# МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОИСК НАИЛУЧШИХ КОНФИГУРАЦИЙ БПЛА ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕЛКОГО РОГАТОГО СКОТА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Научная статья

**Соловьев С.А.[1], Мисюрин С.Ю.[2], Нелюбин А.П.[3], Носова Н.Ю.[4,] ***

[2] ORCID : 0000-0003-1020-0527;

[3] ORCID : 0000-0002-7064-3103;

[4] ORCID : 0000-0002-1213-9312;

[1] Российская академия наук, Москва, Российская Федерация

[2, 3, 4] Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (natahys[at]mail.ru)

**Аннотация**

В статье предложен метод поиска лучших конфигураций роботов в неизвестных заранее условиях функционирования, позволяющий находить решения, близкие к оптимальным, с помощью ограниченного количества натурных испытаний. Рассмотрена задача обработки дезинфицирующим раствором мелкого рогатого скота, прежде всего овец, с помощью БПЛА, оснащенных механизмом распрыскивания жидкости. Обработка заключается в промачивании всей поверхности шерстного покрова. В качестве показателя эффективности различных конфигураций БПЛА выбрано время, необходимое БПЛА для обработки заданного количества голов при произвольно задаваемых внешних условиях. Алгоритм поиска основан на многокритериальном анализе векторных характеристик роботов с использованием методов теории важности критериев. Путем выяснения информации об относительной важности критериев и росте предпочтений вдоль шкалы критериев строится функция ценности конфигураций БПЛА. С использованием простой имитационной модели был проведен численный эксперимент для 1000 различных условий функционирования. Эффективность предлагаемого метода подтверждается малым размером отклонений найденных решений от оптимальных.

**Ключевые слова:** сельское хозяйство, санитария, дистанционная обработка скота, БПЛА, многокритериальный поиск.

# MULTI-CRITERIA SEARCH FOR THE BEST UAV CONFIGURATIONS FOR SMALL CATTLE TREATMENT IN AGRICULTURE

Research article

**Solovev S.A.[1], Misyurin S.Y.[2], Nelyubin A.P.[3], Nosova N.Y.[4,] ***

[2] ORCID : 0000-0003-1020-0527;

[3] ORCID : 0000-0002-7064-3103;

[4] ORCID : 0000-0002-1213-9312;

[1] Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[2, 3, 4] Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (natahys[at]mail.ru)

**Abstract**

The article proposes a method of searching for the best robot configurations in unknown in advance functioning conditions, which allows finding solutions close to the optimal ones by means of a limited number of full-scale tests. The problem of disinfectant solution treatment of small cattle, first of all sheep, using UAVs equipped with a liquid spraying mechanism is studied. The treatment consists in wetting the entire surface of the wool cover. The time required by the UAV to treat a given number of heads under arbitrarily given external conditions is chosen as an indicator of the efficiency of different UAV configurations. The search algorithm is based on multi-criteria analysis of the vector characteristics of the robots using criterion importance theory methods. By finding out information about the relative importance of criteria and the growth of preferences along the criteria scale, a value function of UAV configurations is constructed. Using a simple simulation model, a numerical experiment has been conducted for 1000 different operating conditions. The effectiveness of the suggested method is confirmed by the small size of deviations of the found solutions from the optimal ones.

**Keywords:** agriculture, sanitation, remote cattle treatment, UAV, multi-criteria search.

## Введение

В настоящее время большое применение в народном хозяйстве, в частности в сельском хозяйстве, находят мобильные роботы. Мобильные роботы используются для выполнения самых различных задач, как под управлением оператора, так и самостоятельно управляемые искусственным интеллектом с использованием систем машинного обучения. В животноводстве беспилотная техника используются для оценки продуктивности и травостоя близлежащих пастбищ для перегона скота, контроля точного местонахождения группы животных, управления передвижением группы животных, определения местоположения отбившихся животных, подгон их к основной группе и месту ночевки [1]. При эксплуатации сельскохозяйственной техники БПЛА могут использоваться для своевременной доставки материалов и запасных частей [2].

Преимущества и недостатки применение БПЛА в сельском хозяйстве и оценка их важности для отрасли рассмотрены в работах [3], [4]. В [5] обобщены исследования беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве и предложены направления будущих исследований.

Одной из актуальных проблем в сельском хозяйстве является ветеринарно-санитарная обработка животных — мелкого рогатого скота, прежде всего овец. Обработка заключается в промачивании дезинфицирующим раствором всей поверхности шерстного покрова. Проводится, как правило, после стрижки овец в специальных загонах. Традиционно обработка проводится с помощью купочных и душевых установок и сопряжена с очень большими затратами времени и средств. В данной работе рассматривается применение БПЛА для обработки дезинфицирующим раствором мелкого рогатого скота путем облета животного (рис. 1). За счет точности обработки шерстяного покрова такой способ позволяет сократить расход дезинфицирующего раствора и тем самым удовлетворить экологическим требованиям.

Рисунок 1 - Ветеринарно-санитарная обработка овец после стрижки в специальных загонах с помощью БПЛА

Обработку может производить как один БПЛА, так и несколько. Очень важно подобрать БПЛА с определенными характеристиками и параметрами. Здесь мы имеем задачу параметрической оптимизации. При обработке скота несколькими аппаратами мы имеем задачу группового управления роботами, распределение задач между роботами с целью минимизации времени обработки. Траектории БПЛА не должны пересекаться, каждый может запускаться с разных участков, либо все поочерёдно с одного. Ставится задача — произвести обработку стада за минимальное время. Во время работы некоторые аппараты могут выходить из строя или у них заканчивается дезинфицирующий раствор, поэтому следует предусмотреть возможность перераспределение их задач. Таким образом, мы имеем задачу оптимального выбора параметров, оптимального управления при изменении условий во время работы, задачу создания адаптируемых систем.

Учеными во всем мире ведутся работы по исследованию БПЛА, повышению их мобильности, производительности и получению новых возможностей за счет лётных характеристик и применения искусственного интеллекта. Одной из основных проблем проектирования адаптируемых систем является разработка методов и алгоритмов автоматического определения оптимальных или наиболее целесообразных решений в процессе функционирования системы при изменении внешних условий, целей и других факторов. Поскольку это происходит в режиме реального времени, количество необходимых испытаний должно быть сведено к минимуму. Эта особенность задачи не позволяет использовать большинство классических методов оптимизации, а также современные популяционные подходы [6], предполагающие перебор довольно большого числа вариантов решений. В этом смысле эффективны методы многокритериального анализа принятия решений [7], [8], основанные на теории важности критериев [9], [10], [11]. Авторами предложен многокритериальный подход к проектированию групп роботов, который позволяет за счет оценки производительности сравнительно небольшого числа эталонных роботов существенно сократить область поиска лучших решений и предложить оптимальные или близкие к оптимальным решения [12], [13], [14]. Данная работа является продолжением этих исследований. Помимо информации об относительной

важности критериев, в данной работе оцениваются значения градаций шкалы критериев и строится функция ценности конфигураций БПЛА.

**Имитационная модель и постановка задачи оптимизации**

Варьируемые параметры $x$ БПЛА включают геометрию и габариты корпуса, диаметр и материал пропеллеров, количество и мощность двигателей, количество и мощность форсунок, набираемый за один раз объем дезинфицирующего раствора. От параметров зависят характеристики БПЛА:

$v$ — развиваемая скорость полета (с нагрузкой в среднем), от 6 до 15 м/с;

$q$ — максимальная скорость опрыскивания, от 2 до 4 л/мин;

$c$ — оценка управляемости при полете, от 0 до 9;

$s$ — оценка способности удерживаться над животным, от 0 до 9;

$m$ — полезная нагрузка, от 7 до 25 л.

В силу имеющихся ограничений, у отдельного БПЛА не могут быть достигнуты наилучшие значения сразу по всем характеристикам. Но мы можем подбирать БПЛА, у которых лучше будут те характеристики, которые важнее для нас, которые позволят более эффективно выполнять задачу в имеющихся условиях функционирования.

Условия функционирования $\lambda$ определяются заданием БПЛА (вид обрабатываемого скота, размеры загона, необходимый расход дезинфицирующего раствора), а также прочими условиями:

$\lambda_1$ — необходимый расход дезинфицирующего раствора на голову, от 0.3 до 0.8 л;

$\lambda_2$ — общая дистанция перелетов между животными, от 100 до 5000 м;

$\lambda_3$ — средняя дополнительная дистанция для дозаправки БПЛА, от 100 до 3000 м;

$\lambda_4$ — оценка сложности из-за подвижности скота, от 0 до 9;

$\lambda_5$ — оценка сложности прочих условий (ветер, температура, влажность), от 0 до 9.

Основным показателем эффективности БПЛА считаем время, за которое будет обработано определенное количество голов $N = 100$. Траекторию полета БПЛА можно условно поделить на 2 части. На одной части БПЛА выполняет полезную работу, т.е. распыляет дезинфицирующего раствора над скотом. На второй части траектории БПЛА летит в холостую, перелетая между скотом или возвращаясь на дозаправку раствором. При уменьшении объема загружаемого дезинфицирующего раствора $m$ повышаются оценки полетных характеристик БПЛА, но увеличиваются затраты времени на дозаправки. Общее время выполнения задачи складывается из расхода времени на каждом участке траектории:

$$T(x,\lambda) = T_q(x,\lambda) + T_v(x,\lambda). \quad (1)$$

Затрачиваемое время БПЛА на рабочем участке пропорционально суммарной потребности в дезинфицирующем растворе, обратно пропорционально скорости опрыскивания, а также зависит от прочих условий и способности БПЛА удерживаться над животным и при этом сохранять устойчивость в этих условиях. Для оценки этого времени будем использовать упрощенную модель:

$$T_q(x,\lambda) = \frac{N\lambda_1}{q(x)} \cdot \left(1 + \frac{5+\lambda_4+\lambda_5}{5+0.1c(x)+s(x)}\right). \quad (2)$$

Время перелетов БПЛА на холостых участках траектории пропорционально общей их дистанции, обратно пропорционален скорости полета, а также зависит от прочих условий и способности БПЛА сохранять управляемость в этих условиях. Дистанция перелетов складывается из фиксированной части $\lambda_2$ и дистанции на возврат $\lambda_3$, умноженной на необходимое количество дозаправок. Для оценки этого времени будем использовать упрощенную модель:

$$T_v(x,\lambda) = \frac{1}{v(x)}\left(\lambda_2 + \lambda_3\frac{S\lambda_1}{m(x)}\right)\left(1 + \frac{5+2\lambda_5}{5+c(x)+0.1s(x)}\right). \quad (3)$$

Модель (1)–(3) описывает целевую функцию задачи оптимизации. При заданных параметрах $\lambda$ требуется найти допустимую конфигурацию робота $x^*$, обеспечивающую минимальное значение функции $T(x^*,\lambda)$. Заметим, что при своей простоте, функция $T(x,\lambda)$ нелинейная и имеет переменные с дискретными значениями. В реальных условиях предполагается определение времени работы БПЛА экспериментальным путем. Поэтому при разработке метода оптимизации желательно использовать как можно меньшее количество вычислений функции $T(x,\lambda)$.

**Многокритериальный анализ решений методами теории важности критериев**

Для решения поставленной задачи оптимизации предлагается использовать методы многокритериального анализа задач принятия решений [7], [8] и теории важности критериев [9], [10], [11], в которой формально определены понятия о важности критериев.

Рассмотрим многокритериальную задачу выбора лучшей векторной оценки $y = (y_1, ..., y_n)$, $n \geq 2$, из конечного множества $Y$. Пусть шкала оценки по каждому критерию состоит из $q$ градаций (баллов) $\{1, ..., q\}$. Эту общую для всех критериев шкалу будем считать порядковой: при $1 \leq a < b \leq q$ можно сказать, что оценка $b$ лучше (предпочтительнее) оценки $a$, однако нельзя сказать, насколько или во сколько раз лучше. На множестве векторных оценок $Y$ можно ввести отношение предпочтения (доминирования) по Парето:

$$yP^{\emptyset}z \Leftrightarrow y_i \geq z_i, i = 1, ..., n, y \neq z. \quad (4)$$

Известно, что лучшее решение следует выбирать среди Парето-оптимальных векторных оценок $Y^{\emptyset}$ — векторных оценок, которые недоминируемы по отношению Парето ни одной другой векторной оценкой из множества

$Y$ . Однако множество Парето $Y^{\emptyset}$ обычно содержит много решений. Для сужения этого множества в теории важности критериев используется информация об относительной важности критериев и о скорости роста предпочтений вдоль шкалы критериев.

Качественная информация $\Omega$ о важности критериев состоит из сообщений $i \succ j$ — «критерий с номером $i$ важнее критерия с номером $j$ », а также $i \sim j$ — «критерии с номерами $i$ и $j$ равноважны». Формально это означает следующее [10]:

$$i \succ j \Leftrightarrow \forall y \in Y \rightarrow yP^{i \succ j}y^{ij}, y_i > y_j;$$
$$i \sim j \Leftrightarrow \forall y \in Y \rightarrow yI^{i \sim j}y^{ij}, y_i \neq y_j,$$

где векторная оценка $y^{ij}$ получена перестановкой $i$ -й и $j$ -й компонент векторной оценки $y$ . С использованием информации $\Omega$ , на множестве векторных оценок строится отношение предпочтения $P^{\Omega}$ , расширяющее отношение Парето $P^{\emptyset}$ . В результате множество векторных оценок $Y^{\Omega}$ , недоминируемых по отношению $P^{\Omega}$ , становится меньше, чем $Y^{\emptyset}$ .

Количественная информация о важности критериев состоит из сообщений «критерий с номером $i$ важнее критерия с номером $j$ в $h_{ij}$ раз» [11]. На основе этих степеней превосходства в важности рассчитываются коэффициенты важности критериев $\alpha_i$ : $h_{ij} = \alpha_i / \alpha_j$ ; $\alpha_1 + \cdots + \alpha_n = 1$ .

Помимо информации о важности критериев в теории используется дополнительная информация о скорости роста предпочтений вдоль шкалы критериев $\{1, ..., q\}$ . Для этого вводится понятие ценности $\nu(k)$ градации шкалы с номером $k$ , а также приращения ценности $\delta k = \nu(k+1) - \nu(k)$ , $k = 1, ..., q-1$ . Для порядковой шкалы выполняется $\nu(1) < ... < \nu(q)$ .

Если количественно оценить значения коэффициентов важности $\alpha_i$ и ценностей градаций $\nu(k)$ , то можно сделать допущение о существовании аддитивной функции ценности вида [7], [8], [10]:

$$V(y) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \nu(y_i). \quad (5)$$

Тогда выбор наилучшей векторной оценки $y^V$ можно осуществить, решая задачу максимизации функции $V(y)$ на $Y$ . Если дополнительно предположить, что $\nu(1) = 0$ и $\nu(q) = 1$ , то функция ценности $V(y)$ будет иметь диапазон значений [0;1].

**Описание метода многокритериального поиска предпочтительных решений**

Перечисленные пять характеристик БПЛА будем использовать в качестве критериев многокритериальной задачи выбора лучшей конфигурации робота. Для этого приведем их к общей 10-балльной шкале {1, …, 10}, используя следующие соотношения:

$$\nu = 5 + y_1, q = 2 + \tfrac{2}{9}(y_2 - 1), c = y_3 - 1, s = y_4 - 1, m = 5 + 2y_5. \quad (6)$$

Далее будем решать задачу оптимизации функции $T(y, \lambda)$ , полученной из (1)-(3) с помощью преобразований (6), и выбора наилучших векторных характеристик $y = (y_1, ..., y_5)$ . С учетом ограничений, было получено 72294 допустимых значений вектора $y(x)$ . Из них 1893 являются оптимальными по Парето (4). Поскольку функция $T(y, \lambda)$ является убывающей по $y_1, ..., y_5$ , то при любых значениях параметров $\lambda$ наилучшее решение будет находиться среди множества Парето $Y^{\emptyset}$ . Поиск и выбор этого наилучшего решения уже зависит от конкретных значений параметров $\lambda$ . Чтобы оценить эффективность предлагаемого метода, проведем 1000 испытаний, в которых значения вектора $\lambda$ будут сгенерированы случайным образом.

Для оценки информации об относительной важности критериев используем ранее предложенный в работе [14] метод. Для этого производятся вычисления показателей эффективности у $n + 1 = 6$ эталонных роботов с векторными оценками:

$$e^0 = (a, a, a, a, a), e^1 = (b, a, a, a, a), e^2 = (a, b, a, a, a),$$
$$e^3 = (a, a, b, a, a), e^4 = (a, a, a, b, a), e^5 = (a, a, a, a, b). \quad (7)$$

Информация об упорядочении критериев по важности получается путем попарного сравнения показателей эффективности БПЛА с эталонными оценками $e^1, ..., e^5$ :

$$T(e^i, \lambda) > T(e^j, \lambda) \Rightarrow i \succ j; T(e^i, \lambda) = T(e^j, \lambda) \Rightarrow i \sim j. \quad (8)$$

Количественная информация о важности критериев получается путем сравнения показателя эффективности робота с эталонной векторной оценкой $e^i$ и математического ожидания показателя эффективности робота, который с вероятностью $p$ имеет векторную оценку $e^j$ , а с вероятностью $(1-p)$ — векторную оценку $e^0$ . Вычисляется равновесная вероятность $p_{ij}^*$ , при которой эти показатели эффективности равны:

$$T(e^j, \lambda) = p_{ij}^* T(e^i, \lambda) + (1 - p_{ij}^*) T(e^0, \lambda).$$

Степень превосходства в важности критерия с номером $i$ над критерием с номером $j$ является обратной величиной к вычисленной равновесной вероятности $p_{ij}^*$ (см. [11], [14]):

$$h_{ij} = \frac{\alpha_i}{\alpha_j} = \frac{1}{p_{ij}^*} = \frac{T(e^0, \lambda) - T(e^i, \lambda)}{T(e^0, \lambda) - T(e^j, \lambda)} \quad (9)$$

В дополнение к информации о важности критериев в данной работе предлагается определять информацию о росте предпочтений вдоль шкалы критериев, а именно как соотносятся между собой приращения ценности $\delta k, k = 1, ..., 9$. Для этого потребуется оценить эффективность дополнительного набора роботов со специально подобранными векторными оценками.

Для формирования новых эталонных векторных оценок, будем варьировать значения оценок по первым двум критериям, а остальные оценки положим одинаковыми и равными $d$. Введем обозначения для новых эталонных векторных оценок:

$$g^k = (k, k, d, d, d), k = 1, ..., 9,$$
$$g^{k\pm} = (k+1, k-1, d, d, d), g^{k\mp} = (k-1, k+1, d, d, d), k = 2, ..., 9 \quad (10)$$

Сравнивая функции ценности эталонных векторных оценок $g^k$ и $g^{k\pm}$ для некоторого $k = 2, ..., 9$, можно сделать следующий вывод:

$V(g^k) \geq V(g^{k\pm}) \Leftrightarrow \alpha_2 \delta_{k-1} \geq \alpha_1 \delta_k.$

Если показатели эффективности $T(y, \lambda)$ двух роботов с векторными оценками $g^k$ и $g^{k\pm}$ совпадают, то можно считать, что и их функции ценности равны. Тогда:

$\frac{\delta_{k-1}}{\delta_k} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}.$

Пусть $T(g^k, \lambda) > T(g^{k\pm}, \lambda)$. Воспользуемся приемом, аналогичным тому, что использовался ранее при оценке степеней превосходства в важности критериев. Сравним показатель эффективности робота с эталонной векторной оценкой $g^{k\pm}$ и математическое ожидание показателя эффективности робота, который с вероятностью $p_k$ имеет векторную оценку $g^k$, а с вероятностью $(1 - p_k)$ – векторную оценку $g^{k-1}$. Вычислим равновесную вероятность $p_k^*$, при которой эти показатели эффективности равны:

$T(g^{k\pm}, \lambda) = p_k^* T(g^k, \lambda) + (1 - p_k^*) T(g^{k-1}, \lambda).$

Приравнивая также функцию ценности векторной оценки $g^{k\pm}$ и математическое ожидание функций ценности векторных оценок $g^k$ и $g^{k-1}$, получим:

$$V(g^{k\pm}) = p_k^* V(g^k) + (1 - p_k^*) V(g^{k-1}),$$
$$\alpha_1 \delta_k = p_k^* \alpha_2 \delta_{k-1} + (1 - p_k^*) \cdot 0,$$
$$\frac{\delta_{k-1}}{\delta_k} = \frac{\alpha_1}{p_k^* \alpha_2} = \frac{T(e^0,\lambda) - T(e^1,\lambda)}{T(e^0,\lambda) - T(e^2,\lambda)} \frac{T(g^{k-1},\lambda) - T(g^k,\lambda)}{T(g^{k-1},\lambda) - T(g^{k\pm},\lambda)}. \quad (11)$$

Для случая $T(g^k, \lambda) < T(g^{k\pm}, \lambda)$ получается та же формула (11).

Получив оценки величин $\alpha_i$ и $\nu(k)$, среди Парето-оптимальных решений $Y^{\emptyset}$ выберем векторную оценку $y^V$ с максимальным значением функции ценности $V(y)$.

Предложенный метод количественного оценивания величин $\delta_k$ требует вычисления показателей эффективности у дополнительных $2q - 3 = 17$ роботов с эталонными векторными оценками $g^k$, $k = 1, ..., q-1$, и $g^{k\pm}$, $k = 2, ..., q-1$. Таким образом, всего потребуется $n + 2q = 23$ эталонных векторных оценок.

**Результаты численного эксперимента**

Было произведено 1000 численных испытаний, в которых значения компонент вектора $\lambda$ были получены с помощью генератора случайных чисел. В Таблице 1 представлены результаты, полученные в первых 10 испытаниях и в среднем по всем 1000 испытаниям для значений (*a*, *b*, *c*), равных (6, 9, 3). Эти значения подбирались так, чтобы все эталонные векторные оценки (7) и (10) были допустимы и находились как можно ближе к Парето-оптимальным. В столбцах таблицы 1 приведены значения параметра $\lambda$, оптимальная векторная оценка $y^*$ и значение ее показателя эффективности $T(y^*, \lambda)$. Далее приводится полученная с помощью соотношений (8) информация $\Omega$ об упорядочении критериев по важности, количество недоминируемых по отношению $P^{\Omega}$ векторных оценок $Y^{\Omega}$ и разброс значений $\Delta T^{\Omega}$ показателя эффективности на этом множестве. Следом приводится найденная предложенным методом векторная оценка $y^V$, имеющая максимальное значение функции ценности $V(y^V)$ (5). В следующем столбце приведено отклонение значения показателя эффективности найденного решения от оптимального, в абсолютном и процентном выражении. В последнем столбце приведена разница значений функции ценности найденного решения и оптимального.

Таблица 1 - Результаты первых 10 испытаний при (a, b, d) = (6, 9, 3)

| λ | y* | T(y*, λ) | $\Delta T^{\varnothing}$ | | Ω | $\lvert Y^{\Omega}\rvert$ | $\Delta T^{\Omega}$ | | $y^{V}$ | $V(y^{V})$ | $T(y^{V}, \lambda)-T(y^{*}, \lambda)$ | | $V(y^{V})-V(y^{*})$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | n | % | | | n | % | | | n | % | |
| (0.735, 4412, 941, 6, 5) | (6, 7, 7, 8, 7) | 77,8917 | 84,1 | 108 | 2>4>1>3>5 | 182 | 52,6 | 68 | (6, 7, 7, 8, 7) | 0,9541 | 0 | 0 | 0 |
| (0.695, 1521, 2507, 9, 6) | (6, 7, 7, 7, 8) | 93,4746 | 131,2 | 140 | 2>5>4>1>3 | 151 | 53,6 | 57 | (6, 7, 7, 7, 8) | 0,9328 | 0 | 0 | 0 |
| (0.445, 5000, 2362, 5, 5) | (7, 6, 7, 7, 8) | 64,6648 | 86,1 | 133 | 1>2>3>5>4 | 203 | 40,1 | 62 | (7, 6, 8, 7, 7) | 0,8051 | 0,0187 | 0,03 | 0 |
| (0.315, 1570, 1492, 1, 4) | (6, 7, 7, 7, 8) | 29,8323 | 32,4 | 108 | 2>1>5>4>3 | 203 | 17,9 | 60 | (6, 7, 7, 7, 8) | 0,9138 | 0 | 0 | 0 |

| λ | y* | T(y*, λ) | $\Delta T^{ø}$ | | Ω | $\lvert Y^{\Omega}\rvert$ | $\Delta T^{\Omega}$ | | $y^{V}$ | $V(y^{V})$ | $T(y^{V}, \lambda)-T(y^{*}, \lambda)$ | | $V(y^{V})-V(y^{*})$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | n | % | | | n | % | | | n | % | |
| (0.56, 1717, 187, 7, 9) | (5, 8, 6, 10, 4) | 51,6359 | 89,2 | 173 | 2>4>3>1>5 | 151 | 24,7 | 48 | (6, 8, 7, 8, 5) | 0,9983 | 1,2169 | 2,3 | 0,0019 |
| (0.73, 5000, 1724, 4, 7) | (7, 6, 7, 8, 7) | 95,6214 | 114,6 | 120 | 1>2>4>3>5 | 203 | 56,9 | 59 | (7, 6, 7, 8, 7) | 0,6305 | 0 | 0 | 0 |
| (0.325, 1913, 1637, 8, 5) | (6, 7, 7, 8, 7) | 39,9749 | 39,9 | 100 | 2>4>1>5>3 | 182 | 30,3 | 76 | (6, 7, 7, 8, 7) | 0,9278 | 0 | 0 | 0 |
| (0.455, 2011, 100, 2, 2) | (6, 9, 6, 8, 3) | 27,4796 | 36,6 | 133 | 2>4,1>3>5 | 182 | 15,3 | 56 | (6, 8, 7, 8, 5) | 0,9971 | 0,6618 | 2,35 | 0,0024 |

| λ | y* | T(y*, λ) | $\Delta T^{ø}$ | | Ω | $\lvert Y^{\Omega}\rvert$ | $\Delta T^{\Omega}$ | | $y^{V}$ | $V(y^{V})$ | $T(y^{V}, \lambda)-T(y^{*}, \lambda)$ | | $V(y^{V})-V(y^{*})$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | n | % | | | n | % | | | n | % | |
| (0.73, 2354, 2391, 4, 1) | (6, 8, 5, 7, 8) | 66,4844 | 86,5 | 130 | 2>1>5>4>3 | 203 | 28,8 | 43 | (6, 7, 7, 7, 8) | 0,9288 | 0,2066 | 0,31 | 0,0036 |
| (0.49, 4020, 999, 0, 1) | (8, 8, 5, 6, 6) | 37,0952 | 29,8 | 80 | 2>1>4>5>3 | 203 | 21,5 | 58 | (7, 7, 6, 7, 7) | 0,8967 | 0,4862 | 1,29 | 0,0012 |
| В среднем из 1000 испытаний | - | - | - | 129 | - | 180 | - | 59 | - | - | 0,4305 | 0,83 | 0,0016 |

**Заключение**

В результате проведения численного эксперименты была установлена эффективность предложенного метода. Он позволил на простой имитационной модели сократить область поиска лучших решений и найти близкие к оптимальным решения путем вычисления целевой функции всего для 23 специально подобранных вариантов. Отклонение от оптимального решения было зафиксировано в 55% случаев и в среднем составило 0.83% от оптимального значения целевой функции.

Описанную процедуру поиска лучшей конфигурации робота через тестирование эталонных роботов можно провести один раз в самом начале, перед выполнением основных работ, выполняемых группой роботов. Кроме того, можно проводить онлайн адаптацию роботов к меняющимся условиям и предпочтениям. Для этого параллельно с группой роботов с «рабочей» конфигурацией можно запустить 23 эталонных роботов и отслеживать изменения показателей их эффективности в режиме реального времени. При существенном изменении условий и предпочтений, можно рассмотреть целесообразность изменения «рабочей» конфигурации на новую, более приспособленную к сменившимся условиям.


**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.


## Список литературы / References


1. Соловьев С.А. Дроны в сельскохозяйственном производстве. / С.А. Соловьев, Ю.А. Цой, А.В. Амшоков и др. // Инновации в сельском хозяйстве. — 2018. — 1(26). — С. 262–268.
2. Соловьев С.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для повышения эффективности эксплуатации автотракторной, сельскохозяйственной и лесозаготовительной техники. / С.А. Соловьев, В.С. Герасимов, В.И. Игнатов и др. // Труды ГОСНИТИ. — 2015. — 120. — С. 27–33.
3. Ozguven M. Tarımda Drone Kullanımı ve Geleceği [Use of Drones in Agriculture and Its Future] / M. Ozguven, Z. Altaş, D. Güven [et al.] // Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi [Ordu University Science and Technology Journal]. — 2022. — Vol. 12. — Iss.1 — P. 64–83. [in Turkish]
4. Puri V. Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. / V. Puri, A. Nayyar, L. Raja // Journal of Statistics and Management Systems. — 2017. — Vol. 20. — Iss. 4. — P. 507–518.
5. Rejeb A. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. / A. Rejeb, A. Abdollahi, K. Rejeb et al. // Computers and Electronics in Agriculture. — 2022. — Vol. 198. — P. 1–19 (107017).
6. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. / А.П. Карпенко // Приложение к Информационные технологии. — 2012. — 7. — С. 1–32.
7. Keeney R.L. Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs / R.L. Keeney, H. Raiffa. — New York: Wiley, 1976. — 569 p.
8. Fishburn P.C. Decision and value theory / P.C. Fishburn. — New York: Wiley, 1964. — 451 p.
9. Подиновский В.В. Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В.В. Подиновский. — Москва: Наука, 2019. — 103 с.
10. Подиновский В.В. Многокритериальные задачи с упорядоченными по важности однородными критериями. / В.В. Подиновский // Автоматика и телемеханика. — 1976. — 11. — С. 118–127.
11. Podinovski V.V. The quantitative importance of criteria For MCDA. / V.V. Podinovski // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. — 2002. — Vol. 11. — Iss. 1. — P. 1–15.
12. Misyurin S.Yu. Multicriteria approach to control a population of robots to find the best solutions. / S.Yu. Misyurin, A.P. Nelyubin, M.A. Potapov // Advances in Intelligent Systems and Computing. Biologically Inspired Cognitive Architectures. — 2020. — Vol. 948. — P. 358–363.
13. Misyurin S.Yu. Dominance relations approach to design and control configuration of robotic groups. / S.Yu. Misyurin, A.P. Nelyubin // Procedia Computer Science. — 2021. — Vol. 190. — P. 622–630.
14. Misyurin S.Yu. Multicriteria search for preferred configurations of modular robots for cargo transportation. / S.Yu. Misyurin, A.P. Nelyubin // Procedia Computer Science. — 2022. — Vol. 213. — P. 623–630.


## Список литературы на английском языке / References in English


1. Solov'ev S.A. Drony' v sel'skoxozyajstvennom proizvodstve [Drones in agricultural production]. / S.A. Solov'ev, Yu.A. Czoj, A.V. Amshokov et al. // Innovations in agriculture. — 2018. — 1(26). — P. 262–268. [in Russian]
2. Solov'ev S.A. Primenenie bespilotny'x letatel'ny'x apparatov dlya povy'sheniya e'ffektivnosti e'kspluatacii avtotraktornoj, sel'skoxozyajstvennoj i lesozagotovitel'noj texniki [The use of unmanned aerial vehicles to increase the efficiency of operation of automotive, agricultural and forestry machinery]. / S.A. Solov'ev, V.S. Gerasimov, V.I. Ignatov et al. // Proceedings of GOSNITI. — 2015. — 120. — P. 27–33. [in Russian]

3. Ozguven M. Tarımda Drone Kullanımı ve Geleceği [Use of Drones in Agriculture and Its Future] / M. Ozguven, Z. Altaş, D. Güven [et al.] // Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi [Ordu University Science and Technology Journal]. — 2022. — Vol. 12. — Iss. 1 — P. 64–83. [in Turkish]

4. Puri V. Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. / V. Puri, A. Nayyar, L. Raja // Journal of Statistics and Management Systems. — 2017. — Vol. 20. — Iss. 4. — P. 507–518.

5. Rejeb A. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. / A. Rejeb, A. Abdollahi, K. Rejeb et al. // Computers and Electronics in Agriculture. — 2022. — Vol. 198. — P. 1–19 (107017).

6. Karpenko A.P. Populyacionny'e algoritmy' global'noj poiskovoj optimizacii. Obzor novy'x i maloizvestny'x algoritmov [Population algorithms of global search engine optimization. Review of new and little-known algorithms]. / A.P. Karpenko // Supplement to Information Technologies. — 2012. — 7. — P. 1–32. [in Russian]

7. Keeney R.L. Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs / R.L. Keeney, H. Raiffa. — New York: Wiley, 1976. — 569 p.

8. Fishburn P.C. Decision and value theory / P.C. Fishburn. — New York: Wiley, 1964. — 451 p.

9. Podinovskij V.V. Idei i metody' teorii vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'ny'x zadachax prinyatiya reshenij [Ideas and methods of the criteria importance theory in multicriteria decision making probems] / V.V. Podinovskij. — Moscow: Nauka, 2019. — 103 p. [in Russian]

10. Podinovskij V.V. Mnogokriterial'ny'e zadachi s uporyadochenny'mi po vazhnosti odnorodny'mi kriteriyami [Multi-criterion problems with importance ordered homogeneous criteria]. / V.V. Podinovskij // Automation and remote control. — 1976. — 11. — P. 118–127. [in Russian]

11. Podinovski V.V. The quantitative importance of criteria For MCDA. / V.V. Podinovski // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. — 2002. — Vol. 11. — Iss. 1. — P. 1–15.

12. Misyurin S.Yu. Multicriteria approach to control a population of robots to find the best solutions. / S.Yu. Misyurin, A.P. Nelyubin, M.A. Potapov // Advances in Intelligent Systems and Computing. Biologically Inspired Cognitive Architectures. — 2020. — Vol. 948. — P. 358–363.

13. Misyurin S.Yu. Dominance relations approach to design and control configuration of robotic groups. / S.Yu. Misyurin, A.P. Nelyubin // Procedia Computer Science. — 2021. — Vol. 190. — P. 622–630.

14. Misyurin S.Yu. Multicriteria search for preferred configurations of modular robots for cargo transportation. / S.Yu. Misyurin, A.P. Nelyubin // Procedia Computer Science. — 2022. — Vol. 213. — P. 623–630.