

10. Villacís C. et al. Real-time flight simulator construction with a network for training pilots using mechatronics and cyber-physical system approaches, *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, Chennai*, pp. 238-247.
11. Advani Sunjoo, Hosman Ruud, Potter Mario. Objective Motion Fidelity Qualification in Flight Training Simulators, 2007. DOI: 10.2514/6.2007-6802.
12. Affan Muhammad, Ahmed Syed, Manek Ali, Uddin Riaz. Design and Implementation of the Washout Filter for the Stewart-Gough Motion Platform, 2019, pp. 415-419.
13. Zhu Daoyang, Yan Jun, Duan Shaoli. A Design of Nonlinear Scaling and Nonlinear Optimal Motion Cueing Algorithm for Pilot's Station, *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2021, Vol. 26, pp. 513-520.
14. Lukianov Petro, Kabanyachyi Volodymyr. Mathematical model of stable equilibrium operation of the flight simulator based on the Stewart platform, *Aviation*, 2023, Vol. 27, pp. 119-128.
15. Lipko I.Yu. Modelirovanie redkikh sobyitij kachki bespilotnogo katamarana [Rare roll event modeling of unmanned catamaran], *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine intellectual technologies], 2021, No. 4-1 (54), pp. 219-226.
16. Fossen T.I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Jhon Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-1-119-99149-6.
17. Kramar V. Development of the particular vessel mathematical models, *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2016, Vol. 27, Issue 1, pp. 34-39.
18. Galeazzi R., Christian H., Mogens B., Fossen T. I. Stabilisation of parametric roll resonance by combined speed and fin stabilizer control, *Proceedings of the European Control Conference, Budapest, Hungary, 2009*, pp. 4895-4900.
19. Lopatukhin L.I., Bukhanovskiy A.V., Chernysheva E.S. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Beringova i Belogo morey [Reference data on the wind and wave regime of the Bering and White Seas]. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva [Russian Maritime Register of Shipping], 2010, 566 p. ISBN 978-5-89331-135-8.
20. Lewis F.L., Xie L., Popa D. Optimal and Robust Estimation: With an Introduction to Stochastic Control Theory. 2nd ed. CRC Press, 2017.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Х. Пшихопов.

Липко Иван Юрьевич – Севастопольский государственный университет; e-mail: ivanlipko@yandex.ru; г. Севастополь, Россия; тел. +79787391279; старший преподаватель; научный сотрудник.

Lipko Ivan Urievich – Sevastopol State University; e-mail: ivanlipko@yandex.ru; Sevastopol, Russia; phone +79787391279; senior lecturer; research officer.

УДК 631.171:303.732.4

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-69-82

В.В. Соловьев, А.Я. Номерчук, Р.К. Филатов

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НАЗЕМНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Целью данной работы является проведение системного анализа мобильных роботизированных платформ, которые могут использоваться в сельском хозяйстве для транспортировки грузов и прополки сорняков. Данное исследование является актуальным из-за увеличения численности населения, уменьшения пахотных площадей, естественного оттока населения из сельской местности и снижения количества сельскохозяйственной техники. Для достижения поставленной цели в работе сформировано «дерево» целей системного анализа конструктивного исполнения платформ, которые предваряют и декомпозируют этапы проектирования и разработки роботов сельскохозяйственного назначения. Из-за наличия нечетких и вербальных показателей оценки экспертами роботизированных платформ, авторы предлагают определять их в виде нечетких интервалов, которые с применением аддитивной свертки позволяют получить комплексный показатель, который может представлять либо в нечетком виде, либо в виде пессимистической, оптимистической или нейтральной оценок. При этом весовые коэффициенты аддитивной свертки также можно представить в нечетком виде. Для этого предложены операции умножения и сложения нечетких интервалов. Для проведения имитационного моделирования представлена струк-

тура программного обеспечения с применением объектно-ориентированного подхода. За счет перегрузки классических операций сложения и умножения удалось реализовать алгебраические операции с нечеткими интервалами без усложнения вычислений. Результаты моделирования подтвердили работоспособность подхода и позволили определить конструктивное исполнение, компоновку, двигатели и движители для сельскохозяйственной платформы. Предложенные методы можно использовать перед этапами проектирования и разработки роботов различного назначения, а использование показателей в нечетком виде позволяет снизить нагрузку на экспертов.

Роботизированная платформа; системный анализ; аддитивная свертка; нечеткий интервал; оценка конструкции.

V.V. Soloviev, A.Y. Nomerchuk, R.K. Filatov

SYSTEM ANALYSIS OF A GROUND ROBOTIC PLATFORM FOR AGRICULTURAL PURPOSE

The aim of this work is to conduct a systemic analysis of mobile robotic platforms that can be used in agriculture for cargo transportation and weed control. This study is relevant due to the increasing population, decreasing arable land, natural population outflow from rural areas, and reduction in agricultural machinery. To achieve the set goal, a "tree" of objectives for the systemic analysis of the constructive implementation of platforms has been formed, which precedes and decomposes the stages of designing and developing agricultural robots. Due to the presence of fuzzy and verbal evaluation indicators by experts of robotic platforms, the authors suggest defining them in the form of fuzzy intervals, which, with the use of additive convolution, allow obtaining a composite indicator that can be presented either in fuzzy form or in the form of pessimistic, optimistic, or neutral assessments. At the same time, the weighting coefficients of additive convolution can also be presented in fuzzy form. For this purpose, operations of multiplication and addition of fuzzy intervals are proposed. To conduct simulation modeling, the structure of software is presented using an object-oriented approach. By overloading classical addition and multiplication operations, it was possible to implement algebraic operations with fuzzy intervals without complicating calculations. The modeling results confirmed the feasibility of the approach and allowed determining the constructive implementation, layout, engines, and actuators for the agricultural platform. The proposed methods can be used before the stages of designing and developing robots for various purposes, and the use of indicators in fuzzy form allows reducing the burden on experts.

Robotic platform; systemic analysis; additive convolution; fuzzy interval; construction assessment.

Введение. Потребность в увеличении количества продуктов питания, при ограниченности пахотных земель, естественном оттоке населения из сельской местности и снижении количества сельскохозяйственной техники требуют интенсивной роботизации сельского хозяйства [1]. Сельскохозяйственная робототехника может послужить толчком к цифровизации сельского хозяйства за счет интеграции различных технологий, т.к. роботы могут использоваться в полном цикле производства продукции АПК от предпосевной подготовки земель до упаковки готовой продукции [2]. Отечественные и зарубежные исследователи публикуют статьи по разработке конструкции, систем управления и систем распознавания образов для наземных мобильных платформ сельскохозяйственного назначения.

В общем случае сельскохозяйственная платформа содержит либо гусеничный, либо колесный движитель [3] и оснащается сенсорами, приемником сигнала GPS/ГЛОНАСС, бортовым вычислителем, средствами передачи данных пользователю и навесным оборудованием в виде манипуляторов, лазерных пропольщиков и т.п.

В работе [4] описана структура системы интеллектуального управления в садоводстве, которая рассчитывает нормы внесения удобрений и сроки проведения защитных мероприятий. Указано, что такая система может быть развернута на роботизированной платформе, которая оснащена системой технического зрения с алгоритмами интеллектуальной обработки информации, системой адаптивного вождения в полевых условиях, навесным оборудованием в виде распылителей удобрений.

Автор работы [5] представил роботов для обработки почвы, посадки растений, борьбы с сорняками, сбора урожая. Указано, что роботы должны иметь полный привод для работы на неподготовленном грунте.

В статье [6] в качестве объекта исследования представлен робот, который может перемещаться в междурядьях высокорослых растений, на примере кукурузы.

В публикации [7] представлен автономный робот на базе трактора, способный обработать 99,5% листьев растений по результатам тестовых испытаний. В работе [8] авторы также модифицировали серийный мини-трактор и интегрировали систему автономного управления движением и навесным оборудованием.

В работах [9–12] представлены четырехколесные роботы сельскохозяйственного назначения с поворотными и неповоротными колесами. Также в статье [13] описана концепция платформы с маломощным дизельным двигателем, который приводит в движение четыре гидромотора колес. Платформа имеет полный привод и поворотные колеса.

В работе [14], в отличие от других работ, рассматривается модульная роботизированная платформа сельскохозяйственного назначения. Авторы отмечают, что уровень развития технологий способствует внедрению робототехники в АПК, но отсутствие правил, стандартов и протоколов затрудняют развитие данной отрасли. Предлагается полноприводный робот с электромоторами и редукторами на каждом колесе.

Публикация [15] посвящена разработке модульного робота с гусеничным движителем с электроприводами и редукторами.

По результатам обзора публикаций можно отметить, что авторы предлагают различные варианты роботизированных платформ для сельского хозяйства без системного осмысления конструктивного и компоновочного исполнения, с привязкой к спектру решаемых задач.

Постановка задачи. Предметом исследования является роботизированная платформа сельскохозяйственного назначения для транспортировки грузов. Также на платформе может быть установлен дельта-манипулятор для прополки сорняков на кукурузных полях с шириной междурядий 45 см и предельной высотой культуры 50 см. При большей высоте кукурузы необходимость в прополке отпадает.

Требуется:

- ◆ предложить метод оценки конструктивного исполнения роботизированной платформы в зависимости от кинематической схемы и размещения полезной нагрузки;
- ◆ предложить метод оценки двигателей и движителей для выбора технических средств, ориентированных на сельскохозяйственное применение;
- ◆ разработать программное обеспечение, позволяющее провести моделирование и определить оптимальную конструкцию платформы.

Этапы системного анализа для решения задачи разработки роботизированного комплекса. При разработке роботизированного комплекса будем руководствоваться этапами системного анализа по Н.П. Федоренко [16], как наиболее приближенного к решению технических задач и предполагающего выполнение следующих этапов.

Этап 1 – Формулирование проблемы. Для замены ручного труда и исключения применения гербицидов необходима роботизированная платформа сельскохозяйственного назначения, на которую можно установить дельта-манипулятор для прополки сорняков в автономном режиме в полевых условиях, обеспечивая безопасное перемещение в среде и сохранение культурных растений.

Этап 2 – Определение целей. Совокупность целей можно представить в виде дерева целей, как представлено на рис. 1. Цели системного анализа в данном случае – разработка роботизированной платформы (0), разработка привода (01), разработка корпуса (02), анализ кинематических схем (011), анализ движителей (0111), анализ двигателей (0112), формирование требований к двигателю (01121), формирование требований движителю (01111), анализ вариантов исполнения (021), анализ источников питания (0211), анализ полезной нагрузки (0212), формирование требований к автономности (02111), формирование требований к полезной нагрузке (02121).

В соответствии с разработанной иерархией целей далее будет предложена двухэтапная процедура определения оптимальной конструкции платформы:

- ◆ на первом этапе вычисляются частные оценки различных платформ и определяется конфигурация с соответствующими кинематическими характеристиками и расположением нагрузки (движение по иерархии вверх);

♦ на втором этапе формируются требования к двигателю, движителю, нагрузке и автономности, как к оптимальной совокупности для различных конфигураций (движение по иерархии вниз).

По результатам двух этапов будет определена кинематическая схема платформы, расположение полезной нагрузки, требуемые двигатели, движители и параметры автономности.

Этап 3 – Систематизация информации. Согласно дереву целей для роботизированной платформы можно выделить следующие факторы:

01111 – формирование требований к движителю: эффективность на грунте, надежность, ремонтпригодность, серийное производство, удельная нагрузка на грунт и т.п.;

01121 – формирование требований к двигателю: КПД, энергозатраты, диапазон скоростей, серийное производство, надежность, компактность, обслуживание и т.п.;

0111 – анализ движителей: колесный, гусеничный, комбинированный;

0112 – анализ двигателей: электрический коллекторный, электрический бесколлекторный, гидравлический, пневматический и т.п.;

011 – анализ кинематических схем: трех- (S1), четырех- (S2), шестиколесная (S3), гусеничная (S4), полноприводная (S5), с поворотными колесами (S6), с пассивными поворотными колесами (S7), с пассивными неповоротными колесами (S8);

02121 – формирование требований к полезной нагрузке: емкость с жидкостью, грузы в коробках, грузы в мешках, дельта-манипулятор;

02111 – формирование требований к автономности: работоспособность не менее 8 часов в сутки;

0212 – анализ полезной нагрузки: простота погрузки/выгрузки, простота установки/демонтажа;

0211 – анализ источников питания: аккумуляторы, дизель-генераторы, солнечные панели, комбинированные схемы;

021 – анализ вариантов исполнения: размещение оборудования и нагрузки над уровнем поверхности, боковое размещение, размещение спереди, размещение сзади, захват не менее одного междуружья.

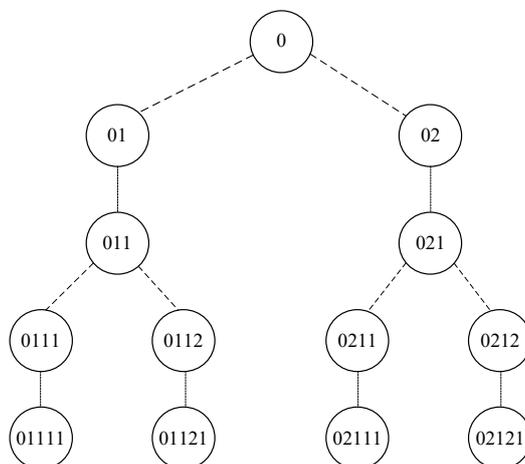


Рис. 1. Дерево целей для разработки роботизированной платформы

Этап 4 – Проработка альтернатив. Одним из вариантов создания альтернативных конструкций роботизированной платформы является их автоматическая генерация с оценкой на каждом уровне иерархии дерева и комплексной оценкой в целом, что позволит исключить неэффективные решения.

В соответствии с деревом целей возможны разные кинематические схемы платформ с различными сочетаниями движителей, как представлено в табл. 1.

Таблица 1

Варианты кинематических схем роботизированных платформ

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
S1	–	–	–	–	–	+++	+	+
S2	–	–	–	–	+	+	+	+
S3	–	–	–	–	+	+	+	+
S4	–	–	–	+	–	–	–	–

Согласно таблице, при заданных условиях можно реализовать 12 кинематических схем платформ, представленных на рис. 2.

Для каждой кинематической схемы возможны различные варианты размещения полезной нагрузки и оборудования, что приводит к 48 вариантам компоновки платформ.

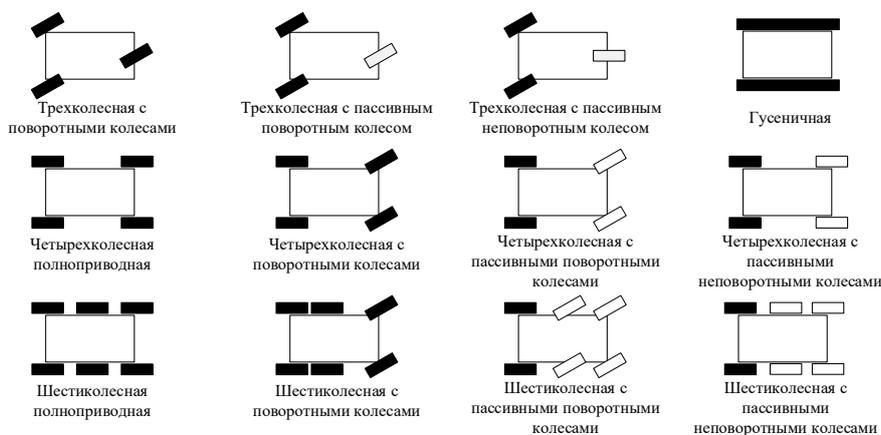


Рис. 2. Базовые кинематические схемы роботизированных платформ

Метод оценки конструктивного исполнения роботизированной платформы.

Для отбора альтернатив необходимо получить численные оценки качества каждого варианта компоновки платформы и сформировать критерий оценки.

При разработке метода формирования критерия качества будем пользоваться индуктивными рассуждениями, т.е. покажем выкладки для формирования критерия оценки для платформы в целом, а затем «спустимся» по дереву вниз и получим оценки, тех компонентов, которые могут дать требуемую оценку платформы.

Роботизированную платформу будем оценивать по следующим показателям: маневренность (M), удельная нагрузка на грунт (L), грузоподъемность (C), сложность конструкции (S), функциональность в прополке сорняков (P).

На маневренность оказывает влияние тип двигателей, тип движителей, их количество и компоновка. Удельная нагрузка определяется типом движителей и их количеством. Грузоподъемность определяется количеством движителей и компоновкой. Сложность конструкции определяется типом движителей, двигателей и компоновкой. Функциональность в прополке сорняков определяется компоновкой. Взаимосвязь показателей с составляющими можно отразить с использованием логики отношений на основе теоретико-множественного подхода [17].

Например, введем бинарное отношение R из множества V в множество M :

$$R \subset V \times M, \tag{1}$$

которое определяет вклад в оценку маневренности платформы отдельных составляющих.

Таким образом получается, что при заданных исходных данных оценки отдельных показателей определяются соответствующими отношениями на множествах исходных данных и обобщающий критерий можно представить в следующем виде:

$$J=F(M, L, C, S, P), \quad (2)$$

где F – функция свертки, связывающая показатели M, L, C, S, P .

Для сложных технических систем при выборе функции F необходимо [18]: обосновать допустимость свертки, с учетом однородности критериев; выполнить нормализацию критериев; учесть приоритет критериев; построить функцию свертки.

Традиционным методом проверки однородности является критерий Стьюдента. Для его применения необходима выборка значимых параметров за некоторый промежуток времени, на основе которой рассчитывается уровень значимости и проверяется гипотеза однородности.

Нормализация показателей в (2) необходима из-за разных мощностей множеств M, L, C, S, P для унификации их размерности и диапазона изменения. Таким образом, возникает необходимость сведения критериев к единой мере. Обозначим частный критерий эффективности k , а его максимальное и минимальное значение как k_{\max} и k_{\min} соответственно. Тогда согласно табл. 2, можно выделить несколько подходов к нормализации.

Таблица 2

Подходы к нормализации критериев

№	Выражение	Диапазон изменения
1	$\bar{k} = \frac{k_{\min}}{k}$	$\left[\frac{k_{\min}}{k_{\max}}, 1 \right]$
2	$\bar{k} = 1 - \frac{k}{k_{\max}}$	$\left[0, 1 - \frac{k_{\min}}{k_{\max}} \right]$
3	$\bar{k} = \frac{k_{\max} - k}{k_{\max} - k_{\min}}$	$[0, 1]$

Относительно процесса оценки конструктивного исполнения платформы критерий (2) является максимизируемым. Любое из указанных выражений подходит для унификации размерности критериев. Однако, следует обратить внимание, что выражения 1 и 2 используются со значениями k_{\max} и k_{\min} взятыми среди всех показателей из (2). В выражении 3 значения k_{\max} и k_{\min} берутся для каждого из рассматриваемых критериев. Таким образом, если априорно достоверно известны точные значения k_{\max} и k_{\min} всех критериев, для нормализации (2) можно использовать выражения 1 и 2. В противном случае необходимо использовать выражение 3.

Существует несколько подходов к учету приоритета критериев. Наибольшее распространение получил учет приоритета за счет введения весовых коэффициентов критериев, каждый из которых определяет вклад частного критерия в общую оценку качества. В нашем случае аддитивная свертка реализует принцип справедливой компенсации абсолютных значений нормированных критериев и записывается в виде [19]:

$$J = \sum_{i=1}^n \alpha_i \bar{k}_i, \quad (3)$$

где α_i – весовой коэффициент критерия \bar{k}_i ; J – значение обобщенного критерия; n – количество частных критериев.

Также следует отметить, что затруднительно получить номинальные значения элементов M, L, C, S, P как значимых параметров в виде четких численных величин. Это связано с тем, что данные параметры изменяются в некоторых интервалах. Поэтому можно их определять треугольными нечеткими числами или нечеткими интервалами. В данном случае под нечетким интервалом будем понимать выпуклую нечеткую величину, функция принадлежности которой задается следующим образом:

$$\forall u, v, \exists \omega \in [u, v], \mu_Q(\omega) \geq \min(\mu_Q(u), \mu_Q(v)). \quad (4)$$

Интервалы задаются четверкой параметров $\tilde{M}=(\underline{m}, \bar{m}, \alpha, \beta)$, где \underline{m} и \bar{m} – соответственно нижнее и верхнее модальное значение интервала, а α и β представляют собой левый и правый коэффициент нечеткости. Кроме того, треугольное нечеткое число будем рассматривать как частный случай нечеткого интервала с $\underline{m} = \bar{m}$. Также при $\underline{m} = \bar{m}$ и $\alpha = \beta$ получим четкое описание параметра.

Удобством нечеткого представления параметров является то, что их значения автоматически нормированы степенями принадлежности $\mu(p)$, но нормализация частных критериев в любом случае необходима.

В (3) весовые коэффициенты критериев обычно определяются с использованием экспертных суждений по оценке значимости частных критериев [20]. При этом экспертные оценки также можно представить в виде нечетких интервалов. Таким образом, выражение (3) можно переписать в виде:

$$\tilde{J} = \sum_{i=1}^n \tilde{\alpha}_i \tilde{k}_i, \quad (5)$$

где $\tilde{\alpha}_i$ – оценка значимости критерия \tilde{k}_i ; \tilde{J} – обобщенный критерий в виде нечеткого интервала.

Из (5) следует, что необходимо определить операции умножения и сложения нечетких интервалов.

Сумма двух интервалов $\tilde{M}_i=(\underline{m}_i, \bar{m}_i, \alpha_i, \beta_i)$ и $\tilde{M}_j=(\underline{m}_j, \bar{m}_j, \alpha_j, \beta_j)$ – есть также интервал $\tilde{M}=(\underline{m}, \bar{m}, \alpha, \beta)$, где

$$\alpha = \alpha_i + \alpha_j; \quad \beta = \beta_i + \beta_j; \quad \underline{m} = \underline{m}_i + \underline{m}_j, \quad \bar{m} = \bar{m}_i + \bar{m}_j. \quad (6)$$

Обобщим полученные формулы на k интервалов:

$$\alpha = \sum_{i=1}^k \alpha_i; \quad \beta = \sum_{i=1}^k \beta_i; \quad \underline{m} = \sum_{i=1}^k \underline{m}_i, \quad \bar{m} = \sum_{i=1}^k \bar{m}_i. \quad (7)$$

Произведение двух интервалов $\tilde{M}_i=(\underline{m}_i, \bar{m}_i, \alpha_i, \beta_i)$ и $\tilde{M}_j=(\underline{m}_j, \bar{m}_j, \alpha_j, \beta_j)$ – есть также интервал $\tilde{M}=(\underline{m}, \bar{m}, \alpha, \beta)$, где

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_i \alpha_j, \quad \beta = \beta_i \beta_j, \\ \underline{m} &= \min \{ \underline{m}_i \cdot \underline{m}_j, \bar{m}_i \cdot \underline{m}_j, \underline{m}_i \cdot \bar{m}_j, \bar{m}_i \cdot \bar{m}_j \}, \\ \bar{m} &= \max \{ \underline{m}_i \cdot \underline{m}_j, \bar{m}_i \cdot \underline{m}_j, \underline{m}_i \cdot \bar{m}_j, \bar{m}_i \cdot \bar{m}_j \}. \end{aligned} \quad (8)$$

С использованием (6)-(8) вычисляется обобщенный критерий (5) в виде нечеткого интервала. Здесь следует отметить, что если необходимо оперировать четкими значениями обобщенного критерия, то необходимо определить тип оценок. Например, пессимистическую, оптимистическую и нейтральную оценки, которые можно вычислить по формулам:

$$J_p = \max(\tilde{J}), \quad (9)$$

$$J_o = \min(\tilde{J}), \quad (10)$$

$$J_N = \frac{\sum_{u_j \in \tilde{J}} u_j}{|\tilde{J}|}. \quad (11)$$

На основании вышеизложенного предлагается следующий метод оценки конструктивного исполнения роботизированной платформы:

Этап 1. Определение множеств оценочных $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ параметров роботизированной платформы.

Этап 2. Введение бинарных отношений R на множествах P .

Этап 3. Выявление множеств значимых параметров $P^* \subseteq P$ технологического процесса.

Этап 4. Определение номинальных значений значимых параметров \tilde{P}_0^* в виде нечетких интервалов.

Этап 5. Определение параметров нечетких интервалов $\tilde{P}^* = (\underline{p}, \bar{p}, \alpha, \beta)$ для измеряемых параметров.

Этап 6. Определение экспертных оценок значимости критериев $\tilde{\alpha}$.

Этап 7. Введение операций на нечетких интервалах.

Этап 8. Введение частных критериев эффективности $\tilde{K} = F(\tilde{P}_0^*, \tilde{P}^*, \tilde{\alpha})$.

Этап 9. Вычисление обобщенного критерия \tilde{J} в виде нечеткого интервала.

Этап 10. Определение типа оценок и их вычисление.

Метод оценки двигателей и движителей. На основе оценки конструктивного исполнения роботизированной платформы необходимо выбрать конкретные двигатели и движители с учетом требований к автономности.

Согласно дереву целей, построенному при системном анализе, в методе необходимо учесть:

- ♦ оценки движителя: эффективность на грунте, надежность, ремонтпригодность, серийное производство, удельная нагрузка на грунт и т.п.;

- ♦ оценки двигателя: КПД, энергозатраты, диапазон скоростей, серийное производство, надежность, компактность, обслуживание и т.п.;

- ♦ типы движителей: колесный, гусеничный, комбинированный;

- ♦ типы двигателей: электрический коллекторный, электрический бесколлекторный, гидравлический, пневматический и т.п.;

- ♦ источники питания: аккумулятор, дизель-генератор, солнечная панель, комбинированные схемы.

Тогда для оценки двигателей и движителей предлагается следующий метод:

Этап 1. Формирование базы двигателей на основе информации из справочников и каталогов производителей.

Этап 2. Оценка параметров двигателей: КПД, энергозатраты, диапазон скоростей, серийное производство, надежность, компактность, обслуживание, в том числе в нечетком представлении.

Этап 3. Свертка оценок и вычисление оценок двигателей по формуле (3) или (5).

Этап 4. Формирование базы движителей на основе информации из справочников, каталогов производителей.

Этап 5. Оценка параметров движителей: эффективность на грунте, надежность, ремонтпригодность, серийное производство, удельная нагрузка на грунт, в том числе в нечетком представлении.

Этап 6. Свертка оценок и вычисление оценки движителей по формуле (3) или (5).

Этап 7. Формирование базы источников питания на основе информации из справочников, каталогов производителей.

Этап 8. Оценка источников питания для выбранной конфигурации платформ.

Этап 9. Поиск всех комбинаций из п. 3, п. 6 и п. 8.

Этап 10. Свертка оценок комбинаций из п. 9 по формуле (3) или (5).

Этап 11. Выбор комбинации с максимальной оценкой.

Модульная структура программного обеспечения. Для оценки функциональности роботизированной платформы разработано программное обеспечение на языке Python со следующей модульной структурой:

- ♦ модуль чтения исходных данных: содержит информацию о параметрах нечетких переменных, весовых коэффициентах нечетких чисел, частных оценках платформ, которые загружаются из текстового файла;

◆ библиотека классов: содержит описание класса нечеткая переменная (FuzzyVar), описание класса лингвистическая переменная (LinguisticVar), описание класса платформы (Robot);

◆ основной программный модуль: содержит описание главной формы приложения, виджетов для вывода списка возможных конфигураций платформ, текста с описанием платформ и их изображений из графических файлов формата *.png, а также вывод графиков лингвистических переменных, при создании экземпляров класса Robot.

Класс FuzzyVar описывает нечеткие переменные в виде нечетких интервалов и операции над нечеткими числами. Класс LinguisticVar описывает лингвистические переменные, которые создаются на базе нечетких переменных. Класс Robot описывает параметры роботизированных платформ, включая лингвистические переменные параметров: маневренность (*M*), удельная нагрузка на грунт (*L*), грузоподъемность (*C*), сложность конструкции (*S*), функциональность в прополке сорняков (*P*).

Классы LinguisticVar и Robot не наследуют свойства и методы, а получают их напрямую в виде списка в методе инициализации, чем обеспечивается связь между классами.

Для реализации операций с нечеткими интервалами потребовалось перегрузить методы add, mul и реализовать выражения (6)-(8) в программном коде. Этот подход позволил выполнять операции с переменными, заданными в виде нечетких интервалов, как с обычными числами. При этом, возвращаемый результат перегруженных функций “_add_”, “_mul_” также оформлен как новый экземпляр класса FuzzyVar, что позволяет выполнять операции над двумя и более нечеткими интервалами в едином математическом выражении и не разбивать его на отдельные операции.

В табл. 3 представлены значимые параметры для оценки роботизированной платформы, количество и значения термов для их описания в виде лингвистических переменных. В общем случае количество терм-множеств может быть различной и корректироваться в зависимости от задачи, в которой будет использован метод.

Таблица 3

Лингвистические переменные параметров платформы

Параметр	Номер терма				
	1	2	3	4	5
Маневренность	Низкая	Ниже среднего	Средняя	Выше среднего	Высокая
Нагрузка на грунт	Высокая	Средняя	Низкая	-	-
Грузоподъемность	Низкая	Средняя	Высокая	-	-
Сложность конструкции	Высокая	Средняя	Низкая	-	-
Функциональность	Низкая	Ниже среднего	Средняя	Выше среднего	Высокая

Следует отметить, что терм-множества лингвистических переменных параметров платформы введены таким образом, что термы с минимальными номерами, соответствуют худшим параметрам, а максимальные термы – лучшим, что позволило исключить операцию вычитания при расчете нечеткой свертки оценки конструктивного исполнения платформ.

Для оценки роботизированных платформ предлагается система кодирования параметров, которая в общем случае описывается следующей конструкцией:

$$w^*_{r^*p^*pr^*},$$

где w^* – количество колес; r^* - количество поворотных колес; p^* – количество пассивных колес; pr^* – количество пассивных поворотных колес; & – место расположения нагрузки на платформе (*s* – боковая, *r* – сзади, *f* – впереди, *t* – вверху над колесной базой).

Здесь символ “*” определяет цифру. Согласно табл. 3 эксперты оценили каждую платформу и сформировали вектор номеров термов для каждой конфигурации, как представлено в табл. 4.

Таблица 4

Кодирование и оценка частных параметров конфигураций роботизированных платформ

Трехколесная с поворотными колесами			
1	2	3	4
w3 r3 p0 pr0 s	w3 r3 p0 pr0 r	w3 r3 p0 pr0 f	w3 r3 p0 pr0 t
M5 L2 C1 S3 P2	M5 L2 C1 S3 P1	M5 L1 C1 S3 P1	M5 L2 C1 S2 P2
...			
Шестиколесная с пассивными неповоротными колесами			
45	46	47	48
w6 r0 p4 pr0 s	w6 r0 p4 pr0 r	w6 r0 p4 pr0 f	w6 r0 p4 pr0 t
M1 L3 C3 S1 P4	M1 L3 C3 S1 P1	M1 L3 C3 S1 P1	M1 L3 C3 S1 P4

Результаты экспериментов. При использовании программного обеспечения были сформированы частные оценки для всех 48 конфигураций в виде нечетких интервалов, которые автоматически объединены в нечеткие переменные.

Интерфейс приложения для оценки функциональности роботизированных платформ представлен на рис. 3.

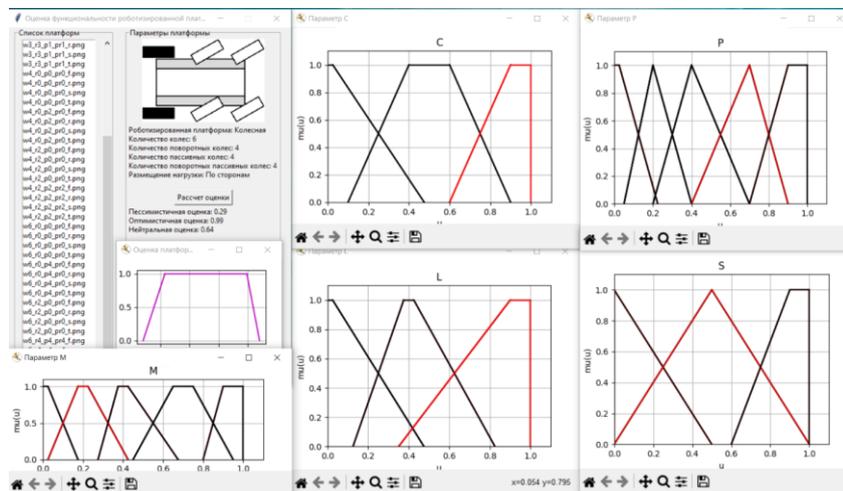


Рис. 3. Интерфейс приложения для оценки платформ

Пользователю доступен список возможных конфигураций платформ. При выборе конфигурации подгружается ее изображение и приводится развернутое описание, в соответствии с закодированной последовательностью. При нажатии кнопки «Расчет оценки» открываются графические формы с лингвистическими переменными параметров. Термы, соответствующие оценкам экспертов, выделяются цветом. Оценка платформы в виде нечеткого интервала выстраивается в графическом окне. Также выводятся значения песимистичной, оптимистичной и нейтральной оценок. Результаты моделирования представлены в табл. 5.

Таблица 5

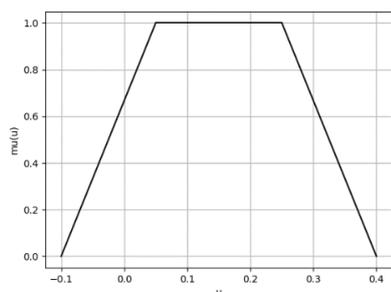
Результаты оценок конфигураций платформ

№	Конфигурация	Пессимистичная оценка	Оптимистичная оценка	Нейтральная оценка
...
5	w3 r2 p1 pr0 f	0,06625	0,37375	0,22
...
37	w6 r0 p4 pr0 f	0,0225	0,4725	0,2475
38	w6 r0 p4 pr0 r	0,0225	0,4725	0,2475
...
44	w6 r2 p0 pr0 t	0,495	1,35	0,9225
...

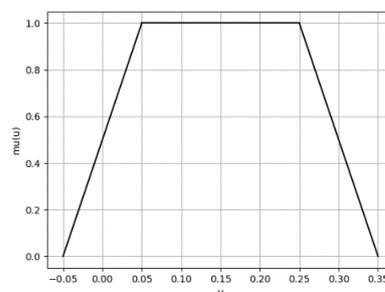
По результатам моделирования установлено, что при заданных частных оценках параметров:

- ◆ шестиколесная платформа с полным приводом и двумя поворотными колесами и расположением нагрузки над колесной базой является лучшим вариантом по совокупности характеристик;
- ◆ трехколесная платформа с передним расположением нагрузки и шестиколесная платформа с четырьмя неповоротными пассивными колесами является худшим вариантом по совокупности характеристик.

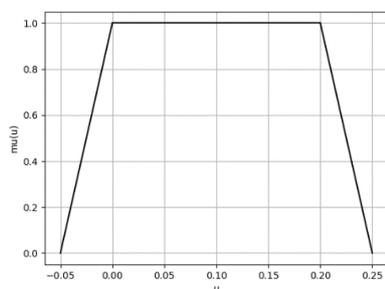
При этом, важно то, что весовые коэффициенты для расчета оценки по формуле (5) также могут задаваться в виде нечетких интервалов как представлено на рис. 5. Они определяются экспертами на основе своей уверенности о степени важности того или иного параметра, которые дают вклад в общую оценку конфигурации роботизированной платформы. Очевидно, ширина плато интервала характеризует величину степени уверенности эксперта относительно его среднего значения, а наклон боковых сторон определяет граничные значения его мнения относительно того или иного параметра. Для определения ширины интервала, можно при анкетировании эксперта разрешить использование модификаторов: около, сильно больше, немного больше, меньше и т.п., на основе которых, вычислять значение.



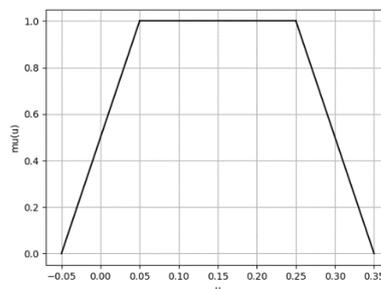
$a - k_1$



$b - k_2$



$v - k_3$



$z - k_4$

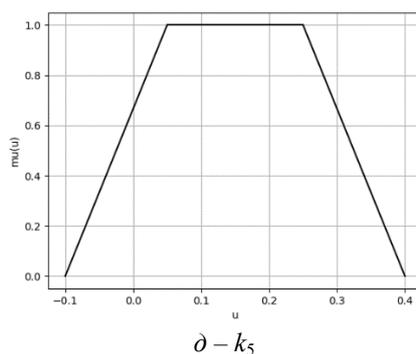


Рис. 5. Весовые коэффициенты критериев в виде нечетких интервалов

Следует отметить, что при такой системе оценки, требование $\sum k_i = 1$ не выдерживается, так как выбирается максимальная из возможных оценок для выбранной конфигурации платформ.

Заключение. В статье проведен системный анализ роботизированных платформ сельскохозяйственного назначения и сформировано дерево целей, позволяющее применить метод оценки оптимального конструктивного исполнения и метод оценки двигателей и движителей. Метод оценки конструктивного исполнения роботизированной платформы отличается простотой реализации, допускающей компьютерное моделирование и возможность учета экспертных знаний, в том числе заданных нечетко. Применение нечетких интервалов и математических операций над ними, позволяет учитывать трудноформализуемые показатели, например «сложность конструкции» или «функциональность в прополке сорняков» при вычислении комплексной оценки платформ с учетом двигателей и движителей. Применение аддитивной свертки критериев качества, допускающей использование весовых коэффициентов, заданных нечетко, позволяет применять метод оценки конструктивного исполнения платформ при небольшом количестве экспертов.

Предложенные методы могут использоваться для оценки конструктивного исполнения платформ в различных областях промышленности и сельского хозяйства за счет изменения или расширения показателей качества.

В дальнейшем авторы планируют рассмотреть эффективность свертки критериев с использованием нечеткой меры и нечетко-интегральной свертки [21].

Авторы благодарны руководству ООО «Алькема-Элитное» (г. Краснодар) за консультативную и экспертную поддержку при подготовке данной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Загазежева О.З., Бербекова М.М. Основные тренды развития роботизированных технологий в сельском хозяйстве // Известия КБНЦ РАН. – 2021. – № 5 (103). – С. 11-20.
2. Соловьев В.В., Шадрина В.В., Номерчук А.Я., Филатов Р.К. Перспективы развития сельскохозяйственной робототехники в условиях импортозамещения // Сб. трудов XIII Всероссийской Школы-семинара, молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников. – Ростов-на-Дону – Таганрог: ЮФУ, 2022. – С. 27-34.
3. Santos Valle, S. and Kienzle. Agriculture 4.0 - Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production // Integrated Crop Management. – Rome, 2020. – Vol. 24.
4. Измайлов А.Ю., Смирнов И.Г., Хорт Д.О. Цифровые агротехнологии в системе «Умный сад» // Садоводство и виноградарство. – 2018. – 6. – С. 33-39. – DOI: 10.31676/0235-2591-2018-6-33-39.
5. Oliveira L.F., Moreira A.P., & Silva M.S. Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead // Robotics. – 2021. – 10. – 52 p.
6. Higuti Vitor & Velasquez Andres & agalhães Daniel & Becker arcelo & Chowdhary Girish. Under canopy light detection and ranging-based autonomous navigation // Journal of Field Robotics. – 2018. – No. 36. – 10.1002/rob.21852.
7. Adamides George. Agricultural Robots in Targeted Spraying: A mini State-of-the-Art review // Robotics & Automation Engineering Journal. – 2017. – No. 2. – 10.19080/RAEJ.2018.02.555581.

8. *Emmi Luis & Gonzalez-de-Soto Mariano & Pajares Gonzalo & Gonzalez-de-Santos Pablo*. New Trends in Robotics for Agriculture: Integration and Assessment of a Real Fleet of Robots // *The ScientificWorld Journal*. – 2014. – 404059. – 10.1155/2014/404059.
9. *Corpe Samuel & Tang Liqiong & Abplanalp Phillip*. GPS-guided modular design mobile robot platform for agricultural applications // *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology, ICST, 2013*. – P. 806-810. – 10.1109/ICSensT.2013.6727763.
10. *Chebroly Nived & Lottes Philipp & Schaefer Alexander & Winterhalter Wera & Burgard Wolfram & Stachniss Cyrill*. Agricultural robot dataset for plant classification, localization and mapping on sugar beet fields // *The International Journal of Robotics Research*. – 2017. – No. 36. – 10.1177/0278364917720510.
11. *Tabile Rubens & Godoy Eduardo & Pereira Robson & Tangerino Giovana & Porto Arthur & Inamasu Ricardo*. Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot // *Engenharia Agricola*. – 2011. – No. 31. – P. 130-142. – 10.1590/S0100-69162011000100013.
12. *Bawden Owen, Ball David, Kulk Jason, Perez Tristan, & Russell Raymond*. A lightweight, modular robotic vehicle for the sustainable intensification of agriculture / In Chen, C (Ed.) // *Proceedings of the 16th Australasian Conference on Robotics and Automation 2014*. Australian Robotics and Automation Association (ARAA), Australia. – P. 1-9.
13. *Abhishesh P. et al*. Multipurpose Agricultural Robot Platform: Conceptual Design of Control System Software for Autonomous Driving and Agricultural Operations Using Programmable Logic Controller // *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*. – 2017. – 4.
14. *Pecka Aldis & Osadcuks Vitalijs*. Conceptual design of modular multi functional agricultural mobile robot. – 2018. – P. 202-206. – 10.22616/trd.24.2018.031.
15. *Nielsen S.H., Jensen K., Bøgild A., Jørgensen O.J., Jacobsen N.J., Jæger C.L.D., Jørgensen . N.* A Low Cost, Modular Robotics Tool Carrier For Precision Agriculture Research // *11th International Conference on Precision Agriculture International Society of Precision Agriculture*. – 2012.
16. *Черняк Ю.И.* Системный анализ в управлении экономикой. – М.: Экономика, 1975. – 193 с.
17. *Финаев В.И.* Модели систем принятия решений: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 118 с.
18. *Штойер Р.* Многокритериальная оптимизация: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
19. *Лотов А.В., Поспелова И.И.* Многокритериальные задачи принятия решений: учеб. пособие. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
20. *Дмитриев М.Г., Ломазов В.А.* Оценка чувствительности линейной свертки частных критериев при экспертном определении весовых коэффициентов // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2014. – № 1. – С. 52-56. – ISSN: 2071-8594.
21. *Соловьев В.В.* Алгоритм оценки эффективности функционирования сложных технических систем // *Матер. Всероссийской научной конференции: Перспективы развития гуманитарных и технических систем: в 3 частях, Ч. 2*. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 61-62.

REFERENCES

1. *Zagazezheva O.Z., Berbekova M.M.* Osnovnye trendy razvitiya robotizirovannykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve [Main trends in the development of robotic technologies in agriculture], *Izvestiya KBNTS RAN* [News of the KBSC RAS], 2021, No. 5 (103) pp. 11-20.
2. *Solov'ev V.V., Shadrina V.V., Nomerchuk A.Ya., Filatov R.K.* Perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennoy robototekhniki v usloviyakh importozameshcheniya [Prospects for the development of agricultural robotics in the conditions of import substitution], *Sb. trudov XIII Vserossiyskoy SHkoly-seminara, molodykh uchenykh, aspirantov, studentov i shkol'nikov* [Collection of works of the XIII All-Russian School-Seminar, young scientists, graduate students, students and schoolchildren]. Rostov-on-Don – Taganrog: YuFU, 2022, pp. 27-34.
3. *Santos Valle, S. and Kienzle*. Agriculture 4.0 - Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production, *Integrated Crop Management*. Rome, 2020, Vol. 24.
4. *Izmaylov A.Yu., Smirnov I.G., Khort D.O.* Tsifrovye agrotekhnologii v sisteme «Umnyy sad» [Digital agricultural technologies in the “Smart Garden” system], *Sadovodstvo i vinogradarstvo* [Gardening and viticulture], 2018, 6, pp. 33-39. DOI: 10.31676/0235-2591-2018-6-33-39.
5. *Oliveira L.F., Moreira A.P., & Silva M.S.* Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead, *Robotics*, 2021, 10, 52 p.
6. *Higuti Vitor & Velasquez Andres & agalhães Daniel & Becker arcelo & Chowdhary Girish*. Under canopy light detection and ranging-based autonomous navigation, *Journal of Field Robotics*, 2018, No. 36, 10.1002/rob.21852.
7. *Adamides George*. Agricultural Robots in Targeted Spraying: A mini State-of-the-Art review, *Robotics & Automation Engineering Journal*, 2017, No. 2. 10.19080/RAEJ.2018.02.555581.

8. Emmi Luis & Gonzalez-de-Soto Mariano & Pajares Gonzalo & Gonzalez-de-Santos Pablo. New Trends in Robotics for Agriculture: Integration and Assessment of a Real Fleet of Robots, *The ScientificWorld Journal*, 2014, 404059. 10.1155/2014/404059.
9. Corpe Samuel & Tang Liqiong & Abplanalp Phillip. GPS-guided modular design mobile robot platform for agricultural applications, *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology, ICST, 2013*, pp. 806-810. 10.1109/ICSensT.2013.6727763.
10. Chebrolu Nived & Lottes Philipp & Schaefer Alexander & Winterhalter Wera & Burgard Wolfram & Stachniss Cyrill. Agricultural robot dataset for plant classification, localization and mapping on sugar beet fields, *The International Journal of Robotics Research*, 2017, No. 36. 10.1177/0278364917720510.
11. Tabile Rubens & Godoy Eduardo & Pereira Robson & Tangerino Giovana & Porto Arthur & Inamasa Ricardo. Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot, *Engenharia Agricola*, 2011, No. 31, pp. 130-142. 10.1590/S0100-69162011000100013.
12. Bawden Owen, Ball David, Kulk Jason, Perez Tristan, & Russell Raymond. A lightweight, modular robotic vehicle for the sustainable intensification of agriculture, In Chen, C (Ed.), *Proceedings of the 16th Australasian Conference on Robotics and Automation 2014. Australian Robotics and Automation Association (ARAA), Australia*, pp. 1-9.
13. Abhishesh P. et al. Multipurpose Agricultural Robot Platform: Conceptual Design of Control System Software for Autonomous Driving and Agricultural Operations Using Programmable Logic Controller, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 2017, 4.
14. Pecka Aldis & Osadcuks Vitalijs. Conceptual design of modular multi functional agricultural mobile robot, 2018, pp. 202-206. 10.22616/rrd.24.2018.031.
15. Nielsen S.H., Jensen K., Bøgild A., Jørgensen O.J., Jacobsen N.J., Jæger C.L.D., Jørgensen . N. A Low Cost, Modular Robotics Tool Carrier For Precision Agriculture Research, *11th International Conference on Precision Agriculture International Society of Precision Agriculture*, 2012.
16. Chernyak Yu.I. Sistemnyy analiz v upravlenii ekonomikoy [System analysis in economic management], Moscow: Ekonomika, 1975, 193 p.
17. Finaev V.I. Modeli sistem prinyatiya resheniy: ucheb. posobie [Models of decision-making systems: textbook]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2005, 118 p.
18. Shtoyer R. Mnogokriterial'naya optimizatsiya [Multicriteria optimization]: trans. from engl. Moscow: Radio i svyaz', 1992, 504 p.
19. Lotov A.V., Pospelova I.I. Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya resheniy: ucheb. posobie [Multicriteria decision-making problems: textbook]. Moscow: MAKS Press, 2008, 197 p.
20. Dmitriev M.G., Lomazov V.A. Otsenka chuvstvitel'nosti lineynoy svertki chastnykh kriteriev pri ekspertnom opredelenii vesovyykh koeffitsientov [Assessing the sensitivity of linear convolution of partial criteria in the expert determination of weighting coefficients], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making], 2014, No. 1, pp. 52-56. ISSN: 2071-8594.
21. Solov'ev V.V. Algoritm otsenki effektivnosti funktsionirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Algorithm for assessing the effectiveness of the functioning of complex technical systems], *Mater. Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii: Perspektivy razvitiya gumanitarnykh i tekhnicheskikh sistem* [Materials of the All-Russian Scientific Conference: Prospects for the development of humanitarian and technical systems]: in 3 part. Part 2. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011, pp. 61-62.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Х. Пшихопов.

Соловьев Виктор Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: vvsolovev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043438844; кафедра систем автоматического управления; старший преподаватель.

Номерчук Александр Яковлевич – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; тел.: +79185945894; кафедра систем автоматического управления; старший преподаватель.

Филатов Роман Константинович – КБ «АРК» ДГТУ; e-mail: r.k.filatov@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79996965820; к.т.н.; руководитель.

Soloviev Viktor Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: vvsolovev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043438844; the department of automatic control systems; senior lecturer.

Nomerchuk Alexandr Yakovlevich – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; phone: +79185945894; the department of automatic control systems; senior lecturer.

Filatov Roman Konstantinovich – СВ ARK DSTU; e-mail: r.k.filatov@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79996965820; cand. of eng. sc.; supervisor.