DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-629124

Оригинальное исследование

Проведение многокритериальных оптимизационных расчетов для повышения эффективности парка мобильных энергетических средств

В.А. Зубина, Т.З. Годжаев, И.С. Малахов

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Моская, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В связи с тем, что разработка одной целевой функции по оценке каждой отдельной сельскохозяйственной машины, используемой в парке, представляется недостаточной для полноты оценки эффективности всего парка мобильных энергетических средств (МЭС). Для этого была применена многокритериальная постановка задачи с привлечением ранее разработанного аппаратно-программного комплекса MOVI 1.4 и разработкой компьютерных программ для проведения оптимизационных расчётов эффективности парка МЭС на примере конкретного хозяйства.
Целью работы является разработка программных средств для проведения многокритериальных оптимизационных расчетов с целью повышения эффективности парка МЭС в условиях цифровизации сельского хозяйства
Материалы и методы. В основе анализа лежит сбор научных публикаций, научных статей и других источников информации по разработке НИОКР по созданию интеллектуальных транспортно-технических средств и совершенствованию методического и программного обеспечения многокритериальных оптимизационных расчётов эффективности парка МЭС. Также использованы методы научного обобщения и статистической обработки имеющихся информационных и аналитических материалов по отечественным и зарубежным источникам
Результаты. Для расчета значений критериев качества парка МЭС, на языке программирования Паскаль была разработана подпрограмма-интерфейс для MOVI 1.4, адекватно реализующая вычисления по математическим моделям критериев в пробных точках. После ввода функциональных и критериальных ограничений, построены допустимое множество и множество Парето-оптимальных решений, а также построены графики корреляции между критериями качества. Научная новизна заключатся в разработке компьютерных программ для многокритериального обоснования эффективности парка МЭС.
Заключение. Практическая ценность заключается в разработанных математических и программных средствах, способных успешно применяться для многокритериальной оптимизации эффективности парка МЭС на примере конкретных сельскохозяйственных организаций, регионов или в масштабах страны в целом.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация; повышение эффективности; мобильные энергосредства; функциональные свойства; критерии качества; варьируемые параметры; принятие компромиссных решений.

Как цитировать:
Зубина В.А., Годжаев Т.З., Малахов И.С. Проведение многокритериальных оптимизационных расчетов для повышения эффективности парка мобильных энергетических средств // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 2. С. 217–227. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-629124

Рукопись получена: 14.03.2024 **Рукопись одобрена:** 17.06.2024 **Опубликована online:** 23.06.2024

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2024

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-629124

Original Study Article

Multi-objective optimization calculations to improve the efficiency of the fleet of agricultural moving power units

Valeria A. Zubina, Teymur Z. Godzhaev, Ivan S. Malakhov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Due to the fact that the development of one objective function for separate assessment of each agricultural machine used in the fleet seems insufficient to fully assess the efficiency of agricultural moving power units (MPU) in fleet, a multi-objective formulation of the problem was applied using the previously developed MOVI 1.4 hardware and software system and the development of computer programs to carry out the optimization calculations of the efficiency of the agricultural moving power units in fleet with the example of a specific farm.

AIM: Development of software tools for carrying out multi-objective optimization calculations in order to increase the efficiency of the MPU fleet in the context of digitalization of agriculture.

METHODS: The analysis is based on the search of scientific publications, scientific papers and other sources of information on the development of research and experimental design work on the creation of intelligent transport and technical means and the improvement of methodology and software for multi-objective optimization calculations of the efficiency of the MPU fleet. Methods of scientific generalization and statistical processing of available information and analytical materials from domestic and foreign sources were also used.

RESULTS: To calculate the values of quality criteria for the MPU fleet, the Pascal-based interface subprogram for the MOVI 1.4, adequate for carrying out calculations based on mathematical models of objectives at trial points, was developed. After introducing the functional and criterion limits, the admissible set and the set of Pareto-optimal solutions were obtained, and correlation graphs between quality criteria were constructed. The scientific novelty lies in the development of computer programs for multi-objective justification of the efficiency of the MPU fleet.

CONCLUSION: The practical value lies in the fact that the developed mathematical and software tools can be successfully used for multi-objective optimization of the efficiency of the MPU fleet using the example of specific agricultural organizations, regions or the country as a whole.

Keywords: multi-objective optimization; efficiency improvement; moving power units; functional propertie; quality criteria; variable parameters; making compromise decisions.

To cite this article:

Zubina VA, Godzhaev TA, Malakhov IS. Multi-objective optimization calculations to improve the efficiency of the fleet of agricultural moving power units. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2024;91(2):217–227. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-629124

Received: 14.03.2024 **Accepted:** 17.06.2024 **Published online:** 23.06.2024

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2024

ВВЕДЕНИЕ

При формировании оптимального по составу и по количеству парка МЭС очень сложно определить единую целевую функцию, т.е. математическую модель, характеризующую эффективность парка МЭС, которая учитывала бы все выбранные критерии оптимизации парка МЭС. Последнее обстоятельство связано с тем, что каждый критерий представляет собой отдельные функции, зачастую являющиеся противоречивыми и зависящими от различных варьируемых параметров (факторов). В условиях эксплуатации МЭС могут возникать различные приоритеты для выбора критериев качества, затрудняющие разработку единой целевой функции для оптимизации. Поэтому, подобные задачи необходимо решать в многокритериальной постановке. В рамках указанных многокритериальных оптимизационных расчетов в качестве критериев, характеризующих эффективность парка МЭС, выбрались основные функциональные и эксплуатационные показатели парка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе настоящего исследования лежит сбор и анализ научных публикаций, научных статей и других источников информации по разработке НИОКР по созданию интеллектуальных транспортно-технических средств и совершенствованию методического и программного обеспечения многокритериальных оптимизационных расчётов эффективности парка МЭС. При решении поставленной задачи использованы методы научного обобщения и статистической обработки имеющихся информационных и аналитических материалов по отечественным и зарубежным источникам

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время при оптимизации парка МЭС, традиционно, применяются методы однокритериальной оптимизации, когда ведется поиск экстремума выбранной целевой функции, таких как, например, минимизация эксплуатационных затрат при высоком техническом уровне машин или минимальная себестоимость продукции при высоком коэффициенте готовности или экологической безопасности техники. Несмотря на огромное многообразие возможных выбранных показателей минимизации или максимизации критериев парка МЭС, в условиях цифровизации сельского хозяйства в настоящее время необходимо найти и подобрать такой общий критерий или систему критериев, объединяющих все наиболее важные функционально-технические, производственно-экономические, кадровые и эксплуатационные показатели машинно-тракторного парка, обеспечивающие его полную работу с наилучшей эффективностью.

Таким образом, невозможно эффективно сформировать парк МЭС по одному из выбранных критериев, не учитывая другие критерии, связанные с эксплуатационными, экономическими, функционально-техническими и другими характеристиками парка.

В силу вышесказанного, многокритериальная постановка задач при принятии решений по оптимальному парку имеет большие преимущества по достоверности полученных решений, в сравнении с однокритериальной оптимизацией.

Проведенный нами анализ математических моделей, характеризующих эффективность парка МЭС, позволил выделить более 20 основных критериев оптимальности, на основании которых в настоящее время производится сравнительная оценка возможных решений и выбор наилучшего. Принцип оптимальности заимствован из математического программирования и теории управления, где содержание данных критериев объективно обусловлено факторами: масштабов решений (регион, отрасль производства, отдельное сельскохозяйственное предприятие) и содержанием целей, на достижение которых направлена оптимизация [1–16].

Для проведения оптимизационных расчетов в исследуемом пространстве параметров (ИПП) были выбраны и уточнены основные доминирующие критерии: суммарная производительность МЭС в составе агрегата за 1 час эксплуатационного времени — F_1, потери сельскохозяйственной продукции от нарушения агротехнических сроков — F_2, удельные капиталовложения на 1 га площади обработанной рабочей машины — F_3, КПД парка МЭС — F_4, суммарные затраты на проведение работы в рублях на 1 га — F_5, средняя стоимость эксплуатации трактора за единицу времени — F_6.

$$\begin{bmatrix} F_1(x_1, x_2 \ldots\ldots x_n) = W \\ F_2(x_1, x_2 \ldots\ldots x_n) = У_п \\ F_3(x_1, x_2 \ldots\ldots x_n) = К_{ц_{ij}} \\ F_4(x_1, x_2 \ldots\ldots x_n) = \sigma \\ F_5(x_1, x_2 \ldots\ldots x_n) = З \\ F_6(x_1, x_2 \ldots\ldots x_n) = C_{ср} \end{bmatrix} \Rightarrow \text{opt. (Паретовское множество вариантов)}$$

где F — критерия качества, $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — варьируемые параметры.

Постановка задачи многокритериальной оптимизации эффективности парка МЭС по выбранным математическим моделям представлена на рис. 1. При этом, критериями качества являются:

1. производительность всех используемых МЭС в составе агрегата за 1 час эксплуатационного времени;
2. потери сельскохозяйственной продукции по причине нарушения агротехнических сроков;
3. удельные капиталовложения на 1 га площади обработанной рабочей машины;
4. КПД парка МЭС;
5. суммарные затраты на проведение работы в рублях на 1 га;
6. средняя стоимость эксплуатации трактора за единицу времени.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-629124

Варьируемыми параметрами являются:
- рабочая ширина захвата агрегата;
- скорость трактора в составе МТА;
- продолжительность смены;
- коэффициент использования эксплуатационного времени;
- количество тракторов в начале периода;
- количество тракторов вышедших из сторя в течение периода;
- стоимость топлива за единицу времени;
- стоимость ремонта и обслуживания;
- стоимость дополнительных и расходных материалов за единицу времени;
- объем продукции, полученной после сбора урожая;
- объем продукции, реализованный на рынке;
- мощность всех используемых тракторов в парке;
- мощность всех существующих тракторов в парке;
- балансовая стоимость трактора;
- балансовая стоимость сельхозмашины;
- нормативные годовые загрузки трактора;
- нормативные годовые загрузки сельхозмашины.

Для разработки математического и программного комплекса по реализации вышеназванного алгоритма многокритериальной задачи в качестве программного обеспечения исследования (зондирования) пространства параметров был адаптирован и усовершенствован программный комплекс MOVI 1.4. Для расчета значений критериев качества парка МЭС, на языке программирования Паскаль была разработана подпрограмма-интерфейс, адекватная реализующим вычислениям по математическим моделям критериев в пробных точках.

На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма по многокритериальному обоснованию эффективности парка МЭС методом исследования пространства параметров. В данной программе также реализованы известные программные средства диалога лица принимающего решения («ЛПР-ЭВМ»), работающего по итерационному принципу. Комплекс составлен по модульному принципу и позволяет в зависимости от условий решаемой задачи и требований пользователя использовать различные модули или применять дополнительное программное обеспечение.

С целью проведения многокритериальных оптимизационных расчетов эффективности работы парка МЭС в исследуемом пространстве параметров, на основе разработанных математических моделей — критериев качества, разработаны компьютерные программы на языке программирования Паскаль для вычисления значений критериев качества при изменениях варьируемых параметров в заданных диапазонах. Выбор и значения переменных, входящих в математические модели критериев эффективности парка МЭС представлены в табл. 1.

Проведенные на основе исходных данных по парку МЭС оптимизационные расчеты позволили вычислить и составить таблицы значений критериев качества в исследуемом пространстве параметров, определить корреляционные поля между критериями качества, получение множества допустимых и Паретовских точек. Согласно данным расчетам, построена таблица испытаний — матрицы значений критериев качества каждой пробной точки зондированного пространства параметров. Фрагмент таблицы представлен на рис. 3.

После ввода функциональных и критериальных ограничений, построены допустимое множество (рис. 4) и множество Парето-оптимальных решений (см. рис. 5) при общем числе пробных точек (испытаний) 150. Количество допустимого множества решений состоит из 10 точек (векторов), а Паретовского множества из 6. В качестве функциональных ограничений выбраны условия устойчивости парка МЭС — 0,6–0,9 и предел варьирования величин недобора урожая — 1,8–10,1. В процессе диалоговой итерации ЛПР — программа МКО функциональные ограничения не менялись.

Построены графики корреляции между критериями качества (рис. 6 и 7). Графики показывают проекции многомерных точек на следующих плоскостях критериев: производительность, потери сельскохозяйственной продукции,

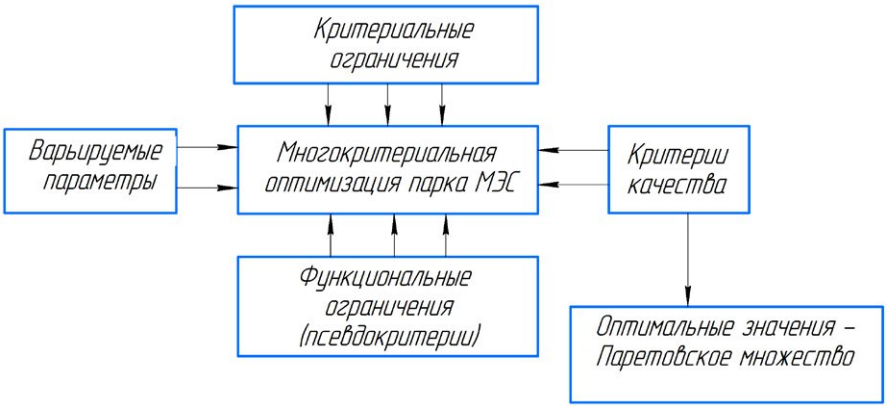


Рис. 1. Постановка задачи многокритериальной оптимизации эффективности парка МЭС по выбранным математическим моделям.
Fig. 1. Formulation of the multi-objective optimization problem of the efficiency of the MPU fleet according to the chosen mathematical models.

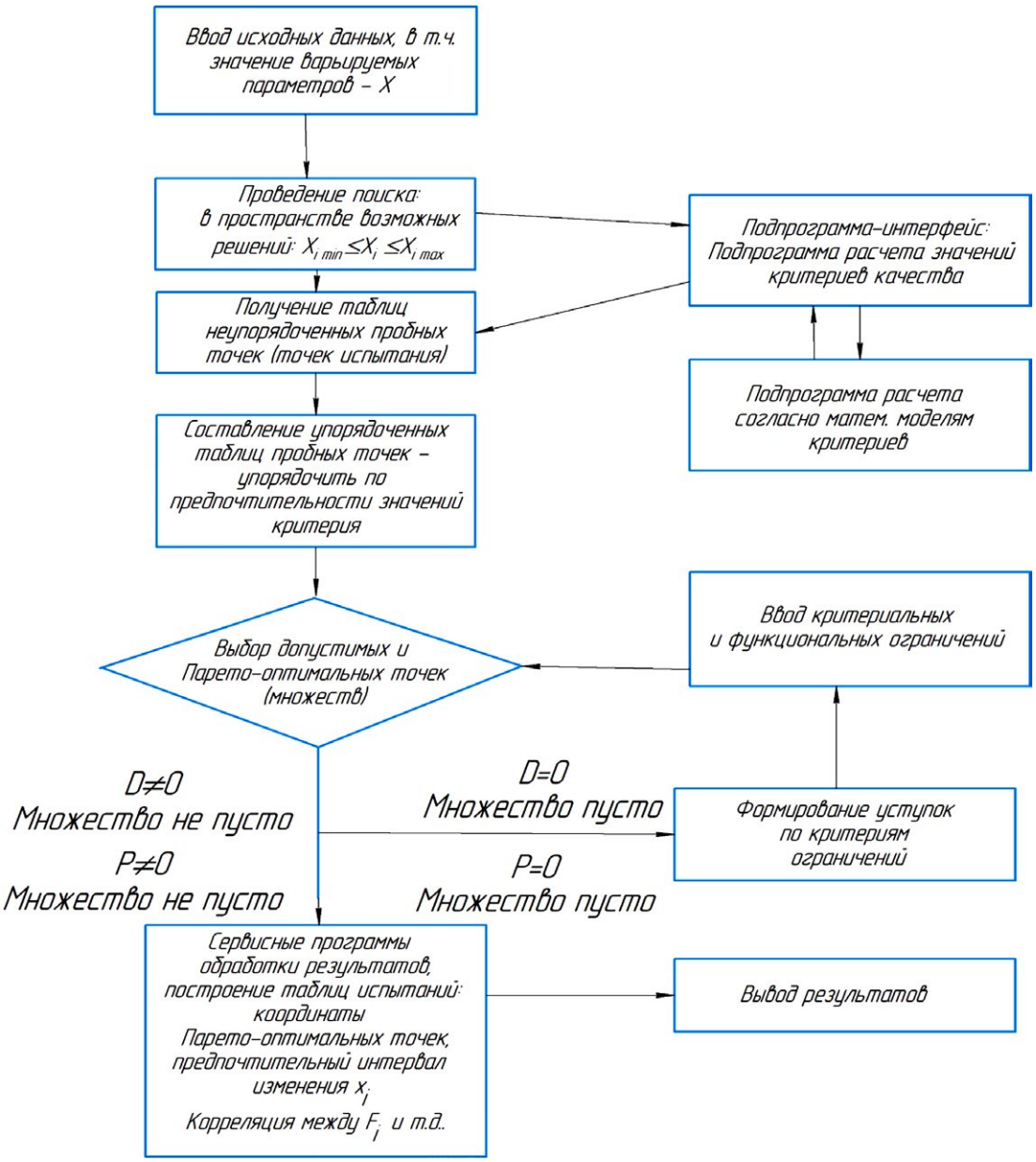


Рис. 2. Блок-схема алгоритма многокритериального обоснования эффективности парка МЭС.
Fig. 2. The block diagram of the algorithm of multi-objective justification of the MPU fleet efficiency.

Таблица 1. Значения параметров, входящих в математические модели критериев эффективности парка МЭС
Table 1. Values of the parameters included in the mathematical models of objectives of the MPU fleet efficiency

Наименование параметров для расчета эффективность парка МЭС	Типы параметров: var — варьируемые, const — постоянные	Значения
1. Производительность за 1 час эксплуатационного времени, га/ч		
B_K – конструктивная ширина захвата сельхозмашин, м;	var	1,5–3
V_p – скорость трактора в составе МТА при выполнении работы, км/ч	var	5–10
$\tau_{эксп}$ – коэффициент использования эксплуатационного времени ($\tau_{см} = 1$)	const	0,9
2. Потери сельскохозяйственной продукции от нарушения агросрока, ц		
$У_д$ – действительная урожайность каждой i-ой культуры (всего 5), ц	var	25000
K – коэффициент потерь продукции от нарушения агросрока дней $n = 1...10$	var	1,8–10,1

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-629124

Таблица 1. Окончание
Table 1. Ending

Наименование параметров для расчета эффективность парка МЭС	Типы параметров: var — варьируемые, const — постоянные	Значения
3. Удельные капиталовложения на 1 га площади обработанной рабочей машины в год, руб.		
$Б_{тр}$ – Балансовая стоимость трактора	const	1 000 000–5 000 000
$Б_{м}$ – Балансовая стоимость сельхозмашины	const	300 000–800 000
$Т_{тр}$ – нормативные годовые загрузки трактора, ч. - экспл.времени	var	710–1035
$Т_{м}$ – нормативные годовые загрузки сельскохозяйственной машины (плуга), ч. — экспл.времени	var	200–250
w_{ij} – производительность j-ого агрегата за 1 час эксплуатационного времени, га/ч	var	0,4–1,3
4. КПД парка МЭС		
k – средняя мощность используемых тракторов в парке, л.с.	var	2256–3666
n – количество используемых тракторов в данном периоде, шт.	var	14–24
$P_{парк_i}$ – мощность всех существующих тракторов, находящихся в парке	const	3800
5. Суммарные затраты на проведение работы в рублях на 1 га, руб.		
$Е_{н}$ – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений	const	0,15
i – общее количество тракторов в парке	const	25
al – норматив годовых отчислений на реновацию l машины и трактора, %	var	9.1–12.5
$Б_{е}$ – балансовая стоимость машины и трактора, руб.	var	3500-5500
k_n – коэффициент использования машины и трактора на работе относительно ее годовой загрузки на всех работах, т.е. отношение времени использования трактора на i-ой работе к суммарному времени	const	0,9
w_{ij} – производительность j агрегата за час эксплуатационного времени	var	0,4–1,3
t_i – продолжительность смены, ч	const	8
$k_{см}$ – смежность работы	const	1
$k_{им}$ – коэффициент использования календарного времени по метеоусловиям при выполнении i работы	var	0,75–0,91
T_i – продолжительность выполнения i-ой работы (количество календарных дней)	var	3–8
$П_{у}$ – стоимость потерь (недобора урожая), соответствующая определённой продолжительности проведения полевых работ, руб.	var	800 000–190 000
6. Средняя стоимость эксплуатации трактора за единицу времени, руб.		
$C_{т}$ – стоимость топлива за единицу времени; руб/год	var	30 000–250 000
$C_{рем}$ – стоимость ремонта и обслуживания за единицу времени; руб./год	var	30 000–85 000
$C_{аморт}$ – стоимость использования трактора (амортизация) за единицу времени, руб/год;	var	30 000–90 000
$C_{доп}$ – стоимость дополнительных материалов и расходных материалов за единицу времени, руб./год;	var	50 000–150 000
$C_{аренды}$ – стоимость аренды, страховки, налогов и других затрат за единицу времени; руб./год;	var	20 000–60 000
t – единица времени, год	var	0,05–0,15

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-629124

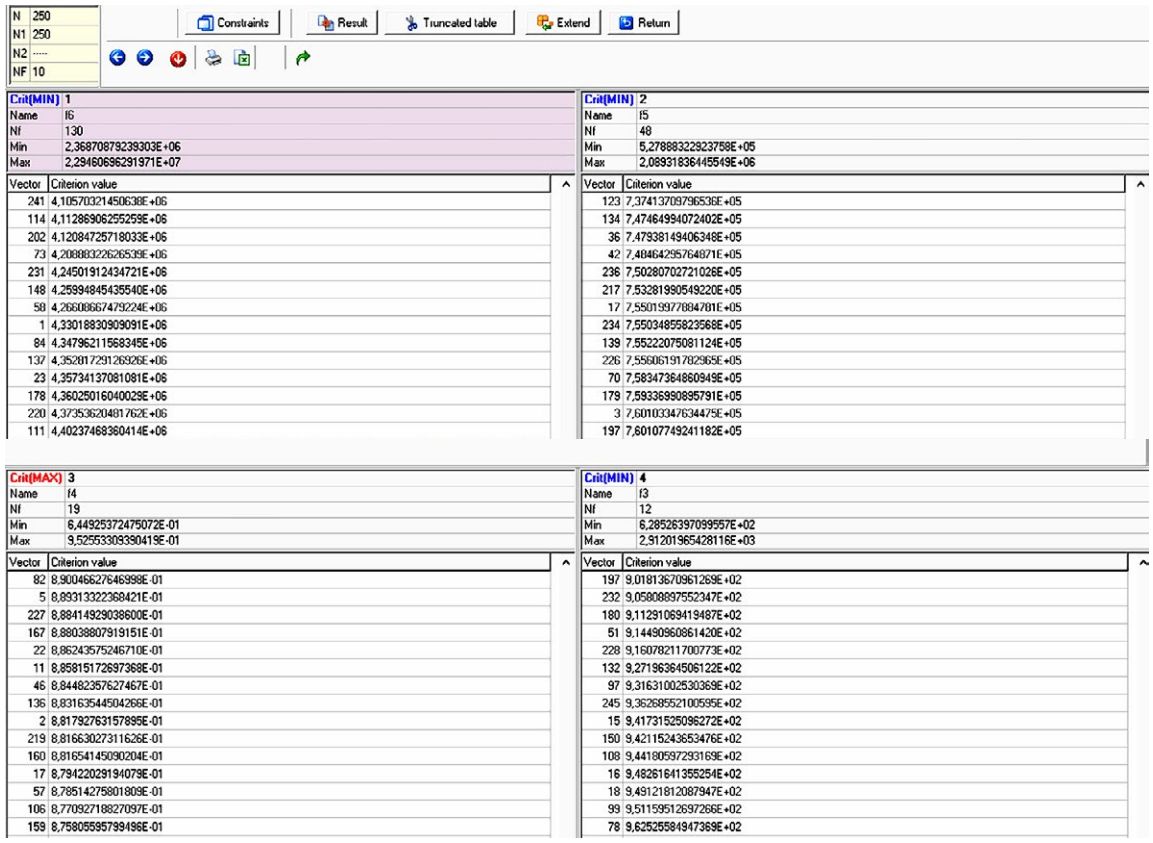
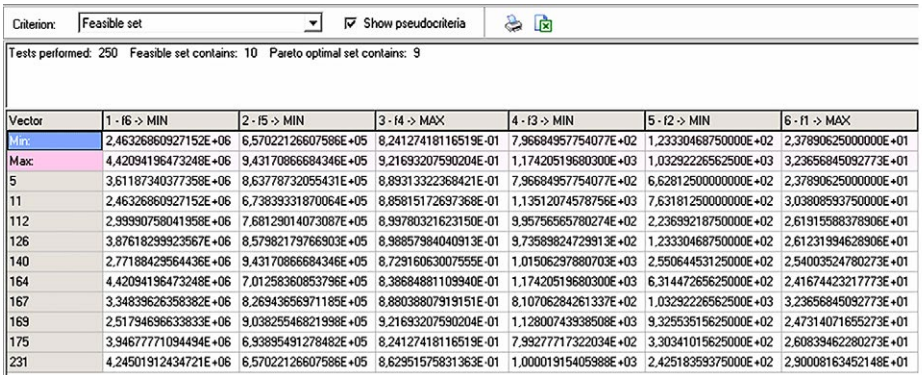
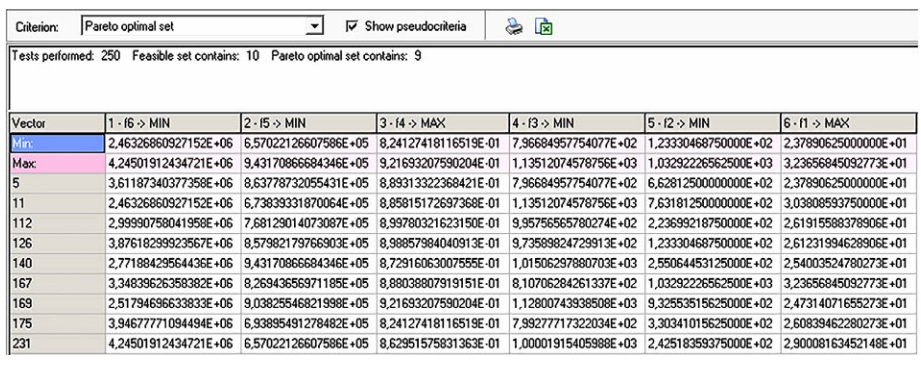


Рис. 3. Фрагмент исходной таблицы испытаний.
Fig. 3. The part of initial table of tests.



Vector	1 - f6 -> MIN	2 - f5 -> MIN	3 - f4 -> MAX	4 - f3 -> MIN	5 - f2 -> MIN	6 - f1 -> MAX
Min:	2,46326860927152E+06	6,57022126607586E+05	8,24127418116519E-01	7,96684957754077E+02	1,23330468750000E+02	2,37890625000000E+01
Max:	4,42094196473248E+06	9,43170866684346E+05	9,21693207590204E-01	1,17420519680300E+03	1,03292226562500E+03	3,23656845092773E+01
5	3,61187340377358E+06	8,63778732055431E+05	8,89313322368421E-01	7,96684957754077E+02	6,62812500000000E+02	2,37890625000000E+01
11	2,46326860927152E+06	6,73839331870064E+05	8,85815172697368E-01	1,13512074578756E+03	7,63181250000000E+02	3,03808593750000E+01
112	2,99990758041958E+06	7,68129014073087E+05	8,99780321623150E-01	9,95756565780274E+02	2,23699218750000E+02	2,61915588378906E+01
126	3,87618299923567E+06	8,57982179766903E+05	8,98857984040913E-01	9,73589824729913E+02	1,23330468750000E+02	2,61231994628906E+01
140	2,77188429564436E+06	9,43170866684346E+05	8,72916063007555E-01	1,01506297880703E+03	2,55064453125000E+02	2,54003524780273E+01
164	4,42094196473248E+06	7,01258360853796E+05	8,38684881109940E-01	1,17420519680300E+03	6,31447265625000E+02	2,41674423217773E+01
167	3,34839626358382E+06	8,26943656971185E+05	8,88038807919151E-01	8,10706284261337E+02	1,03292226562500E+03	3,23656845092773E+01
169	2,51794696633833E+06	9,03825546821998E+05	9,21693207590204E-01	1,12800743938508E+03	9,32553515625000E+02	2,47314071655273E+01
175	3,94677771094494E+06	6,93895491278482E+05	8,24127418116519E-01	7,99277717322034E+02	3,30341015625000E+02	2,60839462280273E+01
231	4,24501912434721E+06	6,57022126607586E+05	8,62951575831363E-01	1,00001915405988E+03	2,42518359375000E+02	2,90008163452148E+01

Рис. 4. Таблица значений критериев в допустимых точках (векторах).
Fig. 4. The table of objectives' values in the admissible points (vectors).



Vector	1 - f6 -> MIN	2 - f5 -> MIN	3 - f4 -> MAX	4 - f3 -> MIN	5 - f2 -> MIN	6 - f1 -> MAX
Min:	2,46326860927152E+06	6,57022126607586E+05	8,24127418116519E-01	7,96684957754077E+02	1,23330468750000E+02	2,37890625000000E+01
Max:	4,24501912434721E+06	9,43170866684346E+05	9,21693207590204E-01	1,13512074578756E+03	1,03292226562500E+03	3,23656845092773E+01
5	3,61187340377358E+06	8,63778732055431E+05	8,89313322368421E-01	7,96684957754077E+02	6,62812500000000E+02	2,37890625000000E+01
11	2,46326860927152E+06	6,73839331870064E+05	8,85815172697368E-01	1,13512074578756E+03	7,63181250000000E+02	3,03808593750000E+01
112	2,99990758041958E+06	7,68129014073087E+05	8,99780321623150E-01	9,95756565780274E+02	2,23699218750000E+02	2,61915588378906E+01
126	3,87618299923567E+06	8,57982179766903E+05	8,98857984040913E-01	9,73589824729913E+02	1,23330468750000E+02	2,61231994628906E+01
140	2,77188429564436E+06	9,43170866684346E+05	8,72916063007555E-01	1,01506297880703E+03	2,55064453125000E+02	2,54003524780273E+01
167	3,34839626358382E+06	8,26943656971185E+05	8,88038807919151E-01	8,10706284261337E+02	1,03292226562500E+03	3,23656845092773E+01
169	2,51794696633833E+06	9,03825546821998E+05	9,21693207590204E-01	1,12800743938508E+03	9,32553515625000E+02	2,47314071655273E+01
175	3,94677771094494E+06	6,93895491278482E+05	8,24127418116519E-01	7,99277717322034E+02	3,30341015625000E+02	2,60839462280273E+01
231	4,24501912434721E+06	6,57022126607586E+05	8,62951575831363E-01	1,00001915405988E+03	2,42518359375000E+02	2,90008163452148E+01

Рис. 5. Таблица значений Парето-оптимальных точек (векторов).
Fig. 5. The table of values of the Pareto-optimal points (vectors).

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-629124

удельные капиталовложения на 1 га площади обработанной рабочей машины, КПД парка МЭС, суммарные затраты эксплуатации трактора в год и средняя стоимость эксплуатации трактора в год. На графиках область допустимых решений отмечены синими точками (10 точек), а Парето-оптимальные решения зелеными точками (9 точек).

Таким образом, наиболее предпочтительным среди полученных Паретовских точек при работе парка МЭС

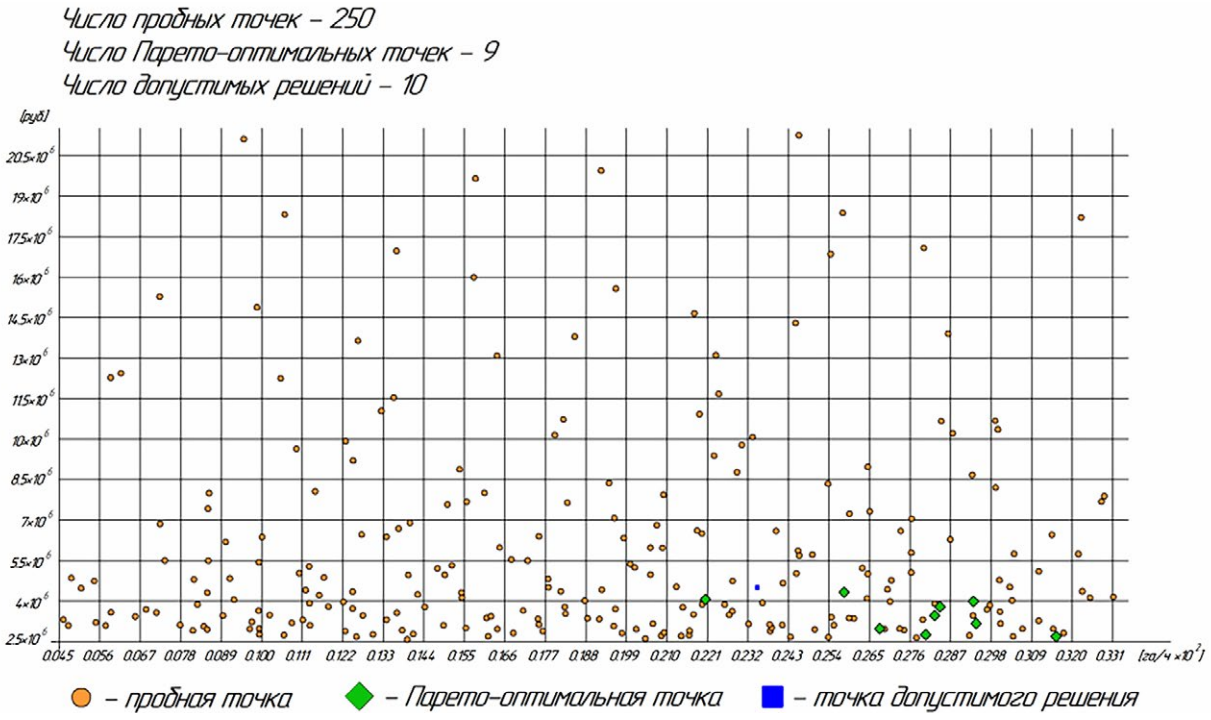


Рис. 6. Корреляция между удельными капиталовложениями и суммарной производительностью всех тракторов в парке.
Fig. 6. Correlation between specific investments and overall performance of all tractors in the fleet.

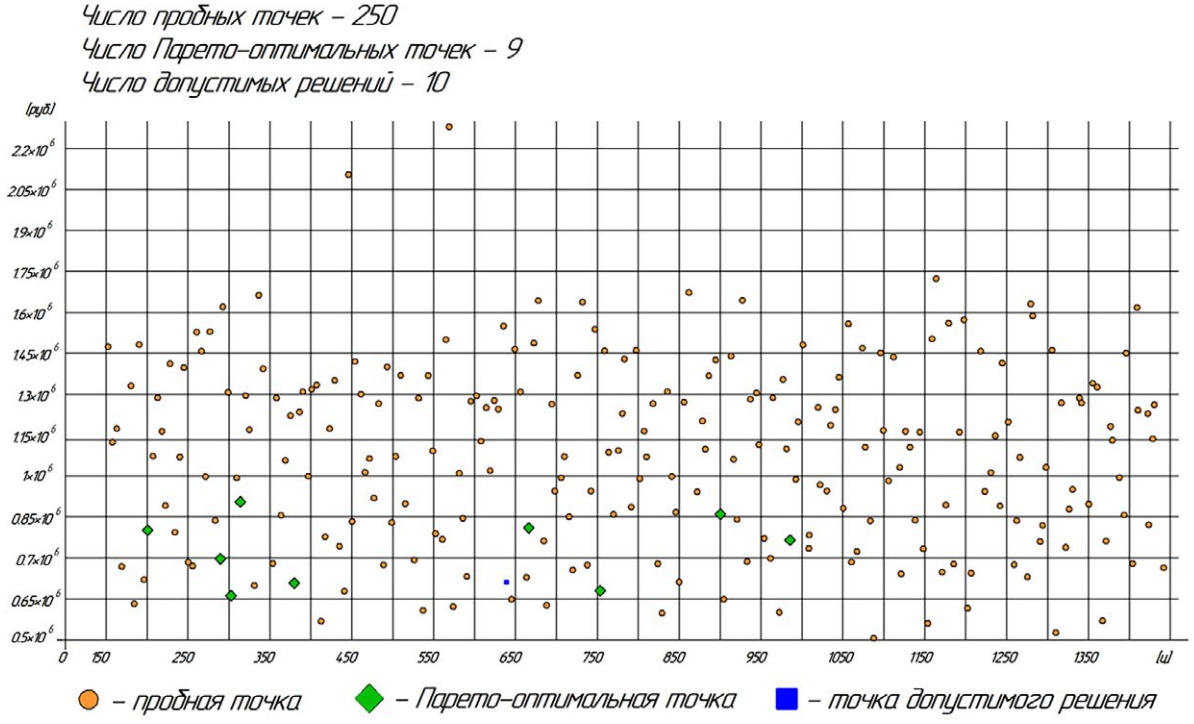


Рис. 7. Корреляция между потерями сельскохозяйственной продукции и суммарными затратами эксплуатации трактора за единицу времени в год.
Fig. 7. Correlation between losses of agricultural products and overall service costs for a tractor per year.

на пахоте, по мнению ЛПР, является точка (вектор) № 11 со следующими значениями критериев: F_1 = 30 га/ч; F_2 = 763 ц; F_3 = 1,135 тыс. руб.; F_4 = 0,88; F_5 = 674 тыс. руб., F_6 = 2,4 млн руб.

Данные значения критериев могут применяться на сельскохозяйственных предприятиях различных почвенно-климатических зонах РФ, имеющие примерные обрабатываемые площади — около 5000 га и состава парка МЭС — 20–30 единиц, при формировании парка МЭС с оптимальными функциональными и эксплуатационными характеристиками.

ВЫВОДЫ

Разработанное программное средство на языке программирования «Паскаль» для многокритериальной оптимизации эффективности парка МЭС позволяет при наличии многих критериев качества, вычислять их значение в пространстве варьируемых параметров в заданных диапазонах. Согласно многокритериальной постановке задачи и предпочтений ЛПР для принятия компромиссных решений по эффективности парка сельскохозяйственных МЭС выбранные и усовершенствованные математические модели, и диапазоны изменения варьируемых параметров играют ключевую роль.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.А Зубина — постановка задачи, разработка математических моделей функциональных характеристик МЭС, формирование перечня варьируемых параметров, подготовка введения и выводов; Т.З. Годжаев — разработка математических моделей экономических критериев качества МЭС, оптимизационных моделей и построение блок-схемы алгоритма; И.С. Малахов — выполнение расчета компромиссных решений на примерах модельных хозяйств, оформление иллюстраций. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V.A. Zubina — formulation of the problem, development of mathematical models of the functional characteristics of the MPU fleet, preparation of the introduction and the conclusions; T.Z. Godzhaev — development of mathematical models of economic quality criteria of MPUs, optimization models, building the block diagram of the algorithm; I.S. Malakhov — calculation of compromise solutions using examples of model farms, creating figures. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing of interests. The authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годжаев З.А., Фараджев Ф.А., Матвеев Е.А., Надеждин В.С. Перспективные методы проектирования несущих систем автотранспортных средств с учетом многих критериев // Технология колесных и гусеничных машин. 2012. № 3. С. 18–24. EDN: PDVCLR

2. Зубина В.А., Годжаев Т.З., Малахов И.С. Разработка оптимизационных математических моделей для принятия компромиссных решений по эффективности парка сельскохозяйственных мобильных энергетических средств // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 523–529. doi: 10.17816/0321-4443-569403

3. Жалнин Э.В., Зубина В.А. Обоснование типовых сельскохозяйственных территорий для разработки региональных систем машин // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 2. С. 82–89. EDN: QXFXYQ doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-82-89

4. Зубина В.А. Обзор и анализ методов оптимизации и компьютерных программ для повышения эффективности МТП // Вестник аграрной науки Дона. 2018. Т. 1, № 41. С. 26–32. EDN: YWEECM

5. Шевцов В.Г., Годжаев З.А., Лавров А.В., Зубина В.А. Методика определения оптимального состава тракторного парка в условиях нарушенного воспроизводства ресурсов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 4. С. 9–14.

6. Скороходов А.Н., Левшин А.Г. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка. М.: БИБКОМ, ТРАНСЛОГ, 2017.

7. Костомахин М.Н. Оценка режимов работы сельскохозяйственной техники // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 4 С. 78–83. EDN: RQBZBU doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-78-83

8. Годжаев Т.З., Зубина В.А., Малахов И.С. Обоснование функциональных характеристик сельскохозяйственных мобильных энергосредств в многокритериальной постановке // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 6. С. 411–420. doi: 10.17816/0321-4443-121325

9. Лавров А.В., Зубина В.А. Систематизация элементов автоматизации, применяемых в сельском хозяйстве // Аграрный научный журнал. 2021. № 4. С. 94–97. doi: 10.28983/asj.y2021i4pp94-97

10. Зангиев А.А., Скороходов А.Н. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка. М.: Лань, 2018.
11. Зубина В.А., Годжаев Т.З. Сравнительный анализ методов решений оптимизационных задач для сельскохозяйственного машиностроения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 1. С. 11–16. EDN: GNBTTT doi: 10.26897/2687-1149-2023-1-11-16
12. Зубина В.А. Обоснование формирования гармоничного тракторного парка сельскохозяйственных организаций при минимизации потерь сельскохозяйственной продукции. дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2020. EDN: AOUOOT
13. Соболь И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. Москва: Дрофа, 2006. EDN: QJQRCT
14. Корнюшин Ю.П., Лавров А.В., Сидорова А.В. Моделирование случайных процессов, обусловленных профилем опорной поверхности транспортнотехнологических средств // Сельскохозяйственные машины и технологии 2023. Т. 17, № 3. С. 61–66. EDN: OYCEFL doi: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-61-66
15. Годжаев З.А., Лавров А.В., Шевцов В.Г., Зубина В.А. О методике оценки уровня локализации производства сельскохозяйственных тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 5. С. 18–24. EDN: JAZNGW doi: 10.31992/0321-4443-2020-5-18-24
16. Шевцов В.Г., Лавров А.В., Зубина В.А., Гурылев Г.С. Принципиальные признаки суженного типа воспроизводства в сельском хозяйстве. В кн.: Научно-техническое обеспечение АПК Сибири. Материалы Международной научно-технической конференции. 2017. С. 235–241.

REFERENCES

1. Godzhaev ZA, Faradzhev FA, Matveev EA, Nadezhdin VS. Advanced methods for designing load-bearing systems of vehicles taking into account many criteria. *Technology of wheeled and tracked vehicles.* 2012;3:18–24. (In Russ.) EDN: PDVCLR
2. Zubina VA, Godzhaev TZ, Malakhov IS. Development of optimization mathematical models for making compromise decisions on the efficiency of the fleet of agricultural moving power units. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2023;90(6):523–529. (In Russ.) doi: 10.17816/0321-4443-569403
3. Zhalnin EV, Zubina VA. Justification of typical agricultural territories for the development of regional machine systems. *Agricultural machines and technologies.* 2022;16(2):82–89. (In Russ.) EDN: QXFXYQ doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-82-89
4. Zubina VA. Review and analysis of optimization methods and computer programs to increase the efficiency of MTP. *Bulletin of Agrarian Science of the Don.* 2018;1(41):26–32. (In Russ.) EDN: YWEECM
5. Shevtsov VG, Godzhaev ZA, Lavrov AV, Zubina VA. Methodology for determining the optimal composition of a tractor fleet in conditions of impaired reproduction of resources. *Agricultural machines and technologies.* 2016;4:9–14. (In Russ.)
6. Skorokhodov AN, Levshin AG. Production operation of the machine and tractor fleet. M.: BIBKOM, TRANSLOG; 2017.
7. Kostomakhin MN. Assessment of operating modes of agricultural machinery. *Agricultural machines and technologies.* 2020;14(4):78–83. (In Russ.) EDN: RQBZBU doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-78-83
8. Godzhaev TZ, Zubina VA, Malakhov IS. Justification of the functional characteristics of agricultural mobile power tools in a multi-criteria formulation. *Tractors and agricultural machinery.* 2022;89(6):411–420. (In Russ.) doi: 10.17816/0321-4443-121325
9. Lavrov AV, Zubina VA. Systematization of automation elements used in agriculture. *Agrarian scientific journal.* 2021;4:94–97. (In Russ.) doi: 10.28983/asj.y2021i4pp94-97
10. Zangiev AA, Skorokhodov AN. *Workshop on the operation of a machine and tractor fleet.* Moscow: Lan'; 2018. (In Russ.)
11. Zubina VA, Godzhaev TZ. Comparative analysis of methods for solving optimization problems for agricultural engineering. *Agroengineering.* 2023;25(1):11–16. (In Russ.) doi: 10.26897/2687-1149-2023-1-11-16
12. Zubina VA. *Justification for the formation of a harmonious tractor fleet of agricultural organizations while minimizing losses of agricultural products* [dissertation] Moscow, 2020. (In Russ.) EDN: AOUOOT
13. Sobol IM, Statnikov RB. *Selection of optimal parameters in problems with many criteria: textbook. manual for university students studying in areas of training.* Moscow: Drofa; 2006. (In Russ.) EDN: QJQRCT
14. Kornyushin YuP, Lavrov AV, Sidorova AV. Modeling of random processes caused by the profile of the supporting surface of transport and technological means. *Agricultural machines and technologies.* 2023;17(3):61–66. (In Russ.) EDN: OYCEFL doi: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-61-66
15. Godzhaev ZA, Lavrov AV, Shevtsov VG, Zubina VA. On the methodology for assessing the level of localization of production of agricultural tractors. *Tractors and agricultural machinery.* 2020;5:18–24. (In Russ.) EDN: JAZNGW doi: 10.31992/0321-4443-2020-5-18-24
16. Shevtsov VG, Lavrov AV, Zubina VA, Gurylev GS. Fundamental signs of a narrowed type of reproduction in agriculture. In: *Scientific and technical support of the agro-industrial complex of Siberia. Materials of the International Scientific and Technical Conference.* 2017;235–241. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

*** Годжаев Теймур Захидович,**
заведующий сектором «Моделирование и оптимизация МЭС»;
адрес: Российская Федерация, 109428, Москва,
1-й Институтский проезд, д. 5;
ORCID: 0000-0002-4496-0711;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: tgodzhaev95@yandex.ru

Зубина Валерия Александровна,
канд. техн. наук,
старший научный сотрудник лаборатории системы мобильных энергетических средств;
ORCID: 0000-0002-6657-1899;
eLibrary SPIN: 3410-5062;
e-mail: lera_zubina@mail.ru

Малахов Иван Сергеевич,
младший научный сотрудник сектора «Моделирование и оптимизация МЭС»;
ORCID: 0000-0001-8162-7718;
eLibrary SPIN: 7067-6972;
e-mail: malahovivan2008@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Teymur Z. Godzhaev,**
Head of the Modelling and Optimization of MPUs Sector;
address: 5 1st Institutsky proezd, 109428 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-4496-0711;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: tgodzhaev95@yandex.ru

Valeria A. Zubina,
Cand. Sci. (Engineering),
Senior Researcher of the Laboratory of Moving Power Units;
ORCID: 0000-0002-6657-1899;
eLibrary SPIN: 3410-5062;
e-mail: lera_zubina@mail.ru

Ivan S. Malakhov,
Junior Researcher of the Modelling and Optimization of MPUs Sector;
ORCID: 0000-0001-8162-7718;
eLibrary SPIN: 7067-6972;
e-mail: malahovivan2008@mail.ru