

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.81

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-2-67-75

Обзорная статья / Review Paper

Некоторые вопросы многокритериальной оптимизации параметров сложных систем

Р.В. Гусейнов, М.Р. Гусейнова, К.А. Алиева

Дагестанский государственный технический университет

367026, г. Махачкала, пр. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является обоснование проектных критериев оптимальности, учитывающей многокритериальное назначение и функционирование объекта. **Метод.** Исследование проведено на основе методов многокритериальной оптимизации, метода анализа иерархий, метода сверток, эвристических методов. **Результат.** В работе описаны общие задачи многокритериальной оптимизации механических систем. Указано на важность проблемы обоснования проектных критериев оптимальности, учитывающей многокритериальное назначение и функционирование объекта и введения количественно измеряемых целей из множества альтернативных вариантов. Отмечается, что выбор и формирование обобщенного критерия оптимальности является наиболее ответственным при решении оптимизационных задач. Указано на необходимость обеспечения корректности применения того или иного метода свертки. Анализируются различные подходы при формировании обобщенного критерия оптимальности. Приведены их особенности, преимущества и недостатки. Указано на возможность коррекции параметрических ограничений в задачах улучшения оптимальных решений. **Вывод.** При решении многокритериальных задач необходимо с большим вниманием относиться как к постановке задачи, так и к выбору системы критериев и реализуемому методу решения проблемы.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, критерии оптимальности, Парето-оптимальные решения, свертка критериев, многовекторная оптимизация

Для цитирования: Р.В. Гусейнов, М.Р. Гусейнова, К.А. Алиева. Некоторые вопросы многокритериальной оптимизации параметров сложных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(2): 67-75. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-67-75

Some issues of multi-criteria optimization of parameters of complex systems

R.V. Guseynov, M.R. Guseynova, K.A. Alieva

Daghestan State Technical University,

70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to substantiate the design criteria for optimality, taking into account the multi-criteria purpose and functioning of the object. **Method.** The study was carried out on the basis of multicriteria optimization methods, the hierarchy analysis method, the convolution method, and heuristic methods. **Result.** The paper describes general problems of multicriteria optimization of mechanical systems. The importance of the problem of substantiating the design criteria for optimality, taking into account the multi-criteria purpose and functioning of the object, and introducing quantitatively measurable goals from a variety of alternative options is indicated. It is noted that the choice and formation of a generalized optimality criterion is the most responsible in solving optimization problems. The need to ensure the correctness of the application of one or another convolution method is indicated. Various approaches to the formation of a generalized optimality criterion are analyzed. Their features, advantages and disadvantages are given. The possibility of correcting parametric constraints in problems of improving optimal solutions is pointed out. **Conclusion.** When solving multi-criteria problems, it is necessary to pay great attention to both

the formulation of the problem and the choice of a system of criteria and the implemented method for solving the problem.

Keywords: multi-criteria optimization, optimality criteria, Pareto-optimal solutions, criteria convolution, multi-vector optimization

For citation: R.V. Guseynov, M.R. Guseynova, K. A. Alieva. Some issues of multicriteria optimization of parameters of complex systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(2): 67-75. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-67-75

Введение. В общем виде многокритериальная оптимизация системы направлена на поиск ее оптимальных параметров с целью формирования оптимального управления этой системы, которая реализует оптимальные режимы функционирования с учетом воздействия внешних и внутренних факторов, характеристик системы и требуемых показателей качества.

Основной проблемой при проектировании сложных систем является то, что невозможно выбрать один единственный критерий оптимальности. Часто локальные критерии оптимальности противоречат друг другу, поэтому многокритериальный подход является, несомненно, необходимым.

Постановка задачи. Проблема многокритериальности не существовала бы, если бы все локальные критерии могли быть сведены к единому (общему) критерию оптимальности или, как отмечалось выше, если бы локальные критерии были бы не противоречивы, то есть если бы изменение управляемых конструктивных параметров объекта приводило к одновременному экстремуму всех локальных критериев. Часто в задачах оптимизации всегда присутствуют противоречивые критерии, при которых максимизация одного локального критерия приводит к минимизации другого и наоборот.

Методы исследования. Современные технические устройства являются достаточно сложными, так как представляет собой большой комплекс различных механизмов, имеющих свои входные и выходные параметры, и функционируют совместно для достижения своего функционального назначения. Существуют различные подходы при решении задач многокритериальности оптимизации механических систем. Для выбора того или иного варианта проектируемого устройства необходимо определить общий критерий оптимальности технического решения, удовлетворяющего как заказчика так и проектировщика.

В качестве основных критериев (компонент) можно выделить:

1. Максимальное качество;
2. Минимальная себестоимость разработки и изготовления;
3. Минимальные расходы на эксплуатацию;
4. Максимальная безопасность функционирования.

Каждая компонента также является многокритериальной. Так, например, многокритериальность первой компоненты обусловлена тем, что к проектируемому устройству предъявляются комплекс таких технических требований, как надежность, точность, быстродействие, габаритные параметры и т.д.

Реализация такого комплекса требований на основе выбора вектора параметров устройства связана с рядом проблем, который возникает при одновременном учете всех компонент. Важнейшей проблемой, обеспечивающей оптимальное качество технической продукции, является проблема обоснования проектных критериев оптимальности, учитывающей многокритериальное назначение и функционирование объекта. Практическая значимость данной задачи заключается в том, что ее правильное решение может оказать определяющее влияние на конструкцию.

При выборе критериев оптимальности наиболее желательными являются введение количественно измеряемых целей из множества альтернативных вариантов. Если известен набор количественно измеряемых целей, то возникает задача определения для каждой цели

вещественной функции. Сложность процесса заключается в том, что даже при наличии этого набора вещественных функций решение задачи оптимизации по большой совокупности количественно измеряемых целей в количественной форме является трудноразрешимым и в некоторых случаях практически невозможным.

Сложность выбора критерия оптимальности заключается в том, что неправильный выбор приведет к построению неоптимальных, иногда неработоспособных систем.

Количественным показателем критерия оптимальности можно использовать некий функционал (функцию). При выборе такого функционала большое внимание необходимо уделить степени адекватности критерия сформулированной цели и насколько экстремальное его значение соответствует выбору варианта с оптимальной конструкцией. Критерий оптимальности позволит оценивать результаты принимаемых проектных решений. Правильно выбранный критерий оптимальности может отражать или определять сущность влияния основных факторов, встречающихся в процессе проектирования, на результат принятия оптимального проектного решения.

На практике проблема принципа оптимальности нашла широкое применение в форме проблемы скаляризации векторного критерия, то есть в форме сведения векторного критерия оптимальности к некоторому обобщенному скалярному критерию, являющемуся функцией локальных критериев.

При проектировании несложных устройств все критерии, кроме одного, выбранного в качестве основного, принимаются в качестве ограничений, и оптимизация производится по одному выбранному главному критерию. Такой подход имеет свои недостатки, снижает эффективность принимаемых решений, но допустимо с точки зрения оперативности принятия решений. В таком случае из четырех приведенных выше локальных критериев в качестве основного принимается качество продукции, а остальные три принимаются в качестве ограничений. Такая постановка актуальна в случаях улучшения качества уже существующих устройств. Задача векторной оптимизации представляется следующим образом

$$\begin{cases} F(x) \rightarrow \max \\ x \in D \end{cases}$$

где D - множество допустимых решений. $F(x)$ – векторная функция векторного аргумента x , которую можно представить как $\{ F(x) = f_1(x) \dots f_n(x) \}$, где $F(x) = f_1(x) \dots f_n(x)$ – скалярные функции векторного аргумента x , каждая из которых является математическим выражением одного критерия оптимальности.

Обсуждение результатов. В общем виде многокритериальная оптимизация от обычной отличается тем, что здесь имеется несколько целевых функций вместо одной функции, которые вместе образуют векторный критерий.

При решении задач векторной оптимизации необходимо с самого начала выделить область компромиссов или множества эффективных решений (множества Парето). Оптимальное проектное решение, выбираемое на основе многокритериального подхода независимо от избираемого принципа оптимальности, всегда должно принадлежать области компромиссов, иначе оно может быть улучшено и, следовательно, не является оптимальным. Существует много способов нахождения области Парето [1-3].

Решение $x \in D$ оптимально по Парето, если не существует такого решения $x_0 \in D$ при условиях $f(x_0) \geq f(x)$. Любой другой вектор, который не является оптимальным по Парето превалируется оптимальным вектором.

Понятие оптимальных по Парето проектных решений представляет собой обобщение понятия точки максимума числовой функции для нескольких функций. Область оптимальных по Парето проектных решений характеризуется тем свойством, что все принадлежащие ей решения не могут быть улучшены одновременно по всем локальным критериям. Выделение множества Парето значительно сужает область поиска оптимального решения и

во многом упрощает задачу выбора принципа оптимальности и нахождения оптимального проектного решения. Поэтому построение множества Парето оптимальных проектных решений должно стать одним из первых этапов большого числа процедур (особенно интерактивных) и методов многокритериальной оптимизации.

В качестве примера рассмотрим нахождение Парето оптимальных решений на основании метода двух критериев $F_1 - F_2$. Допустим значение критерия F_1 желательно максимизировать, а значение критерия F_2 минимизировать. Один из вариантов этого метода, широко применяемого для решения задач выбора лучшего из нескольких конкурирующих вариантов систем, в общих чертах состоит в следующем.

1. Каждый вариант оценивается по двум локальным критериям F_1 и F_2 .
2. Строится график оценок, соответствующих всем рассматриваемым вариантам системы, и из него выделяются те варианты, из которых и должен быть выбран оптимальный вариант (рис. 1). Поскольку значение критерия F_1 желательно максимизировать, а значение критерия F_2 минимизировать, то, например, вариант 3 предпочтительнее варианта 2 (последний имеет меньшее значение F_1 и большее значение F_2).

Таким образом, из шести представленных вариантов лишь три (1-й, 5-й, 3-й) могут претендовать на роль лучшего.

3. Окончательный выбор оптимального варианта из оставшихся трех вариантов производится лишь эвристически по результатам анализа построенного графика, либо путем разработки специальных количественных методов достижения компромисса на множестве $P(\vec{X})$.

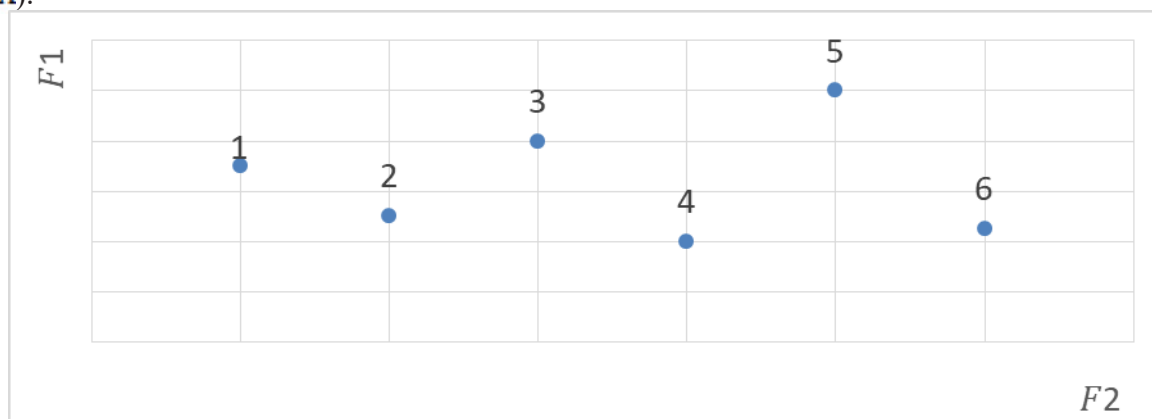


Рис. 1. Парето оптимальные решения по двум противоречивым критериям F_1 и F_2
 Fig. 1. Pareto optimal solutions according to two conflicting criteria F_1 и F_2

По существу вопрос о выборе решающего правила, позволяющего отдать предпочтение той или иной модели из множества Парето, составляет трудную задачу. В ситуациях нестрогой противоречивости локальных критериев оптимальности выделение области компромисса обязательно. В задачах, где встречается строгая противоречивость локальных критериев оптимальности, областью компромиссов будет все допустимое множество $D(\vec{X})$ проектных решений.

В области компромиссов $P(\vec{X})$ выбор и сравнение качества проектных решений возможны только на основе представления принципа компромисса в виде некоторой схемы компромисса между локальными критериями оптимальности. Наиболее часто применяют две группы принципа компромисса: принцип справедливой и абсолютной уступки и принцип равномерности. Они позволяют компенсировать увеличение влияния одной группы локальных критериев за счет уменьшения влияния другой группы локальных критериев на векторный критерий оптимальности.

На практике проблема выбора принципа оптимальности находит применение в форме сведения векторного критерия оптимальности к некоторому обобщенному скалярному критерию, являющемуся функцией локальных критериев.

Если относительный уровень снижения качества по одной группе локальных критериев не превосходит относительно повышения по остальным критериям, то оптимизация проектных решений согласно принципу справедливого компромисса можно проводить с критерием в виде скалярного произведения локальных критериев F_k [4]

$$\text{Opt } F(\vec{X}) = \max \prod_k F_k.$$

Недостатком данного подхода является тот факт, что в случаях, когда локальные критерии имеют различные единицы измерения, обобщенный критерий оптимальности теряет физический смысл.

Для оптимизации векторного критерия также используются и другие принципы: равенства, Чебышева, минимизации суммы приведенных отклонений и др. [5,6,7].

Принцип равенства предусматривает формирование векторного критерия оптимальности из локальных критериев оптимальности, имеющих одинаковую величину

$$\text{Opt } F(\vec{X}) = F_1(\vec{X}) = F_2(\vec{X}) = \dots = F_k(\vec{X}).$$

Этот критерий может не давать оптимальных решений, так как данное условие не обязательно выполняется на области возможных решений.

Принцип квазиравенства допускает формирование глобального критерия оптимальности из неравных локальных критериев оптимальности, но разница между ними по величине не должна превосходить некоторую небольшую относительную величину δ . Проблема здесь состоит в определении этой величины δ , что, в конечном счете, зависит от специфики решаемой задачи.

Принцип Чебышева требует, чтобы оптимальная величина векторного критерия оптимальности определялась наибольшей величиной наименьшего локального критерия оптимальности. В качестве множества допустимых решений берется множество Парето $P(\vec{X})$.

$$\text{Opt } F(\vec{X}) = \max \min F_k(\vec{X}).$$

Принцип минимизации суммы приведенных отклонений предусматривает оптимизацию векторного критерия оптимальности, в качестве аргументов которого используются не локальные критерии оптимальности, а отклонения локальных критериев оптимальности от их оптимальных. Такая оптимизация правомочна, если они имеют одинаковую важность. В ином случае необходимо вводить коррективы.

Одним из удобных приемов решения является введение вектора распределения важности критериев. Такая ситуация возникает, например, когда и исследователь, и заказчик мало имеет информацию о возможностях достижения экстремальных значений по каждому из локальных критериев [8].

Значительную помощь в выборе оптимального решения обеспечивает метод планируемого поиска, достаточно просто реализуемого на ЭВМ [9].

Весь процесс принятия решения строится как диалог лица, принимающего решение (ЛПР) с ЭВМ, т.е. интерактивным методом [10]. Как вариант, можно предложить интерактивную процедуру улучшения оптимальных решений за счет коррекции ограничений [11]. Эффективность диалога существенно повышается при использовании метода планирования экспериментов [12].

В работе [13] описаны методы решения задач линейной многокритериальной оптимизации, основанных на принципе приближения к векторной оптимизации по всем локальным критериям с учетом типа взаимодействия между ними. Такой метод является самым распространенным методом векторной многокритериальной оптимизации при решении прикладных задач.

Сущность метода заключается в назначении коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ и последующей максимизации линейной комбинации критериев $\sum_{i=1}^n \lambda_i f_i(x)$ на множестве X , причем

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 1.$$

Меняя значения коэффициентов λ_i можно получить различные варианты решения задач многокритериальной оптимизации. От правильного назначения коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ зависит точность решения оптимизационной задачи, так как они характеризуют «вес» того или иного критерия. При отсутствии информации о приоритете рассматриваемых критериев коэффициенты λ_i назначаются одинаковыми. Такая аддитивная постановка весов критериев возможна только при условии взаимной независимости критериев по предпочтению [14]

Более гибким является метод определения коэффициентов λ_i , основанный на попарном сравнении «весов» критериев и последующем использовании метода анализа иерархий [15].

Сущность метода заключается в следующем:

Вначале строится многоуровневая иерархическая структура на основе декомпозиции задачи на простые составляющие: в вершине иерархии - цель исследования (1 уровень); на втором уровне критерии, которые могут влиять на цель; на третьем уровне - альтернативные варианты.

Затем эксперты попарно сравнивают элементы на каждом уровне. Для определения значимости альтернативных вариантов их мнения обрабатывают с использованием специально разработанного автором алгоритма. Количественным выражением относительной значимости является вектор приоритетов.

Главным недостатком данного метода является необходимость наличия значительного количества информации об объекте исследования, представляющей собой множество оценок предпочтительности, полученных в процессе парного сравнения критериев.

Использование принципа Эджворта является желательным при подборе экспертов, когда создаются несколько групп высококвалифицированных специалистов с различными мнениями по обсуждаемой проблеме, каждой из которых невыгодно отменять свое решение. В соответствии с этим принципом любой вариант за пределами множества Парето должен иметь нулевую степень принадлежности выбираемому множеству.

Значения λ_i можно также определить на основе прямого сравнения по предпочтению реальных или гипотетических альтернатив [16].

В некоторых случаях применяется эвристические методы, когда эксперт определяет «вес критерия». К ним относятся методы: мозгового штурма, свободных ассоциаций, Дельфи, инверсии, синектики, ключевых вопросов. Недостатком методов является наличие субъективности при принятии решения экспертом.

В условиях нечеткости исходной информации экспертные методы являются основными [17–21], так как «экспертные системы» основываются на аппарате нечеткой логики и позволяют полностью или частично заменить ЛПР при поиске решений возникающих проблем.

Следует заметить, что выбор и формирование обобщенного критерия оптимальности является наиболее ответственным при решении оптимизационных задач. Поэтому в каждом случае необходимо обеспечить корректность применения того или иного метода свертки. Наиболее распространенным методом формирования обобщенного критерия оптимальности является метод линейной свертки.

В работе [22] анализируется круг задач, в котором использование линейной многокритериальной оптимизации обосновано и предлагается подход, состоящий в предварительном сужении множества Парето за счет информации об отношении предпочтения ЛПР с последующей экстремизацией линейной свертки исходных критериев на более узком множестве. Предлагается следующий алгоритм решения задачи линейной многокритериальной оптимизации:

1. Для каждой функции решить задачу максимизации с исходными ограничениями, получив оптимальное решение x_p^* и соответствующее значение целевой функции $f_p^*(x_p^*)$.

2. Получив вектор оптимальных решений проводить их ранжирование точек-решений x_p^* по предпочтительности в зависимости от значений целевых функций. Соответствующим образом упорядочить целевые функции.

3. Определить, какие целевые функции доминируются другими целевыми функциями, и в зависимости от этого исключить доминируемые целевые функции, таким образом, получив недоминируемые критерии, то есть получить оптимальные по Парето векторы.

4. Решить задачу многокритериальной оптимизации с исходными ограничениями и недоминируемыми альтернативами с помощью одного из методов многокритериальной оптимизации.

Автор [23] предлагает комбинированный метод, согласно которому на основе аксиоматического подхода, осуществляется предварительное сужение множества Парето при помощи квантов информации об отношении предпочтения лица, принимающего решение, после чего применяется линейная свертка критериев.

Необходимо отметить, что указанное предварительное сужение позволяет, во-первых, учесть имеющуюся дополнительную информацию, а во-вторых, – сократить возможные негативные последствия, связанные с применением метода линейной свертки критериев.

Метод сверток, несмотря на его достаточно широкую популярность, имеет ряд недостатков [24]: не всегда потеря качества по одному критерию компенсируется приращением по-другому. «Оптимальное» по свертке решение может характеризоваться низким качеством некоторых частных критериев и, следовательно, будет неприемлемым, не всегда можно достаточно корректно задать веса критериев. Зачастую известна лишь сравнительная важность критериев, величина обобщенного критерия, полученная по свертке не имеет никакого физического смысла, многократный запуск алгоритма свертки может выдавать только несколько наиболее легко достижимых Парето точек, даже если в действительности существенно больше.

Вывод. При решении многокритериальных задач необходимо с большим вниманием относиться как к постановке задачи, так и к выбору системы критериев и реализуемому методу решения проблемы. Рассматриваемые вопросы относятся не только к механическим системам. Описаны различные подходы при решении конкретных многокритериальных задач.

Библиографический список:

1. Зайченко Ю.П. Исследование операций. Нечеткая оптимизация.- Киев. Выща школа. 1991.-191 с.
2. Marler R.T., Arora J.S. Multi-Objective Optimization: Concepts and ethods for Engineering. VDM Verlag. 2009. 208 p.
3. Ehrgott M. Multicriteria Optimization. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 328 p.
4. Гамидов Г.С., Колосов В.Г., Османов Н.О. Основы инноватики и инновационной деятельности. - СПб.: Политехника.,2000.-328 с.
5. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето оптимальные решения многокритериальных задач. -М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.-256 с.
6. Федулов А.А., Федулов Ю.Г., Цыгичко В.Н. Введение в теорию статистических ненадежных решений.- М.: Статистик, 1972.-279 с.
7. Матвеевский С.Ф. Основы системного проектирования комплексов летательных аппаратов.-М.: Машиностроение, 1987.-240 с.
8. Овчинникова Н.Ф., Поболь О.Н., Статников И.Н., Фирсов Г.И. Планирование имитационных экспериментов при исследовании многокритериальных динамических систем// В кн. Исследование динамических систем на ЭВМ.- М.: Наука, 1982.- С.8-14.
9. Денисов С.И., Медник А.И., Сергеев В.И., Статников И.Н. ПЛП-поиск как метод оптимизационного проектирования на предварительном этапе.- в кн.: Методы решения задач машиноведения на вычислительных машинах. М.:Наука, 1979.
10. Артоболовский И.И., Емельянов С.В., Сергеев В.И., Статников Р.Б., Шестаков О.А. Интерактивный метод решения задачи оптимального проектирования машины.-ДАН СССР, 1977, т.237, №4.
11. Статников Р.Б., Фейгин Г.Л. О коррекции параметрических ограничений в задаче улучшения оптимальных решений. В кн. Исследование динамических систем на ЭВМ. - М.: Наука, 1982.- С.50-59.

12. Гусейнов Р.В., Ахмедова М.Р. Использование методов оптимизации для анализа и обработки информации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016; Т.41. №2. - С.17-21.
13. Аристова Е.М. Учет взаимодействия между целевыми функциями и их агрегирования в задачах оптимизации. Автореф. дисс. ... на соискание уч. степени канд. техн. наук. Воронеж, 2012.
14. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решения при многих критериях: предпочтения и замещения.-М.: Радио и связь, 1981.-560 с.
15. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Советское радио, 1993, 278 с.
16. Мисюрин С.Ю., Нелюбин А.П. Многокритериальная оптимизация параметров механических систем на примере плоского подъемного механизма // Машиностроение и инженерное образование, 2012, №4.- С.41-48.
17. Джарратино Д. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. 4-е изд. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 1152 с.
18. Gronostajski Z. The expert system supporting the assessment of the durability of forging tools // International journal of advanced manufacturing technology. – 2016. – V. 82. – No 9. –P. 1973–1991.
19. Sabzi H.Z. Developing an intelligent expert system for streamflow prediction, integrated in a dynamic decision support system for managing multiple reservoirs: a case study // Expert systems with applications. – 2017. – V. 82. – No 3. – P. 145–163.
20. Оразбаев Б.Б., Оспанов Е.А., Оразбаева К.Н., Серимбетов Б.А. Многокритериальная оптимизация при управлении химико-технологической системой производства бензола при нечеткой информации. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг биоресурсов. 2019. Т.330. №7.- С.182-194.
21. Волин Ю.М., Островский Г.М. Многокритериальная оптимизация технологических процессов в условиях неопределенности //Автоматика и телемеханика.- 2007.-Т.53. - №3.- С.165-178.
22. Мелькумова Е.Н. Один из подходов решения задачи многокритериальной оптимизации //Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии.- 2010. №2.-С.39-42.
23. В.Д. Ногин Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации //Искусственный интеллект и принятие решений.2014. №4.-С.73-83.
24. Гарипов В.Р. Многокритериальная оптимизация систем управления сложными объектами методами эволюционного поиска : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 Красноярск, 1999.-23 с.

References:

1. Zaichenko Yu.P. Operations research. Fuzzy optimization.- Kiev. You are a school. 1991;191.
2. Marler R.T., Arora J.S. Multi-Objective Optimization: Concepts and methods for Engineering. VDM Verlag. 2009; 208.
3. Ehrgott M. Multicriteria Optimization. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2010; 328.
4. Gamidov G.S., Kolosov V.G., Osmanov N.O. Fundamentals of innovation and innovation activity. St. Petersburg: Polytechnic., 2000; 328. (In Russ)
5. Podinovsky V.V., Nogin V.D. Pareto optimal solutions of multicriteria problems. M.: Fizmatlit, 2007;256 (In Russ)
6. Fedulov A.A., Fedulov Yu.G., Tsygichko V.N. Introduction to the theory of statistical unreliable solutions. M.: Statistician, 1972; 279. (In Russ)
7. Matveevsky S.F. Fundamentals of system design of aircraft complexes. M.: Mechanical Engineering, 1987; 240. (In Russ)
8. Ovchinnikova N.F., Pobol O.N., Statnikov I.N., Firsov G.I. Planning of simulation experiments in the study of multicriteria dynamical systems// In the book. The study of dynamic systems on a computer. M.: Nauka, 1982; 8-14. (In Russ)
9. Denisov S.I., Mednik A.I., Sergeev V.I., Statnikov I.N. PLP-search as a method of optimization design at the preliminary stage. In the book: Methods for solving problems of machine science on computers. Moscow: Nauka, 1979. (In Russ)
10. Artobolevsky I.I., Emelyanov S.V., Sergeev V.I., Statnikov R.B., Shestakov O.A. Interactive method for solving the problem of optimal machine design.-DAN USSR, 1977; 237(4). (In Russ)
11. Statnikov R.B., Feigin G.L. On the correction of parametric constraints in the problem of improving optimal solutions. In the book. The study of dynamic systems on a computer. M.: Nauka, 1982;50-59. (In Russ)
12. Guseynov R.V., Akhmedova M.R. The use of optimization methods for information analysis and processing. Herald of Daghestan State Technical University. Technical sciences. 2016; 41 (2):17-21. (In Russ)
13. Aristova E.M. Accounting for the interaction between objective functions and their aggregation in optimization problems. Autoref. diss. ... for the degree of Candidate of Technical Sciences. Voronezh, 2012. (In Russ)
14. Kini R.L., Raifa H. Decision-making under many criteria: preferences and substitutions.-M.: Radio and Communications, 1981;560. (In Russ)

15. Saati T. Decision-making. Method of hierarchy analysis. Moscow: Sovetskoe Radio, 1993; 278. (In Russ)
16. Misyurin S.Yu., Nelyubin A.P. Multicriteria optimization of parameters of mechanical systems on the example of a flat lifting mechanism. *Mechanical engineering and engineering education*, 2012; 4:41-48. (In Russ)
17. Djarratino D. Expert systems: principles of development and programming. 4th ed. Moscow: I.D. Williams LLC, 2007; 1152. (In Russ)
18. Gronostajski Z. The expert system supporting the assessment of the durability of forging tools. *International journal of advanced manufacturing technology*. 2016; 82 (9):1973–1991. (In Russ)
19. Sabzi H.Z. Developing an intelligent expert system for streamflow prediction, integrated in a dynamic decision support system for managing multiple reservoirs: a case study. *Expert systems with applications*. 2017; 82(3): 145–163.
20. Orazbayev B.B., Ospanov E.A., Orazbayeva K.N., Serimbetov B.A. Multi-criteria optimization in the management of chemical-technological system of benzene production with fuzzy information. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Bioresource engineering*. 2019; 330(7):182-194. (In Russ)
21. Volin Yu.M., Ostrovsky G.M. Multicriteria optimization of technological processes under uncertainty. *Automation and telemechanics*. 2007; 53(3):165-178. (In Russ)
22. Melkumova E.N. One of the approaches to solving the problem of multi-criteria optimization. *Bulletin of the VSU. Series: System Analysis and Information Technologies*. 2010; 2:39-42. (In Russ)
23. V.D. Nogin Linear convolution of criteria in multi-criteria optimization. *Artificial intelligence and decision-making*. 2014; 4:73-83. (In Russ)
24. Garipov V.R. Multicriteria optimization of control systems for complex objects by methods of evolutionary search : Abstract. dis. ... Candidate of Technical Sciences : 05.13.01 Krasnoyarsk, 1999; 23. (In Russ)

Сведения об авторах:

Гусейнов Расул Вагидович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации и безопасности движения; ragus05@mail.ru

Гусейнова Мадина Расуловна, специалист отдела международного сотрудничества и маркетинга; ragus05@mail.ru

Алиева Карина Абдурахмановна, аспирант кафедры организации и безопасности движения; ragus05@mail.ru

Information about the authors:

Rasul V. Guseynov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Organization and Traffic Safety; ragus05@mail.ru

Madina R. Guseynova, Specialist of the Department of International Cooperation and Marketing; ragus05@mail.ru

Karina A. Aliyeva, Postgraduate Student of the Department of Organization and Traffic Safety; ragus05@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 28.04.2023.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 19.05.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 19.05.2023.