

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «ИНДУСТРИЯ 4.0» НА ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

*Мусливец М.А., Литвин Р.А.*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** транспортно-технологические машины, строительные и дорожные машины, производительность, эффективность, робототехника, беспилотные агрегаты, «Индустрия 4.0».

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию возможности перехода комплексов транспортно-технологических машин путем внедрения новых технологий «Индустрии 4.0» в конструкцию машины. Важная задача при строительстве объекта заключается в производительности, эффективности и продуктивности. Перед каждым планом работы поставлены сроки, по которым и выбирается техника и операторы для строительства. Для успешного выполнения работы выбирается машина с наилучшей производительностью. В исследовании продемонстрирован возможный перевод строительных машин на новые технологии для повышения КПД. В статье описан анализ сравнительной характеристики строительных машин относительно применимости «Индустрии 4.0», рассмотрена конструкция беспилотных агрегатов. Проведен анализ использования дополнительных установок «Индустрии 4.0». Получена схема алгоритма движения беспилотной машины, так же произведена сравнительная характеристика традиционной строительной техники и с агрегатами «Индустрии 4.0». Статья представляет результаты научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») в 2023 году.

## RESEARCH ON THE APPLICATION OF THE “INDUSTRY 4.0” TECHNOLOGY ON TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES TO IMPROVE THE SAFETY AND PRODUCTIVITY OF CONSTRUCTION

*Muslivets M.A., Litvin R.A.*

*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg*

**Keywords:** transport and technological machines, construction and road machines, productivity, efficiency, robotics, unmanned units, "Industry 4.0".

**Abstract.** The article is devoted to the study of the possibility of transitioning transport and technological machines complexes to Industry 4.0 by introducing new technologies into the design of the machine. An important goal when constructing a facility is productivity, efficiency and productivity. Each work plan has deadlines according to which equipment and operators are selected for construction. To successfully complete the job, the machine with the best performance is selected. The study demonstrated the possible transfer of construction machines to new technologies to increase efficiency. The article describes an analysis of the comparative characteristics of construction machines regarding the applicability of Industry 4.0, and examines the design of unmanned units. An analysis of the use of additional Industry 4.0 installations was carried out. A diagram of the movement algorithm of an unmanned vehicle was obtained, and a comparative description of traditional construction equipment and “Industry 4.0” units was also made. Discussion and conclusions: The article presents the results of research work carried out within the framework of a grant competition for the implementation of research works by scientific and pedagogical workers of St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering SPbGASU (Federal State-Funded Educational Institution of Higher Professional Education "St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering") in 2023.

### **Введение**

В настоящее время мировое сообщество находится в периоде перехода между промышленными эпохами, в рамках которого происходит комплексное обновление социальных и технологических систем. Практически все отрасли стремятся повысить производительность своих организаций и предприятий, улучшить качество продукции и

обеспечить безопасность как на производстве, так и в социальной сфере. Один из потенциальных путей решения этой проблемы заключается в переходе к индустриальной эпохе 4.0. Важной задачей при разработке проектов является учет производительности, эффективности и безопасности. Планирование работ предполагает установление сроков, по которым выбираются соответствующая техника и операторы. Для успешного выполнения задачи выбирается машина с наилучшей производительностью. Возможно ли улучшить текущие технологии и методы для повышения ее эффективности? Этот вопрос требует дополнительной оценки [1].

Согласно Всемирному экономическому форуму (ВЭФ), размывание границ между физическим, цифровым и биологическим секторами экономики можно рассматривать как Четвертую промышленную революцию (иногда называемую «Индустрия 4.0»). Одним из неотъемлемых элементов этой революции является роботизация. Прогнозируется, что практически все виды человеческой деятельности будут переходить в цифровой формат, что представляет собой новый вызов, особенно для Российской Федерации [2].

Тенденция роста роботизации в мире за последнее десятилетие наблюдается с геометрическим ускорением. В качестве примера можно упомянуть анализ, проведенный "Сбербанком" по динамике продаж промышленных роботов (рис. 1).

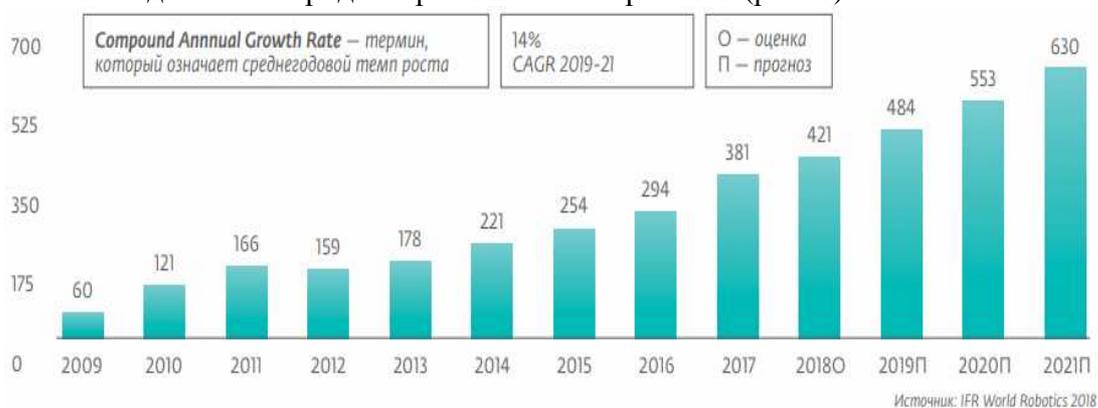


Рис. 1. Динамика продаж промышленных роботов в мире

Теоретической базой исследования послужили труды ученых в области строительной техники: Волков С.А., Евтюков С.А. Евтюков С.С., Чудаков А.В., Куракина Е.В. Локшин, Е.С. и др. [3, 4]. Вопросы об изучении новых технологий связаны с «Индустрией 4.0» хорошо освещены в отечественной и зарубежной науке. Лапкин Евгений хорошо описал значение и значимость «Индустрии 4.0» в промышленной сфере, показал плюсы и минусы, дал хорошую почву для исследований [1]. Так как наша работа напрямую связана с робототехникой, интернет вещами, умными технологиями, издания авторов этой сфере: Alasdair Gilchrist, Bruno Siciliano, Jean-Claude André Martin Frank, Peter Corke, Sebastian Thrun и др. [5, 6], также послужили базой составлению научной статьи. Хорошо описывает работу роботизированных систем Цой Т.Г., который исследует разработку программного обеспечения (ПО) для управления российского гусеничного робота [7]. Большинство мнений авторов схожи друг другу, все приходят к общему выводу, что цифровизация в разных областях необходима и реализуема в наше время.

Строительная промышленность на сегодняшний день является одним из крупнейших потребителей промышленных роботов, задействованных на производственных площадках по всему миру. Текущие запасы промышленных роботов достигли рекордного уровня, превысив миллион единиц. По данным Международной Федерации Робототехники (IFR), это число составляет примерно треть общего количества установленных роботов в различных секторах промышленности. Продолжение и расширение исследований в этой области представляют собой крайне важный аспект научных исследований в настоящее время [5].

Для исследования данной темы было решено провести анализ внедрения беспилотных строительных машин с использованием концепции «Индустрии 4.0».

Этот процесс включает в себя расчеты и сравнения между традиционными техническими средствами и новыми инновациями на основе нескольких критериев.

Рассмотрим пример роботизированной установки «Exosystem», разработанной компанией «Built Robotics», которая успешно интегрируется в традиционные строительные машины. Эта технологическая эволюция не только повышает эффективность и производительность, но также порождает важные вопросы в области безопасности и этики при использовании автоматизированных систем. Решение этих вопросов представляет собой значимую задачу для будущих исследований в области робототехники и промышленной автоматизации [8].

### Материалы и методы

Для начала рассмотрим установку «Exosystem» – ее состав, принцип работы и основные функции. Для иллюстрации возьмем экскаватор от фирмы «Volvo». Сама система и дополнительное оборудование устанавливается и на техническую базу машины (рис. 2).



Рис. 2. Схема экскаватора с системами «Индустрии 4.0»

Все дополнительные компоненты, установленные на данной машине, являются частью «Индустрии 4.0». С их помощью, машина может выполнять задачи автономно, что способствует повышению производительности и безопасности на стройплощадке. Эти компоненты включают в себя различные датчики, радары, камеры, системы GPS и алгоритмы роботизированных систем. Каждый элемент конструкции взаимодействует между собой и передает информацию непосредственно на пульт управления или устройство оператора (планшет, телефон, ноутбук), что позволяет оператору быстро реагировать на любую ситуацию [9].

Проведем теоретический анализ двух типов работы строительной машины. Рассмотрим Случай 1 и Случай 2. В первом случае ТТМ (транспортно-технологическая машина) не оснащена системами беспилотных установок, а во втором – все дополнительные системы установлены. Наше исследование будет сконцентрировано на одном из аспекте производительности в процессе работы машин. Для этого мы воспользуемся формулой, описывающей эксплуатационную производительность экскаватора:

$$П = \frac{3600 \times q \times K_n \times K_g}{K_p \times t_u}, \quad (1)$$

где  $q$  – вместимость ковша,  $m^3$ ;  $K_n$  – коэффициент наполнения ковша (0,75-1,4);  $K_g$  – коэффициент использования машины по времени (0,9-0,95);  $K_p$  – коэффициент разрыхления (1,1-1,5);  $t_u$  – время цикла.

В данном контексте все зависит от времени цикла работы технической транспортной машины (ТТМ). Благодаря беспилотным системам, процесс реагирования на поставленную

задачу будет выполняться более эффективно, чем при управлении оператором. Таким образом, время цикла, обозначенное как  $t_{ц}$ , может быть представлено следующим образом:

$$t_{ц} = t_{к} + t_{п} + t_{пов} + t_{раз} + t_{пн}, \quad (2)$$

где  $t_{раз}$  – время разгрузки ковша, которое в зависимости от его вместимости, с;  $t_{пн}$  – время, затрачиваемое на переключение рычагов управления, с;  $t_{к}$  – время копания, с;  $t_{п}$  – время подъема ковша, с;  $t_{пов}$  – время поворота груженого ковша с.

Для ТТМ с беспилотными агрегатами изменим стандартную формулу, ведь управлять машиной будет роботизированная система, поэтому формула, разработанная автором статьи, преобразуется и показана ниже:

$$П = \frac{3600 \times q \times K_{н} \times K_{с} \times K_{а} \times K_{э}}{K_{р} \times t_{ц} \times K_{ом}}, \quad (3)$$

где  $K_{ом}$  – коэффициент отклика робота (0,1-0,2);  $K_{а}$  – коэффициент автономности (0,5);  $K_{э}$  – коэффициент эквивалентности времени работы робота (1,5).

Таким образом, в формулу вводится сразу несколько коэффициентов, такие как: отклика робота, автономности, эквивалентности времени работы робота, которые характеризуют реакцию робота на различные факторы во время его работы внутри систем автоматизации. Эти факторы включают в себя получение данных с датчиков, возможные погрешности при передаче данных через радио- или проводные каналы, а также время ожидания робота в режиме простоя, когда он ожидает выполнения следующей задачи.

Из вышесказанного вытекают следующие выражения, предложенные авторами статьи, описывающие коэффициенты автономности, эквивалентности времени работы робота, отклика робота:

$$K_{ом} = \Delta_{tapread} \times T_{thrm} + 2 \times \Delta_{ttrans} = 20мс = 0,2с, \quad (4)$$

где  $\Delta_{tspread}$  – время между переключением активности: 10 мс;  $T_{thrm}$  – тепловая постоянная времени: 10 мс;  $\Delta_{ttrans}$  – время передачи: 10 мс;

$$K_{а} = (1 - P_e) \times (1 - P_c) \times (1 - P_f) = 0,5, \quad (5)$$

где  $P_e$ ,  $P_c$ ,  $P_f$  – вероятности событий классов ( $e$ ,  $c$ ,  $f$ );  $e$  – состояния, связанные непосредственно с роботом и его ПО;  $c$  – состояния, связанные с оборудованием клиента;  $f$  – состояния связанные с процессами обеспечения системы материалами для дальнейшей работы, если разрешение этих состояний не связано с использованием дополнительных сотрудников;

$$K_{э} = ExS \times TEX = 1,5, \quad (6)$$

где  $ExS$  – поправочный коэффициент скорости выполнения операций;  $TEX$  – суммарное время работы программного робота при выполнении полного цикла операций.

В данном контексте, мы намерены исходно использовать значения коэффициентов автономности ( $K_{а}$ ) и эквивалентности времени работы робота ( $K_{э}$ ) на основе наблюдений и теоретических данных. Формулы (3)-(6) были получены теоретическим путем, в последующих этапах исследования, эти коэффициенты будут доработаны и точнее определены в результате проведения экспериментов.

Возьмем в качестве иллюстрации рассмотрим технические характеристики гусеничного одноковшового экскаватора XCMG XE 225DN:

Результаты исследования запишем в таблицу 1 и построим графики зависимости производительности и времени двух случаев.

Полученные значения производительности разделим на 10 смен и вставим в таблицу 2.

Табл. 1. Числовые данные двух экскаваторов

$q$ (вместимость ковша), м <sup>3</sup>	$П$	$t_{ц}$	$K_{н}$	$K_{с}$	$K_{р}$	$K_{ом}$	$K_{а}$	$K_{э}$
1	108	25	1	0,9	1,2	-	-	-
1	540	25	1	0,9	1,2	0,2	0,5	1,5

Табл. 2. Теоретические результаты расчетов

Смена	Традиционные / Traditional	Беспилотные / Unmanned
	П	П
1	108	405
2	230	580
3	350	900
4	460	1310
5	680	1730
6	1000	2135
7	1460	2540
8	1870	2945
9	2340	3350
10	2750	3755

### Результаты

В ходе анализа функционирования технических транспортных средств (ТТС) были выявлены закономерности и измерены показатели производительности (рис. 3).

Зависимость производительности от количества смен/The dependence of productivity on the number of shifts

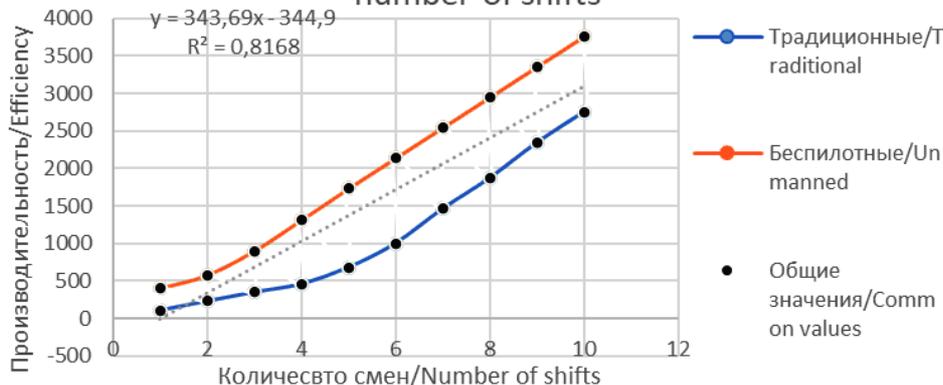


Рис. 3. Зависимость производительности от смен

Для автоматизации определенного процесса в строительной и дорожной технике можно использовать "принцип регулятора". Основная концепция заключается в том, что регулятор управляет элементами управления строительной машины, опираясь на внешние параметры. Например, это может быть регулирование силы схватывания для бревен или минимизация отклонения движения экскаватора при его автономном передвижении вперед в процессе земельных работ или профилирования.

Существуют 3 типа ПИД регулятора (пропорциональный, интегральный, дифференциальный). В данном исследовании возьмем пропорциональный тип регулятора, где управляющее воздействие ( $u$ ) пропорционально разнице (ошибке) между измеряемым значением и установленной нормой. С увеличением отклонения увеличивается и управляющее воздействие [10].

Представлена блок-схема (рис. 4), сделанная в программе «TRIK Studio», системы управления движением экскаватора в процессе выполнения рабочего цикла – передвижения вперед и разработки грунта. Из схемы видно, что при установке скорости ( $v$ ) на уровне 80% от максимальной и коэффициента пропорциональности ( $k$ ) равного 1, мы создаем саморегулирующуюся систему. Принцип работы системы, следующий: когда мощность от двигателя передается на трансмиссию, энкодеры, установленные на полуосях, регистрируют угол поворота привода. После достижения 360 градусов, энкодер фиксирует один оборот гусеницы. Это значение накапливается, то есть оно учитывает все предыдущие движения, и обнуляется каждый раз при выполнении программы.

Далее можно увидеть применение следующего выражения:

$$err = 0 - (encoder4 - encoder3), \quad (7)$$

где  $err$  – разница между показаниями датчика и уставкой;  $encoder(3,4)$  – датчик угла поворота, преобразующий значения вращения колес в сигналы (цифровые или аналоговые).

Выражение 7 описывает ошибку ( $err$ ), которая будет возникать при движении. Отсюда можно увидеть, что значение ошибки может быть как положительным, так и отрицательным. Encoder – это измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования угла поворота вращающегося объекта, индексы 3, 4 указывают на порты E3, E4, как продемонстрировано на рисунке 4. Учитывая это, можно применить выражение:

$$u = k \times err, \quad (8)$$

где  $u$  – управляющее воздействие;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $err$  – ошибка (от англ. error).

Выражение 8 создает управляющее воздействие на гусеничный привод машины. Если робот будет съезжать с заданной траектории, то регулятор будет исправлять его движение и выводить обратно (рис. 4).

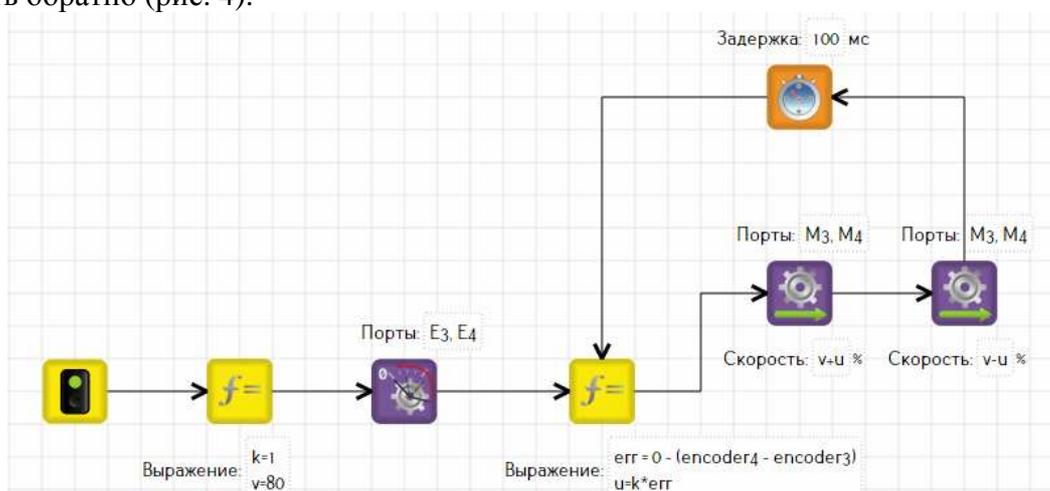


Рис. 4. предложенная схема автоматки движения

Применение автономных систем управления в строительной технике, таких как нейросети и пропорционально-дифференциальные регуляторы, а также автономные анализирующие системы, например, бортовые компьютеры, представляет собой мощный инструмент для улучшения производительности и безопасности в строительной отрасли. Они обеспечивают более точные и надежные результаты, сокращают время выполнения работ и снижают риски для работников. Эти передовые технологии уже активно используются, и их роль в строительстве будет только увеличиваться в будущем.

В заключении можно сделать вывод, что использование автономных строительных машин увеличит производительность и безопасность на стройплощадке, сократит время выполнения задачи и упростит рабочий процесс.

### Обсуждение и заключения

Исследование позволяет сделать вывод, что при использовании дополнительных систем в строительную технику, включая "Индустрию 4.0", более эффективны по сравнению с традиционными технологическими средствами управления. Анализ показал, что беспилотные агрегаты на ТТМ применяются эффективно. В перспективе планируется рассмотреть вопрос беспилотного управления машиной с использованием языка программирования Python и создания блок-схем для лучшей визуализации работы программы.

Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ обучающимися СПбГАСУ (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») в 2023 году.

**Финансирование.** Статья профинансирована за счет гранта СПбГАСУ №50С23.

**Благодарности.** Выражаю благодарность своему научному руководителю Литвину Роману Андреевичу за помощь и принесенный вклад при планировании исследования и составлению научной статьи. Также я очень благодарен университету СПбГАСУ, кафедре АДФ, своим коллегам и родителям, пока шла работа над рукописью.

#### Список литературы

1. Липкин Е.Б. Индустрия 4.0: Умные технологии – ключевой элемент в промышленной конкуренции. – М.: Остек-СМТ, 2017. – 223 с.
2. Alasdair Gilchrist Industry 4.0: The Industrial Internet of Things // Wiley-ISTE. 2016, vol. 4, pp. 103-125.
3. Волков С.А., Евтюков С.А. Строительные машины: Учебник для строит. вузов. – СПб: ООО «Изд-во ДНК», 2012. – 597 с.
4. Евтюков С.А., Евтюков С.С., Чудаков А.В., Куракина Е.В. Наземные транспортно-технологические машины. – СПб.: ООО «Издательский дом «Петрополис»», 2016. – 504 с.
5. Peter Corke. Robotics, Vision, and Control // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2023, vol. 2, no. 2, pp. 127-158.
6. Bruno Siciliano. Springer Handbook of Robotics // Springer Handbooks. 2008, vol. 2, no. 3, pp. 67-86.
7. Цой Т.Г. Оценка систем координатных меток с использованием бортовой камеры мобильного робота "сервосила инженер" в условиях закрытых помещений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – №3. – С. 289-299.
8. Илюхин Ю.В., Топорин А.А. Интеллектуальное управление мобильным роботом в среде с препятствиями на основе нечёткой логики // Вестник МГТУ «Станкин». – 2021. – №1. – С. 81-88.
9. Martin Frank. A step towards the design of collaborative autonomous machines a study on construction and mining equipment // Blekinge Institute of Technology. 2019, vol. 7, no. 1, pp. 33-35.
10. Нагоев З.В., Шуганов В.М. Разработка интеллектуальной интегрированной системы "умное поле" // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – №1. – С 81-91.

#### References

1. Lipkin E. B. Industry 4.0: Smart technologies are a key element in industrial competition. – М.: Ostek-SMT, 2017. – 223 p.
2. Alasdair Gilchrist Industry 4.0: The Industrial Internet of Things // Wiley-ISTE. 2016, vol. 4, pp. 103-125.
3. Volkov S.A., Yevtyukov S.A. Construction machines: Textbook for builds. universities. – SPb.: LLC "DNA Publishing house", 2012. – 597 p.
4. Evtyukov S.A., Evtyukov S.S., Chudakov A.V., Kurakina E.V. Ground transport and technological machines. – SPb.: Publ. house "Petropolis" LLC, 2016. – 504 p.
5. Peter Corke. Robotics, Vision, and Control // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2023, vol. 2, no. 2, pp. 127-158.
6. Bruno Siciliano. Springer Handbook of Robotics // Springer Handbooks. 2008, vol. 2, no. 3, pp. 67-86.
7. Tscoi T.G. Evaluation of coordinate tag systems using the onboard camera of the mobile robot "servoforce engineer" in indoor conditions // News of the SFU. Technical sciences. 2022, no. 3, pp. 289-299.
8. Plyukhin Yu.V., Toporin A.A. Intelligent control of a mobile robot in an environment with obstacles based on fuzzy logic // Bulletin of MSTU "Stankin". 2021, no. 1, pp. 81-88.
9. Martin Frank. A step towards the design of collaborative autonomous machines a study on construction and mining equipment // Blekinge Institute of Technology. 2019, vol. 7, no. 1, pp. 33-35.
10. Nagoev Z.V., Shuganov V.M. Development of an intelligent integrated system "smart field" // News of the SFU. Technical sciences. 2022, no.1, pp. 81-91.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Литвин Роман Андреевич</b> – кандидат технических наук	<b>Litvin Roman Andreevich</b> – candidate of technical sciences
<b>Мусливец Михаил Александрович</b> – студент	<b>Muslivets Mikhail Aleksandrovich</b> – student
myslivec-2000@yandex.ru	

Получена 10.11.2023