

УДК: 629.764:004.94

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ КОМПЛЕКСОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

А.В. Журавлев, Г.А. Смелычакова, К.А. Аксенов (Екатеринбург),
Е.А. Рублева (Москва)

Введение

Отработка аппаратного и программного обеспечения систем управления комплексов вооружения, военной и специальной техники производится на испытательных стендах, которые являются уникальными в отрасли и проектируются различными способами, как правило, на основе опыта специалистов предприятий-изготовителей систем управления.

Для унификации подходов к созданию испытательных стендов и разработки системы поддержки принятия решений требуется анализ и выбор соответствующих методов и алгоритмов.

Анализ методов и алгоритмов систем поддержки принятия решений

В теории принятия решений можно выделить три группы методов: неформальные (эвристические), коллективные и количественные [1].

Неформальные (эвристические) методы основаны на интуиции лица принимающего решение (ЛПР), основанной на накопленном опыте и знаниях в конкретной предметной области. ЛПР выступает как интеллектуальная система поддержки принятия решения (СППР). Основу первой группы составляют субъективные суждения ЛПР. Достоинство этих методов – оперативность принятия решений, недостаток – отсутствие гарантии в надежности интуиции.

Коллективные решения принимаются на основе коллективного разума (участников группы, работников организации, членами комиссий и др.), что позволяет избегать грубых ошибок при их разработке. В эту группу методов входят такие, как метод «мозговой атаки», метод «Дельфы», экспертные оценки и др. Недостатком этой группы методов являются значительные затраты времени в процессе работы над подготовкой решения, необходимость наличия экспертной группы.

Количественные методы базируются на научном подходе: системном анализе, исследовании операций, теории игр, имитационном моделировании, вероятностных и статистических моделях, нечетких множествах, теории графов и т. д. В этой группе методов выбор оптимальных решений осуществляется путем предварительного сбора и обработки большого объема информации. Математические методы используются только при наличии достаточного объема информации, имеющей количественные характеристики. При отсутствии этих условий можно использовать метод экспертных оценок, который применяется для формулирования цели решения, оценки влияния совокупности обстоятельств, генерирования и оценки альтернатив. Несмотря на системность и логичность математическая теория во всей своей полноте используется очень ограничено, чаще как вспомогательное средство. Причины этого в трудности их применения и в неспособности математических методов учесть влияние человеческого фактора и того многообразия неопределенностей, с которыми сталкивается ЛПР.

В теории принятия решений наиболее распространены следующие типы моделей:

- теоретические модели, основывающиеся на теории (вероятностные, теоретико-игровые, модели исследования операций и другие);
- словесные (вербальные) модели типа сценария развития ситуаций;

– схематические модели типа «черный ящик» или «сетевая» модель, они составляют часто основу других моделей и учитывают только входные и выходные данные об объекте без рассмотрения внутреннего содержания;

– математические (алгоритмические) модели, которые в настоящее время являются основой для компьютерного моделирования и с помощью которых могут быть воплощены модели теоретические и вербальные.

Моделирование процесса принятия решения придает ему качественно новый уровень и обеспечивает внедрение компьютерных технологий в практику принятия решений. Применение моделей процесса принятия решений позволяет ЛПР проверить (подтвердить или опровергнуть) интуитивные соображения при принятии решений, обеспечить системность, непротиворечивость, адекватность и оптимальность решений, а также позволяет ЛПР более полно реализовать знания, опыт и интуицию.

Важно учитывать, что вместе с требованиями соответствия модели объекту управления, модель должна соответствовать профессиональным навыкам, системе ценностей и предпочтений ЛПР и обеспечивать определенный уровень доверия к результатам моделирования.

Классическая теория систем поддержки принятия решения включает в себя множество математических методов и алгоритмов, которые помогают принимать решения на основе анализа данных. Ключевыми методами являются:

- линейное программирование [2];
- методы анализа многокритериальных решений [3];
- теория игр [4];
- байесовские сети [5];
- динамическое программирование [6];
- методы оптимизации [7-10];
- сетевые методы планирования и управления [11, 12].

Линейное программирование – это метод оптимизации, используемый для максимизации или минимизации линейной функции при наличии линейных ограничений. Алгоритмы: симплекс-метод [13, 14], метод внутренней точки [15].

Преимущества метода:

- эффективен для крупных задач с большим числом переменных;
- находит глобально оптимальное решение.

Ограничения:

- применим только к задачам с линейными функциями;
- требует точного определения ограничений.

Методы анализа многокритериальных решений – это методы для принятия решений с учетом нескольких критериев. Популярными методами: метод анализа иерархий [16], метод анализа иерархического процесса [17], метод уступок [18], метод предпочтений по признакам [19, 20].

Преимущества:

- позволяют учитывать многокритериальные оценки;
- гибкость в выборе и весе критериев.

Ограничения:

- подвержены субъективности в задавании весов критериев;
- сложны в интерпретации для большого числа критериев.

Теория игр – математический подход к изучению стратегий взаимодействия между рациональными игроками. Алгоритмы: минимакс [21, 22], микроэкономические модели [23], равновесие Нэша [24].

Преимущества:

- полезны для моделирования конфликтных и кооперативных ситуаций;

– анализируют стратегическое поведение.

Ограничения:

- требуют предположений о рациональности игроков;
- сложны в случаях с большим числом участников и стратегий.

Байесовские сети – графические модели, представляющие вероятностные зависимости между набором переменных. Алгоритмы: жадный поиск [25], обратный поиск с максимизацией вероятности [26].

Преимущества:

- обрабатывают неопределенность и предоставляют визуальные представления зависимостей;
- позволяют обновлять вероятности на основе новых данных.

Ограничения:

- требуют больших вычислительных ресурсов;
- сложны для больших сетей.

Динамическое программирование – метод решения сложных задач путем разбиения их на более простые подзадачи. Алгоритмы: алгоритм Беллмана [27], метод обратной индукции [28].

Преимущества:

- эффективен для задач, которые могут быть разбиты на подзадачи;
- предоставляет точные решения.

Ограничения:

- может быть неэффективным для задач с большой размерностью состояния или действий;
- требует большой памяти.

Методы оптимизации – методы для поиска экстремумов функций. Популярные методы: градиентный спуск [29], метод Нелдера-Мида [30, 31], эволюционные алгоритмы [32].

Преимущества:

- широкий спектр применений;
- могут быть применены к нелинейным и многомерным задачам.

Ограничения:

- могут застревать в локальных экстремумах;
- зависят от начальных условий.

Сетевые методы планирования и управления – методы для планирования и управления проектами. Популярные методы: метод критического пути [33], метод анализа и оценки программ [34].

Преимущества:

- поддерживают планирование и мониторинг проектов;
- позволяют визуализировать проектные зависимости.

Ограничения:

- требуют точных оценок времени и ресурсов;
- могут быть сложны для крупных проектов.

Анализ методов и алгоритмов систем поддержки принятия решений при создании испытательных стендов

В работе Переведенцева Д.А. [35] рассматривается задача создания системы поддержки принятия решений при реализации наукоемких проектов сложных технических систем. Предложен подход к переходу от содержательной модели описания проекта к концептуальной модели, что позволяет облегчить процесс сравнения и выбора проекта сложной технической системы. В предложенном решении используется как классический аппарат теории принятия решений в совокупности с инструментами

нечеткой логики, также продемонстрирована возможность применения графов для описания и решения задач в данной предметной области.

Преимуществами предложенного метода является формализация подхода к выбору проектов сложных систем, перевод параметров проекта в качественные критерии оценки, что упрощает процесс сравнения и принятия решений многокритериальной задачи выбора реализуемых проектов.

В то же время предложенный подход содержит ряд недостатков, а именно:

- большой объем задействования экспертов разных областей для формирования связей содержательной модели (параметров системы) и концептуальной модели (критерии оценки) для каждого проекта;
- упрощение связей влияния входных параметров на критерии оценки (в силу рассмотрения задачи в общем виде);
- выбор основного критерия (метод главного критерия) с использованием остальных в качестве ограничений;
- отсутствие подходов для оценки параметров проектов (данный вопрос в работе не рассматривается).

В работе Разумова Д.А. [36] рассматривается задача разработки многокритериальной оценки проектов космических средств и систем. Предложен подход по моделированию поведения экспертов при задании приоритетов оптимизации для заданных параметров системы, а далее для каждого набора приоритетов проводится методом линейной свертки расчет обобщенного показателя, выбор варианта осуществляется тот, которому в большем количестве наборов соответствовал максимальный обобщенный показатель. Также рассмотрены возможности задания коэффициентов линейной свертки в заданном диапазоне для показателей, которые имеют особое влияние или их связи понятны.

Преимуществами данного метода является возможность сравнения различных проектов (вариантов построения) по большому количеству показателей с учетом их влияния за счет метода линейной свертки, при этом рассматриваются варианты задания ЛПП ограничений и в алгоритме учтена необходимость наличия хотя бы одного проекта, в противном случае ограничения ЛПП предлагается расширить. Моделирование поведения экспертов при задании приоритетов позволяет снизить субъективный фактор и более полно рассмотреть задачу, а также локально задавать логические связи между параметрами, не исключая остальные из расчета.

Недостатками предложенного подхода для использования в задаче выбора структуры стенда является необходимость наличия значений параметров всех рассматриваемых вариантов для нормирования показателей, так как применяется метод компромиссных решений, при большом количестве параметров сложность выбора приоритетных для экспертов и отсутствие рекомендаций по их выбору (в связи с относительной широтой решаемой задачи без учета специфик проектов), при большом количестве параметров и большом количестве вариантов метод подразумевает использования большого количества вычислительных ресурсов, так как поиск выполняется методом сканирования (полным перебором) и не даются рекомендации по его сужению, отсутствие подходов для оценки параметров проектов (данный вопрос в работе не рассматривается).

В работе Рогачевского А.М. [37] рассматривается задача оптимизации характеристик стенда для испытаний комплексов бортового оборудования гражданских самолетов. Предложен подход по оценке структур стенда через вводимый критерий эффективности. Критерий эффективности базируется на трех показателях: суммарные затраты на создание стенда, полная вероятность «правильного» результата проверки испытуемого объекта и надежность функционирования стенда. Для всех вариантов

структур стенда рассчитывается критерий эффективности с учетом весов, заданных экспертами для показателей. Далее осуществляется выбор структуры стенда от состава взаимодействия комплексной вычислительной системы самолетовождения со штатным бортовым радиоэлектронным оборудованием (БРЭО) до варианта замены в структуре стенда штатного БРЭО на программно-аппаратные имитаторы.

Преимуществами данного метода является возможность обоснованного выбора структуры испытательного стенда, формирование рекомендаций для ЛППР по границам, в которых находится решение, получаемое по результатам анализа отдельных показателей, наличие методики расчета показателей, применяемых для оценки структур стенда, учет весовых коэффициентов при расчете, использование для нормирования подхода сравнения с базовой структурой, что позволяет сравнивать отдельно взятые конфигурации стенда без полного перебора вариантов и наглядно демонстрировать улучшение/ухудшение рассматриваемого показателя, возможность применения методики на этапе проектирования испытательного стенда.

К недостаткам данного метода можно отнести, во-первых, большой объем работы экспертов для задания исходных данных, используемых при расчете показателей и ориентация задаваемых исходных данных на программу испытаний, что позволяет применять метод в области авиации для рассматриваемых комплексных вычислительных систем самолетовождения, но усложняет его применение в других отраслях. Во-вторых, не параметризован испытуемый объект, что ограничивает сферу применения методики для рассматриваемых систем (типов самолетов). В-третьих, в предложенном подходе в явном виде не представлены временные характеристики проведения испытаний и не рассматривается вопрос комплексной автоматизации проведения испытаний за счет сокращения количества ручных операций при проведении испытаний.

Рассмотренные существующие методы и подходы позволяют создавать системы поддержки принятия решений по выбору оптимальной структуры испытательного стенда систем управления изделиями ракетно-космической техники, но обладают существенными недостатками. В числе недостатков: отсутствие возможности описания испытуемого объекта в формализованном виде для применения методики при построении стендов различных систем управления, а также отсутствие в явном виде рассмотрения времени проведения испытаний на стенде и подходов по учету комплексной автоматизации проведения испытаний, необходимость задания большого объема исходных данных, требуемых от экспертов. Для устранения указанных недостатков требуется разработка математических моделей испытательных стендов и алгоритмов поддержки принятия решений. Сравнение методов выбора структуры испытательного стенда приведено в таблице 1.

Разработка метода оценки эффективности испытательного стенда

Для принятия решения о выборе наилучшего варианта конфигурации испытательного стенда разработан метод оценки эффективности испытательного стенда, основанный на сравнении параметров типового стенда и оптимизированного, использующего различные способы и технологии оптимизации процесса отработки аппаратуры и программ. Предложенный метод позволяет на всех этапах жизненного цикла испытательного стенда (от проектирования до штатной эксплуатации) оценить целесообразность и возможность применения различных средств, способов и технологий оптимизации процесса отработки [38, 39].

Основой метода оценки эффективности испытательного стенда являются модели типового [40] и оптимизированного испытательных стендов [41]. Общая структура метода представлена на рисунке 1.

Таблица 1 – Сравнение методов выбора структуры испытательного стенда

Критерии	Метод перехода к концептуальной модели (Переведенцев Д.А.)	Метод моделирования поведения экспертов (Разумов Д.А.)	Метод оценки эффективности стенда по трем показателям (Рогачевский А.М.)
Применение на этапе работ (опытно-конструкторские работы, серийное изготовление)	Опытно-конструкторские работы, серийное изготовление	Опытно-конструкторские работы, серийное изготовление	Опытно-конструкторские работы, серийное изготовление
Учет требований качества к объекту контроля	–	–	+
Возможность применения на стадии ТЗ на СУ	–	–	+
Возможность применения при модернизации стенда	+	+	+
Объем задействования экспертов	очень большой	небольшой	большой
Отсутствие необходимости наличия значений показателей для всех рассматриваемых вариантов	+	–	+
Поддержка нелинейных зависимостей входных и выходных параметров	–	x	+
Расчет показателей испытательного стенда	–	–	+
Описание объекта контроля в формализованном виде для применения на стендах различных систем управления	–	–	–
Расчет времени проведения одного испытания на стенде	–	–	–
Расчет сроков запуска испытательного стенда	–	–	–
Расчет площади технологического оборудования испытательного стенда	–	–	–
Учет средств комплексной автоматизации проведения испытаний на стенде	+	+	–
Наличие рекомендаций по созданию средств комплексной автоматизации проведения испытаний на стенде	–	–	–

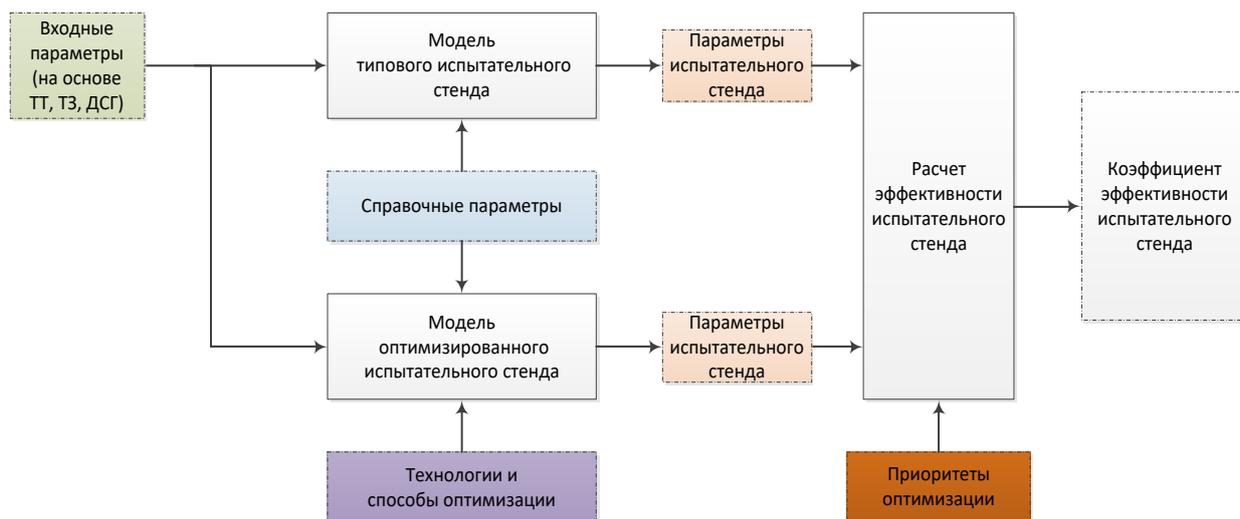


Рис. 1 – Общая структура метода оценки эффективности испытательного стенда

На основе входной информации, которая содержится в ТТ, ТЗ, ИД и организационных документах (ДСГ, планы работы и прочее) на разработку системы управления изделием РКТ, и справочной информации, полученной по результатам обработки статистических данных, связанных с опытом эксплуатации испытательных стендов, определяются значения параметров моделей типичного испытательного стенда и оптимизированного. Для модели оптимизированного стенда задается набор технологий и способов оптимизаций.

Выходные параметры моделей, которые являются максимально независимыми друг от друга:

- время подготовки и оценки результатов испытаний ($T_{\text{подгот_оц_исп}}$);
- коэффициент использования штатной аппаратуры (K_a);
- общая стоимость разработки испытательного стенда ($S_{\text{поз_разраб}}$);
- стоимость эксплуатации испытательного стенда ($S_{\text{поз_сопров}}$).

Для каждого независимого параметра задается приоритет оптимизации ($PR_l, l = 1 \dots 4, PR_l \geq 0$) исходя из стратегии оптимизации параметров испытательного стенда, обусловленной назначением, количеством штатных элементов, сложностью системы управления, планируемыми объемами испытаний на стенде. Например, при необходимости минимизации времени проведения испытаний необходимо задать высокий приоритет первым двум сравниваемым параметрам. При этом, если стоимость разработки и эксплуатации стенда не критична, можно понизить им приоритет или исключить из оценки эффективности задав приоритеты для данных параметров равными нулю.

После этого производится расчет эффективности стенда путем определения комплексного показателя эффективности ($K_{\text{эффект}}$) испытательного стенда в соответствии с методикой, представленной ниже.

Расчет эффективности испытательного стенда

Входной информацией для оценки эффективности испытательного стенда в соответствии со структурой метода (рисунок 1) является:

- набор максимально независимых параметров (МНП) типичного испытательного стенда (MNP_TIP);

– набор максимально независимых параметров оптимизированного испытательного стенда (MNP_OPT);

– набор приоритетов оптимизации параметров стенда (PR).

Набор максимально независимых параметров в общем виде обозначается MNP .

Максимально независимые параметры делятся на две категории:

– параметры, которые необходимо минимизировать ($MNP_{min}, MNP_TIP_{min}, MNP_OPT_{min}$);

– параметры, которые необходимо максимизировать ($MNP_{max}, MNP_TIP_{max}, MNP_OPT_{max}$).

Расчет коэффициента эффективности испытательного стенда ($K_{\text{эффект}}$) выполняется по формуле (1).

$$K_{\text{эффект}} = \sum_{i=1}^{N_{MNT_{min}}} \frac{MNP_TIP_{min_i}}{MNP_OPT_{min_i}} * K(MNP_{min_i}) + \sum_{j=1}^{N_{MNT_{max}}} \frac{MNP_OPT_{max_j}}{MNP_TIP_{max_j}} * K(MNP_{max_j}), \quad (1)$$

где $N_{MNT_{min}}$ – количество максимально независимых параметров, которые необходимо минимизировать;

$N_{MNT_{max}}$ – количество максимально независимых параметров, которые необходимо максимизировать;

$MNP_TIP_{min_i}, MNP_OPT_{min_i}$ – значение максимально независимого параметра, который необходимо минимизировать, для типового и оптимизированного испытательных стендов соответственно;

$MNP_TIP_{max_i}, MNP_OPT_{max_i}$ – значение максимально независимого параметра, который необходимо максимизировать, для типового и оптимизированного испытательных стендов соответственно;

$K(MNP_{min_i}), K(MNP_{max_i})$ – значение весовых коэффициентов для соответствующих максимально независимых параметров.

Весовые коэффициенты вычисляются как отношение приоритета одного МНП к сумме всех приоритетов по формуле (2).

$$K(MNP_x) = \frac{PR(MNP_x)}{\sum_{l=1}^{N_{PR}} PR_l}, \quad (2)$$

где $PR(MNP_x)$ – значение приоритета для одного максимально независимого параметра;

MNP_x – один максимально независимый параметр (принимает значения MNP_{min_i} или MNP_{max_j}).

Расчет коэффициента эффективности испытательного стенда в общем виде производится по формуле (3).

$$K_{\text{эффект}} = \sum_{i=1}^{N_{MNT_{min}}} \frac{MNP_TIP_{min_i}}{MNP_OPT_{min_i}} * \frac{PR(MNP_{min_i})}{\sum_{l=1}^{N_{PR}} PR_l} + \sum_{j=1}^{N_{MNT_{max}}} \frac{MNP_OPT_{max_j}}{MNP_TIP_{max_j}} * \frac{PR(MNP_{max_j})}{\sum_{l=1}^{N_{PR}} PR_l} \quad (3)$$

Комплексный показатель эффективности испытательного стенда может быть использован в качестве критерия сравнения вариантов испытательных стендов. Если коэффициент больше 1, то оптимизированный стенд эффективнее типового, если ниже, то типовой стенд лучше для заданных условий. При этом, чем выше комплексный

показатель эффективности, тем более эффективна выбранная конфигурация оптимизированного стенда.

Переход к относительной оценке в критерии сравнения вариантов целесообразно использовать ввиду того, что решение о выборе варианта испытательного стенда должно приниматься с учетом возможности использования технологии и способа оптимизации стенда (разработки, внедрения и сопровождения), задания приоритетов оптимизации параметров стенда. Переход к относительной оценке позволяет выбрать область предпочтения варианта при изменении параметров стенда.

Следует отметить, что вместо модели типового испытательного стенда при оценке эффективности испытательного стенда может быть использована конфигурация другого оптимизированного испытательного стенда, с которым производится сравнение.

Результаты внедрения

В результате проведенного анализа разработан метод оценки эффективности испытательного стенда, который является основой системы поддержки принятия решений при создании испытательных стендов систем управления НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова (Екатеринбург).

Полученные в работе результаты внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по дисциплине «Проверочно-пусковая аппаратура систем управления ракетными комплексами», изучаемой магистрантами по направлению «Бортовая и наземная аппаратура ракетных комплексов».

Заключение

Метод оценки эффективности испытательного стенда и математические модели типового и оптимизированного испытательных стендов позволяют проводить комплексное моделирование параметров стенда до его создания, осуществлять прогнозирование сроков отработки, определять необходимые ресурсы для создания и эксплуатации стенда. Система поддержки принятия решений на базе предложенного метода позволяет определять оптимальную структуру испытательного стенда для заданного объекта контроля (системы управления) с учетом приоритетов оптимизации заданных ЛПР.

Результаты, полученные от внедрения материалов работы на испытательных стендах систем управления изделиями РКТ, позволяют сделать вывод о возможности и целесообразности внедрения данных подходов на предприятиях как ракетно-космической отрасли, так и других отраслей машиностроения, в частности, при создании комплексов вооружения, военной и специальной техники.

Литература

1. **Кислов А.Г.** Системный анализ и принятие решений Курс лекций // УрГУ – Екатеринбург: 2007. – 115 с.
2. **Селина Е.Г. Кудашов В.Н.** Основы линейного программирования. СПб: Университет ИТМО, 2020.
3. **Воробьева М.В.** Анализ методов многокритериального принятия решений. Региональная и отраслевая экономика, 2022.
4. **Колобашкина Л.В.** Основы теории игр: учебное пособие. 5-е изд., электрон. – М.: Лаборатория знаний, 2021.
5. **Сироткин А.В. Николенко С.И. Тулупьев А.Л.** Основы теории байесовских сетей. Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2019.
6. **Окулов С.М.** Динамическое программирование. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017.
7. **Lei Han Chenjia Bai Lingxiao Wang.** Principled Exploration via Optimistic Bootstrapping and Backward Induction // Proceedings of Machine Learning Research 139 (2021).
8. **Adnan Haji Saad Abdulazeez.** Comparison of optimization techniques based on gradient descent algorithm: a review // PalArch s Journal of Archaeology of Egypt / Egyptology 18 (2021).
9. **Mohamed Abdel-Basset, Reda Mohamed и Seyedali Mirjalili.** A novel Whale Optimization Algorithm integrated with Nelder–Mead simplex for multi-objective optimization problems // Knowledge-Based Systems 212 (2021), с. 106619. issn: 0950-7051. doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106619>. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705120307486>.
10. **Onishi M. Takenaga S. Ozaki Y.** Practical initialization of the Nelder–Mead method for computationally expensive optimization problems // Optimization Letters 17 (2023).
11. **Jiang M. Tan K.C. Feng L.** Evolutionary Transfer Optimization - A New Frontier in Evolutionary Computation Research // IEEE Computational Intelligence Magazine 16 (2021).
12. **Mei Lu Xiaokang Han Wenzhou Yan.** Intelligent critical path computation algorithm utilising ant colony optimisation for complex project scheduling // Complexity 2021 (2021).
13. **Robert L. Smith Archis Ghate Christopher T. Ryan.** A Simplex method for countably infinite linear programs // SIAM Journal on Optimization 31 (2021).
14. **Makmun Imam Purwanto.** Implementation system of simplex method for optimization profit // International journal science and technology 2 (2023).
15. **Xin Liu Yongshuai Liu Jiaxin Ding.** IPO: Interior-Point policy optimization under constraints // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence 34 (2020).
16. **Моисеев С.И. Баркалов С.А. Карпович М.А.** Метод анализа иерархий: подход, основанный на теории латентных переменных // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» 22 (2022).
17. **Chernobrovchenko V. Krenicky T. Hrebennyk L.** Application of concepts of the analytic hierarchy process in decision-making // Management Systems in Production Engineering 30 (2022).
18. **Alexandre Beluco Fausto A. Canales Jakub Jurasz.** Assessing temporal complementarity between three variable energy sources through correlation and compromise programming // Energy 192 (2020).
19. **Chakraborty S.** TOPSIS and Modified TOPSIS: A comparative analysis // Decision Analytics Journal 2 (2022).

20. **Tuysuz F. Celikbilek Y.** An in-depth review of theory of the TOPSIS method: An experimental analysis // *Journal of Management Analytics* 7 (2020).
21. **Смирнова А.И. Кузнецова Н.С.** Актуализация междисциплинарных связей на примере усвоения принципа «минимакса» в теории игр // *Вестник Костромского государственного университета. Серия: Педагогика. Психология. Социокинетика.* 7 (2021).
22. **Самаров К.Л.** Математика. Учебно-методическое пособие по разделу «Элементы теории игр». ООО «Резольвента», 2009.
23. **Ахмадеев Д.Р. Кочкаров Д.Э.** Теория игр в микроэкономическом анализе и ее применение на практике. В: *Хроноэкономика* 5 (2020).
24. **Lacra Pavel.** Dissipativity Theory in game theory: on the role of dissipativity and passivity in nash equilibrium seeking // *IEEE Control Systems Magazine* 42 (2022).
25. **Mauricio D. Shiguihara P. Lopes A.D.A.** Dynamic Bayesian network modeling, learning, and inference: a survey // *IEEE Access* 9 (2021).
26. **Lim S. Chan A. Silva H.** Greedification operators for policy optimization: investigating forward and reverse KL divergences // *Journal of Machine Learning Research* 23 (2022).
27. **Stachurski J. Ma Q.** Dynamic programming deconstructed: transformations of the Bellman equation and computational efficiency // *Operations Research* 69 (2021).
28. **Lei Han Chenjia Bai Lingxiao Wang.** Principled exploration via optimistic bootstrapping and backward induction // *Proceedings of Machine Learning Research* 139 (2021).
29. **Adnan Haji Saad Abdulazeez.** Comparison of optimization techniques based on gradient descent algorithm: a review // *PalArch s Journal of archaeology of Egypt / egyptology* 18 (2021).
30. **Mohamed Abdel-Basset, Reda Mohamed и Seyedali Mirjalili.** A novel whale optimization algorithm integrated with Nelder–Mead simplex for multi-objective optimization problems // *Knowledge-Based Systems* 212 (2021), с. 106619. issn: 0950-7051. doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106619>. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705120307486>.
31. **Onishi M. Takenaga S. Ozaki Y.** Practical initialization of the Nelder–Mead method for computationally expensive optimization problems // *Optimization Letters* 17 (2023).
32. **Jiang M. Tan K.C. Feng L.** Evolutionary transfer optimization - a new frontier in evolutionary computation research // *IEEE Computational Intelligence Magazine* 16 (2021).
33. **Mei Lu Xiaokang Han Wenzhou Yan.** Intelligent critical path computation algorithm utilising ant colony optimisation for complex project scheduling // *Complexity* 2021 (2021).
34. **Achmad Fuad Bay Hamzah Abdul Ba'its Ika Arum Puspita.** Combination of Program Evaluation and Review Technique (PERT) and Critical Path Method (CPM) for project schedule development // *The International Journal of Integrated Engineering* 12 (2020).
35. **Переведенцев Д.А.** Разработка методики и алгоритмов поддержки принятия решений при реализации наукоемких проектов сложных технических систем. Диссертация. Кандидат технических наук. Ижевск, 2019.
36. **Разумов Д.А.** Разработка методики многокритериальной оценки проектов космических средств и систем.: диссертация к.т.н. // МАИ – М.: 2021. – 23 с.
37. **Рогачевский А.М.** Оптимизация характеристик стенда для испытаний комплексов бортового оборудования гражданских самолетов. Диссертация. Кандидат технических наук. Санкт-Петербург, 2004.
38. Методика оценки эффективности отработочной позиции. Технический отчет // ФГУП «НПО автоматики им. акад. Н.А. Семихатова», Екатеринбург, 2014, 10 с.
39. Апробация методики оценки эффективности отработочной позиции. Технический

- отчет // ФГУП «НПО автоматики им. акад. Н.А. Семихатова», Екатеринбург, 2014, 18 с.
40. **Журавлев А.В., Шашмури И.В., Петухов В.И.** Математическая модель типовой отработочной позиции аппаратуры системы управления летательных аппаратов // Материалы девятой межрегиональной отраслевой научно-технической конференции. – Екатеринбург: ОАО «ОКБ «Новатор» имени Л.В. Люльева», 2014, с. 136-138
41. **Журавлев А.В., Шашмури И.В.** Математическая модель «автоматизированной» отработочной позиции корабельных информационно-управляющих комплексов // Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих систем. Сборник докладов научно-технической конференции. – Москва: ОАО «Концерн «Моринсис-Агат», 2014. – 6 с.