р и с. 3. Окно конструктора сетей ресурсного снабжения

### Основные функции ИСКС

Интеллектуальная сетевая клиентоориентированная система газо-, тепло- и электроснабжения должна выполнять следующие функции.

**Создание конфигурации сетей.** Система должна обеспечивать возможность полноценного описания архитектуры действующих сетей ресурсного снабжения. Каждый элемент этих сетей должен описываться достаточным и достоверным набором характеристик.

**Формирование спроса.** Система должна позволять потребителям выстраивать индивидуальный план потребления ресурсов на длительный горизонт. При этом, учитывая тенденцию интеграции концепций SG и «умного дома», система должна

быть ориентирована на детализированное формирование спроса по каждому объекту потребления.

**Адаптивное планирование в реальном времени.** Исходя из агрегированных данных спроса и прогноза потребления поставщики ресурсов должны планировать свои графики предоставления ресурсов, что позволит выровнять нагрузку сети и избежать пиков.

**Управление топологией и интеграция сетей.** Система должна объединить существующие программные и аппаратные механизмы мониторинга и управления сетями ресурсного снабжения. Интеграция должна включать сбор телеметрии и управление топологией сетей, в том числе с целью замещения ресурсов.

**Прогнозирование.** Интеграция с системами сбора данных с интеллектуальных счетчиков должна позволить строить прогнозы на основе сохраняемой истории и внешних факторов.

**Интерактивность, выработка предложений.** Система должна работать в режиме диалога и двусторонней связи с пользователем. Существующие графики фактического потребления или поставки должны корректироваться пользователем «на лету», отражая его потребности. Если запрос пользователя невозможно или крайне трудно обработать, система должна формировать предложение, помогающее пользователю принять решение.

**Аналитика.** Система должна производить анализ агрегируемых данных, предоставляя статистические отчеты, а также вырабатывая заключения и рекомендации по наиболее эффективному использованию ресурсов.

**Разграничение прав доступа, роли.** Система должна предоставлять доступ трем типам пользователей – потребитель, поставщик, администратор сети. Каждый из этих пользователей должен иметь возможность описывать характеристики подотчетных ему объектов и строить планы потребления, производства и поставки ресурсов. Здесь администратор сети – пользователь, осуществляющий мониторинг и управление интегрированными сетями газо-, тепло- и электроснабжения.

**Масштабирование.** Благодаря использованию сетевидной архитектуры и возможности масштабирования онтологии система должна быть пригодной для использования как в рамках всех интегрированных типов сетей, так и в рамках одного крупного объекта – фабрики, многоквартирного или даже частного дома.

### **Пример работы метода адаптивного планирования в ИСКС**

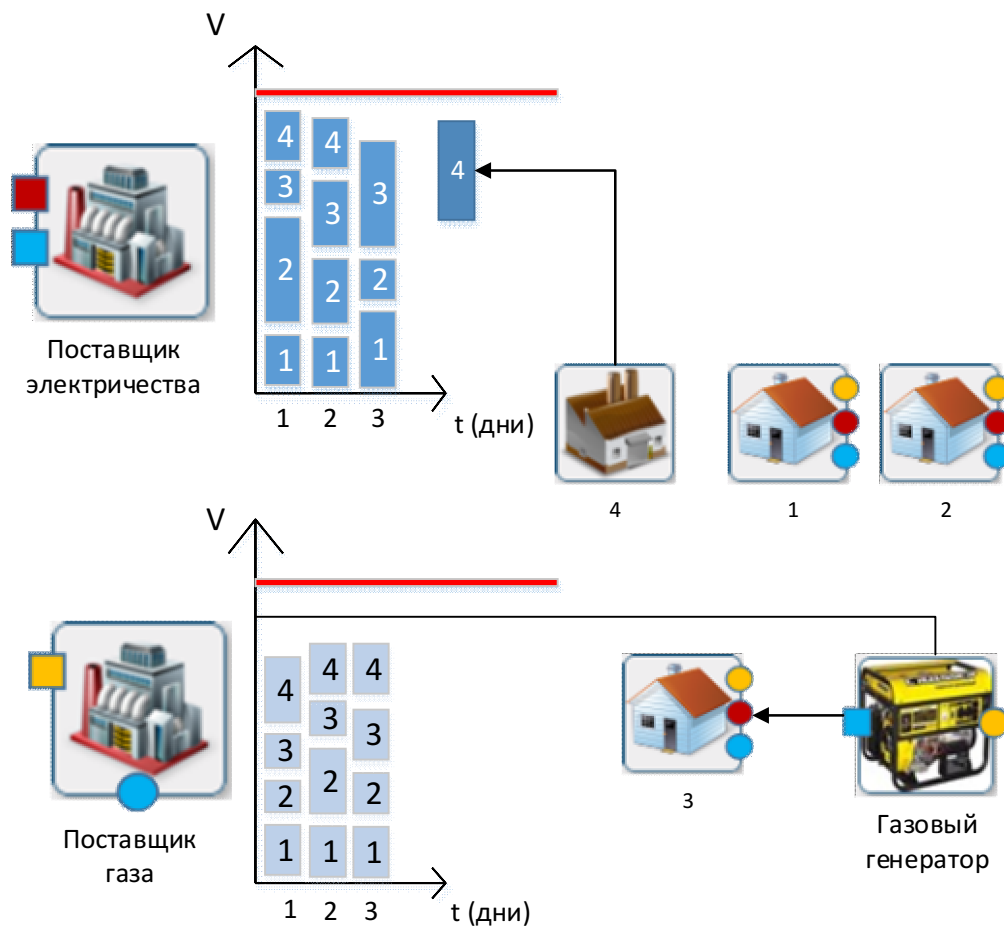
На рис. 4 продемонстрированы графики производства ресурсов поставщиками электричества (ПЭ) и газа (ПГ).

На каждом из графиков отмечен максимальный уровень производства ресурса, а также объемы их потребления различными объектами сети в каждый из дней. Рассмотрим событие, когда фабрика (потребитель № 4) выдвигает заявку на потребление в третий день. При стартовых условиях удовлетворение заявки фабрики невозможно из-за ограничений в объемах производства, тем не менее необходимо удовлетворение спроса всех объектов потребления. Рассмотрим переговоры агентов для решения этой задачи.

В начальной ситуации пробуждаются (создаются) агенты ПЭ и фабрики – потребитель № 4 (П № 4). Агент фабрики запрашивает производство определенного объема ресурса в третий день. Получив запрос на размещение в графике, агент ПЭ производит анализ графика. Процесс анализа расписания заключается в поиске мест размещения, которые удовлетворяют интересам и поставщика, и фабрики. По итогу

анализа агент ПЭ дает негативный ответ на запрос агента П № 4, указывая причины возникновения конфликта: высокие объемы спроса других потребителей.

Агент П № 4 рассылает агентам потребителей 1, 2 и 3 предложения о снижении спроса в третий день с указанием возможной компенсации такого решения, а также величины, на которую необходимо снизить потребление. Агенты всех потребителей не заинтересованы в снижении уровня потребления электроэнергии. Однако агент потребителя 3 (П № 3) в отличие от остальных имеет в своем распоряжении газовый электрогенератор. Агент П № 3, зная о возможности замещения одного ресурса другим, запрашивает агента ПГ о возможности и стоимости обеспечения необходимого количества газа с учетом курса конвертации одного ресурса в другой. Агент ПГ дает положительный ответ с указанием стоимости. Агент П № 3 рассчитывает конечную стоимость перехода на газовое электрообеспечение (с учетом амортизации генератора и прочих факторов) и отправляет ответ агенту П № 4. П № 4, зная, что от получения должного объема электричества в третий день зависит выполнение крупного заказа, соглашается на условия агента П № 3, после чего последний меняет текущие заявки к ПЭ и ПГ, а агент фабрики повторяет запрос к ПЭ, который теперь может его удовлетворить.



Р и с. 4. Графики адаптивного перепланирования производства ресурсов в ответ на появление новой заявки

В рамках тестирования системы был разработан сценарий минимизации стоимости электроэнергии для потребителя за счет подключения газового электрогенератора и распределения потребления электричества во времени. В сценарии описан ряд отличающихся по характеристикам потребителей и поставщиков газо-, тепло- и электроснабжения. Смоделированы спрос и предложение ресурсов на месячный горизонт, воссоздана ситуация пиковой нагрузки на сеть за счет увеличения среднего значения спроса потребителей. Система, проведя анализ ситуации, приняла два взаимодополняющих решения:

– в автоматическом порядке подключить альтернативный источник энергии (газовый электрогенератор) для удовлетворения повышенных запросов потребителей, задействовав газовый ресурс;

– разослать потребителям в их АРМы рекомендации по снижению нагрузки на сеть в обозначенный пиковый период потребления, подкрепленные мотивационными мерами: предложением скидок на потребление в периоды помимо пикового, а также штрафами за потребление сверх допустимого уровня в период повышенной нагрузки.

Благодаря принятым системой решениям удалось снизить конечную стоимость ресурсов для потребителей (согласно схеме расчета цены Demand Response), а также сохранить безопасный режим работы сетей.

## **Выводы**

На текущий момент разработан прототип интеллектуальной сетевцентрической клиентоориентированной системы газо-, тепло- и электроснабжения. Эксперименты, проведенные с прототипом ИСКС, продемонстрировали высокую пригодность мультиагентного подхода к решению задач управления ресурсами в интегрированных сетях ресурсного снабжения для повышения эффективности использования первичных и конечных энергоносителей, а также для демонстрации модели межотраслевой интеграции на основе сетевцентрического подхода. Необходимо отметить высокий уровень конкурентоспособности мультиагентных систем в области реализации подхода Demand Response за счет обеспечения двусторонней связи системы управления с ее пользователями в реальном времени.

Разрабатываемая система за счет широких возможностей масштабирования и интеграции имеет возможность развертывания в различных сферах сетей газо-, тепло- и электроснабжения на любом уровне – от промышленного до бытового.

При поддержке экспертов возможно подробное описание онтологии сетей газо-, тепло- и электроснабжения, а также перенос в систему существующих карт сетей всех трех типов, что позволит перейти от прототипа к реальной системе.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Smart grid // Режим доступа: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>
2. Michael T. Burr. Technology corridor: Reliability demands will drive automation // *Fortnightly Magazine*. 2003. – November 1. – Режим доступа: <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor?page=0%2C0>
3. *Воротницкий В.Э., Туркина О.В.* Сравнительный анализ потерь электрической энергии в электрических сетях Российской Федерации и стран дальнего зарубежья // Режим доступа: [http://www.ntc-power.ru/upload/presentation/Prezentation\\_Vorotnitskiy\\_Turkina.pdf](http://www.ntc-power.ru/upload/presentation/Prezentation_Vorotnitskiy_Turkina.pdf)
4. *Быкова О., Аблязов П.* Куда движется электроэнергетика? // Режим доступа: <http://www.bigpowernews.ru/research/document47671.phtml?1&q=0JrQo9CU0JAg0JTQktCY0JbQldCi0KHQryDQrdCb0JXQmtCi0KDQntCt0J3QldCg0JPQldCi0JjQmtCQPw==>
5. European SmartGrids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future // Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.



6. *Дорофеев В.В., Макаров А.А.* Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энерго-эксперт. – 2009. – № 4 (15).
7. Концепция энергетической стратегии России на период до 2030 года (проект) // Прил. к журналу «Энергетическая политика». – М.: ГУ ИЭС, 2007.
8. *Ледин С.С.* Интеллектуальные сети SG – будущее российской энергетики // Автоматизация и ИТ в энергетике. – Ноябрь 2010. – № 11(16).
9. 10 трендов рынка SMART Grid в 2012 году. – Режим доступа: [http://www.cleandex.ru/articles/2012/08/23/10\\_trendov\\_rynka\\_smart\\_grid\\_v\\_ssha](http://www.cleandex.ru/articles/2012/08/23/10_trendov_rynka_smart_grid_v_ssha)
10. Перспективы развития технологий Smart Grid в России. – Режим доступа: [http://www.cleandex.ru/opinion/2010/05/28/smart\\_grid\\_perspectives\\_in\\_russia](http://www.cleandex.ru/opinion/2010/05/28/smart_grid_perspectives_in_russia)
11. Простой стимул экономить электричество появится в нескольких российских регионах. – Режим доступа: <http://www.1tv.ru/news/other/238598>
12. *Иващенко А.В., Карсаев О.В., Скобелев П.О., Царев А.В., Юсупов Р.М.* Мультиагентные технологии для разработки сетевых систем управления // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления», 4-6 апреля 2011 г. Таганрог. – Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №3 (116). – С. 11-23.
13. *Скобелев П.О.* Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. – № 1. – С. 1-32.
14. *Скобелев П.О.* Онтология деятельности для ситуационного управления предприятиями в реальном времени // Онтология проектирования. – 2012. – № 1(3). – С. 6-38.

*Статья поступила в редакцию 17 июля 2013 г.*

## **THE DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL NETWORK-CENTRIC SYSTEM (SMART GRID) OF ADAPTIVE RESOURCE ALLOCATION IN INTEGRATED NETWORKS OF GAS, HEAT AND ELECTRICITY**

***D.S. Budaev, V.B. Larukhin, D.S. Kosov, E.V. Simonova***

SEC «Smart Solutions»  
17 Moscovskoe Shosse, office center «Vertikal», Samara, 443013

*The current trends of the Smart Grid concept are described. The creation of an intellectual customer-centric system of gas, heat and electricity supply is described as a solution to the corresponding problems the creation of the intellectual customer-centric system of gas, heat and electricity supply is proposed. As a prototype of such a simulation modeling and the adaptive resource allocation in integrated networks of resource supply system is given.*

**Keywords:** *Smart grid, multi-agent technology, network-centric, integrated network of resource supply.*

---

*Denis S. Budaev, Leading Developer.*

*Vladimir B. Larukhin, Director of Engineering.*

*Daniil S. Kosov, analyst.*

*Elena V. Simonova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Senior Analyst.*