

УДК 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007

## Моделирование автономной микросети

Еделев Алексей Владимирович<sup>1</sup>, Карамов Дмитрий Николаевич<sup>2</sup>,  
Башарина Ольга Юрьевна<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,

<sup>3</sup>Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,  
Россия, Иркутск, *flower@isem.irk.ru*,

<sup>4</sup>Уральский государственный экономический университет, Россия, Екатеринбург

**Аннотация.** Данная работа является первой из серии статей, посвященных применению разработанной технологии цифрового двойника сложной технической системы для исследования ее свойств. Одним из таких свойств является живучесть, под которой понимается свойство системы адаптироваться к крупным возмущениям и восстанавливать свое исходное состояние после их воздействия. В качестве сложных технических систем в статье рассматриваются автономные микросети. Исследование живучести этих энергетических комплексов локального уровня обычно строится на многовариантных вычислительных экспериментах, однако при существовании обратной связи цифрового двойника с микросетью или испытательным стендом можно также использовать натурные опыты. Ключевым компонентом цифрового двойника микросети должен быть комплекс разнообразных моделей, с высокой точностью описывающих все аспекты поведения этого энергетического комплекса. В данной статье описывается оптимизационная модель микросети на основе концепции энергетического хаба. Энергетический хаб концентрирует производственные мощности по генерации, преобразованию и аккумулированию энергоресурсов, которые соединяются между собой и с потребителями с помощью сетей транспорта энергоресурсов. В статье представлена программная реализация оптимизационной модели микросети на основе концепции энергетического хаба. В заключении производится сравнение с принципиально близкой двухуровневой моделью энергетического комплекса города. Моделирование микросети на основе концепции энергетического хаба обеспечивает более высокую вычислительную эффективность. С другой стороны, модель энергетического комплекса города более точно, чем представленная в данной статье модель микросети, отражает физические особенности некоторых процессов, например транспорта тепла и электроэнергии.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, испытательный стенд, микросеть, живучесть, математическая модель, энергетический хаб

**Цитирование:** Еделев А.В. Моделирование автономной микросети / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С.74-85. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.

**Введение.** Автономные системы энергоснабжения являются разновидностью энергетических комплексов локального уровня (микросетей), в которых совместное использование возобновляемых источников энергии с традиционными энергетическими установками и накопителями электрической энергии является экономически эффективным способом энергоснабжения потребителей. Особую значимость и большое распространение возобновляемые источники энергии получили при электрификации труднодоступных территорий, не имеющих связи с традиционными топливно-энергетическими комплексами [1].

Изолированность автономных микросетей повышает значимость исследования их функционирования в следующих экстремальных условиях:

- природные бедствия, такие как ураганы, наводнения, землетрясения, резкие похолодания и т.д.;
- отказ элементов и подсистем вследствие износа, ошибок персонала и т.д.;
- преднамеренные (умышленные) нарушения, такие как кибератаки и т.д.

Способность противостоять вышеперечисленным крупным возмущениям, не допуская каскадного развития аварий с массовым нарушением режима энергоснабжения потребителей,

и восстанавливать исходное состояние или близкое к нему характеризует одно из свойств энергетических комплексов – живучесть [2].

Исследование живучести обычно строится на проведении крупномасштабных вычислительных экспериментов, в которых разыгрывается множество сценариев крупных возмущений. Для исследования живучести автономных микросетей вследствие их малого размера помимо вычислительных экспериментов также доступны натурные опыты на реальном оборудовании или на испытательных стендах, позволяющих моделировать функционирование микросетей в экстремальных условиях. Эти вопросы изучались в рамках научного проекта РФФИ и Правительства Иркутской области № 20-47-380002-р\_а, который был посвящен разработке фундаментальных основ математического и информационного моделирования инфраструктурных объектов Байкальской природной территории, использующих природосберегающие технологии. В процессе выполнения проекта получены следующие основные методические результаты [3, 4]:

- разработана система мониторинга условий функционирования инфраструктурных объектов и их внешнего окружения, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, агрегирование, структурирование и анализ ретроспективных и текущих предметных данных большого объема;
- созданы модели, методы и инструментальные средства спецификации и моделирования процессов функционирования исследуемых объектов на основе многокритериальных методов с использованием высокопроизводительных вычислительных систем в процессе проведения многовариантных расчетов;
- разработаны методы и инструментальные средства конструирования наборов цифровых двойников, представляющих различные подсистемы объекта, а также системы интеллектуальных агентов, которым делегируются права и обязанности субъектов, связанных с обеспечением эксплуатации объекта и потреблением предоставляемых им ресурсов и услуг;
- реализованы методы и средства микро-сервисного взаимодействия между цифровыми двойниками, а также двойниками и их конечными пользователями разных категорий.

Цифровой двойник используется для исследования свойств моделируемого инфраструктурного объекта. Инфраструктурным объектом в данной статье выступает автономная микросеть, соответственно, предметной областью является её живучесть, а решаемым классом задач – анализ уязвимости этих энергетических комплексов. Традиционно исследование живучести строится на разыгрывании сценариев крупных возмущений с применением математических моделей вследствие утверждения, что проведение необходимых натурных экспериментов на реальных энергетических комплексах недопустимо [2]. В настоящее время испытательные стенды позволяют разворачивать полноценные реалистичные схемы микросетей и имитировать воздействие на них крупных возмущений. Таким образом, цифровой двойник микросети, соединенный с испытательным стендом, может для разыгрывания заданного множества крупных возмущений использовать не только вычислительные эксперименты, но и натурные опыты. Главным преимуществом цифрового двойника по сравнению математической моделью является наличие обратной связи с объектом исследования, что позволяет в процессе эксперимента подстраивать управление микросетью в экстремальных условиях, исходя из разницы между прогнозируемыми (полученными в результате расчета на математической модели) и реальными значениями технологических параметров оборудования.

Согласно [5], в современной энергетике наибольшее распространение получили три основных типа цифровых двойников:

1. Двойник-прототип – виртуальный аналог реального объекта, содержащий информацию, которая представляет объект в целом на всех стадиях его жизненного цикла.
2. Двойник-экземпляр – содержит информацию по описанию оборудования объекта, то есть данные о материалах, комплектующих, информацию от системы мониторинга оборудования.
3. Агрегированный двойник – объединяет два вышеперечисленных типа.

Основным требованием к цифровому двойнику микросети в [6] определена его ориентация на моделирование всевозможных воздействий (не только физических), прогнозирование последствий таких воздействий, выработка мер по предотвращению их негативного техногенного влияния. Ключевым компонентом цифрового двойника микросети должен быть комплекс оптимизационных, имитационных, нейросетевых моделей, с высокой точностью описывающих все аспекты поведения этого энергетического комплекса. Данная статья представляет оптимизационную модель, которая используется в двойнике-экземпляре для исследования живучести автономной микросети.

**1. Математическая модель микросети.** В целом в энергетических исследованиях применяется иерархический подход к моделированию, использующий принципы декомпозиции и агрегирования при формировании моделей энергетических систем на различных уровнях иерархии и взаимосвязей моделей разных уровней. Так, например, в модели энергетического комплекса современного города [7] выделяются два уровня иерархии: уровень централизованных систем энергоснабжения и уровень децентрализованно управляемых потребителей электро- и теплоэнергии. Формирование подобных моделей и расчёты на них в настоящее время могут осуществляться с помощью инструментария, представленного в [5, 8].

Сущность предлагаемого в данной работе подхода к моделированию автономных микросетей заключается в следующем: энергетический комплекс локального уровня состоит из произвольного числа взаимосвязанных компонентов (хабов) [9], в которых концентрируются производственные мощности по генерации, преобразованию и аккумулированию энергоресурсов [10-14]. Данный подход поддерживается специализированным инструментарием [15].

Концепция энергетического хаба позволяет детально учитывать факторы совместной работы накопителей электрической энергии в микросетях, влияющие как на техническую, так и экономическую эффективность использования тех или иных типов накопителей. В большей степени эти факторы касаются неравномерности генерации источниками, использующими энергию ветра и солнца в качестве первичных двигателей.

Накопители электрической энергии в микросетях, как правило, представлены разного рода аккумуляторными батареями. Накопители, в отличие от элементов генерации и трансформации электрической энергии, имеют определенный ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при моделировании микросетей. Исходя из условий их эксплуатации [16], к данным особенностям можно отнести внутренние процессы старения активной массы аккумуляторных батарей, включая расслоение электролита, разрушение положительного электрода, тяжелую/необратимую сульфацию, кристаллизацию и т.п.

Стохастическая составляющая при генерировании электрической энергии существенно сказывается на основных эксплуатационных показателях аккумуляторных батарей. Например, в автономных фотоэлектрических системах эксплуатация аккумуляторных батарей сопровождается процессами с ярко выраженным циклическим характером в течение суток.

**1.1. Общая схема энергетического хаба.** Большинство схем хабов может быть построено на базе пяти типов элементарных блоков: входы, входные накопители энергии, преобразователи энергии, выходные накопители энергии и выходы [14] (рис. 1).

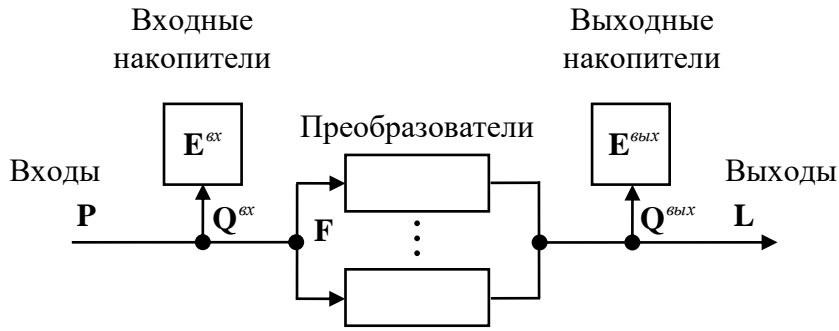


Рис. 1. Общая схема энергетического хаба

Согласно данной схеме моделирование потоков энергии в хабе от его входов  $P$  к его выходам  $L$  происходит в несколько этапов. Сначала необходимо описать, как входные потоки разбиваются на потоки  $Q^{ex}$ -к входным накопителям с запасом энергии  $E^{ex}$  и потоки  $F$  к преобразователям энергии. Преобразователи могут конвертировать один вид энергии в несколько различных. Затем преобразованные потоки суммируются и вместе с потоками выходных накопителей  $Q^{вых}$  с запасом энергии  $E^{вых}$ , образуют выходные потоки [14].

**Входные и выходные потоки.** Пусть рассматриваемый интервал времени состоит из  $T$  периодов длительностью  $\Delta t$ , энергоресурсы представлены множеством  $K$ , а автономный энергетический комплекс представлен набором из взаимосвязанных хабов в количестве  $H$ .

Каждый хаб  $h = \{1, \dots, H\}$  имеет множество входов  $M_h$ , множество выходов  $N_h$ , множество входных накопителей  $I_h^{in}$ , множество выходных накопителей  $I_h^{out}$ . Каждый элемент из множеств  $M_h, N_h, I_h^{in}, I_h^{out}$  связан с одним определённым энергоресурсом  $k \in K$ . Также хаб  $h$  имеет набор преобразователей в количестве  $J_h$ .

Как показано на рис. 2, в хабе  $h = \{1, \dots, H\}$  в период времени  $t = \{1, \dots, T\}$  поток энергоресурса  $P_{hm}^t$  на входе  $m \in M_h$  разделяется на поток  $Q_{hi}^t$  входного накопителя энергии  $i \in I_h^{in}$  и потоки  $F_{hmj}^t$  к преобразователям  $j = \{1, \dots, J_h\}$ , связанным со входом  $m \in M_h$

$$P_{hm}^t = \sum_{j \in \Theta_h(m)} F_{hmj}^t + Q_{hi}^t, \quad (1)$$

$$F_{hmj}^t \leq \bar{F}_{hmj}, \quad (2)$$

где  $\bar{F}_{hmj}^t$  – пропускная способность связи преобразователя  $j$  со входом  $m$  хаба  $h$ ;  $\Theta_h(m)$  – множество, содержащее преобразователи хаба  $h$ , связанные со входом  $m$ .

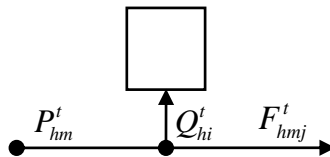


Рис. 2. Переток энергии в энергетическом хабе от входа к преобразователям

Образование потока энергоресурса  $L_{hn}$  на выходе  $n \in N_h$  хаба  $h = \{1, \dots, H\}$  показано на рис. 3. В период времени  $t = \{1, \dots, T\}$  преобразователь энергии  $j = \{1, \dots, J_h\}$  хаба  $h$  конвертирует поток  $F_{hmj}^t$  с коэффициентом преобразования  $\eta_{hmjn}^{con}$  и направляет его к выходу  $n$ . Принимая во внимание поток  $Q_{hi}^t$  выходного накопителя  $i \in I_h^{out}$ , поток  $L_{hn}^t$  на выходе  $n \in N_h$  определяется как

$$L_{hn}^t = \sum_{m \in M_h} \sum_{j \in \Theta_h(m,n)} \eta_{hmjn}^{con} F_{hmj}^t - Q_{hi}^t, \quad (3)$$

где  $\Theta_h(m, n)$  – множество преобразователей, посредством которых вход  $m \in M_h$  соединяется с выходом  $n$  хаба  $h$ .

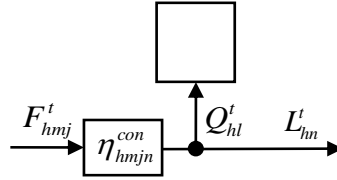


Рис. 3. Переток энергии в энергетическом хабе от преобразователей к выходу

**Накопители энергии.** В формулах (1) и (3) поток  $Q_{hi}^t$  накопителя  $i \in I_h^{in} \cup I_h^{out}$  хаба  $h = \{1, \dots, H\}$  формируется потоками заряда  $Q_{hi}^{chg,t}$  и разряда  $Q_{hi}^{dis,t}$  в период  $t = \{1, \dots, T\}$ :

$$Q_{hi}^t = Q_{hi}^{chg,t} - Q_{hi}^{dis,t}. \quad (4)$$

Запас энергии  $E_{hi}^t$  в накопителе  $i \in I_h^{in} \cup I_h^{out}$  хаба  $h = \{1, \dots, H\}$  на конец периода времени  $t = \{1, \dots, T\}$  зависит от его емкости  $\bar{E}_{hi}$ , запаса  $E_{hi}^{t-1}$  на конец предыдущего периода  $t - 1$ , потоков заряда  $Q_{hi}^{chg,t}$  и разряда  $Q_{hi}^{dis,t}$  в период  $t$ :

$$E_{hi}^t = E_{hi}^{t-1} + (\eta_{hi}^{chg} Q_{hi}^{chg,t} - \frac{1}{\eta_{hi}^{dis}} Q_{hi}^{dis,t}) \Delta t, \quad (5)$$

$$0 \leq E_{hi}^t \leq \bar{E}_{hi}, \quad (6)$$

$$E_{hi}^0 = \bar{E}_{hi}, \quad (7)$$

где  $\eta_{hi}^{chg}$  – коэффициент эффективности зарядки накопителя  $i$  хаба  $h$ ;  $\eta_{hi}^{dis}$  – коэффициент эффективности разрядки накопителя  $i$  хаба  $h$ . Уравнение (7) предполагает, что перед началом работы ( $t = 0$ ) все накопители содержат полный заряд.

Так как накопитель  $i \in I_h^{in} \cup I_h^{out}$  хаба  $h = \{1, \dots, H\}$  в период  $t = \{1, \dots, T\}$  может находиться только в состоянии заряда или разряда, то вводится дополнительная бинарная переменная  $z_{hi}^t \in \{0, 1\}$  и уравнения, связанные с ней:

$$0 \leq Q_{hi}^{dis,t} \leq (1 - z_{hi}^t) \bar{Q}_{hi}^{dis}, \quad (8)$$

$$0 \leq Q_{hi}^{chg,t} \leq z_{hi}^t \bar{Q}_{hi}^{chg}, \quad (9)$$

где  $\bar{Q}_{hi}^{dis}$  – максимально возможное значение потока разряда накопителя  $i$  хаба  $h$ ;  $\bar{Q}_{hi}^{chg}$  – максимально возможное значение потока заряда накопителя  $i$  хаба  $h$ . Если  $z_{hi}^t = 0$ , то согласно уравнению (8) накопитель  $i$  хаба  $h$  находится в состоянии разряда в период  $t$ . Если  $z_{hi}^t = 1$ , то согласно уравнению (9) накопитель  $i$  хаба  $h$  находится в состоянии заряда в период  $t$ .

Уравнения (6), (8), (9) задают технические ограничения на работу накопителя  $i$  в период  $t$ .

**1.2. Сети транспорта энергоресурсов.** Энергетические хабы соединяются между собой и с потребителями с помощью сетей транспорта энергоресурсов. Каждая сеть представляет собой граф  $G_k = (V_k, E_k)$ , где  $V_k$  – множество узлов,  $E_k$  – множество ориентированных дуг,  $k$  – энергоресурс из множества  $K$ . На граф  $G_k$  могут накладываться дополнительные ограничения, связанные с физическими законами перемещения энергоресурса  $k$ .

В сеть  $G_k$  может входить множество узлов  $V_k^g \subset V_k$ , которые представляют обособленные источники энергоресурса  $k \in K$ , не относящиеся ни к одному из  $H$  хабов. Например, в  $V_k^g$  могут быть выделены источники топлива.

Через  $V_k^d \subset V_k$  обозначается множество узлов потребления энергоресурса  $k \in K$ . Остальные узлы из множества  $V_k^o = V_k \setminus (V_k^g \cup V_k^d)$  называются промежуточными и служат местами пересечения потоков энергоресурса в сети транспорта. Каждый узел  $v$  сети  $G_k$  должен удовлетворять одному из условий баланса потоков энергоресурса  $k \in K$  в период времени  $t = \{1, \dots, T\}$ :

$$g_{kv}^t + \sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, v \in V_k^g, \quad (10)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t + u_{kv}^t = \bar{d}_{kv}^t, v \in V_k^d, \quad (11)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, v \in V_k^o, \quad (12)$$

$$0 \leq u_{kv}^t \leq \bar{d}_{kv}^t, v \in V_k^d, \quad (13)$$

$$0 \leq f_{kvq}^t \leq \bar{f}_{kvq}, (v, q) \in E_k, \quad (14)$$

$$0 \leq g_{kv}^t \leq \bar{g}_{kv}^t, v \in V_k^g, \quad (15)$$

где  $\Psi_k(v) \subseteq E_k$  – множество дуг, входящих в узел  $v$ ;  $\Omega_k(v) \subseteq E_k$  – множество дуг, исходящих из узла  $v$ ;  $f_{kqv}^t$  – поток энергоресурса  $k$  по дуге  $(q, v) \in E_k$  в период времени  $t$ ;  $g_{kv}^t$  – производство энергоресурса  $k$  в узле  $v \in V_k^g$  в период времени  $t$ ;  $\bar{d}_{kv}^t$  – потребность узла  $v \in V_k^d$  в энергоресурсе  $k$  в период времени  $t$ ;  $u_{kv}^t$  – недопоставка энергоресурса  $k$  в узел  $v \in V_k^d$  в период времени  $t$ ;  $a_{kqv}$  – коэффициент, характеризующий потери при транспорте энергоресурса  $k$  по дуге  $(q, v) \in E_k$ ;  $\bar{f}_{kvq}, (v, q) \in E_k$  – пропускная способность дуги  $(q, v) \in E_k$ .

Если учитывать энергетические хабы, соединённые с  $G_k$  в узле  $v$ , то уравнения (10)-(12) для периода времени  $t = \{1, \dots, T\}$  запишутся как:

$$g_{kv}^t + \sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t + \sum_{h \in \Lambda_k^g(v)} L_{hn}^t - \sum_{h \in \Lambda_k^d(v)} P_{hm}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, \quad v \in V_k^g, \quad (16)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t + \sum_{h \in \Lambda_k^g(v)} L_{hn}^t - \sum_{h \in \Lambda_k^d(v)} P_{hm}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t + u_{kv}^t = \bar{d}_{kv}^t, \quad v \in V_k^d, \quad (17)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t + \sum_{h \in \Lambda_k^g(v)} L_{hn}^t - \sum_{h \in \Lambda_k^d(v)} P_{hm}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, \quad v \in V_k^o, \quad (18)$$

где  $\Lambda_k^d(v)$  – множество хабов, входы которых соединены с сетью  $G_k$  в узле  $v$ ;  $P_{hm}^t$  – поток энергоресурса  $k \in K$ , поступающего на вход  $m \in M_h$  хаба  $h \in \Lambda_k^d(v)$  в период  $t$ ;  $\Lambda_k^g(v)$  – множество хабов, выходы которых соединены с сетью  $G_k$  в узле  $v$ ;  $L_{hn}^t$  – поток энергоресурса  $k \in K$ , поступающего на выход  $n \in N_h$  хаба  $h \in \Lambda_k^g(v)$  в период  $t$ .

**1.3. Целевая функция.** Целью оптимизации функционирования автономного энергетического комплекса является наиболее полное удовлетворение потребностей в энергоресурсах при минимальных затратах на эксплуатацию хабов и транспортных сетей на протяжении всех периодов времени  $t = \{1, \dots, T\}$ :

$$\sum_{t=1}^T \left[ \sum_{h=1}^H \sum_{m \in M_h} C_{hk}^t P_{hm}^t + \sum_{k \in K} \sum_{v \in V_k^d} y_{kv} u_{kv}^t + \sum_{k \in K} \sum_{(v,q) \in E_k} c_{kvq} f_{kvq}^t \right] \rightarrow \min, \quad (19)$$

где  $C_{hk}^t$  – цена на энергоресурс  $k \in K$ , поступающего на вход  $m \in M_h$  хаба  $h = \{1, \dots, H\}$  в период  $t$ ;  $P_{hm}^t$  – поток энергоресурса  $k \in K$ , поступающего на вход  $m \in M_h$  хаба  $h = \{1, \dots, H\}$  в период  $t$ ;  $y_{kv}$  – штраф за недопоставку энергоресурса  $k \in K$  в узел  $v \in V_k^d$  в период  $t$ ;  $c_{kvq}$  – удельная стоимость транспорта энергоресурса  $k \in K$  по дуге  $(v, q) \in E_k$ ;  $f_{kvq}^t$  – поток энергоресурса  $k \in K$  по дуге  $(q, v) \in E_k$  в период  $t$ .

Ограничениями для целевой функции (19) выступают уравнения (1)-(9), (13)-(18).

**2. Описание конфигурации микросети.** Конструирование цифрового двойника реальной микросети [17, 18] невозможно без её спецификации или описания конфигурации этого энергетического комплекса. В целом, понятие конфигурации энергетического комплекса в литературе трактуется весьма широко. В рамках научного проекта РФФИ и Правительства Иркутской области № 20-47-380002-р\_а конфигурацией был назван определённый вариант инфраструктуры энергетического комплекса, которая включает в себя перечень объектов энергетики, входящих в состав комплекса, а также список природно-климатических, социальных, экономических и прочих параметров энергетических технологий, применяемых на этих объектах. Например, для детального моделирования возобновляемых источников энергии требуется подробная природно-климатическая информация. К ней относятся температура воздуха,

атмосферное давление, влажность, плотность, солнечная радиация, скорость и направление ветра, а также некоторые другие метеорологические показатели [19, 20].

Математическая постановка (1)-(9), (13)-(19) предоставляет достаточный набор элементов для описания возможных конфигураций микросети:

- узлы сетей транспорта: источники и потребители энергоресурсов, промежуточные узлы;
- дуги сетей транспорта;
- преобразователи;
- накопители энергии (хранилища энергоресурсов).

Таким образом, описание конфигурации микросети в виде набора из  $N$  взаимодействующих энергетических хабов состоит из двух частей. Первая часть описывает инфраструктуру передачи энергоресурсов  $k \in K$  в виде множества узлов  $V_k$  и дуг  $E_k$  транспортных сетей  $G_k$ . Вторая часть описывает инфраструктуру генерации, преобразования и аккумуляции энергоресурсов в виде информации о входах, входных накопителях, преобразователях, выходных накопителях и выходах каждого из  $N$  энергетических хабов. Данный способ спецификации энергетического комплекса достаточен для описания конфигураций автономных микросетей. Следует отметить, что в литературе представлены более сложные и универсальные способы спецификации микросетей на базе концепции энергетического хаба [10-13].

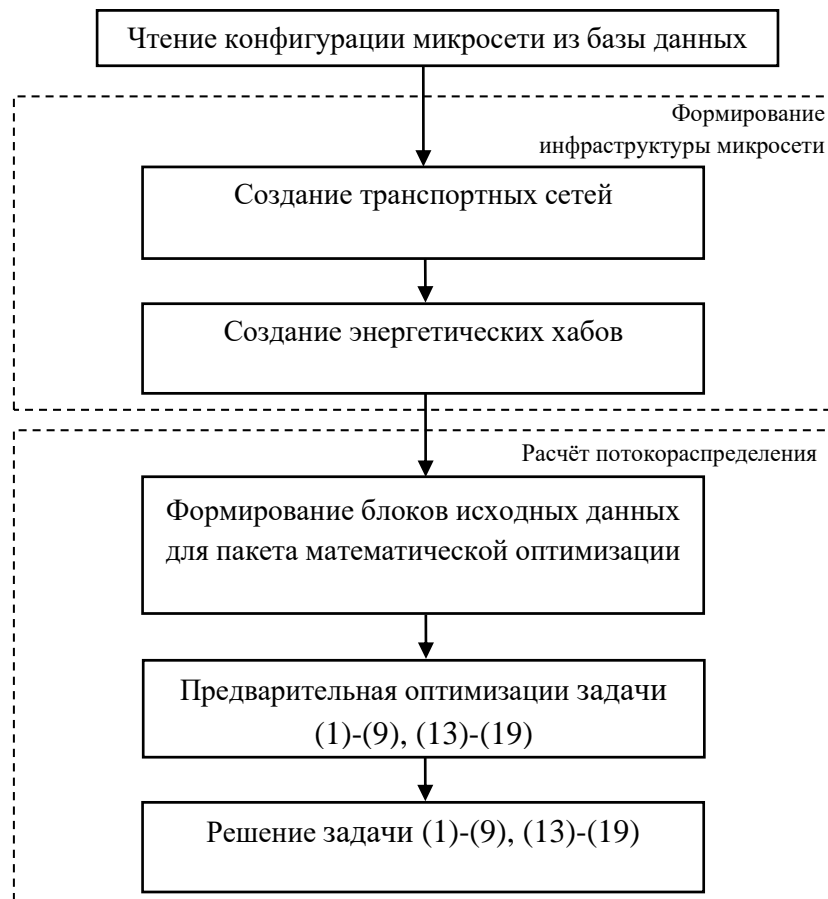
В рамках проекта № 20-47-380002-р\_а были разработаны инфологическая и физическая модели данных для хранения конфигураций микросетей [21].

**3. Программная реализация.** После того, как описание конфигурации микросети считано из базы данных, оно трансформируется в вектора и матрицы согласно математической модели (1)-(9), (13)-(19). Этот шаг достаточно легко автоматизируется, так как каждому элементу конфигурации соответствует свой набор уравнений, описывающий функционирование этого элемента. Затем вектора и матрицы заполняются данными, характеризующими функционирование микросети на протяжении  $T$  периодов времени. В конце происходит расчёт потоков распределения энергоресурсов  $K$  в микросети. Этот шаг состоит из этапов предварительной оптимизации и решения задачи (1)-(9), (13)-(19).

Вышеописанные шаги реализованы в виде программного модуля, который использует один из пакетов математической оптимизации: GLPK [22], Clp [23], Cbc [24], CPLEX [25] и SoPlex [26]. Пакеты CPLEX и Cbc ориентированы на параллельные и распределённые вычисления. Алгоритм работы реализованного программного модуля показан на рис. 4.

**Заключение.** В качестве выводов можно выделить следующие основные отличия математической постановки (1)-(9), (13)-(19) от аналогичной модели городского энергетического комплекса, описанной в [7]:

- более низкий уровень территориальной иерархии рассматриваемых энергетических комплексов и меньшая на три порядка величина нагрузок на стороне потребителя;
- использование концепции энергетического хаба, жестко заданная структура которого позволяет достаточно просто автоматизировать перевод текстового описания конфигурации энергетического комплекса в целевые структуры данных конкретного пакета математической оптимизации;
- возможность оптимизации показателей функционирования автономного энергетического комплекса по данным типичного метеорологического года или заданного многолетнего периода метеорологических наблюдений [16,17,27];
- ориентация на более детализированное моделирование режимов работы возобновляемых источников энергии и аккумуляторов электроэнергии [1].



**Рис. 4.** Алгоритм расчёта потокораспределения энергоресурсов в микросети

Особенностями программной реализации модели микросети (1)-(9), (13)-(19) по сравнению с подходом, представленным в [8], являются:

- применение готовых пакетов математической оптимизации, ориентированных на параллельные и распределённые вычисления;
- применение концепции параллельных и распределённых вычислений, что требует специализированной вычислительной среды для сборки, тестирования и выполнения разрабатываемого программного обеспечения.

Таким образом, сравнение с похожей двухуровневой моделью энергетического комплекса города [7] показывает, что благодаря тому, что все процессы производства, преобразования, аккумулирования и передачи энергоресурсов описываются линейными зависимостями, моделирование микросети на основе концепции энергетического хаба обеспечивает более высокую вычислительную эффективность. С другой стороны, модель энергетического комплекса города более точно и качественно, чем представленная в статье модель микросети, отражает физические особенности некоторых процессов, например транспорта тепла и электроэнергии. Дальнейшее совершенствование модели микросети связано с добавлением новых элементарных блоков, более детально описывающих работу электрохимических накопителей энергии и возобновляемых источников энергии, а также с формированием различных вариантов компоновки аккумулирующего звена на основе методики категоризации электрохимических накопителей энергии [1].

**Благодарности.** Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FNEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределённых средах».



### Список источников

1. Карамов Д.Н. Интеграция процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники энергии / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 113-130.
2. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4-х томах. Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994.– 480 с.
3. Vyckov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V. et al. Support for managing the resilience of energy systems based on a combinatorial approach. Journal of computer and systems sciences international, 2021, v. 60, no. 6. pp. 981-994, DOI:10.1134/S1064230721060071.
4. Kostromin R., Basharina O., Feoktistov A., Sidorov I. Microservice-based approach to simulating environmentally-friendly equipment of infrastructure objects taking into account meteorological data. Atmosphere, 2021, v. 12, no. 9, 1217, pp. 1-24, DOI: 10.3390/atmos12091217.
5. Hosseini S.H.R., Allahham A., Walker S.L., Taylor, P. Optimal planning and operation of multi-vector energy networks: A systematic review. Renewable and sustainable energy reviews, 2020, 133, p.110216.
6. Тягунов М.Г. Использование цифрового двойника гибридных энергетических комплексов для оптимизации их параметров и режимов / М.Г. Тягунов, Р.П. Шевердиев // Вестник МЭИ, 2023. – № 3. – С. 109-118. – DOI:10.24160/1993-6982-2023-3-109-118.
7. Воропай Н.И. Методика управления спросом на электро-и теплоэнергию в интегрированной энергосистеме с активными потребителями / Н.И. Воропай, В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко и др. // Известия РАН. Энергетика, 2020. – Т. 4. – С. 11-23.
8. Barakhtenko E., Sokolov D. An architecture of the technology platform for computer modeling, design, and optimization of intelligent integrated energy systems. Proceedings of International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon), 2019, pp. 1-5.
9. Eladl A.A., El-Afifi M.I., El-Saadawi M.M., Sedhom B.E. A review on energy hubs: Models, methods, classification, applications, and future trends. Alexandria engineering journal, 2023, vol. 68, pp. 315-342.
10. Liu T., Zhang D., Wang S., Wu T. Standardized modelling and economic optimization of multi-carrier energy systems considering energy storage and demand response. Energy conversion and management, 2019, vol. 182, pp.126-142.
11. Wang Y., Cheng J., Zhang N., Kang C. Automatic and linearized modeling of energy hub and its flexibility analysis. Appl energy feb., 2018, pp. 211:705–14.
12. Wang Y., Zhang N., Kang C., Kirschen D.S., Yang J., Xia Q. Standardized matrix modeling of multiple energy systems. IEEE Trans smart grid, 2019, vol. 10, pp. 257-70.
13. Huang W., Zhang N., Wang Y., Capuder T., Kuzle I., Kang C. Matrix modeling of energy hub with variable energy efficiencies. International journal of electrical power & energy systems, 2020, 119, p. 105876.
14. Almassalkhi M., Hiskens I. Optimization framework for the analysis of large-scale networks of energy hubs. Proceedings of 17th power system computation, 2011, p. 7.
15. Kriechbaum L., Scheiber G., Kienberger T. Grid-based multi-energy systems – modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges. Energy, sustainability and society, 2018, 8, p.35.
16. Карамов Д.Н. Формирование исходных метеорологических массивов с использованием многолетних рядов fm 12 Synop и metar в системных энергетических исследованиях / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. –Т. 329. – № 1. – С. 69-88.
17. Kostromin R., Feoktistov A., Voskoboinikov M. Service-oriented tools for automating digital twin development. Proceedings of the 4th Scientific-practical workshop on information technologies: algorithms, models, systems (ITAMS 2021), CEUR-WS Proceedings, 2021, vol. 2984, pp. 95-100, DOI:10.47350/ITAMS.2021.12.
18. Kostromin R., Feoktistov A. Agent-based DevOps of software and hardware resources for digital twins of infrastructural objects. Proceedings of the 4th International conference on future networks and distributed systems (ICFNDS 2020), ACM, 2020, pp. 1-6, DOI:10.1145/3440749.
19. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 28-37.
20. Karamov D.N., Naumov I.V. Modeling a solar power plant with regard to changes in environmental parameters. Proceedings of Power technology and engineering, 2020, 4, pp. 448-454.
21. Еделев А.В. База данных для моделирования автономных энергетических комплексов / А.В. Еделев, А.Г. Феоктистов // Техническая и технологическая модернизация России. Проблемы, приоритеты, перспективы: Тр. Международной научно-практической конф. – Казань: Аэтерна, 2021. – С. 3-9.

22. GLPK – GNU Linear Programming Kit. Available at: <http://www.gnu.org/software/glpk/> (accessed: 05/04/2023).
23. Clp – Coin-Or Linear Programming. Available at: <http://projects.coin-or.org/Clp> (accessed: 05/04/2023).
24. Cbc – Coin-Or Branch and Cut. Available at: <http://projects.coin-or.org/Cbc> (accessed: 05/04/2023).
25. Cplex V12. 1: User’s Manual for CPLEX. International Business Machines Corporation, 2009, 46, p.157.
26. SoPlex – The Sequential Object-Oriented Simplex. Available at: <http://soplex.zib.de> (accessed: 05/04/2023).
27. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., Jossen A. et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. *Solar energy*, 2007, 81, pp. 1409-1425.

**Еделев Алексей Владимирович.** К.т.н., старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Область научных интересов – живучесть энергетических комплексов, математическое моделирование, распределенные вычисления. AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754, [flower@isem.irk.ru](mailto:flower@isem.irk.ru).

**Карамов Дмитрий Николаевич.** К.т.н., доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Байкальский институт БРИКС. Область научных интересов – энергетические системы и комплексы, возобновляемые источники энергии, математическое моделирование. AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, [dmitriy.karamov@mail.ru](mailto:dmitriy.karamov@mail.ru).

**Баширина Ольга Юрьевна.** К.т.н., доцент, научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, доцент Уральского государственного экономического университета. Область научных интересов – системный анализ и моделирование сложных систем. AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X, [basharinaolga@mail.ru](mailto:basharinaolga@mail.ru).

UDC 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007

## Modelling autonomous microgrids

Alexey V. Edelev<sup>1</sup>, Dmitriy N. Karamov<sup>2</sup>, Olga Yu. Basharina<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

<sup>2</sup>National Research Irkutsk State Technical University,

<sup>3</sup>Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS,

Russia, Irkutsk, [flower@isem.irk.ru](mailto:flower@isem.irk.ru),

<sup>4</sup>Ural State University of Economics, Russia, Yekaterinburg

**Abstract.** This work is the first of a series of articles devoted to the application of the developed digital twin technology of a complex technical system for the study of its properties. One of these properties is resilience, which is understood as the property of these energy complexes to adapt to large disturbances and restore their initial state after their impact. Autonomous micro-networks are considered as complex technical systems in the article. The study of the resilience of these local-level energy complexes is usually based on multivariate computational experiments, however, if there is a feedback of a digital twin with a micro-grid or a test bench, field experiments can also be used. The key component of the digital twin of the microgrid should be a complex of various models that accurately describe all aspects of the behavior of this energy complex. This article describes an optimization model of a microgrid based on the concept of an energy hub. The energy hub concentrates production capacities for generating, converting and accumulating energy resources, which are connected to each other and to consumers using energy transport networks. The article presents a software implementation of an optimization model of a microgrid based on the concept of an energy hub. In conclusion, a comparison is made with a fundamentally similar two-level model of the city's energy complex, showing that the modeling of a microgrid based on the concept of an energy hub provides higher computational efficiency. On the other hand, the model of the energy complex of the city more accurately than the microgrid model presented in this article reflects the physical features of some processes, for example, the transport of heat and electricity.

**Keywords:** digital twin, test-bed, micro-grid, resilience, mathematical model, energy hub

**Acknowledgements:** The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. № FWEW-2021-0005 «Technologies for the development and analysis of subject-oriented intelligent group control systems in non-deterministic distributed environments».

## References

1. Karamov D.N. Integratsiya protsessa kategorizatsii elektrokhimicheskikh istochnikov energii v unikal'nom sostave oborudovaniya avtonomnykh energeticheskikh kompleksov, ispol'zuyushchikh istochniki energii [Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering], 2019, v. 330, no. 5, pp. 113-130.
2. Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya. V 4-kh tomakh. T. 1. Spravochnik po obshchim modelyam analiza i sinteza nadezhnosti sistem energetiki [Reliability of energy systems and their equipment. In 4 volumes. T. 1. Handbook of general models of analysis and synthesis of reliability of energy systems], vol. 1., Ed Rudenko Yu.N., Moscow, Energoatomizdat, 1994, 480 p.
3. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V., Kostromin R.O., Sidorov I.A., Feoktistov A.G., Fereferov E.S., Fedorov R.K. Support for managing the resilience of energy systems based on a combinatorial approach. *Journal of computer and systems sciences international*, 2021, v. 60, no. 6. pp. 981-994, DOI: 10.1134/S1064230721060071.
4. Kostromin R., Basharina O., Feoktistov A., Sidorov I. Microservice-based approach to simulating environmentally-friendly equipment of infrastructure objects taking into account meteorological data. *Atmosphere*, 2021, v. 12, no. 9, 1217, pp. 1-24, DOI: 10.3390/atmos12091217.
5. Hosseini S.H.R., Allahham A., Walker S.L., Taylor, P. Optimal planning and operation of multi-vector energy networks: A systematic review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2020, 133, p.110216.
6. Tyagunov M.G., Sheverdiyev R.P. Ispol'zovaniye dvoynika gibridnykh energeticheskikh kompleksov dlya optimizatsii ikh parametrov i rezhimov [Using a digital twin of hybrid energy complexes to optimize their parameters and modes]. *Vestnik MEI* [Bulletin of MPEI], no 3, pp. 109-118, DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-109-118.
7. Voropay N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. et al. Metodika upravleniya sprosom na elektro- i teploenergiyu vo vstroynnoy energosisteme s aktivnymi pol'zovatelyami [Demand management technique for electricity and heat in an integrated energy system with active consumers]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Izvestiya RAS. Energy], 2020, v. 4, pp. 11-23.
8. Barakhtenko E., Sokolov D. An architecture of the technology platform for computer modeling, design, and optimization of intelligent integrated energy systems. *Proceedings of International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon)*, 2019, pp. 1-5.
9. Eladl A.A., El-Afifi M.I., El-Saadawi M.M., Sedhom B.E. A review on energy hubs: Models, methods, classification, applications, and future trends. *Alexandria engineering journal*, 2023, vol. 68, pp. 315-342.
10. Liu T., Zhang D., Wang S., Wu T. Standardized modelling and economic optimization of multi-carrier energy systems considering energy storage and demand response. *Energy conversion and management*, 2019, vol. 182, pp.126-142.
11. Wang Y., Cheng J., Zhang N., Kang C. Automatic and linearized modeling of energy hub and its flexibility analysis. *Appl energy feb.*, 2018, pp. 211:705–14.
12. Wang Y., Zhang N., Kang C., Kirschen D.S., Yang J., Xia Q. Standardized matrix modeling of multiple energy systems. *IEEE Trans smart grid*, 2019, 10, pp. 257-70.
13. Huang W., Zhang N., Wang Y., Capuder T., Kuzle I., Kang C. Matrix modeling of energy hub with variable energy efficiencies. *International journal of electrical power & energy systems*, 2020, vol. 119, p. 105876.
14. Almassalkhi M., Hiskens I. Optimization framework for the analysis of large-scale networks of energy hubs. *Proceedings of 17th power system computation*, 2011, p. 7.
15. Kriechbaum L., Scheiber G., Kienberger T. Grid-based multi-energy systems – modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges. *Energy, sustainability and society*, 2018, 8, p.35.
16. Karamov D.N. Formirovaniye iskhodnykh meteorologicheskikh massivov s ispol'zovaniyem mnogoletnikh ryadov fm 12 Synop i metar v sistemnykh energeticheskikh proizvodstvakh [Formation of initial meteorological arrays using long-term series fm 12 Synop and metar in system energy studies]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69-88.
17. Kostromin R., Feoktistov A., Voskoboinikov M. Service-oriented tools for automating digital twin development. *Proceedings of the 4th Scientific-practical workshop on information technologies: algorithms, models, systems (ITAMS 2021)*, CEUR-WS Proceedings, 2021, v. 2984, pp. 95–100, DOI:10.47350/ITAMS.2021.12.

18. Kostromin R., Feoktistov A. Agent-based DevOps of software and hardware resources for digital twins of infrastructural objects. Proceedings of the 4th International conference on future networks and distributed systems (ICFNDS 2020), ACM, 2020, pp. 1-6, DOI:10.1145/3440749.
19. Karamov D.N. Matematicheskoye modelirovaniye sluchaynykh izlucheniy s ispol'zovaniyem mnogoletnikh meteorologicheskikh ryadov, nakhodyashchikhsya v dostupe [Mathematical modeling of solar radiation using publicly available long-term meteorological series]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28-37.
20. Karamov D.N., Naumov I.V. Modeling a solar power plant with regard to changes in environmental parameters. Proceedings of Power technology and engineering, 2020, 4, pp. 448-454.
21. Edelev A.V., Feoktistov A.G. Baza dannykh dlya modelirovaniya avtonomnykh energeticheskikh kompleksov [Database for modeling autonomous energy complexes]. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tekhnicheskaya i tekhnologicheskaya modernizatsiya Roscii. Problemy, priority, perspektivy» [Proc. of International scientific and practical conference “Technical and technological modernization of Russia. Problems, priorities, prospects”], Kazan', Aeterna, 2021, pp. 3-9.
22. GLPK – GNU Linear Programming Kit. Available at: <http://www.gnu.org/software/glpk/> (accessed: 05/04/2023).
23. Clp – Coin-Or Linear Programming. Available at: <http://projects.coin-or.org/Clp> (accessed: 05/04/2023).
24. Cbc – Coin-Or Branch and Cut. Available at: <http://projects.coin-or.org/Cbc> (accessed: 05/04/2023).
25. Cplex V12. 1: User’s Manual for CPLEX. International Business Machines Corporation, 2009, 46, p.157.
26. SoPlex – The Sequential Object-Oriented Simplex. Available at: <http://soplex.zib.de> (accessed: 05/04/2023).
27. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., Jossen A. et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. Solar energy, 2007, 81, pp. 1409-1425.

**Edelev Alexey Vladimirovich.** Candidate of Technical Sciences, Researcher, Melentiev energy systems institute. The main direction of research – resilience of energy systems, mathematical modeling, distributed computing. AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754, flower@isem.irk.ru.

**Karamov Dmitriy Nikolaevich.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National research Irkutsk state technical university, Baikal School of BRICS. The main direction of research - energy systems and power engineering complexes, renewable energy sources, mathematical modelling. AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru.

**Basharina Olga Yurievna.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, researcher at the Matrosov institute for system dynamics and control theory of SB RAS, Associate Professor, Ural state university of economics. The main direction of research - system analysis and modeling of complex systems. AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X, basharinaolga@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 30.08.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023; принята к публикации 25.09.2023.

The article was submitted 08/30/2023; approved after reviewing 09/12/2023; accepted for publication 09/25/2023.