

Алгоритм поиска Парето-оптимальных решений в задачах оценки когерентной когнитивности ресурсных сетей

Р.Г. Болбаков, С.В. Маличенко, В.А. Мордвинов

Аннотация—Развитие алгоритма поиска оптимального состояния ресурсной сети использованием множества Парето, а также геометрическая интерпретация задачи с применением метода глубокой аналогии. Цель: создание и апробация улучшенной инновационной модели поиска Парето-оптимальных состояний ресурсных сетей. Методы: оптимизирующие локации с применением множества Парето; методы когнитивности, обновляемые введением характеристических признаков когерентности по показателям энтропийного рассеяния и монохроматизма онтологий. Результат: разработано и представлено ядро обновленного математического описания модели поиска Парето-оптимальных состояний ресурсных сетей. Выводы: показана продуктивность модели поиска Парето-оптимальных состояний с необходимостью его дальнейшей модернизации в частях, отображающих динамические признаки, свойства.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для создания управляющих систем, способных контролировать ресурсные сети и достигать Парето-оптимальных состояний с высокой точностью. Кроме того, использование методов когнитивности может существенно улучшить эффективность работы таких систем, позволяя учитывать параметры и признаки, влияющие на производительность и стабильность.

Прогнозируется дальнейшая модернизация модели включением учета динамических свойств и признаков, что может значительно повысить ее продуктивность в реальных условиях эксплуатации. В целом, создание и апробация улучшенной инновационной модели поиска Парето-оптимальных состояний ресурсных сетей представляет собой важный шаг в развитии методов оптимизации и управления современными техническими системами.

Ключевые слова—множество Парето, когерентная когнитивность, когнитивные сети, ресурсные сети, сетцентрическое взаимодействие.

I. ВВЕДЕНИЕ

Использование сетевых технологий при организации внутрисистемного взаимодействия является на сегодняшний день определяющим фактором при решении проблем коммуникации, связи и иных

прикладных задач, имеющих важное практическое применение. Исследуемые в настоящей работе ресурсные сети рассматриваются с позиций их вовлеченности в процесс информационного обмена при осуществлении коммуникационных взаимодействий между ее участниками. Информационные сети, как частный случай ресурсных сетей являются продолжением развития и использования принципов организации и моделей взаимодействия разрозненных узлов-терминалов с наличием в них полезного ресурса и алгоритмами управления перераспределением этого ресурса между узлами. Используемые алгоритмы организации такого обмена в сетях в настоящее время являются определяющей целью изучения научными коллективами, результаты работ которых можно найти в публикациях [1, 2, 3, 4]. В опубликованном источнике [3] исследуется организация перемещения потоков в транспортных сетях с применением алгоритма Дейкстры. В работе [4] выносятся на обозрение идея адаптивной маршрутизации для увеличения надежности доставки информационных пакетов и минимизации временных затрат. Очевидно, что рассматриваемая в данной работе тематика продолжает линию начальных исследований по зарождающемуся направлению когерентной когнитивности сетей и сетцентрического взаимодействия.

Изыскания при улучшении управления сетевым взаимодействием наталкивают на вовлечение в процесс регуляции более интеллектуализированных систем, это приводит к качественным изменениям в самом процессе информационного обмена. Последним в наше время является переход к новой формации – когнитивным сетям, порождающим неизбежную трансформацию ранее созданного человечеством конгломерата серверов – хранителей информации, сетей – средства перемещения информации и доступа к ней, информационных (компьютерных) систем – средств поиска, обработки и вывода информации к ее обозрению и, собственно, плеяды разночинных пользователей и администраторов всего этого в формат-универсум сложных информационных эргатических систем, где используются онтологии и когнитивность изыскиваемой, хранимой, перерабатываемой и образно воспроизводимой информации. Последнее – есть синтетическое конструирование и воплощение,

Статья получена 23 марта 2023.

Болбаков Роман Геннадьевич, РТУ МИРЭА (bolbakov@mirea.ru)

Маличенко Сергей Владимирович, РТУ МИРЭА (malichenko@mirea.ru)

Мордвинов Владимир Александрович, РТУ МИРЭА (mordvinov@mirea.ru)

являющееся лейбмотивом функциональной синергетики [5].

Для улучшения самого процесса управления когнитивность должна использоваться как системообразующий фактор при создании и конструировании рассматриваемых информационных систем. Их способность думать, обучаться, запоминать и адаптироваться к непостоянным условиям для того, чтобы достигнуть своих целей может в значительной мере оптимизировать механизм переноса ресурсов в процессе инфокоммуникаций. При организации такого взаимодействия, процесс обмена приводит к перераспределению полезного ресурса в пределах сети и вовлечением в этот процесс всех узлов-терминалов, а управляющее воздействие на него оказывается со стороны алгоритмов организации трафика данных, где, как раз, когерентные когнитивные методы управления рефлексивно, на основе оценки состояния, производят интеллектуальный анализ и регулирование.

С этих позиций, на начальном этапе производится онтологическое проектирование и определение показателей состояния сети, которые входят ее в математическую модель, а разветвленная структура подобной сети представляется в виде взвешенного ориентированного графа.

II. ГРАФОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕСУРСНЫХ СЕТЕЙ

На первом этапе формирования архитектуры будущей сети авторами рекомендуется детально ознакомиться с предметной областью, в которой будет функционировать будущая сеть, и выделить ключевые параметры и их ограничения, которые, далее, будут задействованы при формировании множества Парето. В настоящем исследовании авторы опирались на традиционное использование графовой модели, в узлах которой располагаются источники-хранилища ресурсов, а ребра представляют собой каналы, по которым производится перераспределение ресурса внутри сети. Такие ребра помимо пропускной способности могут иметь еще несколько характеристик, описывающих их свойства и/или ограничения, которые, в конечном счете, используются для выбора наиболее подходящего состояния во множестве решений.

В этой связи, авторами предлагается использовать модель сети, основанную на классических потоковых моделях [6]. Известен ориентированный ациклический граф $G=(V,E)$, описывающий существующую сеть (рисунок 1). V – множество вершин, которым соответствуют узловым элементам сети. Ребро (u,v) из множества E между вершинами u и v задает канал связи и имеет положительную пропускную способность $c(u,v)$, показывающую, какое максимальное количество ресурса может быть передано по нему в единицу времени.

В графе выделяются две особые вершины: источник информации s и сток t . Из s ведут каналы к

промежуточным узлам, соединяющим сеть. Через промежуточные узлы ресурс попадает в сток t . Множество ребер $E'(E \cap E') = \emptyset$ описывает все каналы передачи ресурса, которые могут быть выстроены. Для каждого $(u,v) \in E'$ известна пропускная способность $c'(u,v)$ и иные параметры ребра, описывающие его характеристики.

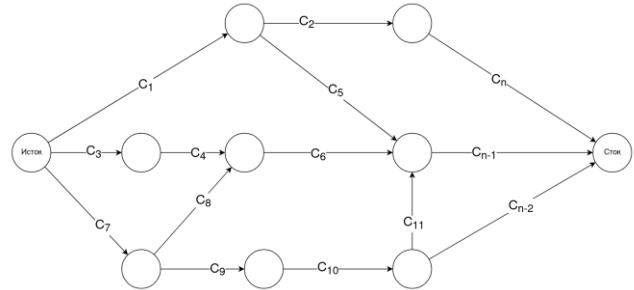


Рисунок 1 – Ациклический граф ресурсной сети.

Процесс транспортировки ресурсов (данных) в сети моделируется с помощью функции потока $f_G: V \times V \rightarrow R$, где \times – декартово произведение, а R – множество вещественных чисел. Величина $f_G(u,v)$ показывает, какое количество информации или ресурса передается в единицу времени по каналу связи, соответствующего ребру между вершинами u и v .

Функция f_G удовлетворяет трем условиям:

1. ограниченность потока: $\forall u,v \in V: f_G(u,v) \leq c(u,v)$;
2. антисимметричность: $\forall u,v \in V: f_G(u,v) = -f_G(v,u)$;
3. сохранение потока: $\forall v \in V \setminus \{s,t\}: \sum_{u \in V} f_G(u,v) = 0$.

Через $|f_G|$ обозначим величину потока в графе G , показывающую, какое количество ресурса может быть передано из источника в сток за единицу времени. Тогда f_G вычисляется следующим образом:

$$|f_G| = \sum_{v \in V} f_G(s,v) \quad (1)$$

Через $|f_G|$ обозначим максимальную величину потока в графе G среди всех возможных значений f_G . Множество ребер $E^* \subseteq E'$ соответствует каналам связи, которые будут выстроены. На этапе проектирования вышеобозначенная сеть трансформируется в сеть, описываемую графом $G^* = (V, E \cup E^*)$.

Уместно отметить, что построенная математическая модель может использоваться во многих предметных областях при оптимизации структуры ресурсных сетей различной природы.

Сеть трубопроводов имеет иерархическую древовидную структуру, которая может быть описана в рамках рассматриваемой математической модели, поэтому она может использоваться при решении оптимизационных задач планирования транспортировки нефти и газа.

Многоиндексные задачи объемно-календарного планирования могут быть сведены к отысканию

допустимой циркуляции в ресурсной сети, имеющей структуру сети передачи данных.

III. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ПАРЕТО ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ СЕТИ

Оптимизация сети передачи данных является многокритериальной задачей, так как при ее рассмотрении требуется учитывать, как минимум два фактора: стоимость реализации и пропускная способность. В этой связи уместно сформулировать задачу отыскания оптимальных решений многокритериальной задачи в условиях определенности, то есть, когда отсутствуют случайные или неопределенные факторы.

Возможными решениями задачи оптимизации является множество допустимых решений D , из которого необходимо выбрать одно (иногда целое подмножество) оптимальное решение. Рассматривается множество числовых функций $f_1(x), \dots, f_n(x), n \geq 2, x \in D$, определенных на множестве D . Указанные функции задают векторный критерий $f = (f_1(x), \dots, f_n(x))$, который принимает значения в пространстве n -мерных векторов R^n (R – множество вещественных чисел). Всякое значение $f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x))$ называют оценкой решения $x \in D$.

Многокритериальная задача оптимизации может быть представлена следующим образом:

$$\min_{x \in D} (f_1(x)), \min_{x \in D} (f_2(x)), \dots, \min_{x \in D} (f_n(x)) \quad (2)$$

Сравнение решений в задаче многокритериального выбора применяется не непосредственно, а с использованием векторного критерия f . Рассмотрим наиболее часто применяемые подходы к решению.

В работе [7] вводятся критерии оптимизации сети передачи данных. Через $Q_1(E^*)$ обозначим стоимость реализации проектирования E^* :

$$Q_1(E^*) = \sum_{(u,v) \in E^*} p'(u,v) \quad (3)$$

Через $Q_2(E^*)$ обозначим величину максимальной пропускной способности сети, описываемой графом G^* , взятую со знаком минус:

$$Q_2(E^*) = -|F_{G^*}| \quad (4)$$

Тогда, задача оптимизации формулируется следующим образом: по заданным ациклическим графом $G = (V, E)$ и множеству ребер $E' (E \cap E') = \emptyset$, матрицам пропускных способностей $c(u,v)$, $c'(u,v)$ и матрице стоимости ребер $p'(u,v)$ найти множество Парето-оптимальных решений задачи $\min_{E^*} (Q_1(E^*)), \min_{E^*} (Q_2(E^*))$.

Эта формулировка сводится к поиску минимума функций $Q_i, i \in [1,2]$, т. е. оптимального состояния сети по двум критериям. В предельном состоянии задача

должна формулироваться исходя из неопределенного числа параметров оптимизации:

$$[A] = \min(Q_i(E^*)) \forall i \in N \quad (5)$$

A представляет собой матрицу Парето-оптимальных состояний для каждого узла графа $G = (V, E)$.

В таком случае, решение этой задачи сводится к поиску оптимальных значений для каждого параметра узла и ребра графа сети. Далее с помощью метода наискорейшего спуска для Q_i отыскивается множество Парето – множество Парето оптимальных точек. Эти точки представляют собой набор характеристик $G = (V, E)$ – графовой модели ресурсной сети. По имеющимся состояниям сети находится величина, характеризующая разницу текущего состояния сети и состояния в выбранной точке Парето оптимальности.

Кроме того, в расчете целесообразно учитывать важность и приоритетность ключевых параметров. Для этого в задачу поиска вводится коэффициент k_i , учитывающий вес каждого параметра сети. В итоге формула 5 имеет следующий вид:

$$[A] = \min(k_i \cdot Q_i(E^*)) \forall i \in N \quad (6)$$

Весовые коэффициенты могут варьироваться в пределах $0 < k_i \leq 1$ и меняться с течением времени, т. е. $k_i = k(t, i)$ в зависимости от характера и текущего состояния ресурсной сети.

IV. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЗАДАЧИ ПОИСКА ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

Задача поиска множества Парето-оптимальных состояний сети может быть интерпретирована геометрически и визуально представлена в N -мерном пространстве, где каждая мера представляет собой параметр ресурсной сети, для которого необходимо отыскать оптимальное значение. Каждое решение в этом пространстве представимо точкой из множества Парето. Очевидно, что в условиях, далеких от идеальных, любая точка из этого множества асимптотически стремится к Парето-фронт, но достигает его лишь в пределе [7]. Каждый из параметров сети имеет неотрицательное значение и предельное состояние, которое выводит задачу поиска уже в иную плоскость, а именно, решается задача многокритериальной оптимизации с ограничениями. Основная идея, лежащая в основе алгоритма: максимально избежать вычислений целевых функций и ограничений вдали от Парето-фронта. Многие существующие алгоритмы (например, генетические), выполняют много вычислений далеко от оптимального множества, пытаясь «одновременно» двигать все множество точек в сторону Парето-фронта. При этом, во многих случаях Парето-фронт обладает определенными геометрическими свойствами, позволяющими найти его практически без вычислений функций за его пределами.

Предполагается, что целевые функции и ограничения в задаче гладкие, а Парето-фронт состоит из конечного

множества отдельных компонент, каждая из которых описывается некоторой гладкой функцией. Тогда визуализировать задачу можно следующим образом: в N -мерном пространстве отыскать точку с наименьшим расстоянием к Парето-фронт и заключенной в шаровом секторе, ограниченной сферой Парето-фронта и сферой ограничений.

В многопараметрической задаче, например, с тремя параметрами, визуализация множества решений будет выглядеть следующим образом.

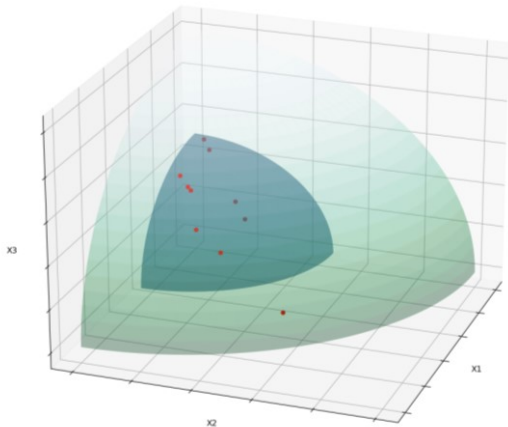


Рисунок 2 — Пример визуализация задачи поиска множества Парето.

Все множество Парето-оптимальных решений укладывается в облако точек между двумя сферами. Следует также отметить, что весовые коэффициенты в данном случае имеют, также, свою геометрическую интерпретацию. По сути, они характеризуют пропорциональность наклона прямой в 2-х мерном пространстве или плоскости в многомерном относительно осей координат (рисунок 3).

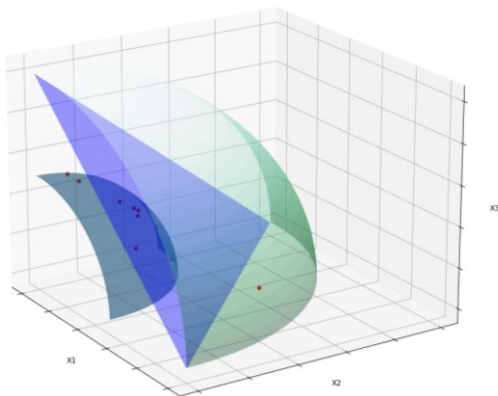


Рисунок 3 — Интерпретация весовых коэффициентов в плоскость решений.

Эта плоскость пересекает оси координат в точках наименьшего предельного значения функций для каждого из параметров сети, и все точки множества, оказавшиеся за пределами плоскости, находящиеся близко к Парето-фронт, становятся множеством потенциальных решений задачи поиска оптимального состояния. Конечным решением при прочих равных условиях может стать точка наиболее близкая к Парето-фронт.

Существенным является то, что в случае, когда

решение близкое к Парето-фронт не эффективно, нормаль, проведенная к коэффициентообразованной плоскости, приводит к получению эффективного решения, которое может быть более предпочтительно, но это предположение может быть задействовано в том случае, если исходная многокритериальная задача вогнута (линейна).

Поиск точек оптимальности, так же, как и поиск Парето-фронта представляет собой далеко не тривиальную задачу. Частные приложения к их использованию более детально описаны в работах [8, 9, 10]. В числе этих решений рассматривается сведение многокритериальных задач к однокритериальным [11], а способы и возможности практического использования более детально изложены в работах [12, 13, 14].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный алгоритм поиска Парето-оптимальных решений в задачах оценки когерентной когнитивности ресурсных сетей предложен к использованию для нахождения оптимального состояния сети и проведения когнитивного анализа ее поведения для организации наиболее эффективного управления сетевым взаимодействием. Упомянутый алгоритм является частью системообразующей методики когнитивного анализа сетевого взаимодействия и управления. На основе оценок предельного, текущего и оптимального состояний сделан вывод об интеллектуальности модели управления при проведении сетцентрического взаимодействия или же его отсутствии, а также становится возможным дать количественную оценку меры когнитивности по исследуемым показателям и динамикам их изменения.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Беляков С.Л., Коломийцев Я.А., Розенберг И.Н., Савельева М.Н. Модель решения задачи маршрутизации в интеллектуальной геоинформационной системе // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – №5 (118). – С. 113-119.
- [2] Беляков С.Л., Коломийцев Я.А., Розенберг И.Н., Савельева М.Н. Оптимизация потоков в транспортных системах // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – №5 (154). – С. 161-167.
- [3] Дышленко С.Г. Маршрутизация в транспортных сетях // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2018. – №1. – С. 15-20.
- [4] Рудь Д.Е. Технологии топологической оптимизации трафика информационных потоков в телекоммуникационных сетях [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2010. – №2. – С. 95-107. – Режим доступа: http://www.ivdon.ru/uploads/article/doc/articles.193.big_image.doc.
- [5] Болбаков Р.Г., Мордвинов В.А., Берёзкин П.В., Свицкий И.И. Онтология функциональной синергетики в виртуальном когнитивно-семиотическом конструировании информационных процессов и систем // Russian Technological Journal. – 2022. – №10 (1). – С. 7-17.
- [6] Лазарев Е.А. Бикритериальная модель и алгоритмы оптимизации сети переданных данных: дис. канд. техн. наук: 05.13.01. - Нижний Новгород, 2013. - 120 с.
- [7] Пересторонин Н.О. Новый метод многокритериальной оптимизации, основанный на локальной геометрии множества Парето: ВКР. магистра М., 2013. – 37 С.
- [8] Kaisa Miettinen, Francisco Ruiz, Andrzej P Wierzbicki Introduction to multiobjective optimization: interactive approaches. In Multiobjective Optimization, Springer, 2008. pp. 27-57.

- [9] Jorge Nocedal, Stephen J Wright Numerical optimization. Springer Science+ Business Media, 2006.
- [10] Gabriele Eichfelder Adaptive scalarization methods in multiobjective optimization. Springer, 2008.
- [11] Пересторонин Н.О., Яроцкий Д.А. Тестирование алгоритмов многокритериальной оптимизации // В Труды 53-й научной конференции МФТИ. Москва-Долгопрудный, – 2010. – С. 122-123.
- [12] Зобнина О.В., Дю А.И., Бабаева Ю. А. Многокритериальная оптимизация // StudNet. – 2021. – №1. – С. 87.
- [13] Utyuzhnikov S.V., Maginot J, Guenov M.D. Local approximation of pareto surface. In Proceedings of the World Congress on Engineering, Citeseer, – 2007. V 2, pp. 898-903.
- [14] Joerg Fliege, Grana Drummond L.M., Benar F Svaiter Newton's method for multiobjective optimization. SIAM Journal on Optimization, – 2009. № 20(2), pp. 602-626.

Роман Геннадьевич БОЛБАКОВ, заведующий кафедрой инструментального и прикладного программного обеспечения РТУ МИРЭА
email: bolbakov@mirea.ru

Сергей Владимирович МАЛИЧЕНКО, аспирант кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения РТУ МИРЭА
email: s.malichenko@yandex.com

Владимир Александрович МОРДВИНОВ, профессор кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения РТУ МИРЭА
email: mordvinov@mirea.ru

Algorithm for searching for Pareto-optimal solutions in problems of estimating coherent cognitiveness of resource networks

R.G. Bolbakov, S.V. Malichenko, V.A. Mordvinov

Abstract—Development of an algorithm for finding the optimal state of a resource network using the Pareto set, as well as a geometric interpretation of the problem using the deep analogy method. **Purpose:** creation and testing of an improved innovative model for searching for Pareto-optimal states of resource networks. **Methods:** optimizing locations using the Pareto set; methods of cognition, updated by the introduction of characteristic features of coherence in terms of entropy scattering and monochromatism of ontologies. **Result:** the core of the updated mathematical description of the search model for the Pareto-optimal states of resource networks was developed and presented. **Conclusions:** the productivity of the search model for Pareto-optimal states is shown with the need for its further modernization in parts that display dynamic features and properties.

The obtained results can be used to create control systems for monitoring resource networks. And the use of cognitive methods can improve the efficiency of such systems, allowing you to take into account the parameters and features that affect performance and stability.

Keywords—Pareto set, coherent cognition, cognitive networks, resource networks, networks-centric interaction.

REFERENCES

- [1] S. L. Belyakov, Ya. A. Kolomiytsev, I. N. Rozenberg, and M. N. Savelyeva, Tech. A model for solving the routing problem in an intelligent geoinformation system. *Izvestiya of the Southern Federal University. Technical science.* – 2011. – No. 5 (118). – pp. 113-119. (in russian)
- [2] S. L. Belyakov, Ya. A. Kolomiytsev, I. N. Rozenberg, and M. N. Savelyeva, Tech. Optimization of flows in transport systems // *Proceedings of the Southern Federal University. Technical science.* – 2014. – No. 5 (154). – pp. 161-167. (in russian)
- [3] Dyshlenko S.G. Routing in transport networks // *ITNOU: information technologies in science, education and management.* – 2018. – No. 1. – pp. 15-20. (in russian)
- [4] Rud D.E. Technologies of topological optimization of traffic of information flows in telecommunication networks [Electronic resource] // *Engineering Bulletin of the Don.* – 2010. – No. 2. – pp. 95-107. – Access mode: http://www.ivdon.ru/uploads/article/doc/articles.193.big_image.doc. (in russian)
- [5] Bolbakov R.G., Mordvinov V.A., Berezkin P.V., Sivitsky I.I. Ontology of Functional Synergetics in Virtual Cognitive-Semiotic Design of Information Processes and Systems // *Russian Technological Journal.* – 2022. – No. 10 (1). – pp. 7-17. (in russian)
- [6] Lazarev E.A. Bicriteria model and algorithms for optimizing the data transmission network: Cand. cand. tech. Sciences: 05.13.01. - Nizhny Novgorod, 2013. – 120 p.
- [7] Perestoronin N.O. A new method of multiobjective optimization based on the local geometry of the Pareto set: WRC. master's degree. – 2013. – 37 p. (in russian)
- [8] Kaisa Miettinen, Francisco Ruiz, Andrzej P Wierzbicki Introduction to multiobjective optimization: interactive approaches. In *Multiobjective Optimization*, Springer, 2008. pp. 27–57.
- [9] Jorge Nocedal, Stephen J Wright *Numerical optimization.* Springer Science + Business Media, 2006.
- [10] Gabriele Eichfelder *Adaptive scalarization methods in multiobjective optimization.* Springer, 2008.
- [11] Perestoronin N.O., Yarotsky D.A. Testing of algorithms for multiobjective optimization // *Proceedings of the 53rd Scientific Conference of the Moscow Institute of Physics and Technology. Moscow-Dolgoprudny,* – 2010. – pp. 122-123. (in russian)
- [12] Zobnina O.V., Dyu A.I., Babaeva Yu.A. Multicriteria optimization // *StudNet.* – 2021. – No. 1. – pp. 87. (in russian)
- [13] Utyuzhnikov S.V., Maginot J, Guenov M.D. Local approximation of pareto surface. In *Proceedings of the World Congress on Engineering, Citeseer,* – 2007. V 2, pp. 898-903.
- [14] Joerg Fliege, Grana Drummond L.M., Benar F Svaiter Newton's method for multiobjective optimization. *SIAM Journal on Optimization,* – 2009. No. 20(2), pp. 602-626.

Roman BOLBAKOV, Head of the Department of Instrumental and Applied Software of RTU MIREA email: bolbakov@mirea.ru
Sergey MALICHENKO, Postgraduate student of the Department of Instrumental and Applied Software of RTU MIREA email: s.malichenko@yandex.ru
Vladimir MORDVINOV, Professor of the Department of Instrumental and Applied Software of RTU MIREA email: mordvinov@mirea.ru