

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-121325>

Оригинальное исследование



Обоснование функциональных характеристик сельскохозяйственных мобильных энергосредств в многокритериальной постановке

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

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с тем, что создаваемые технические средства, в том числе и мобильные энергосредства (МЭС), применяемые в аграрной сфере, характеризуются многими критериями качества, поставленные задачи должны решаться в многокритериальной и многофакторной постановке. Поэтому создание математического и программного обеспечения решения этих задач является актуальным.

Цель исследования. Определение оптимальных функциональных характеристик МЭС сельскохозяйственного назначения со многими критериями качества, в том числе и противоречивыми.

Методы и средства. В данном исследовании было разработано алгоритмическое и программное обеспечение многокритериальной оптимизации функциональных характеристик мобильных энергосредств сельскохозяйственного назначения. Приведены математические модели доминирующих критериев качества МЭС, функциональные ограничения и исходные данные для решения многокритериальной оптимизационной задачи по определению характеристик МЭС на стадии проектирования и совершенствования. В качестве доминирующих критериев, согласно экспертной оценке, применялись давление на почву, производительность, энергетическая оценка по относительному снижению полных удельных топливно-энергетических затрат, суммарные затраты на техобслуживание и ремонт, энергоэффективность.

Результаты. Выполнены расчеты значений критериев качества в пробных точках испытаний – в исследуемом пространстве параметров. Согласно разработанному алгоритму определено множество допустимых решений по конструктивным и функциональным характеристикам МЭС, отвечающим всем критериальным и функциональным ограничениям, выдвинутому лицом, принимающим решение (ЛПР). А также определено Паретовское множество решений (точек) – наилучшие варианты функциональных свойств МЭС, по совокупности критериев не уступающих друг другу. Согласно оптимизационным расчетам, ЛПР выбирает среди Паретовских точек одну единственную.

Заключение. Разработанные математические модели и на их основе составленные программные средства позволяют оптимизировать при наличии многих критериев качества, в том числе и противоречивых, функциональные, эксплуатационные и другие характеристики мобильных энергосредств сельскохозяйственного назначения. Программный комплекс позволяет провести многокритериальную оптимизацию объекта при общем количестве рассматриваемых критериев качества до 20, а варьируемых параметров до 50. Для применения данного программного комплекса для оптимизации других технических объектов и средств необходимы доработка математического и, как следствие, программного обеспечения.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация; мобильные энергосредства; функциональные свойства; критерии качества; варьируемые параметры; Паретовское множество.

Для цитирования:

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: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-121325>

Рукопись получена: 16.11.2022

Рукопись одобрена: 04.12.2022

Опубликована: 15.12.2022

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-121325>

Original Study Article

The justification of functional properties of agricultural moving power units in the multi-objective scenario

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

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Considering the developed technical facilities like moving power units (MPU) used in agricultural industry are described with numerous quality criteria, the design development issues should be solved in multi-objective and multi-factorial scenario. Therefore, the development of mathematical tools and software for solving these issues is a relevant aim [1-3].

AIMS: Determination of optimal functional properties of an agricultural MPU with numerous quality criteria including the conflictive ones.

METHODS: In this study, the algorithmic software for multi-objective optimization of functional properties of agricultural moving power units has been developed. The simulation models of MPU's dominating quality criteria, functional limits and initial conditions for solving the multi-objective optimization task of MPU's properties determination at the design and improvement stages are given. According to the expert assessment, the chosen dominating criteria are pressure on soil, productive capacity, energetic assessment based on relative reduction of total specific fuel-energy consumption, total maintenance costs and energy efficiency.

RESULTS: The calculations of quality criteria values in testing points – in the studied parameter space – were performed. According to the developed algorithm, the range of acceptable results for the MPU's functional and design properties, which meet all criterial and functional limits given by the decision-making person (DMP), was derived. In addition, the Pareto set of solutions (points), which are the best options of the MPU's functional properties and do not disgrace each other on totality of criteria, was derived. According to the optimization analysis, the DMP chooses the only one point from the Pareto set.

CONCLUSIONS: The developed mathematical models and the software based on the models are helpful to optimize the properties of agricultural moving power units with regard to various quality criteria including conflictive, functional, service criteria, etc. The software set allows performing the multi-objective optimization of an object with the total amount of considered quality criteria of up to 20 and with up to 50 variable parameters. . In order to use this software set to optimize other technical objects and tools, it is necessary to update the mathematical apparatus and, as a consequence, the software.

Keywords: *multi-objective optimization; moving power units; functional properties; quality criteria; variable parameters; the Pareto set.*

Cite as:

Godzhaev TZ, Zubina VA, Malakhov IS. The justification of functional properties of agricultural moving power units in the multi-objective scenario. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(6):411–420. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-121325>

Received: 16.11.2022

Accepted: 04.12.2022

Published: 15.12.2022

ВВЕДЕНИЕ

Разработка методов и средств разработки и создания сложных технических средств с многочисленными функциональными, эксплуатационными, экономическими, экологическими характеристиками, по своей сути, является сложной математической, исследовательской, научной и технической задачей. В связи с повышением роли применения расчетных методов проектирования и моделирования свойств создаваемых объектов взамен натурных испытаний создание эффективного и достоверного математического, алгоритмического и программного обеспечения этих расчетов является актуальной задачей. Особенно актуальна разработка математических и программных средств оптимизации параметров и характеристик объектов, что создает возможности закладывать обоснованные величины этих характеристик объекта на стадии проектирования. Традиционно, в отрасли применяются простые и малоэффективные алгоритмы однокритериальной оптимизации, что не может обеспечить получение качественного и достоверного решения по создаваемому объекту. В связи с тем, что создаваемые технические средства, в том числе и мобильные энергосредства (МЭС), применяемые в аграрной сфере, характеризуются многими критериями качества, эти задачи должны решаться в многокритериальной и многофакторной постановке. Поэтому создание математического и программного обеспечения для решения этих задач является актуальным [1–3].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение оптимальных функциональных характеристик МЭС сельскохозяйственного назначения

со многими критериями качества, в том числе и противоречивыми.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись с использованием методов математического моделирования, программирования, оптимизации и экспертной оценки, теории трактора, а также с применением высокопроизводительной вычислительной техники.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сформирована постановка задачи многокритериальной оптимизации характеристик МЭС на примере колесного трактора тягового класса 1,4.

Согласно исследованиям, проведенным Федеральным научным агроинженерным центром ВИМ, с привлечением более 30 экспертов были определены многочисленные критерии качества, характеризующие эффективность работы мобильных энергосредств. Оценка проводилась как по анализу существующих научно-исследовательских работ, так и с учетом мнений экспертов-специалистов в области создания МЭС. Согласно этому анализу, из 18 критериев качеств экспертами были выбраны 5 наиболее значимых (доминирующих) для выполнения многокритериальных оптимизационных расчетов характеристик МЭС: давление на почву – q_{\max}^k ; производительность – W ; энергетическая оценка по относительному снижению полных удельных топливно-энергетических затрат – $\bar{\Delta}\mathcal{E}_w^{\Pi}$; суммарные затраты на техобслуживание и ремонт – \mathcal{Z}_{P_i} ; энергоэффективность – E_c (табл. 1).

Таблица 1. Математические модели критериев качества – F_i

Table 1. The mathematical models of quality criteria

Наименование критериев	Математическая модель критериев
Давление на почву, кПа	$q_{\max}^k = \bar{q}_k \cdot K_2$
Производительность, га/ч	$W = 0,1 \cdot B_p \cdot \beta \cdot V_p \cdot \tau \cdot T_{cm}$
Энергетическая оценка по относительному снижению полных удельных топливно-энергетических затрат, %	$\bar{\Delta}\mathcal{E}_w^{\Pi} = \frac{\mathcal{E}_{TP}^{\delta} \cdot \left(1 - \frac{a}{c}\right) + \mathcal{E}_{TOP}^{\delta} \cdot \left(1 - \frac{b}{c}\right)}{\mathcal{E}_{TP}^{\delta} + \mathcal{E}_{TOP}^{\delta}}$
Суммарные затраты на ТОР, тыс. руб.	$\mathcal{Z}_{P_i} = \frac{\sum_{j=1}^{nM} B_{M_j} \cdot k_{P_j}}{W_{экj}} \cdot 10^{-4}$
Энергоэффективность, кВт·ч/га	$E_c = \frac{\eta_{дв} \cdot P_{дв} \cdot G_{тр} \cdot \varphi \cdot \eta_{тр} \cdot W}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot g} \cdot 10^{-1}$

Важным критерием при создании современных МЭС для обеспечения их экологической безопасности является давление на почву. Существующие нормы по давлению на почву не соблюдаются и многие МЭС, создаваемые различными производителями, не отвечают требованиям ГОСТ. Вследствие переуплотнения почвы происходит снижение урожайности и качества почвы как питательной среды. Для влажной почвы максимальное давление от движителя МЭС на почву не должно превышать 80 кПа, а для сухой – 210 кПа.

Основной критерий, определяющий эффективность работника сельскохозяйственного производства (выполнение объема работ в единицу времени), – это производительность. Она косвенно связана с другими показателями, такими как тяговый КПД и экономическая эффективность эксплуатации МЭС. Зарубежные авторы тоже выделяют данный показатель как один из значимых при оценке эффективности МЭС. Кроме того, критерий производительности косвенно связан с энергонасыщенностью МЭС, с массогабаритными характеристиками применяемого комплекса машин (например, шириной захвата сельскохозяйственного орудия – плуга, опрыскивателя и др.) и скоростью МЭС при выполнении конкретных технологических операций [4–5].

Критерий энергоэффективности связан с тяговым КПД агрегатов и узлов, силой передачи МЭС, самого двигателя и комплексом машин, с которым агрегируется МЭС. Обычно энергоэффективность является наиболее важным критерием для МЭС на электрической тяге и напрямую связана с омическими потерями в электрических цепях. А для механической силовой передачи, где в качестве энергоустановки используется тепловой двигатель или ДВС, наиболее показательным является КПД самого двигателя или трактора в целом [6].

Критерий энергетической оценки по относительному снижению полных удельных топливно-энергетических

затрат и суммарных затрат на техобслуживание и ремонт отражает экономические характеристики и надежность МЭС.

Согласно анализу решения подобных задач, в других отраслях нами принят следующий алгоритм решения многокритериальной задачи по оптимизации характеристик МЭС сельскохозяйственного назначения (рис. 1).

Общая постановка задачи многокритериальной оптимизации характеристик МЭС имеет вид:

$$\left[\begin{array}{l} F_1 = (x_1, x_2, \dots, x_n) = q_{\max}^k \\ F_2 = (x_1, x_2, \dots, x_n) = W \\ F_3 = (x_1, x_2, \dots, x_n) = \mathcal{E}_W^{\Pi} \\ F_4 = (x_1, x_2, \dots, x_n) = Z_{p_i} \\ F_5 = (x_1, x_2, \dots, x_n) = E_c \end{array} \right] \Rightarrow \text{opt.}$$

(Паретовское множество вариантов)

где F_1 – критерии качества, x_1, x_2, \dots, x_n – варьируемые параметры.

В данной задаче главной целью является поиск Паретовского множества. Паретовское множество – это точки, где значения всех критериев качества нельзя улучшить одновременно по всем показателям, не ухудшив хотя бы один из них [7].

В дальнейшем были разработаны и сформированы математические модели этих 5 критериев, которые приведены в табл. 1.

Коэффициенты весомости для всех критериев приняты равными 1.

Для проведения оптимизационных расчетов в исследуемом пространстве параметров сформированы диапазоны изменения варьируемых параметров (табл. 2), согласно постановке задачи и предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР), сформированы критериальные

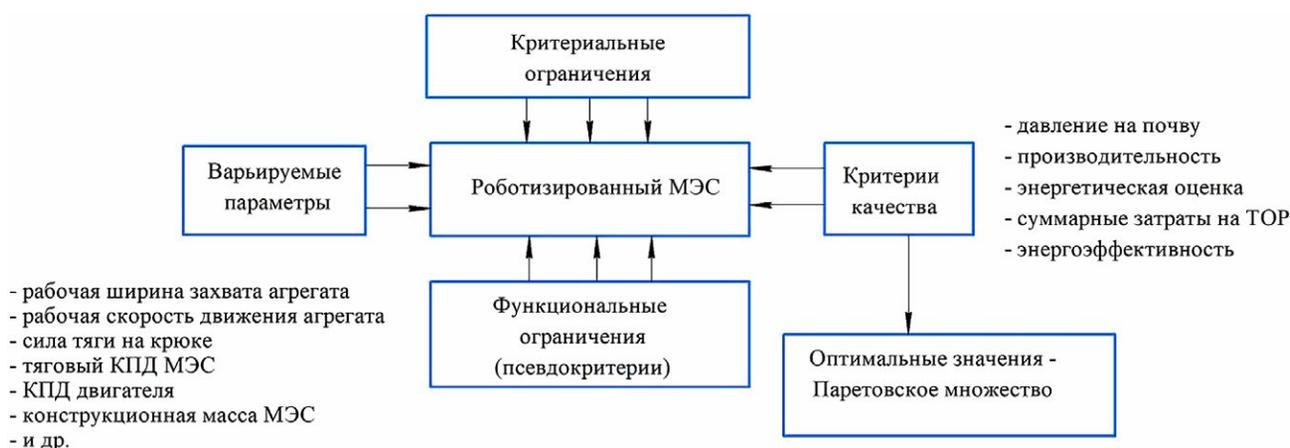


Рис. 1. Алгоритм решения задачи многокритериальной оптимизации функциональных свойств МЭС.

Fig. 1. The algorithm of solving the task of multi-objective optimization of MPE's functional properties.

Таблица 2. Диапазоны изменения варьируемых параметров по МЭС тягового класса 1,4**Table 2.** The value ranges of variable parameters for the MPU of 1.4 drawbar category

Варьируемые параметры	Диапазон изменения
B_p – рабочая ширина захвата агрегата, м;	[1,5–2]
β – коэффициент использования ширины захвата;	[0,75–0,9]
V_p – рабочая скорость движения агрегата, км/ч;	[2–8]
$T_{см}$ – время смены, ч;	[8–16]
τ – коэффициент использования времени смены;	[0,75–0,9]
$\mathcal{E}_{ТР}^6$ – энергозатраты трактора, мДж/ч;	[107–139]
$\mathcal{E}_{ТОП}^6$ – энергозатраты топлива по базовому варианту и коэффициентов, мДж/ч;	[885–1300]
a – отношение конструкционных масс нового и базового тракторов;	[0,7–0,9]
b – отношение нового удельного расхода топлива к базовому;	[0,8–0,95]
c – отношение новой и базовой производительности по спектру выполняемых технологических операций, соответствующих характеристикам нового комплекса машин для всего спектра выполняемых сельскохозяйственных работ;	[1,15–1,25]
n_M – число агрегатов, входящих в РМЭС, шт.;	[1–2]
B_{M_j} – цена j -го агрегата (без НДС), руб.;	[4 000 000–6 000 000]
$\eta_{дв}$ – КПД двигателя;	0,40–0,45
$P_{дв}$ – мощность двигателя, кВт;	50–65
$\eta_{тр}$ – КПД трактора;	0,65–0,75
W – производительность, га/ч;	0,65–0,75
m – масса МЭС (для тягового класса 1,4), кг.	2800–3300

и функциональные ограничения для дальнейшего определения допустимого и Паретовского множества решений [3, 8–11].

На языке программирования «Паскаль» разработана подпрограмма расчета значений критериев качества для проведения многокритериальной оптимизации свойств МЭС. Разработанный программный комплекс позволяет одновременно оптимизировать объект по не менее чем 20 критериям качества и по не менее чем 50 варьируемым параметрам, что достаточно для эффективного и достоверного решения вышеназванной оптимизационной задачи.

Проведенные оптимизационные расчеты позволили вычислить и составить таблицы значений критериев качества в исследуемом пространстве параметров, определения корреляционных полей между критериями качества, получения множества допустимых и Паретовских точек на основе исходных данных по МЭС тягового класса 1,4. Согласно оптимизационным расчетам построена таблица испытаний матрицы значений

критериев качества каждой пробной точки зондированного пространства параметров. Фрагмент таблицы представлен на рис. 2.

После ввода функциональных и критериальных ограничений построены допустимое множество (рис. 3) и множество Парето-оптимальных решений (рис. 4) при общем числе пробных точек (испытаний) 150. Фрагмент общей таблицы испытаний приведен на рис. 5. Количество допустимого множества решений состоит из 11 точек (векторов), а Паретовского множества – из 8.

Также построены графики корреляции между критериями качества. Графики показывают проекции многомерных точек на следующих плоскостях критериев: давление на почву – производительность (рис. 5); энергоэффективность – давление на почву (рис. 6); затраты на ТОП – давление на почву (рис. 7). На графиках область допустимых решений отмечена зелеными квадратами $N=11$, а Парето-оптимальные решения – зелеными треугольниками $N=8$.

Criterion: **Feasible set** Show pseudocriteria

Tests performed: 300 Feasible set contains: 11 Pareto optimal set contains: 8

Vector	1 - dEwp_c -> MIN	2 - Ec_c -> MAX	3 - Zp_c -> MIN	4 - W_c -> MAX	5 - qkmax_c -> MIN
Min:	1,62722699040090E+01	4,14331369728699E+01	1,00477058319039E+02	6,57428672137686E-01	1,27083332635055E+02
Max:	1,85744009910425E+01	6,47976711729862E+01	2,02692084122299E+02	1,18817048956729E+00	2,00838222283041E+02
17	1,71261758914898E+01	4,31281778863137E+01	1,00477058319039E+02	1,07147443886948E+00	2,00483736172566E+02
94	1,62722699040090E+01	5,18559096024029E+01	1,42882570534578E+02	6,70946595071325E-01	1,57066607970506E+02
97	1,84834430045435E+01	4,37894545368265E+01	1,57828950902450E+02	8,56582141296956E-01	1,85907894782428E+02
99	1,70116264291608E+01	4,14331369728699E+01	1,74281480733733E+02	8,27408514199337E-01	1,81633996991460E+02
102	1,67948095920455E+01	5,83200515305239E+01	1,12622409559176E+02	9,83135094010284E-01	1,47839765625000E+02
136	1,85344093830689E+01	5,07519830077618E+01	2,02692084122299E+02	1,18817048956729E+00	2,00838222283041E+02
143	1,85744009910425E+01	5,83945931861190E+01	1,26473235463540E+02	7,78336351034888E-01	1,33435467782148E+02
159	1,77831611637790E+01	5,04131015150616E+01	1,73092344576720E+02	6,57428672137686E-01	1,31788980572456E+02
172	1,84072608976701E+01	4,34727586481459E+01	1,17580848904990E+02	8,17495354962073E-01	1,65096368519717E+02
183	1,81216047553946E+01	6,47976711729862E+01	1,99783581372665E+02	8,93777316223419E-01	1,45378915228545E+02
237	1,79387254801414E+01	6,13746013318748E+01	1,31377314010836E+02	7,85205712601730E-01	1,27083332635055E+02

Рис. 3. Таблица значений критериев в допустимых точках (векторах).
 Fig. 3. The table of criteria values in the acceptable points (vectors).

Criterion: **Pareto optimal set** Show pseudocriteria

Tests performed: 300 Feasible set contains: 11 Pareto optimal set contains: 8

Vector	1 - dEwp_c -> MIN	2 - Ec_c -> MAX	3 - Zp_c -> MIN	4 - W_c -> MAX	5 - qkmax_c -> MIN
Min:	1,62722699040090E+01	4,31281778863137E+01	1,00477058319039E+02	6,57428672137686E-01	1,27083332635055E+02
Max:	1,85744009910425E+01	6,47976711729862E+01	2,02692084122299E+02	1,18817048956729E+00	2,00838222283041E+02
17	1,71261758914898E+01	4,31281778863137E+01	1,00477058319039E+02	1,07147443886948E+00	2,00483736172566E+02
94	1,62722699040090E+01	5,18559096024029E+01	1,42882570534578E+02	6,70946595071325E-01	1,57066607970506E+02
102	1,67948095920455E+01	5,83200515305239E+01	1,12622409559176E+02	9,83135094010284E-01	1,47839765625000E+02
136	1,85344093830689E+01	5,07519830077618E+01	2,02692084122299E+02	1,18817048956729E+00	2,00838222283041E+02
143	1,85744009910425E+01	5,83945931861190E+01	1,26473235463540E+02	7,78336351034888E-01	1,33435467782148E+02
159	1,77831611637790E+01	5,04131015150616E+01	1,73092344576720E+02	6,57428672137686E-01	1,31788980572456E+02
183	1,81216047553946E+01	6,47976711729862E+01	1,99783581372665E+02	8,93777316223419E-01	1,45378915228545E+02
237	1,79387254801414E+01	6,13746013318748E+01	1,31377314010836E+02	7,85205712601730E-01	1,27083332635055E+02

Рис. 4. Таблица значений Парето-оптимальных точек (векторов).
 Fig. 4. The table of values of the Pareto set points (vectors).

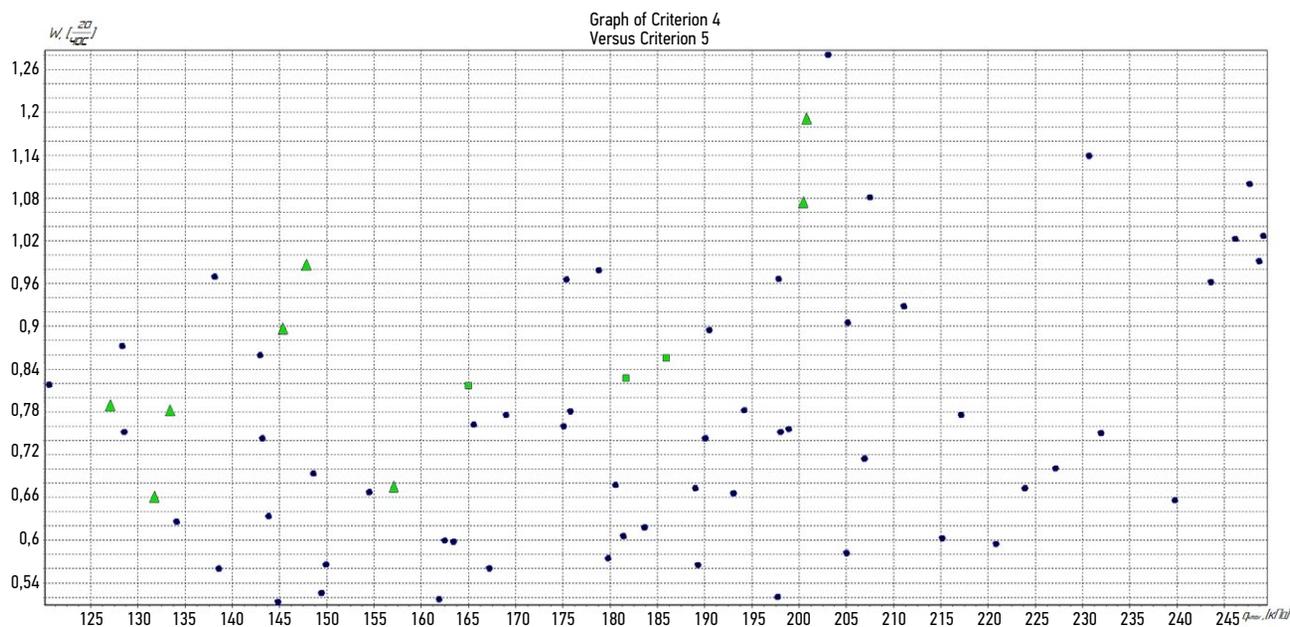


Рис. 5. График корреляции между производительностью и давлением на почву.
 Fig. 5. The graph of correlation between productive capacity and pressure on soil.

Наиболее предпочтительным среди полученных Паретовских точек при работе трактора класса 1,4 на пахоте, по мнению ЛПР, является точка (вектор) № 143 со следующими значениями: давление на почву – 133 кПа; критерии производительности – 0,77 га/ч; суммарные затраты – 126 тыс. рублей; энергетическая оценка – 18,5%, энергоэффективность – 58,3 кВт-ч/га. Выявленная на рисунках корреляция между критериями качества слабая. В связи с этим можно утвердить, что все критерии, которые включены в постановку задачи, должны оставаться в решении оптимизационной задачи.

Следовательно, объединить или заменить два критерия одним нецелесообразно.

ВЫВОДЫ

На основе экспертного анализа и обзора научных работ для постановки многокритерильной задачи оптимизации МЭС сельскохозяйственного назначения тягового класса 1,4 были выбраны 5 значимых критериев качества. К ним относятся энергоэффективность, производительность, давление на почву и энергетическая

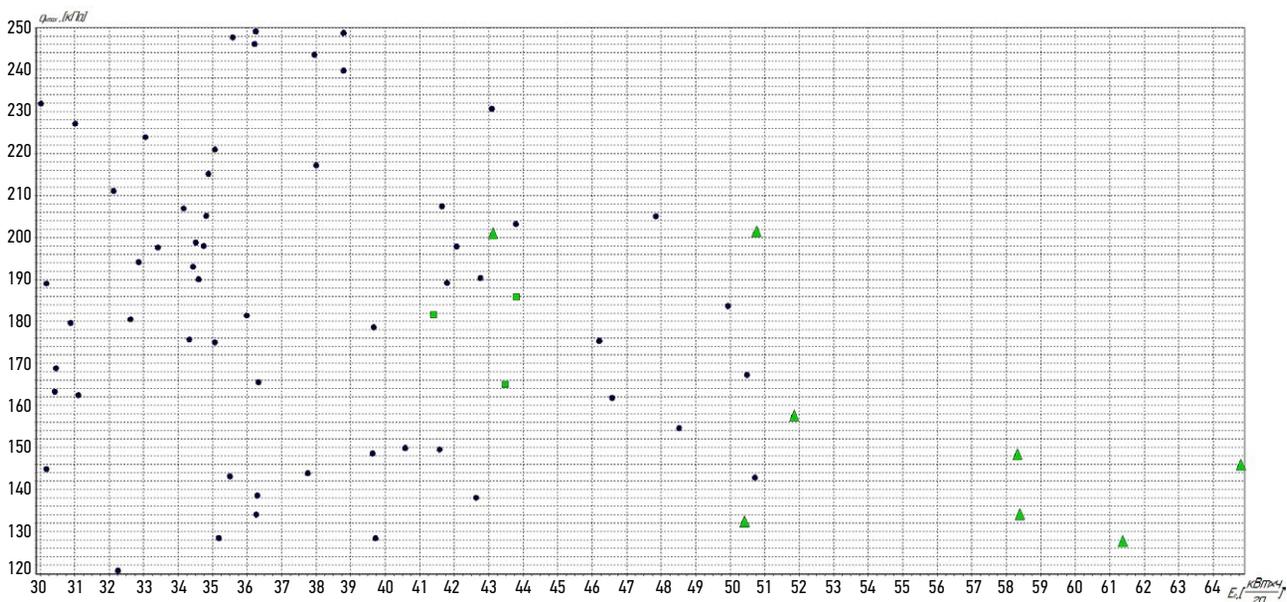


Рис. 6. График корреляции между давлением на почву и энергоэффективностью.
Fig. 6. The graph of correlation between pressure on soil and energy efficiency.

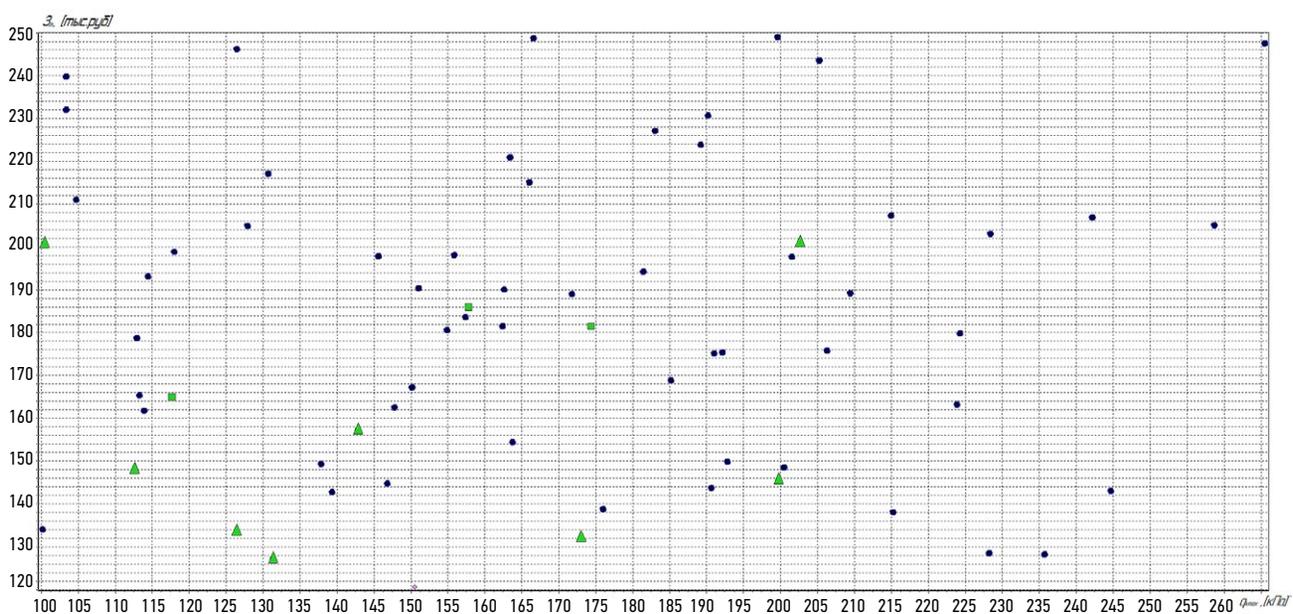


Рис. 7. График корреляции между затратами на ТОР и давлением на почву.
Fig. 7. The graph of correlation between maintenance costs and pressure on soil.

оценка по относительному снижению полных удельных топливно-энергетических затрат. Разработаны оптимизационные математические модели по данным критериям, зависящие от многих варьируемых параметров, выделены пределы их варьирования для проведения оптимизационных расчетов.

Разработанные оптимизационные модели достаточны для достоверной оценки эффективности функционирования МЭС. Данные модели использованы для проведения оптимизационных расчетов и составления программных средств в рамках программного комплекса «Многокритериальной оптимизации конструкций МЭС».

Разработанный программный комплекс позволяет проводить многокритериальную оптимизацию функциональных характеристик МЭС при наличии критериев качества до 20, в том числе и противоречивых, а варьируемых параметров до 50.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. В.А. Зубина — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Т.З. Годжаев — редактирование текста рукописи, утверждение финальной версии; И.С. Малахов — редактирование текста рукописи, создание изображений. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все 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 — search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript; T.Z. Godzhaev — editing the text of the manuscript, approving the final version; I.S. Malakhov — editing the text of the manuscript, creating images. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (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 interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

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

ЛИТЕРАТУРА

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.
2. Годжаев З.А., Сергеев В.Н., Фараджев Ф.А. Многокритериальный выбор эффективной конструкции рамы // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2006. № 3. С. 20–24.
3. Карпенко А.П., Федорук В.Г. Обзор программных систем многокритериальной оптимизации. Отечественные системы // *Информационные технологии*. 2008. № 1. С. 15–22.
4. Бахмутов С.В., Висич Р.Б., Ахмедов А.А., Мальцев П.А. Прикладной программный комплекс для проектирования и доводки автомобильной техники методами многокритериальной параметрической оптимизации // *Известия МГТУ МАМИ*. 2010. № 2. С. 95–97.
5. Statnikov R., Matusov J., Statnikov A. Multicriteria engineering optimization problems: Statement, solution and applications // *J Optim Theory Appl*. 2012. Vol. 155. No 2. P. 355–375. doi: 10.1007/s10957-012-0083-9
6. 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
7. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Дрофа, 2006. 175 с.
8. 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. doi: 10.31992/0321-4443-2020-5-18-24
9. Аверина Т.А. Численные методы. Верификация алгоритмов решения систем со случайной структурой: учебное пособие для вузов. Москва: Издательство Юрайт, 2019. 179 с.
10. 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, 07–09 июня 2017 г. Т. 1*. Краснообск, 2017. С. 235–241.

REFERENCES

1. Gojaev ZA, Faradzhev FA, Matveev EA, Nadezhdin VS. Perspective methods of designing load-bearing systems of motor vehicles taking into account many criteria. *Technology of wheeled and tracked machines*. 2012;(3):18–24. (In Russ).
2. Gojaev ZA, Sergeev VN, Faradzhev FA. Multicriteria choice of an effective frame design. *Tractors and agricultural machinery*. 2006;(3):20–24. (In Russ).

3. Karpenko AP, Fedoruk VG. Review of multi-criteria optimization software systems. Domestic systems. *Information technologies*. 2008;(1):15–22. (In Russ).
4. Bakhmutov SV, Visich RB, Akhmedov AA, Maltsev PA. Applied software complex for designing and fine-tuning of automotive equipment by methods of multi-criteria parametric optimization. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2010;(2):95–97. (In Russ).
5. Statnikov R, Matusov J, Statnikov A. Multicriteria engineering optimization problems: Statement, solution and applications. *J Optim Theory Appl*. 2012;155(2):355–375. doi: 10.1007/s10957-012-0083-9
6. 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
7. Sobol IM, Statnikov RB. The choice of optimal parameters in problems with many criteria: textbook. 2nd ed., revised and updated. Moscow: Drofa; 2006. 175 p. (In Russ).
8. Gojaev 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). doi: 10.31992/0321-4443-2020-5-18-24
9. Averina TA. Numerical methods. Verification of algorithms for solving systems with a random structure: a textbook for universities. Moscow: Yurayt; 2019. 179 p. (In Russ).
10. Shevtsov VG, Lavrov AV, Zubina VA, Gurylev GS. Principal signs of a narrowed type of agricultural production. Scientific and technical support of the agro-industrial complex of Siberia: Materials of the International Scientific and Technical Conference, June 07–09, 2017. Vol. 1. Krasnoobsk; 2017. P. 235–241. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

*Годжаев Теймур Захидович,

заведующий сектором координации деятельности технологической платформы;
адрес: Российская Федерация, 109428, г. Москва,
1-й Институтский проезд, д. 5;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4496-0711>;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: tgodzhaev95@yandex.ru

Зубина Валерия Александровна,

канд. техн. наук,
старший научный сотрудник лаборатории систем
мобильных энергетических средств;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6657-1899>;
eLibrary SPIN: 3410-5062;
e-mail: lera_zubina@mail.ru

Малахов Иван Сергеевич,

младший научный сотрудник сектора координации
деятельности технологической платформы;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8162-7718>;
eLibrary SPIN: 7067-6972;
e-mail: malakhovivan2008@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

*Teymur Z. Godzhaev,

Head of the Coordination Sector of Technological Platform;
address: 5 1st Institutsky passage, 109428 Moscow, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4496-0711>;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: tgodzhaev95@yandex.ru

Valeriya A. Zubina,

Cand. Sci. (Tech.),
Senior Researcher of the Laboratory of Mobile Power Systems;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6657-1899>;
eLibrary SPIN: 3410-5062;
e-mail: lera_zubina@mail.ru

Ivan S. Malakhov,

Junior Researcher of the Coordination Sector of Technological
Platform;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8162-7718>;
eLibrary SPIN: 7067-6972;
e-mail: malakhovivan2008@mail.ru

*Corresponding author