

УДК 622.013.3 © К.Д. Кравец¹, О.Ю. Козлова², А.С. Оганесян¹, 2025UDC 622.013.3 © K.D. Kravets¹, O.Yu. Kozlova², A.S. Oganessian¹, 2025¹ НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия¹ National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS),² ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,
119454, г. Москва, Россия

Moscow, 119049, Russian Federation

✉ e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

² MIREA — Russian Technological University,
Moscow, 119454, Russian Federation

✉ e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

Концепция межсекторального моделирования функциональной структуры угольной шахты

The concept of intersectoral modeling of the functional structure of a coal mine

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-7-111-115>

В рамках проведенных исследований предлагается концепция межсекторального моделирования функциональной структуры угольной шахты с использованием метаэвристических алгоритмов PSO и GA – алгоритм PSO обладает функциями поиска и формирования локальных и глобальных решений с учетом процедуры обновления и последующей трансформации квазиупорядоченной структуры, алгоритм GA – наделен функциями идентификации и инициализации последующего поколения составляющих процедур оптимизации. После синтеза предпочтительных альтернатив на следующей ступени модели осуществляются выбор наилучшей путем выполнения многокритериальной оценки и принятие окончательного решения.

Ключевые слова: угольная шахта, технологическая система, синтез проектных решений, функция принадлежности, область Парето, метаэвристический алгоритм, нечеткий вывод.

Для цитирования: Кравец К.Д., Козлова О.Ю., Оганесян А.С. Концепция межсекторального моделирования функциональной структуры угольной шахты // Уголь. 2025;(7):111-115. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-7-111-115.

Abstract

Within the framework of the conducted research, the concept of intersectoral modeling of the functional structure of a coal mine using the PSO and GA metaheuristic algorithms is proposed. The PSO algorithm has the functions of searching and forming local and global solutions, taking into account the procedure for updating and subsequent transformation of a quasi-ordered structure, the GA algorithm is endowed with the functions of identifying and initializing the next generation of optimization procedures. After synthesizing preferred alternatives, the next stage of the model selects the best one by performing a multi-criteria assessment and making a final decision.

Keywords

Coal mine, technological system, synthesis of design solutions, membership function, Pareto domain, metaheuristic algorithm, fuzzy inference.

For citation

Kravets K.D., Kozlova O.Yu., Oganessian A.S. The concept of intersectoral modeling of the functional structure of a coal mine. *Ugol'*. 2025;(5):111-115. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-7-111-115.

КРАВЕЦ К.Д.

Аспирант кафедры

«Геотехнологии освоения недр»

Горного института НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия,

e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

КОЗЛОВА О.Ю.

Канд. техн. наук, доцент

кафедры «Высшая математика – 3»

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский
технологический университет»,
119454, г. Москва, Россия,

e-mail: kozlova_ou@mail.ru

ОГАНЕСЯН А.С.

Профессор НИТУ МИСИС,

119049, г. Москва, Россия,

e-mail: oganessian.as@misis.ru

ВВЕДЕНИЕ

Неоднократно многочисленными исследованиями отмечалось, что ряд классических алгоритмов базового наполнения модельных представлений с использованием метода наименьших квадратов и градиентного спуска в

рамках решения задач синтеза проектных решений имеют довольно существенные недостатки, обусловленные наличием ряда проблематичных составляющих в области (пространстве) компромиссов Парето, что связано с поиском именно глобального рационального решения,

а зачастую они просто нереализуемы с учетом масштабности и сложности решаемых задач либо приводят к очень искаженным результатам [1, 2, 3, 4]. Эти проблематичные составляющие не позволяют правомерно интерпретировать полученные производственные правила, что, в конечном итоге, приводит к довольно значительной вычислительной сложности процедуры вывода решения. Точность, объективность и надежность выстроенной системы оптимизации сложных решений входят в явное противоречие с количеством производственных правил, – исходя из этого в методологическом и методическом плане процедуры формирования оптимизационных систем должны предусматривать механизмы, обеспечивающие должный компромисс между сложностью, иерархичностью, масштабностью, точностью и объективностью.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Процесс принятия основных проектных решений и схематизация поставленных задач формализуются с использованием терминов критериального языка и ввиду большой сложности и размерности требуют проведения определенной последовательности, что реализуется в виде концепции и обобщенного алгоритма.

Блок-схема алгоритма концептуального системного подхода к процедуре синтеза в рамках метода многоцелевой оптимизации представлена на рис. 1.

МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ ANFIS-PSO-GA

В рамках решения этой проблемы удовлетворительные результаты дают метаэвристические алгоритмы PSO и GA – алгоритм PSO обладает функциями поиска и формирования локальных и глобальных решений с учетом процедуры обновления и последующей трансформации квазиупорядоченной структуры, алгоритм GA – наделен функциями идентификации и инициализации последующего

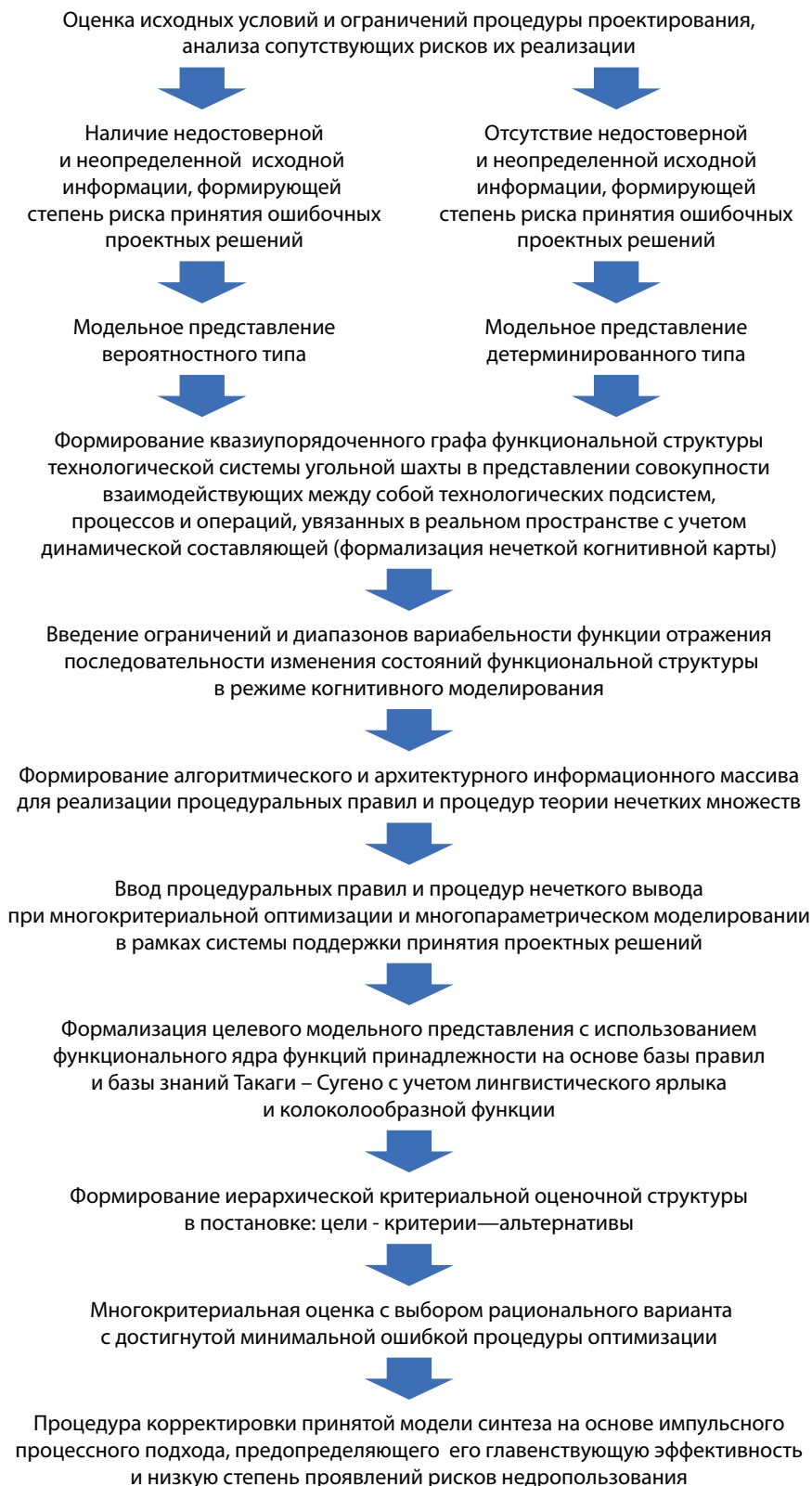


Рис. 1. Системное представление структуры методологии
 Fig. 1. System representation of the methodology structure

поколения составляющих процедур оптимизации [5, 6]. Соотношение их использования predeterminedается требуемой детализацией соответствующих под-итераций. Архитектура и алгоритмическое наполнение ANFIS-PSO-GA представлены на рис. 2.

Настройка модели требует извлечения и преобразования из модели ANFIS следственных и исходных параметров и характеристик и их совместимого использования и адаптации в гибридном пространстве PSO-GA. Затем создается пространство компромиссов (область Парето) с соответствующими кортежами параметров и оценивается их эффективность. Оптимизация эффективности производится с учетом обновления параметров и количества необходимых итераций, пока не будет синтезирован рациональный вариант с достигнутой минимальной ошибкой процедуры оптимизации.

Горно-геологические и горнотехнические параметры и характеристики поступают в виде лингвистических переменных на вход каждой подсистемы принятия проектных решений и обоснования их параметров. Далее по каждому параметру и характеристике формируется базовое термножество (присвоение нечетких переменных – значений лингвистических переменных), причем каждый из термов идентифицируется своей функцией принадлежности.

На выходе каждой подсистемы присваиваются их основные характеристики, разделенные по соответствующим классификационным признакам, которые также носят лингвистический характер.

После выделения основных параметров входных и выходных лингвистических переменных проектных решений технологических систем угольных шахт необходимо выбрать метод (решающее правило) вынесения логических заключений. В настоящее время в основном используется прямой метод вынесения заключений в нечетких системах (Модус поненс), который и реализуется в настоящей работе. Данный метод реализуется посредством трансформирования отдельных участков проблемной области в конкретные значения функций принадлежности условий нечетких множеств. После этого трансформирования по одному из правил нечеткой композиции находятся значения функций принадлежности заключений правых частей по каждому из правил нечетких множеств.

Выделенные значения функций принадлежности либо являются необходимым результатом вывода, либо могут быть использованы в качестве дополнительных условий в рассматриваемой базе правил нечетких множеств.

Для конкретизации метода вывода логических заключений реализуется алгоритм вывода. Алгоритм вывода работает на основе правил нечетких множеств, условия и заключения в которых базируются на нечетких лингвистических переменных.

Основными этапами алгоритма нечеткого вывода являются:

- формирование базы правил нечеткого вывода;

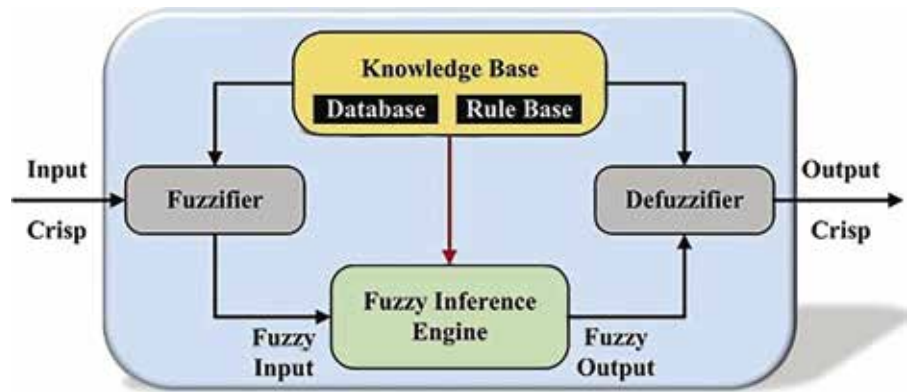


Рис. 2. Процедура и последовательность нечеткого вывода (FIS)

Fig. 2. Procedure and sequence of fuzzy inference (FIS)

- фазификация (введение нечеткости) входных переменных;
- агрегирование условий в нечетких правилах продукций;
- активизация или композиция заключений в нечетких правилах продукций;
- аккумулярование заключений нечетких правил продукций;
- введение четкости (дефазификация).

В общем случае механизм логического вывода включает четыре этапа: введение нечеткости (фазификация), нечеткий вывод, композиция и приведение к четкости, или дефазификация. Особую значимость в приведенной системе нечеткого логического вывода имеют составляющие фазификатор и дефазификатор.

Дефазификатор трансформирует нечеткое множество в полностью детерминированное точечное решение y . Нечеткое множество представляет зависимость $\mu(y) = \mu_{A \rightarrow B}(y)$ как функцию от выходной переменной y . Преобразование этого множества в единственное точечное решение возможно многими способами. Наиболее известны среди них:

- дефазификация относительно центра области (англ.: center of area):

$$y_c = \frac{\int \mu(y) y dy}{\int \mu(y) dy}, \quad (1)$$

- либо в дискретной форме:

$$y_c = \frac{\sum \mu(y_i) y_i}{\sum \mu(y_i)}, \quad (2)$$

- дефазификация относительно среднего центра (англ.: center average):

$$y_c = \frac{\sum \mu(y_{ci}) y_{ci}}{\sum \mu(y_{ci})}, \quad (3)$$

где: y_{ci} обозначает центр i -го нечеткого правила; $\mu(y_{ci})$ – значение функции принадлежности, соответствующей этому правилу;

- дефаззификация относительно среднего максимума (англ.: mean of maxima):

$$y_M = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m}, \quad (4)$$

где: m – обозначает количество точек переменной y , в которых $\mu(y_{ci})$ достигает максимального значения (заметим, что для нормальной нечеткой переменной значение максимума $\mu(y_{ci}) = 1$), если функция $\mu(y)$ имеет максимальное значение только в одной точке y_{\max} , то $y_M = y_{\max}$; если $\mu(y)$ достигает своих максимальных значений на отрезке от y_l до y_p , то $y_M = 0,5(y_l + y_p)$;

- дефаззификация в форме выбора минимального из максимальных значений y :

y_δ – наименьшее значение y , для которого $\{\mu(y) = \max\}$;

- дефаззификация в форме выбора максимального из максимальных значений y :

y_l – наибольшее значение y , для которого $\{\mu(y) = \max\}$.

На практике чаще всего применяется дефаззификация относительно среднего центра (рис. 3).

Выбор конкретных вариантов совокупности параметров по каждому из этапов в свою очередь предопределяет следующий алгоритм, который в полном объеме реализует нечеткий вывод в системах правил нечетких множеств.

Существует несколько стандартных алгоритмов нечеткого вывода – в развернутом виде превалирующие модели Мамдани-Заде и Такаги-Сугено-Канга.

Выходные характеристики каждой из декомпозированных подсистем будут определяться по вышеописанному алгоритму. Итог нечеткого вывода каждой подсистемы после приведения к четкости представляется в числовом варианте. Из числового значения, которое точно определено на отрезке принадлежности, выводится четкое линг-

вистическое значение. После этого полученные результаты нечеткого вывода проходят этап синтеза. Выбор наилучшей альтернативы предлагается осуществлять с использованием метода попарных сравнений. Общая концепция реализации данного метода выглядит следующим образом.

При нечетком выводе по иерархической базе знаний процедуры результат логического вывода в виде нечеткого множества напрямую передается в машину нечеткого вывода следующего уровня иерархии. Поэтому для промежуточных переменных в иерархических нечетких базах знаний достаточно задать только терм-множества без описания функций принадлежности.

На основе предложенной декомпозированной модели сообразно стадиям освоения угольного месторождения применяемому горношахтному оборудованию и характеристикам поверхностного комплекса технологической системы необходимо сформировать первую ступень многоуровневой нечеткой модели в виде входных данных.

Для каждой подсистемы создается отдельная нечеткая модель, в которой основными входными данными будут являться характеристики горно-геологических условий. Ядро каждой подсистемы будет содержать базу правил нечетких продукций, базирующихся на существующих областях применения, нормах и правилах. Выходы нечеткой модели представляются характеристиками, непосредственно относящимися к подсистеме. На выходе подсистемы нечеткого вывода при заданных горно-геологических условиях формируются несколько различных вариантов. Например, могут сформироваться три различных варианта схемы вскрытия, два различных варианта схемы подготовки, а система разработки будет представлена лишь одним вариантом.

Синтез полученных вариантов вывода подсистем будет производиться на основе принципов совместности, которые были изложены выше. Таким образом, будет сформировано множество нескольких предпочтительных вариантов технологической системы угольной шахты – множество Эджворта – Парето [7].

После синтеза предпочтительных альтернатив на следующей ступени модели осуществляются выбор наилучшей путем выполнения многокритериальной оценки и принятие окончательного решения. При этом полагается, что число оцениваемых альтернатив будет небольшим. Для оценки такого рода будет использоваться метод попарных сравнений (метод анализа иерархий), предложенный Томасом Саати [8].

Реализация метода попарных сравнений осуществляется поэтапно. Первый этап заключается в структуризации задачи в виде иерархической структуры с несколькими уровнями: цели – критерии-альтернативы. На втором этапе выполняются по-

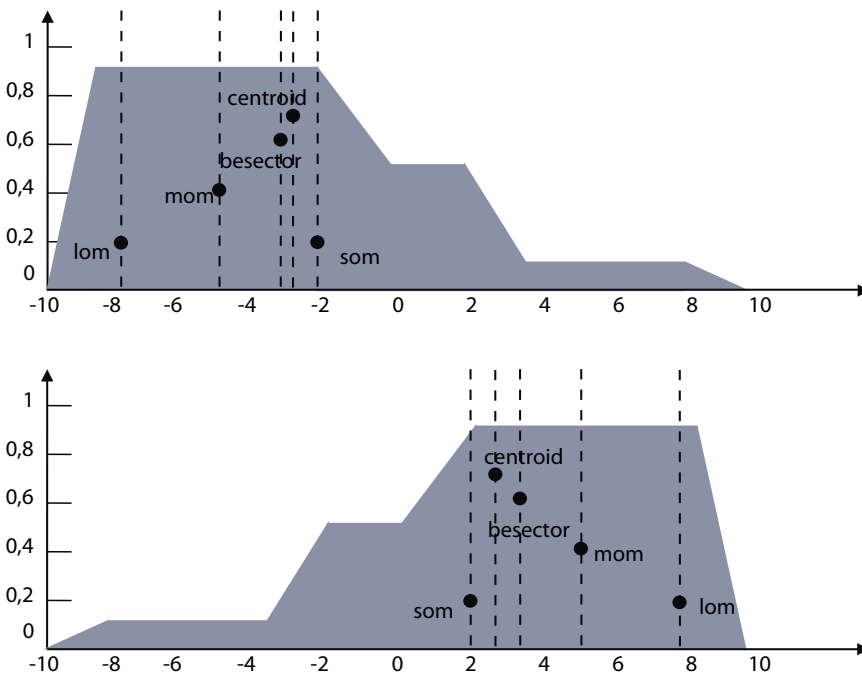


Рис. 3. Дефаззификация различными методами

Fig. 3. Defuzzification by various methods

парные сравнения элементов каждого уровня. Результаты сравнений переводятся в числа. На следующем этапе вычисляются коэффициенты важности для элементов каждого уровня. При этом проверяется согласованность суждений эксперта.

На заключительном этапе выполняется подсчет количественного индикатора качества каждой из альтернатив и определяется лучшая альтернатива. Итогом применения данного метода должно стать определение лучшего из ряда предпочтительных вариантов.

ВЫВОДЫ

Для моделирования многоуровневых связей «входы – выход» процедуры синтеза проектных решений технологических систем угольных шахт целесообразно использовать иерархические системы нечеткого вывода с иерархической структурой баз знаний. В таких системах выход одной базы знаний подается на вход другой, более высокого уровня иерархии. В иерархических базах знаний хранится не более 7 ± 2 понятий-признаков. Следовательно, количество входных переменных в одной базе знаний не должно превышать это число. Опыт создания нечетких экспертных систем свидетельствует, что хорошие базы знаний получаются, когда число входов не превышает пяти. Поэтому при большем числе входных переменных необходимо их иерархически классифицировать с учетом приведенных выше рекомендаций. Применение иерархических нечетких баз знаний позволяет преодолеть «проклятие размерности». При большом количестве входов эксперту трудно описать нечеткими правилами причинно-следственные связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование многокритериальных моделей синтеза технологических схем угольных шахт на основе сравнительного многоатрибутного ранжирования и оптимизации должно предусматривать наличие процесса вывода прямым методом в системах нечетких продукций и в общем случае должно иметь рекурсивный характер.

Процесс может быть остановлен либо в случае отсутствия активных нечетких правил, либо в случае получения функции принадлежности заключения, которое является целевым в контексте решения исходной проблемы. В этом случае функция принадлежности заключения характеризует конец процесса вывода в системах нечетких множеств и заключительное решение поставленных задач.

Список литературы • References

1. Ветчинкина Д.С. Метод градиентного спуска при идентификации линейных систем / История, современное состояние и перспективы инновационного развития науки. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак, 2021. С. 38-39
2. Насфутдинова Д.Р. Разработка программного обеспечения для решения оптимизационных задач в среде MATLAB / Сборник тезисов конференции: Энергия-2022. 2022. С. 54.
3. Толстых В.Н. О развитии методов классификации и регрессии / Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Сборник трудов конференции. 2023. С. 113-117.
4. Беляев В.В., Агафонов В.В. Синтез высокопроизводительных и прогрессивных технологических систем угольных шахт. Уголь. 2020. № 11. С. 36-42. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-36-42. Belyaev V.V., Agafonov V.V. Synthesis of high-performance and advanced technological systems for coal mines. *Ugol*. 2020;(11):36-42. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-36-42.
5. Клевец Н.И. Метаэвристические алгоритмы оптимизации / Сборник трудов конференции: Актуальные проблемы и перспективы развития экономики. Симферополь – Гурзуф, 12-14 октября 2023 года. С. 218.
6. Влад А.И. Анализ метаэвристических методов идентификации параметров для агентных моделей / XIV Всероссийское совещание по проблемам управления. Москва, 17-20 июня 2024 года. 2024. Т. 17. С. 20.
7. Басков О.В., Ногин В.Д. Нечеткие множества второго порядка и их применение в принятии решений. Приложения // Искусственный интеллект и принятие решений. 2021. №. 2. С. 21-34. Baskov O.V., Nogin V.D. Fuzzy sets of the second order and their application in decision-making. *Applications. Iskustvennyj intellekt i prinyatie reshenij*. 2021;(2):21-34.
8. Саати Т.Л. Принятие решений с помощью метода анализа иерархий // Методы менеджмента качества. 2022. Saati T.L. Decision-making using the hierarchy analysis method. *Metody menedzhmenta i kachestva*. 2022.

Authors Information

Kravets K.D. – Postgraduate Student of the Department of Geotechnologies of Subsurface Development of Mining Institute of National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

Kozlova O.Yu. – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: kozlova@mail.ru

Oganesyan A.S. – Professor of the National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: oganesyan.as@misis.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.05.2025

Поступила после рецензирования: 17.06.2025

Принята к публикации: 27.06.2025

Paper info

Received May 10, 2025

Reviewed June 17, 2025

Accepted June 27, 2025