

## МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ В ПРОЕКТЕ «УМНЫЙ СЕВЕРНЫЙ ГОРОД». МУЛЬТИ-АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ

*Кругликов С.В.*

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, s.v.kruglikov@urfu.ru

ИММ УрО РАН, svk@imm.uran.ru

Организация объединенных наций сформулировала 17 целей [1] (UN Sustainable Development Goals) обеспечения экономических, социальных, экологических и культурных потребностей настоящего и будущего поколений, которые дают развернутое представление о системе приоритетов, отвечающей устойчивому развитию. Данное исследование сосредоточено на анализе следующих положений: SDG7: о доступности недорогой, надежной, устойчивой и современной энергии; SDG9: о создании устойчивой инфраструктуры; о стимулировании инноваций; SDG11: об устойчивых, безопасных городах. Актуальность этих положений подтверждает указ Президента РФ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» [2], п.1 которого определяет национальные цели развития РФ, включая в) комфортную и безопасную среду для жизни; д) цифровую трансформацию.

Особое значение данные положения имеют для Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), огромные по потенциалу неосвоенные территории которой составляют стратегическую ресурсную базу и перспективное направление социально-экономического развития. АЗРФ включает более 270 северных поселений с населением 2,3 млн. чел. Обеспечение достойного качества жизни и социальных стандартов жителей в тяжелых геоклиматических условиях, специфичных для высоких широт, требует особого внимания к системе энергообеспечения. Умная энергетика реализует интеллектуальную передачу и распределение электрической и/или тепловой энергии, соединяя информационные технологии с системами регулирования энергетических ресурсов. Целью является обеспечение бесперебойного снабжения потребителей энергоресурсами высокого качества, прозрачность учета расходования энергоресурсов и оформления оплаты, предупреждение возможных аварийных ситуаций и минимизации их последствий, обеспечение безопасности и предотвращение несанкционированного доступа к системе управления энергоресурсами.

В работе рассматривается возможность реализации централизованно управляемой системы энергообеспечения типа «умный город» [3]. Выбор в качестве базового объекта исследования муниципального образования город Салехард определен следующими объективными предпосылками. (1) Салехард - административный центр субъекта РФ, донора федерального бюджета, что делает понятными механизмы финансирования трансформаций; (2) пространственная и демографическая компактность; (3) концентрация в муниципальной собственности бизнеса по управлению технологическими системами облегчает согласование протоколов единой информационной платформы для совместимости с ранее реализованными системами автоматизированного мониторинга и сбора данных; (4) предложения согласуются со «Стратегией социально-экономического развития города Салехард до 2030 года» (далее Стратегия) [4]. (5) Анализ документов и экспертная оценка выявили значительные проблемы в управлении жилым фондом города, многоквартирными домами (МКД), расположенными в зоне вечной мерзлоты; эксплуатации и ремонте объектов тепло-, водо-, электроснабжения; техническом и кадровом обеспечении работы управляющих компаний (УК). Возможно привлечение компетенций, ресурсов внешних организаций, в частности, университетов УрФО, способных организовать обучение с привлечением дистанционных технологий и цифровых двойников.

Стратегия определяет одним из существенных направлений совершенствования экономического потенциала и эффективного внедрения цифровой экономики в городе

информатизацию основных инфраструктурных организаций («умный город»). Установлен перечень возможных источников финансирования проектов по созданию платформы. Перспективы централизованно управляемой реализации проекта «умный город Салехард» обсуждались с участием экспертов фонда «Сколково» в рамках уточнения тематики Уральского (Екатеринбург, ноябрь 2019г.) и Западно-Сибирского НОЦ (Тюмень, март 2020г.). Отмечено согласование концепции проекта со стратегическими документами развития ЯНАО и МО г.Салехард и необходимость проработки сценариев инновационного развития города. Методическую основу для априорного анализа и моделирования формирует мультиагентный подход с применением теории гарантированного управления и оценивания в условиях неопределенности.

Мультиагентная версия системного подхода [5] позволяет формализовать описание широких классов технических объектов и понятий для ряда практических приложений, в том числе, в условиях неопределенности и риска [6]. Термины агент и мультиагентная система (МАС) применяются далее для конкретных либо абстрактных понятий, описывающих произвольные объекты и системы, организованные согласно принципам иерархии, вложенности и наследования. Агенты конкретного уровня иерархии [k] рассматриваются как единая целостность. Принятая типология позволяет рассматривать по уровням [k] три основных класса агентов, (р/в/и)А; (р)А: *реальные* (р; ТС, оборудование, механизмы, транспортные средства), (в)А: *виртуальные* (в; соглашения, сообщения, изображения, планы; ПО: модули, программы, программное обеспечение), (и)МАС: *интеллектуальные* (и; персонал, организационные системы).

Частным случаем (р)МАС уровня [k] является мультиагентная управляемая система [k]МУС, комплекс в составе которого выделяются 4 основных вложенных подсистемы (р)МАС уровня [k-1]; [k]МУС={**E**: Условие (р/в)МАС (проекция окружения)// **G**:(**СУ**): субъект (проекция заказчика) ∨ **B**: Механизм (проекция посредника) ∨ **C**: (**OY**) объект (проекция исполнителя)}. Компоненты [k-1]{**E||G;B;C**}, элементы базового множества **Y#** агентов или МАС, носители сервисных функций, реализуют соответственно принципы **E**: автономного; **G**: централизованного; **B**: распределенного; **C**: децентрализованного управления.

В частности, (и)МАС, цифровой двойник (ЦД), — единая обучаемая интеллектуальная система, генерирующая (в)МАС, образ, отражающий функционирование подсистем (р)МАС, прообраза, на протяжении всего жизненного цикла. На практике ЦД представляет собой структурированную под нормативные требования (**E**: НСИ) совокупность математических моделей, банков данных о (р)МАС, объединённую в рамках единой цифровой платформы [7]. Включение ЦД в структуру системы управления (**C**: **СУ**) может преобразовать [k]МУС в (и)МАС. Вопрос о математическом описании взаимодействия с участием интеллектуальных (и)МАС остается открытым. Далее принята следующая схема (1) структурного описания Агентов и МАС, согласованная с понятием киберфизической системы и методологией функциональной декомпозиции IDEF0. Согласование описания (1) и методологии IDEF0 возможно в терминах [ICOM] кодов; **Input**~Входные потоки; **Control**~Управление, договора; **Me**~Механизм, носители; **Output** ~Выходные ( $m/e$ )/( $i/f$ ) потоки. Тогда [**Функции**; шаблону взаимодействия]  $f/f^*$  соответствуют функциональные возможности  $f=(f;F;F/f \in F \in F)$  и планы  $f^*=(f^*;F^*;F^*/f^* \in F^* \in F^*)$ .

$$[iJ/k(:)n] \langle \text{Input} \sim g(\bullet; n) // g^*(n; \bullet) (\text{Me} \sim y \text{Fu} \sim \{ /l/f/f^*/l^* \} y^* \sim \text{Control}) g(m; \bullet) // g^*(\bullet; m \sim \text{Output}) \rangle \quad (1)$$

Ключевые требования к функционалу проекта составляют следующие задачи: анализ ситуации и прогнозирования, включая построение единого плана направленного изменения образа фазового состояния; принятие решения; управление исполнением; контроль соответствия полученных результатов целевым требованиям. Схема (1) применима для

анализа проектов модернизации системы отопления в целях создания системы управляемого энергопотребления, в частности, за счет возможного перехода на электроотопление в ходе реализации концепции единого информационного пространства (ЦД) города. Экономический анализ альтернативных сценариев инновационного развития реализован на основе дерева решений;  $H = \{UA, UW, UI\}$ . Далее рассмотрены следующие альтернативы: (*UA*) инерционный сценарий, ориентированный на сохранение состояния  $QO$  = «как есть»; (*UW*) технологичный сценарий, направленный на достижение целевого результата  $QF$  = «как должно быть»; (*UI*)  $QF^*$  = «как может быть», рациональное приближение с максимальным учетом существующих ограничений. Исходы отражают неопределенные факторы, учитываемые по аналогии с SWOT анализом.

(*UA*) **инерционный сценарий**, опирающийся на учет существующих социально-технологических ограничений, представлен в Стратегии [4], которая как (в)МАС содержит представления о состоянии  $QO$ ,  $QF$  и предлагает направления трансформации  $FO^*$ , механизмы **Me** и источники финансирования программных мероприятий, в том числе, средства местного, окружного и, в меньшей мере, федерального бюджетов.

Особенностью приоритетов интеллектуальных продуктов, реализующих IT-технологии «умного северного города», является принципиальная необходимость интеграции отраслевых (индустриальных) цифровых платформ с приоритетом обеспечения эффективного взаимодействия (*e*) гибридных систем энергообеспечения города и следующих процессов жизнеобеспечения города: (*m*) транспорт; безопасность: системы видеонаблюдения; (*i*) сфера услуг: электронное правительство, образование, здравоохранение, (*f*) финансы.

Проведен анализ документа на основе четырехкомпонентной макроэкономической модели города, обеспечивающей замкнутость деятельности по управлению в рамках распределения потоков четырех типов ресурсов (материальных, энергетических, информационных, финансовых). Применение иерархической модели для процедур оптимизации и модернизации многокомпонентных гибридных энергетических систем на основе теории гарантированного управления и оценивания в условиях неопределенности позволило выделить, как значимый недостаток, не достаточный учет в Стратегии [4] проблем вечной мерзлоты (ММГ). Значительное воздействие **B(-2-)G0** на окружающую среду **G0** ресурсно-энергетических предприятий **B** МО г. Салехард требует минимизации вреда, наносимого экосистеме города **G0**, в частности, ММГ, как базового инвариантного условия устойчивого существования города. Необходима геоинформационная подоснова моделирования городской территории, включающая 3D-описание состояния вечной мерзлоты в городе с возможностью подключения данных оперативного мониторинга и перспективного прогнозирования на среднесрочную перспективу состояния зданий, мостов, резервуаров. Кроме этого, риски реализации задач «умного города» возрастают из-за предлагаемой децентрализованной схеме привлечения на конкурсной основе «IT энтузиастов, для которых задачи будут прикладными в сфере муниципального управления» [4, стр.99].

(*UW*) **технологичный сценарий**, направленный на достижение целевого результата «как должно быть». Согласно Стратегии, состояние экономики города определяется доминирующей, с долей более 80%, отраслью промышленности города – производством и распределением тепло-, электроэнергии, газа и воды. Поэтому можно ожидать, что реализация лучших доступных технологий в сфере энергетики может качественно повысить устойчивость технологических систем.

Строки **X(-2-)Y**;  $X, Y \in \{E0 | G0, B0, C0\}$ , обозначают взаимодействия подсистем **X** и **Y** разных уровней. При этом строки **B0(-2-)B0** and **B0(-2-)C0** отражают процессы в сфере экономики и технологий, включая производство, транспортировку и снабжение энергии. В тоже время **G0(-2-)C0** и **C0(-2-)C0** представляют социально-экономические ограничения и

взаимосвязи социальной сферы. Жилищно-коммунальное хозяйство г. Салехарда включает в себя энергоснабжение, водоснабжение и водоотведение, слаботочные сети, вывоз и утилизация мусора. Процесс подключения МО г. Салехард к ЕЭС дал опыт практической реализации гибридной системы энергоснабжения. Обеспечение изменения технологической схемы и структуры энергобаланса МО потребовало реорганизации субъектов экономической деятельности. В настоящее время предприятия “СалехардЭнерго”  $\mathbf{b0} \in \mathbf{B0}$  и «Ямалэлектросети»  $\mathbf{b1} \in \mathbf{B0}$  располагают возможностью регулировать энергетические потоки. Предприятие  $\mathbf{b0}$  практически монополист в поставках потоков  $(m||e)g$  материальных и энергетических ресурсов населению Салехарда. Кроме того,  $\mathbf{b0}$  является основным муниципальным реальным активом и плательщиком бюджета.

Перспективные мероприятия сценария ( $UW$ ) включают: 1) создание универсальной системы автоматизированного проектирования оптимальной структуры автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК) и способ управления энергетическим балансом в ней, т.е. потоками мощностей, циркулирующими в этой системе [8 Кокин]. 2) реализацию управляемого энергопотребления за счет использования электроэнергии для отопления многоквартирных домов. Использование электроэнергии для отопления позволяет решить проблему накопления и последующего использования «ночной» электроэнергии в часы провалов графика нагрузки энергосистемы с применением двух- тарифного принципа ценообразования. Анализ неравномерности суточного электропотребления административными и жилыми помещениями, суточной неравномерностей потребности в тепловой энергии, связанной с местными климатическими особенностями. Опыт эксплуатации энергоэффективного дома по адресу г.Лабытнанги ул. Южная, 14, требует сравнительного сопоставления эффективности различных вариантов отопления в климатической зоне с уровнем ГСОП более 55000 (Екатеринбург, Салехард).

Анализ согласования контуров физических потоков  $(m||e)g$  материалов и энергии и дуальных кибернетических потоков  $(i||f)g^*$  информации и капитала на основе свойства дуальности (5) теории гарантированного управления в условиях неопределенности [6],

$$\text{Min}_U \text{Sup}_X \{F(U)\eta \mid \eta \in W\} = \text{Min}_U \# \text{Sup}_{X\#} \{F^*(U\#)\zeta^*\}, \quad (5)$$

показал, что экономия на затратах на основной производственный актив приведет к снижению поступлений в муниципальный бюджет, что сразу же делает решение экономически не состоятельным.

( $UI$ ) **инновационный сценарий**, реализующий синергию возможностей с максимальным учетом существующих ограничений. В отличие от вариантов ( $UA$ ) и ( $UW$ ), опирающихся на децентрализованные и распределенные сценарии управления, здесь предлагается централизованно управлять процессом формирования информационной платформы «умный северный город» с опорой на цифровой двойник и экономико-финансовое обоснование. Существует вариант решения задач направленной модернизации энергоэффективной системы управления гибридными системами энергообеспечения северного города, обеспечивающий устойчивость инженерной инфраструктуры в районах вечной мерзлоты. В этом случае моделирование взаимовлияния  $\mathbf{B0(-2)G0}$  хозяйственной деятельности на окружающую среду и взаимодействия компонент  $\mathbf{M0(-2)B0}$  показывает возможность формирования  $\mathbf{b}^* \in \mathbf{B0}$  компании, оказывающей услуги по мониторингу и управлению состоянием фундаментов в ММГ. Расчет стоимости мероприятий по сезонному восстановлению состояния мерзлоты для анализа перспектив привлечения средств проектного и венчурного финансирования возможен на основе показателей EVA, NPV, IRR. Для поиска оптимальных долей участников венчурного проекта целесообразно максимизировать минимально возможный RAROC [9].

Открытым вопросом, требующим дальнейших исследований, является согласование расчета прочностных характеристик несущих конструкций зданий и сооружений с альтернативными прогнозами поведения вечной мерзлоты.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЯНАО в рамках научного проекта № 19-48-890001 «Формирование принципов оптимизации и модернизации многокомпонентных энергетических систем на основе априорного мульти-агентного моделирования гибридных систем энергообеспечения для АЗРФ».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 17 Goals to Transform Our World. Web site of the United Nations "Sustainable Development Goals". Режим доступа: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/> (дата обращения 15.09.2020).
2. Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. N 474 "О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года" [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://rg.ru/2020/07/22/ukaz-dok.html> (дата обращения 10.09.2020).
3. Технологии для умных городов [Электронный ресурс]: Центр стратегических разработок Северо-запад. Режим доступа: [http://www.csr-nw.ru/files/publications/doklad\\_tehnologii\\_dlya\\_umnyh\\_gorodov.pdf](http://www.csr-nw.ru/files/publications/doklad_tehnologii_dlya_umnyh_gorodov.pdf) (дата обращения 10.09.2020).
4. Стратегия социально-экономического развития муниципального образования город Салехард до 2030 года. [Электронный ресурс]: Решение Гор. Думы г. Салехарда от 21.12.2018г. N91. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/550285222> (дата обращения 10.09.2020).
5. Kruglikov S.V. A problem of optimal control and observation for distributed homogeneous multi-agent system // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1910, P.060007 [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://doi.org/10.1063/1.5014001> (дата обращения 10.09.2020).
6. Kruglikov S.V. An A Priori Planning of Joint Motions for USV as a Problem of Guaranteed Control // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 494-495. P. 1110-1113.
7. Тапалов В. Информационная модель — основа «умного города». [Электронный ресурс]: Режим доступа: [http://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=19940](http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19940) (дата обращения 10.09.2020).
8. Хальясмаа А.И., Дмитриев С.А., Кокин С.Е. Автоматизированная система принятия решений для оценки фактического состояния электрооборудования // Электрические станции. 2015. № 8. С. 36-41.
9. Podluzhnyy S., Kruglikov S. Searching for the Credit Portfolio Structure and Building Portrait of Prospective Borrower // 16th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization (CAO-2015) Garmisch-Partenkirchen, Germany, 6-9 October 2015. IFAC-PapersOnLine: Vol. 48, Iss. 25, P. 231–235. [doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.092](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.092).