

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.3:519.85

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-11-16



Сравнительный анализ методов решений оптимизационных задач для сельскохозяйственного машиностроения

Валерия Александровна Зубина[✉], канд. техн. наук, старший научный сотрудник

lera_zubina@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-6657-1899>

Теймур Захидович Годжаев, заведующий сектором

tgodzhaev95@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4496-0711>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Создание интеллектуальных транспортно-технических средств требует совершенствования методического и программного обеспечения многокритериальной оптимизации функциональных свойств инновационных мобильных энергетических средств. Правильный выбор метода оптимизации необходим для построения достоверной математической модели. Анализ методов оптимизации в сельхозмашиностроении и агроинженерии показал возможность применения однокритериальных методов при совершенствовании простых конструкторских параметров одноцелевых задач (разработка деталей и технико-технологических характеристик отдельных объектов). Методы многокритериальной оптимизации применимы для многоцелевых задач с большим количеством функциональных и критериальных ограничений и варьируемых параметров, где каждый параметр не уступает по значимости и важности друг другу (управление сельскохозяйственным предприятием, проектирование мобильных энергосредств, комбайнов и других сельскохозяйственных машин). Методы векторной оптимизации применимы для решения многокритериальных задач с множеством возможных (допустимых) решений (проектирование элементов узлов, агрегатов машин и оборудования сельскохозяйственного производства). Анализ существующих программных средств для решения оптимизационных задач показал необходимость разработки программных пакетов, позволяющих учитывать одновременно до 20 критериальных и функциональных ограничений, до 50 варьируемых параметров и более трех одновременно важных целевых функций, где каждый параметр не уступает по значимости и важности друг другу.

Ключевые слова: создание интеллектуальных транспортно-технических средств, методы оптимизации для сельхозмашиностроения, методы однокритериальной оптимизации, методы многокритериальной оптимизации, программные пакеты для решения оптимизационных задач

Формат цитирования: Зубина В.А., Годжаев Т.З. Сравнительный анализ методов решений оптимизационных задач для сельскохозяйственного машиностроения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 1. С. 11-16. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-11-16.

© Зубина В.А., Годжаев Т.З., 2022

ORIGINAL PAPER

Comparative analysis of methods for solving optimization problems in agricultural engineering

Valeriya A. Zubina[✉], CSc (Eng), Junior Research Engineer

lera_zubina@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-6657-1899>

Teymur Z. Godzhayev, Divisional Head

tgodzhaev95@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4496-0711>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

Abstract. To design intelligent transport and technical means, it is necessary to improve the methodological provisions and software for multi-criteria optimization of the functional properties of innovative mobile energy means. The right choice of optimization methods is necessary to design a reliable mathematical model. A comparative analysis of methods for optimizing problem solving for agricultural engineering showed the applicability of single-criterion methods in optimizing simple design parameters of single-purpose problems (development of parts, technical and technological characteristics of individual objects). Multicriteria optimization methods are applicable to solving problems with the definition of several objective functions with a large number of functional and criterion constraints, as well as variable parameters, where each parameter is not inferior in importance and relevance to each other (agricultural enterprise management, design of mobile power vehicles, combines and other agricultural machines). Vector optimization methods are applicable for solving a multicriteria optimization problem with a set of possible (permissible) solutions (designing

elements of units, machine units and equipment for agricultural production). The authors have analyzed the existing software tools for solving optimization problems. They have found it necessary to develop software tools taking into account simultaneously up to 20 criterial and functional constraints, up to 50 variable parameters and more than three equally important objective functions, where each parameter has no precedence over the others.

Keywords: designing intelligent transport and technical means, optimization methods for agricultural engineering, single-criteria optimization methods, multi-criteria optimization methods, software packages for solving optimization problems

For citation: Zubina V.A., Godzhayev T.Z. Comparative analysis of methods for solving optimization problems in agricultural engineering. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(1): 11-16. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-11-16>.

Введение. Создание интеллектуальных транспортно-технических средств предполагает применение роботизированных и автоматизированных агрегатов и узлов, адаптивных систем, автоматизированных приводов и т.д. при оптимальной концептуальной кинематической и компоновочной схемах с целью обеспечения их высокой функциональной и эксплуатационной эффективности [1-2].

Решение конкретных технических задач, основывающихся на математических результатах и численных методах теории оптимизации, подразумевает выполнение следующих действий: установление границ подлежащей оптимизации инженерной системы; определение количественно критериев, используемых для анализа вариантов, и выявление лучшего из них; выбор системных переменных, используемых для определения характеристик и идентификации вариантов; построение модели, отражающей взаимосвязи между переменными. Постановка задачи основывается на четком представлении преимуществ, недостатков и специфических особенностей различных методов теории оптимизации [1-4].

Цель исследований: провести сравнительный анализ методов оптимизации для сельхозмашиностроения с целью совершенствования методического и программного обеспечения многокритериальной оптимизации функциональных свойств инновационных мобильных энергетических средств и выявить наиболее предпочтительный метод для решения задач сельхозмашиностроения и агроинженерии.

Материалы и методы. Проведен анализ научных публикаций, научных статей и других источников информации по разработке НИОКР для создания интеллектуальных транспортно-технических средств и совершенствования методического и программного обеспечения многокритериальной оптимизации функциональных свойств инновационных мобильных энергетических средств. Использованы методы научного обобщения и статистической обработки информационных и аналитических материалов из отечественных и зарубежных источников.

Результаты и их обсуждение. Деятельность конструкторов, технологов и экономистов, а также проектных и производственных коллективов связана с выбором решений, позволяющих получить наиболее оптимальные результаты: минимум затрат денежных и материальных средств на создание и эксплуатацию объекта (технологического процесса, сельскохозяйственной или электрической машины, машинно-тракторного агрегата);

достижение максимальной прибыли на хозяйственных предприятиях, максимальной производительности и минимальной материалоемкости сельскохозяйственных машин, минимального расхода топлива, электроэнергии и т.д. В каждой конкретной ситуации необходимо считаться с реальными условиями, налагаемыми на решение данной задачи. Для достижения максимальной прибыли предприятия следует учитывать реальные затраты на сырье и оборудование, себестоимость продукции, рост объемов ее реализации и ряд других факторов. При минимизации расхода топлива сельскохозяйственными машинами необходимо учитывать агротехнические требования к рабочей скорости, ширину захвата, условия движения (сопротивление почвы, буксование и др.)¹.

Задачи оптимизации агроинженерных разработок связаны с проектированием технических устройств и технологических процессов, распределением ограниченных ресурсов и планированием работы предприятий. Агрегаты, устройства и процессы являются объектами оптимизации, вид математической модели которых определяет метод или методы, используемые для дальнейшего построения оптимального решения.

Для достижения высокой эффективности оптимизационных методов необходимо привлечение положений математического анализа, теории матрицы и элементов дифференциального исчисления².

Формирование математической модели реальной задачи и последующее ее решение – достаточно сложный процесс, включающий в себя несколько этапов: изучение объекта; описательное моделирование; математическое моделирование; выбор или создание метода решения; выбор или написание программы для решения задачи с использованием ЭВМ; решение задачи с использованием компьютера; анализ полученного решения. Степень точности математической модели определяет ее приближение к реальному объекту.

Решение оптимизационных задач можно проводить с помощью однокритериальной или многокритериальной оптимизации. Согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93 для оценивания характеристик качества любого программного обеспечения или его подэтапов и математических

¹ Лачуга Ю.Ф., Самсонов В.А. Прикладная математика: учебник и практикум для вузов. 2-е изд., доп. М.: Юрайт, 2019. 304 с.

² Сухарев А.Г., Тихонов А.В., Федоров В.В. Численные методы оптимизации: Учебник и практикум для академического бакалавриата. 3-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2019. 367 с.

моделей проводят анализ и проверку метрик, определяют требования качества и их спецификацию, уровень ранжирования на основе технической информации и критерии оценки³. Но данный ГОСТ не позволяет дать количественную оценку и выделить преимущества всех оптимизационных методов.

При создании новой техники в рамках задач однокритериальной оптимизации наибольший интерес представляют методы, относящиеся к группе оптимального планирования при ограниченных ресурсах. Множество задач может быть сведено к постановке задачи математического программирования (составление плана либо программы действий). Задача оптимизации сводится к нахождению значений переменных, обращающих значение целевой функции Z в максимум либо в минимум^{1,4,5}:

$$Z = f(x_1, \dots, x_n) \rightarrow \min(\max) \tag{1}$$

при условиях:

$$\begin{aligned} g_i(x_1, \dots, x_n) &\leq b_i, \quad i = 1; \\ g_i(x_1, \dots, x_n) &\geq b_i, \quad i = 1, \end{aligned} \tag{2}$$

где g_i – функция; b_i – константы.

При синтезе какой-либо системы целевая функция Z может быть критерием оптимальности, достигнув экстремального значения в одной или нескольких точках U , которые требуется отыскать. Обычно в постановке задачи выбора оптимального решения известен вид функций

Z, g_i и константы b_i , но специально оговариваются ограничения, выраженные в требованиях к неотрицательности либо к целочисленности переменных. Условие задачи математического программирования имеет вид:

$$X \in U \cdot \max(\min)\{Z = f(x)\}, \tag{3}$$

где U – область определения задачи.

В задачах линейного программирования целевая функция Z и все функции g_i линейны, в нелинейном программировании допустимое множество решений может быть невыпуклым, несвязанным, то есть иметь довольно сложную структуру.

Задачи нелинейной оптимизации подразделяются на задачи безусловной оптимизации, когда поиск оптимума целевой функции осуществляется без всяких дополнительных условий ($F = f(x) \rightarrow \min(\max)$), и задачи условной оптимизации, записываемой в общем случае как

$$\left\{ \begin{aligned} F &= \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \rightarrow \min(\max) \\ g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq b_1 \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq b_2 \\ &\dots\dots\dots \\ g_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq b_n \\ d_2 &\leq x_2 \leq D_j, \quad j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right.$$

Основные методы однокритериальной оптимизации представлены на рисунке 1.

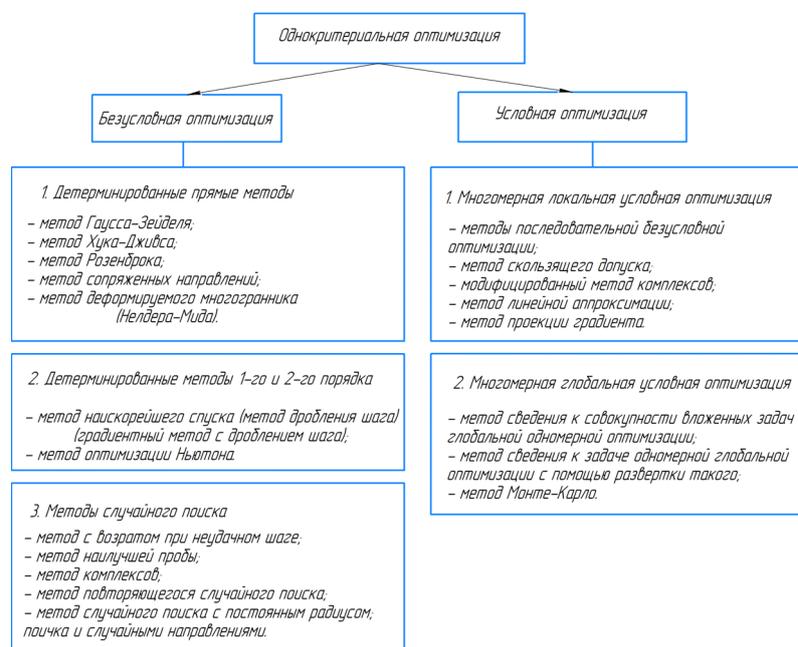


Рис. 1. Методы однокритериальной оптимизации
Fig. 1. Basic methods of single-objective optimization

³ ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. М.: Госстандарт России, 1994. 12 с.

⁴ Аверина Т.А. Численные методы. Верификация алгоритмов решения систем со случайной структурой: Учебное пособие для вузов. М.: Юрайт, 2019. 179 с.

⁵ Черняк А.А., Черняк Ж.А., Метельский Ю.М., Богданович С.А. Методы оптимизации: теория и алгоритмы: Учебное пособие для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2019. 357 с.

В задачах многокритериальной оптимизации (МКО) (линейного программирования) глобальный экстремум целевой функции достигается в вершине симплекса, и симплекс-метод за конечное число шагов определяет эту вершину⁶.

Основные этапы разработки модели линейного программирования включают в себя: определение переменных задач; представление ограничений задачи в виде линейных уравнений или неравенств; задание и выбор линейной целевой функции, подлежащей минимизации или максимизации.

Конечным результатом решения задач МКО является Парето-оптимальное множество решений – множество вариантов искомых решений, не уступающих друг другу по совокупности критериев качества. Паретовское множество точек – это точки (варианты объекта), значения в которых по всем критериям одновременно невозможно улучшить без ухудшения хотя бы одного из них⁶ [5].

Векторная оптимизация является решением частного вида многокритериальной оптимизации – это обеспечение одновременно минимального значения каждого частного критерия оптимальности. Многокритериальная задача оптимизации с множеством возможных (допустимых) решений включает в себя набор целевых функций, называемых частными критериями оптимальности, образующих вектор-функцию (векторный критерий)⁴⁻⁶ [6].

Каждому решению соответствует один определенный векторный критерий, но каждой оценке могут отвечать несколько решений.

Основные методы многокритериальной оптимизации представлены на рисунке 2.

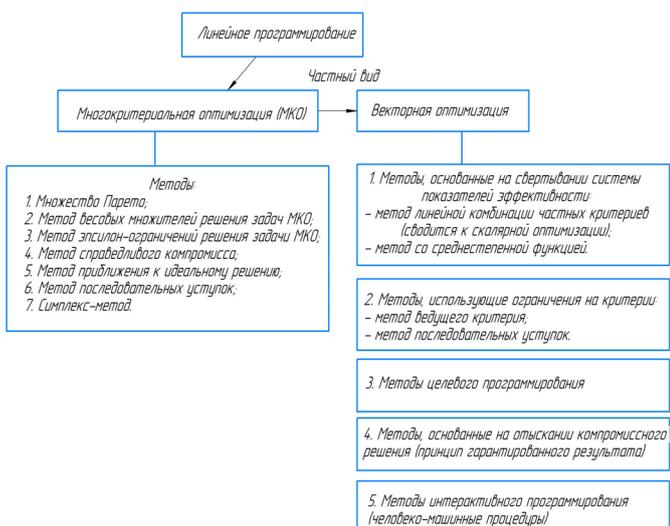


Рис. 2. Методы многокритериальной оптимизации
Fig. 2. Basic methods of multiobjective optimization

Модели линейного программирования широко применяются при решении экономических, промышленных, организационных, агроинженерных задач, в сельском хозяйстве, производстве, промышленности и транспорте.

Модели нелинейного программирования применяются в частных случаях определенных классов моделей, для которых существуют общие подходы и алгоритмы решения.

Более 75% от общего числа применяемых оптимизационных методов отведено решению задач путем многокритериальной оптимизации и линейного программирования, а также их различным модификациям^{1,2,4-6} [5-7].

Методы многокритериальной оптимизации используются при наличии многих противоречивых критериев качества, зависящих от следующих параметров роботизируемых мобильных энергосредств: конструктивных (геометрические размеры конструкций, мощность, база, колея); технологических (свойства конструкционных материалов, влажность, температура); экономических (затраты на эксплуатацию и ремонт, стоимость комплектующих и т.д.); экологических (давление на почву, выхлопные газы и т.д.); функциональных (энергоэффективность, радиус поворота, точность позиционирования и т.д.).

Методы оптимизации для сельхозмашиностроения представлены таблице^{1,2,7,8} [5-10]. Наиболее предпочтительным для достоверного и полноценного решения оптимизационной задачи является метод многокритериальной оптимизации.

Зарубежными и отечественными учеными разработаны программные пакеты для решения оптимизационных задач:

1. Отечественные системы ДИСО (РАН) и СИМОП (Нижний Новгород), предназначенные для реализации метода свертывания векторного критерия оптимальности в скалярный.

2. Система DAKOTA (Design Analysis Kit for Optimization and Terascale Applications) (США), предназначенная для проведения системного анализа и проектирования и включающая в себя алгоритмы для оптимизации конструкции, неопределенность количественного параметра оценки, планирования эксперимента и анализа чувствительности.

3. Программный пакет Ansys (США), предназначенный для решения в единой среде на одной и той же конечно-элементной модели задач по прочности, теплу, электромагнетизму, гидрогазодинамике, многодисциплинарного связанного анализа и оптимизации на основе всех вышеприведенных типов анализа.

4. Отечественная система многокритериального выбора вариантов Quick Choice (Санкт-Петербург), реализующая

⁶ Палий И.А. Линейное программирование: Учебное пособие для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2019. 175 с.

⁷ Аверина Т.А. Численные методы. Верификация алгоритмов решения систем со случайной структурой: Учебное пособие для вузов. М.: Юрайт, 2019. 179 с.

⁸ Черняк А.А., Чренок Ж.А., Метельский Ю.М., Богданович С.А. Методы оптимизации: теория и алгоритмы: Учебное пособие для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2019. 357 с.

Таблица. Сравнительный анализ методов оптимизационных решений задач для сельхозмашиностроения

Table. Comparative analysis of optimization methods for solving agricultural engineering problems

Метод	Преимущества	Недостатки	Класс задач
Многокритериальная оптимизация	1. Задачи выбора некоторого решения из множества допустимых решений с учетом многих критериев оптимальности 2. Полноценность и достоверность решения оптимального варианта	1. Необходимость формализации моделей критериев качества и функциональных ограничений, характеризующих оптимизируемые объекты 2. Введение коэффициента весомости по всем оптимизируемым критериям 3. Невозможность решения задачи при неподдающихся формализации критериях качества	Решение экономических, технических, организационных, агроинженерных, социальных задач, где невозможно обойтись без учета многих критериев качества и варьируемых параметров, характеризующих объекты оптимизации. (управление сельскохозяйственным предприятием, проектирование МЭС, комбайна)
Векторная оптимизация	Нахождение компромиссного решения, обеспечивающего одновременно минимально возможное отклонение всех целевых функций относительно их экстремальных значений	1. Низкая точность полученного оптимального решения 2. Допустимое множество решений может быть невыпуклым, несвязанным, то есть иметь довольно сложную структуру 3. Глобальный экстремум целевой функции может достигаться как на границе области допустимых решений, так и внутри. Возможно существование локальных экстремумов, что делает задачу нелинейного программирования гораздо сложнее задачи линейного программирования 4. Необходимость сведения к единичным интегральным показателям 5. Введение коэффициента весомости по всем показателям	Решение экономических, технических, организационных и агроинженерных задач (проектирование элементов узлов, агрегатов машин и оборудования сельскохозяйственного производства – как мобильных, так и стационарных)
Однокритериальная оптимизация	Возможность решения задач с ограничениями (условная оптимизация) и без ограничений (безусловная оптимизация)	1. Затруднительно и нецелесообразно применение в задачах со многими переменными и с целевыми функциями сложного рода, так как усложняются программные вычисления производных, аналитических выражений, которых порой может и не быть 2. Необходимость поиска экстремума каждой целевой функции – функции переменных 3. Низкая точность принимаемого решения и высокая погрешность	Решение определенных классов моделей, функций, имеющих экстремумы и представляющих собой частные случаи, для которых существуют общие подходы и алгоритмы решения. При исследовании технических характеристик детерминированных величин. Оптимизация простых конструкторских параметров (разработок, деталей, показателей одноцелевых задач и технико-технологических характеристик отдельных объектов, где целевая функция состоит из одного критерия)

метод t -упорядочения и использующая информацию об относительной важности критериев.

5. Отечественная система автоматизированного выбора ВЫБОР-12М (Москва), обеспечивающая совместимость с *MS Excel*.

6. Система *Easy-Opt* (Германия), предназначенная для решения задач условной и безусловной одно- и многокритериальной оптимизации. Многокритериальная оптимизация выполняется на основе метода скалярной сверки частных критериев оптимальности. Полученная однокритериальная задача глобальной условной оптимизации решается методом последовательного квадратичного программирования.

Большинство из перечисленных программных пакетов применяется в условиях векторной и однокритериальной оптимизации. Поэтому необходима разработка программных средств, позволяющих учитывать одновременно до 20 критериальных и функциональных ограничений, до 50 варьируемых параметров и более трех одновременно важных целевых функций, где каждый параметр не уступает по значимости и важности друг другу [3, 8-10].

Выводы

1. Для сельхозмашиностроения методы однокритериальной оптимизации применяются при разработке деталей и технико-технологических характеристик отдельных объектов. Методы многокритериальной оптимизации применяются для управления сельскохозяйственным предприятием, проектирования мобильных энергосредств, комбайнов и других сельскохозяйственных машин. Методы векторной оптимизации применимы при проектировании элементов узлов, агрегатов машин и оборудования.

2. Существующие программные пакеты для решения оптимизационных задач применимы в условиях векторной и однокритериальной оптимизации. Необходимо разработка программных средств, позволяющих учитывать одновременно до 20 критериальных и функциональных ограничений, до 50 варьируемых параметров и более трех одновременно важных целевых функций, где каждый параметр не уступает по значимости и важности друг другу.

Список использованных источников

1. Лавров А.В., Зубина В.А. Систематизация элементов автоматизации, применяемых в сельскохозяйственных тракторах // Аграрный научный журнал. 2021. № 4. С. 94-97. <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i4pp94-97>
2. Годжаев З.А., Сергеев В.Н., Фараджев Ф.А. Многокритериальный выбор эффективной конструкции рамы // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 3. С. 20-24. EDN: KWPMXR.
3. Зубина В.А. Анализ применения компьютерных программ для формирования оптимального состава тракторного парка // Плодоводство и ягодоводство России. 2016. Т. 46. С. 109-115. EDN: WMHGHP.
4. Коротченя В.М., Личман Г.И., Смирнов И.Г. Цифровизация технологических процессов в растениеводстве России // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13, № 1. С. 14-20. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-13-1-14-20>
5. Годжаев З.А., Дмитриченко С.С., Губерниев Ф.Я. Оптимальное проектирование валопроводов (на примере тракторов) // Вестник машиностроения. 1992. № 4. С. 23-26. EDN: MGIMKW.
6. Савченко О.Ф., Исакова С.П., Елкин О.В. Применение информационного моделирования для автоматизированного выбора агротехнологий в растениеводстве // Агротехника и энергообеспечение. 2022. № 2(35). С. 37-48. EDN: PMEQIK.
7. Шевцов В.Г., Лавров А.В., Зубина В.А., Гурылев Г.С. Принципиальные признаки суженного типа воспроизводства в сельском хозяйстве // Научно-техническое обеспечение АПК Сибири: Материалы Международной научно-технической конференции. 2017. С. 235-241. EDN: ХМКТNJ.
8. Hassan M., Maurya J.K., Mishra S.K. On m-stationary conditions and duality for multiobjective mathematical programs with vanishing constraints. *Bulletin of the Malaysian Mathematical Society*. 2022;45:1315-1341. <https://doi.org/10.1007/s40840-022-01252-w>
9. Zheng Y., Zhang L., Pan Y., He Z. Multi-objective structural optimization of a wind turbine tower. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2020;25(4):538-544. <https://doi.org/10.1007/s12204-020-2190-3>
10. Wang Y., Ni C., Cao H., Qian Q., Jin S. Two-stage dynamic differential agent cellular automata algorithm. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS*. 2020;26(4):989-1000. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2020.04.013>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.08.2022; поступила после рецензирования и доработки 22.12.2022; принята к публикации 22.12.2022

References

1. Lavrov A.V., Zubina V.A. Systematization of automation elements used in agriculture. *Agrarian Scientific Journal*. 2021;4:94-97 <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i4pp94-97> (In Rus.)
2. Godzhaev Z.A., Sergeev V.N., Faradzhev F.A. Multi-criteria selection of an efficient frame design. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2006;3:20-24. (In Rus.)
3. Zubina V.A. Analysis of computer applications for the formation of the composition of the tractor fleet. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2016;46:109-115. (In Rus.)
4. Korotchenya V.M., Lichman G.I., Smirnov I.G. Digitalization of technological processes in crop production in Russia. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2019;13(1):14-20. (In Rus.)
5. Godzhaev Z.A., Dmitrichenko S.S., Guberniev F.Ya. Optimal design of shafting (as exemplified by tractors). *Vestnik mashinostroeniya*. 1992;4:23-26. (In Rus.)
6. Savchenko O.F., Isakova S.P., Elkin O.V. Application of information modeling for automated selection of agricultural technologies in crop production. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2022;2(35):37-48. (In Rus.)
7. Shevtsov V.G., Lavrov A.V., Zubina V.A., Gurylev G.S. Main indicators of the contracted reproduction in agriculture. *Nauchno-tehnicheskoe obespechenie APK Sibiri. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii*. 2017:235-241. (In Rus.)
8. Hassan M., Maurya J.K., Mishra S.K. On m-stationary conditions and duality for multiobjective mathematical programs with vanishing constraints. *Bulletin of the Malaysian Mathematical Society*. 2022;45:1315-1341. <https://doi.org/10.1007/s40840-022-01252-w>
9. Zheng Y., Zhang L., Pan Y., He Z. Multi-objective structural optimization of a wind turbine tower. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2020;25(4):538-544. <https://doi.org/10.1007/s12204-020-2190-3>
10. Wang Y., Ni C., Cao H., Qian Q., Jin S. Two-stage dynamic differential agent cellular automata algorithm. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS*. 2020;26(4):989-1000. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2020.04.013>

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Received 29.08.2022; revised 22.12.2022; accepted 22.12.2022