Оригинальная статья

УДК 629.05 © Р.В. Садовец✉[1], И.В. Лобачев[1], И.С. Сыркин[2], В.Ю. Садовец[2], 2025

[1] ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», 105005, г. Москва, Россия,
[2] ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: r.sadovec1296@yandex.ru

Original Paper

UDC 629.05 © R.V. Sadovets✉[1], I.V. Lobachev[1], I.S. Syrkin[2], V.Yu. Sadovets[2], 2025

[1] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation
[2] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: r.sadovec1296@yandex.ru

Анализ записей модуля навигации карьерного самосвала при движении по угольному разрезу*

Analysis of the navigation module records of a mining dump truck while driving through a coal mine

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-12-104-110

САДОВЕЦ Р.В.
Студент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», 105005, г. Москва, Россия, e-mail: r.sadovec1296@yandex.ru

ЛОБАЧЕВ И.В.
Старший преподаватель, ведущий программист Научно-образовательного центра «КАМАЗ-БАУМАН», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», 105005, г. Москва, Россия

СЫРКИН И.С.
Канд. техн. наук, доцент, заместитель руководителя Научного центра «Цифровые технологии», ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: syrkin@kuzstu.ru

В настоящей статье представлены результаты анализа и обработки записей с инерциальной навигационной системы (ИНС) и геодезического ГНСС-приемника, расположенных на карьерном самосвале (КС) при его движении по угольному разрезу. Актуальным направлением развития горнодобывающей промышленности выступает роботизация карьерной техники. Обязательной подсистемой любого автономного наземного транспортного комплекса (АНТК) выступает модуль навигации. Он отвечает за высокоточное определение местоположения и ориентации техники в пространстве (localization). Однако при движении КС присутствует ряд явлений, присущих только подобному роду техники. К таковым можно отнести погрузку/разгрузку горной породы, вибрацию от дизельного двигателя, влияние микро- и макропрофиля дорожного полотна. Они, напрямую или косвенно, влияют на показания навесного оборудования, что отражается на всех последующих

** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 г. №075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. № 1144-р в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.*

системах автономного движения: восприятии (perception), прогнозировании (prediction), планировании (planning). Таким образом, важным этапом разработки автономного КС являются точное определение вредных составляющих в сигнале и их последующая фильтрация. После цифровой обработки и комплексирования данных от нескольких источников можно переходить к построению траектории автономного движения и передаче информации в центр диспетчеризации угольного разреза. Полученные в статье результаты показали необходимость адаптивной обработки показаний измерительного оборудования с учетом частоты вращения двигателя, а также вибраций КС вследствие погрузки/разгрузки породы и вибраций вследствие движения самосвала.

Ключевые слова: *автономный карьерный самосвал, беспилотные транспортные средства, инерциальная система навигации, цифровая обработка данных*

Для цитирования: Анализ записей модуля навигации карьерного самосвала при движении по угольному разрезу / Р.В. Садовец, И.В. Лобачев, И.С. Сыркин и др. // Уголь. 2025;(12):104-110. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-104-110.

САДОВЕЦ В.Ю.
Канд. техн. наук, доцент,
руководитель Научного центра
«Цифровые технологии»,
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный
технический университет
имени Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: svyu.pmh@kuzstu.ru

Abstract

This article presents the results of the analysis and processing of the records from the inertial navigation system (INS) and the geodetic GNSS receiver located on the quarry dump truck (QD) when it moves along the coal mine. The actual direction of development of the mining industry is the robotization of quarry equipment. The navigation module is a mandatory subsystem of any autonomous ground transport complex (AGTC). It is responsible for high-precision determination of the location and orientation of the equipment in space (localization). However, when the QD moves, there are a number of phenomena inherent only to this type of equipment. These include loading/unloading of rock, vibrations from a diesel engine, and the influence of micro and macro profiles of the roadway. They directly or indirectly affect the readings of attachments, which affects all subsequent autonomous motion systems: perception, prediction, and planning.

Keywords

Autonomous mining dump truck, unmanned vehicles, inertial navigation system, digital data processing.

Acknowledgements

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Agreement № 075-15-2022-1198 dated 30.09.2022 with the Gorbachev Kuzbass State Technical University on complex scientific and technical program of full innovation cycle: "Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life" (the "Clean Coal – Green Kuzbass" Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle) as part of implementing the project "Development and creation of an unmanned shuttle-type mine truck with a payload of 220 tonnes" in terms of research, development and experimental-design work.

For citation

Sadovets R.V., Lobachev I.V., Syrkin I.S., Sadovets V.Yu. Analysis of the navigation module records of a mining dump truck while driving through a coal mine. *Ugol'*. 2025;(12):104-110. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-104-110.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением цифровизации горнодобывающей промышленности выступает роботизация карьерной техники, в частности КС [1, 2, 3, 4]. Положительные и отрицательные эффекты, а также особенности внедрения роботизированной техники в угледобывающие предпри-

ятия подробно описаны в научных трудах Д.М. Дубинкина [3, 4, 5, 6]. По данной теме активно работают коллективы Научного центра «Цифровые технологии» (НЦЦТ) КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] и Научно-образовательного центра «КАМАЗ-БАУМАН» МГТУ им. Н.Э. Баумана [11, 12, 13].

Обязательной составляющей автономной карьерной техники выступает бортовая роботизированная система управления (БРСУ) [1]. Она состоит из множества подсистем, одна из которых – модуль навигации [7]. Эта подсистема отвечает за определение местоположения и ориентации техники в угольном разрезе. В аппаратную часть модуля входят лидар, радар, ИНС и система спутниковой навигации (ГНСС) [8].

На текущий момент коллектив НЦЦТ КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева ведет активные разработки и отладку программного обеспечения (ПО) для ИНС и ГНСС-приемника [9, 10]. Одной из задач ПО в составе БРСУ выступают цифровая обработка сигналов (ЦОС) навесного оборудования и передача полученных результатов в центр диспетчеризации. В статье проводятся изучение и анализ результатов работы ПО при тестировании на реальном оборудовании в условиях угольного разреза.

Настоящая научная статья выступает продолжением работ [9, 10] и включает:

1. Анализ циклов проездов КС по угольному разрезу, определение источников шумов;
2. Обнаружение ошибок в работе ПО для навесного оборудования БРСУ [9, 10] и их дальнейшее устранение;
3. Изучение методов ЦОС для выделения полезной составляющей из сигнала [14, 15, 16], рассмотрение подходящих цифровых фильтров;
4. Расширения функционала ПО визуализации движения КС для последующей интеграции в систему диспетчеризации карьера [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные с испытаний навесного оборудования БРСУ на КС предоставлены сотрудниками НЦЦТ КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева. За базовую платформу принят КС БЕЛАЗ серии 7513 грузоподъемностью 130 т. В качестве оборудования используются ИНС «Гиронав Н1В» ($f_{\text{ИНС}}$ = 400 Гц) и два ГНСС-приемника «Ориент Системс» ОС-213 ($f_{\text{ГНСС}}$ = 10 Гц). Для повышения точности определения координат применяются RTK-поправки. Пример размещения оборудования на КС и его внешний вид представлены в работе [9].

Математический аппарат цифровой обработки сигнала

Исходный сигнал является цифровым и может быть описан дискретной последовательностью:

$$x[n],\ \ n = \overline{0, N-1} \tag{1}$$

где n – номер отсчета дискретизированного сигнала; N – общее количество измерений.

В сигнале присутствуют случайные стационарные составляющие (приборные шумы) и случайные нестационарные (перемещение КС; вибрации от дорожного полотна) [14].

При этом в сигнале также имеется детерминированная составляющая – вибрации от дизельного двигателя. Они описываются суперпозицией узкополосных случайных процессов с кратными средними частотами [17]:

$$s(t) = \sum_k A_k(t)\cos[k\omega_r t - \varphi_k(t) + \psi_k(t)], \tag{2}$$

где ω_r – угловая частота вращения ротора, рад/с; $k\ \omega_r$ – средняя частота узкополосного процесса, рад/с; $A_k(t)$ – случайная медленно изменяющаяся огибающая узкополосного процесса; $\varphi_k(t)$ – меняющаяся фаза, рад; $\psi_k(t)$ – уровень шумового возбуждения.

Спектр сигнала (2) сосредоточен в узких полосах в окрестности частоты вращения ротора:

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi}, \tag{3}$$

и на высших гармониках, кратных f_r:

$$f = m \cdot f_r,\ m = \overline{1, M}. \tag{4}$$

Для анализа дискретной последовательности (1) применяют дискретное преобразование Фурье (ДПФ), имеющее вид [14, 15, 16]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]\cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]\cdot W_N^{-nk},\ \ k = \overline{0, N-1} \tag{5}$$

где k – номер гармоники (обычно берут, $k = \overline{0, N-1}$); $X[k]$ – последовательность комплексных частотных коэффициентов; W_N^{nk} – поворотный коэффициент. Существует и обратное ДПФ [15, 16, 17].

Также имеют место алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ): с децимацией по времени, по частоте, алгоритм Кули-Тьюки и другие [14, 15, 16]. Основное назначение алгоритмов БПФ – снижение вычислительной сложности ДПФ с $\overline{O}(N^2)$ до $\overline{O}(N\cdot\log(N))$. В работе применяется функция MATLAB, работающая на основе библиотеки FFTW [18].

Для подавления нежелательных частот и выделения полезного сигнала в ЦОС применяют цифровые фильтры [14, 15, 16]. Они отличаются своими свойствами, импульсной характеристикой (конечная или бесконечная), назначением. В настоящей работе рассматривается применение следующих видов фильтров:

– *Фильтр низких частот (ФНЧ).* За основу принят фильтр Баттерворта четвертого порядка. Используется для подавления высокочастотных сигналов (более 100 Гц);

– *Режекторный фильтр.* В основе также лежит фильтр Баттерворта четвертого порядка, ширина полосы задерживания Δf = 3 Гц. Фильтр необходим для устранения узкополосных шумов от вибраций двигателя (2)-(4);

– *Сглаживающий фильтр Савицкого-Голея*. Отдельно рассматривается два фильтра: восьмого порядка и размером скользящего окна 35; второго порядка и размером скользящего окна 45.

Преобразования систем координат

На *рис. 1* представлена система координат (СК) ИНС. Более удобным является вариант, когда направление оси Ox совпадает с продольным направлением движения КС, а ось Oz направлена вертикально вверх относительно опорной поверхности (палубы). Поскольку отсутствует

Рис. 1. СК ИНС

Fig. 1. IMU coordinate system

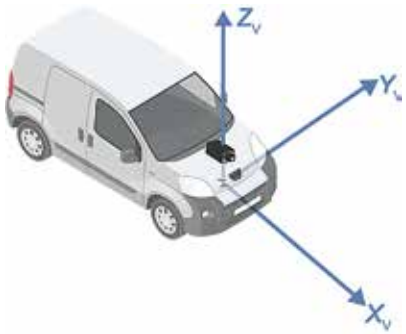

Рис. 2. СК АНТК

Fig. 2. UGVs coordinate system

точная информация по расположению ИНС относительно центра масс КС, в работе в качестве целевой СК принят вариант, представленный на *рис. 2*. За начало координат берется центр масс ИНС.

Как следует из работы [9], ИНС расположен под продольным ($\alpha_0 = -16{,}67°$) и поперечным ($\beta_0 = -0{,}57°$) углами относительно палубы. Переход от СК ИНС к целевому осуществляется в порядке XYZ. Тогда матрица перехода T будет иметь вид:

$$T = R_Z(90°) \cdot R_Y(\beta_0) \cdot R_X(\alpha_0) =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta_0) & 0 & \sin(\beta_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta_0) & 0 & \cos(\beta_0) \end{bmatrix} \times \quad (6)$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_0) & -\sin(\alpha_0) \\ 0 & \sin(\alpha_0) & \cos(\alpha_0) \end{bmatrix}.$$

Матрицы R выражают поворот вокруг оси, соответствующей нижнему индексу. Тогда линейные ускорения АНТК в целевой СК будут определяться соотношением:

$$\bar{a}_{\text{АНТК}} = T\ \bar{a}_{\text{АНТК}} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\bar{a}_{\text{ИНС}} = (a_x a_y a_z)$ – вектор линейных ускорений самосвала в СК ИНС, м/с^2; g – ускорение свободного падения (g = 9,815 м/с^2).

ГНСС-приемник определяет местоположение АНТК (координаты, скорости) в глобальной СК ENU (East-North-Up; «Восток-Север-Вверх»).

Обработка записей
с навесного оборудования БРСУ

В рамках обработки записей были решены следующие задачи:

1. Произведена сортировка записей по глобальному времени. Частота дискретизации приборов на практике является переменной величиной, т.е.:

$f_{\text{ИНС}}$ = 400 Гц ≠ const,

$f_{\text{ГНСС}}$ = 10 Гц ≠ const.

По этой причине в записанных файлах наблюдались «перескоки» во времени.

2. Добавлен интервал инициализации. Он необходим для синхронизации измерений с навесного оборудования БРСУ;

3. Глобальное время переведено в локальное. В качестве начального момента времени принят момент зажигания двигателя КС.

4. Рассчитана средняя магнитуда скорости $v_{\text{ср.}mag}$ с двух ГНСС-приемников:

$$v_{\text{ср.}mag} = \frac{\sqrt{v_{LE}^2 + v_{LN}^2} + \sqrt{v_{RE}^2 + v_{RN}^2}}{2}, \quad (8)$$

где v_{LE}, v_{LN} – измеренная линейная скорость с левого ГНСС-приемника в СК ENU, м/с; v_{RE}, v_{RN} – измеренная линейная скорость с правого ГНСС-приемника в СК ENU, м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа из общего проезда был «вырезан» промежуток длительностью 16 мин при наличии RTK-поправок. Далее приведены графики усредненной магнитуды скорости (8) *(рис. 3)*, записи линейных ускорений с акселерометра ИНС *(рис. 4)*, спектры исходного и отфильтрованного

Рис. 3. Усредненная магнитуда скорости с двух ГНСС-приемников с RTK-поправками

Fig. 3. Averaged velocity magnitude from two GNSS receivers with RTK query

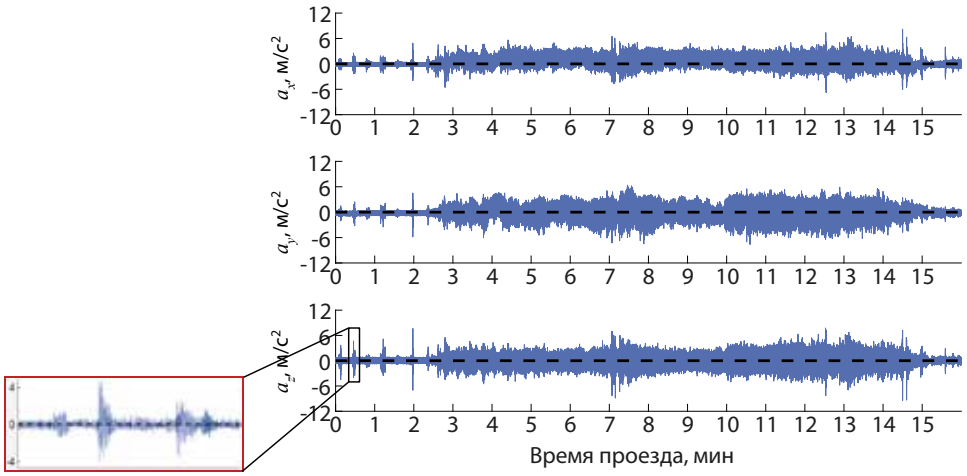

Рис. 4. Измеренные значения линейных ускорений с ИНС в СК АНТК

Fig. 4. Measured values of linear acceleration from INS in UGVs coordinate system

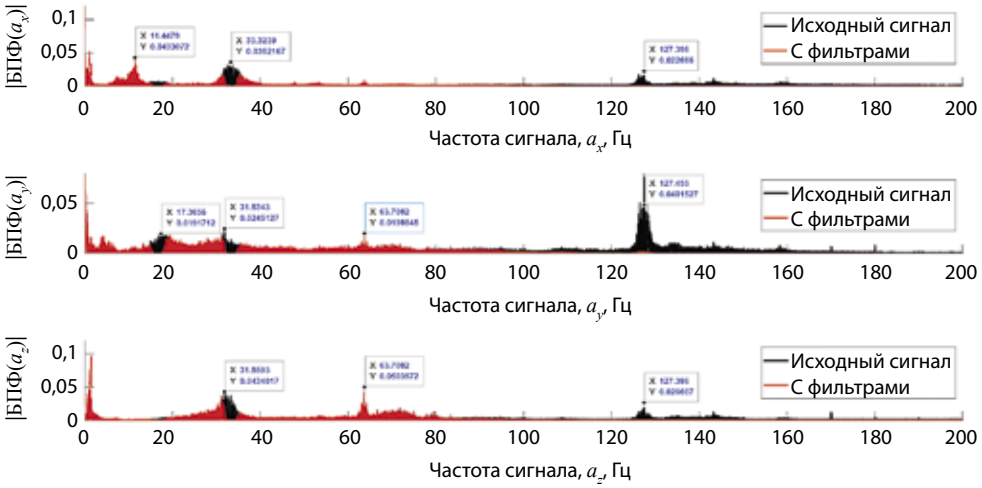

Рис. 5. Частотный спектр исходного сигнала и сигнала с применением фильтров

Fig. 5. Frequency spectrum of the original and filtered signal

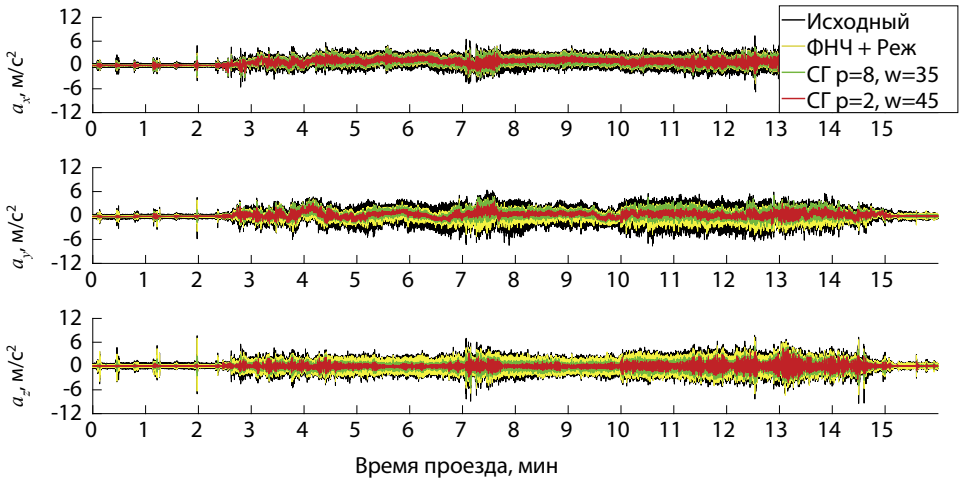

Рис. 6. Сигнал со сглаживающими фильтрами

Fig. 6. Signal with smoothing filters

сигналов линейных ускорений *(рис. 5)*, полученный сигнал с применением сглаживающих фильтров *(рис. 6)*.

При работе с частотными спектрами были замечены пики амплитуд на частотах, близких к частотам вращения дизельного двигателя:

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{n_r}{60} = \frac{1000}{60} \sim 16,6 \text{ Гц}, \quad (9)$$

а также на высших гармониках. В первом приближении это соответствует соотношениям (2)-(4). Для подавления этих вибраций были введены режекторные фильтры.

Также введен ФНЧ для подавления высокочастотных составляющих *(см. рис. 5)*.

На *рис. 6* показаны: исходной сигнал (черный); с применением режекторного фильтра и ФНЧ (желтый); два

сигнала с применением сглаживающего фильтра Савицкого-Голея с отличными параметрами (зеленый – восьмой порядок, размер скользящего окна 35; красный – второй порядок, размер скользящего окна 45).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведем анализ полученных графиков. Как следует из *рис. 3*, при наличии RTK-поправок ГНСС-приемник определяет скорость движения КС с достаточной для беспилотного движения точностью. Сложность вызывают промежутки времени, на которых приемник теряет связь с базовой станцией. В такие моменты основным источником информации о местоположении должен выступать ИНС. Этого можно добиться путем комплексирования сигналов [19].

На *рис. 4* показаны линейные ускорения в СК АНТК, записанные с акселерометра ИНС. В первые минуты проезда наблюдаются высокочастотные пики. Они соответствуют погрузке породы в КС (обведен красным). С третьей минуты самосвал начинает движение.

На *рис. 5* отражены частотные спектры исходного сигнала с акселерометра (черный) и после наложения ФНЧ в совокупности с режекторными (красный). Полезный сигнал (перемещение КС) находится на низких частотах, поэтому высокочастотные составляющие (> 100 Гц) было принято отсечь. Природа пика на частоте 128 Гц предварительно была связана с колебаниями самосвала, возникающими при погрузке/разгрузке породы. Также заметны расхождения частоты колебаний от вибрации двигателя по оси Ox с теоретическими значением (9). Для решения проблемы можно применять адаптивные фильтры, которые будут способны смещать опорную частоту f_r, например на основе показаний тахометра, и изменять ширину полосы.

Как следует из *рис. 6,* после применения сглаживающего фильтра сигнал стал иметь значительно лучший вид по сравнению с исходным.

Полученные результаты имеют теоретическую и практическую значимость для разработки БРСУ КС. Проведенный анализ является отправной точкой для разработки оптимальных фильтров для обработки цифровых сигналов с ИНС. Следующими шагами в разработке выступают: введение критериев по оценке качества сигнала; увеличение выборки данных для анализа; внедрение показаний с гироскопа и магнитометра ИНС; комплексирование информации с нескольких источников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены анализ и обработка записей с ИНС и ГНСС-приемников с проездов КС БЕЛАЗ серии 7513 по угольному разрезу. Выделены особенности циклов движения, определены основные источники шумов.

Рассмотрены методы ЦОС для подавления шумов и выделение полезного сигнала. Качественная цифровая обработка является обязательной составляющей для создания высокоточной системы управления.

Произведена модернизация ПО для работы с данными. В дальнейшем разрабатываемый программный модуль можно будет внедрить в систему диспетчеризации разреза, а также применить для улучшения алгоритмов обработки данных систем беспилотного управления карьерного самосвала для построения высокоточных 3D-карт местности.

Список литературы • References

1. Владимиров Д.Я., Клебанов А.Ф., Кузнецов И.В. Цифровая трансформация открытых горных работ и новое поколение карьерной техники // Горная промышленность. 2020. № 6. С. 10-12. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-10-12.
   Vladimirov D.Ya., Klebanov A.F., Kuznetsov I.V. Digital Transformation of Surface Mining and New Generation of Open-Pit Equipmet. *Gornaya promyshlennost'*. 2020;(6):10-12. (In Russ.). DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-10-12.
2. Соболев А.А. Анализ опыта применения беспилотных карьерных самосвалов // Горный журнал. 2020. № 4. С. 51-55. DOI: 10.17580/gzh.2020.04.10.
   Sobolev A.A. Review of case history of unmanned mining trucks. *Gornyi zhurnal*. 2020;(4):51-55. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2020.04.10.
3. Дубинкин Д.М. Современное состояние техники и технологий в области автономного управления движением транспортных средств угольных карьеров // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6(146). С. 8-15. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-8-15.
   Dubinkin D.M. Current state of engineering and technology in the field of autonomous traffic control of coal mine vehicles. *Mining equipment and electromechanics*. 2019;6(146):8-15. (In Russ.). DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-8-15.
4. Ашихмин В.Е., Фурман А.С., Шадрин В.Н. Скоростные и рабочие режимы карьерных автосамосвалов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 4(92). С. 123-125.
   Ashikhmin V.E., Furman A.S., Shadrin V.N. Speed and Operating Modes of Quarry Dump Trucks. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2012;4(92):123-125. (In Russ.).
5. Дубинкин Д.М. Основы цифрового создания автономных карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 2 (160). С. 39-50. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-2-39-50.
   Dubinkin D.M. Fundamentals of Digital Creation of Autonomous Dump Trucks. *Mining Equipment and Electromechanics* 2022; 2(160):39-50. (In Russ.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-2-39-50.
6. Диспетчеризация в карьерных экскаваторно-автомобильных комплексах с беспилотным транспортом / Ю.Е. Воронов, А.Ю. Воронов, Д.М. Дубинкин и др. // Уголь. 2023. № 9. С. 75-83. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-75-83.
   Voronov Yu.E., Voronov A.Yu., Dubinkin D.M., Maksimova O.S. Dispatching in truck-shovel systems with unmanned transport at open-pit mines. *Ugol'*. 2023;(9):75-83. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-75-83.
7. Влияние трассы разреза на скорость движения карьерного самосвала грузоподъемностью 220 т / Д.М. Дубинкин, А.В. Дягилева, С.Д. Дубинкин и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 6 (166). С. 110-119. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-110-119.
   Dubinkin D.M., Dyagileva A.V., Dubinkin S.D., Turgenev I.A. Influence of the Cut Route on the Speed of a 220-Ton Car-Sized Open-Pit Dumper. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2024;6(166):110-119. (In Russ.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-110-119.
8. Исследование скоростных режимов движения карьерного самосвала грузоподъемностью 220 т / Д.М. Дубинкин, И.С. Елкин,

С.Д. Дубинкин и др. // Горное оборудование и электромеханика. 2024. №5 (175). С. 61-69. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-61-69.
Dubinkin D.M., Elkin I.S., Dubinkin S.D., Turgenev I.A. Research of Speed Modes of a 220-Ton Carrying Capacity Open-Pit Dumper. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2024;5(175):61-69. (In Russ.) DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-61-69.

9. Создание алгоритма обработки данных систем беспилотного управления карьерного самосвала для построения высокоточных 3D-карт местности / Д.М. Дубинкин, В.Ю. Садовец, И.С. Сыркин и др. // Уголь. 2024. № 11S. С. 116-122. DOI: 10.18796/0041-5790- 2024-11S-116-122.
Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu., Syrkin I.S., Korshunova E.V. Creation of an algorithm for processing data from unmanned control systems of a quarry dump truck for constructing high-precision 3D maps of the terrain. *Ugol'*. 2024;(11S):116-122. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-116-122.
10. Хорешок А.А., Стенин Д.В., Фурман А.С. Исследование распределения скоростей движения карьерных автосамосвалов // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 5. С. 48-49.
Khoreshok A.A., Stenin D.V., Furman A.S. Research of the Distribution of Carrying Capacity of Open-Pit Dump Trucks. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2009;(5):48-49. (In Russ.).
11. Лобачев И.В., Масленников А.Л., Пчелинцев В.Э. Алгоритм формирования трассы для имитационной модели движения карьерного транспортного средства // Автоматизация. Современные технологии. 2024. Т. 78. № 4. С. 152-157. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-152-157.
Lobachev I.V., Maslennikov A.L., Pchelintsev V.E. An Algorithm for Generating a Path for a Simulation Model of a Quarry Vehicle Movement. *Automation. Modern Technologies.* 2024;78(4):152-157. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-152-157. (In Russ.).
12. Выбор архитектуры системы управления беспилотным транспортным средством для движения по закрытым территориям / И.В. Лобачев, М.А. Рыженко, Г.А. Арутюнян и др. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 2. С. 87-91.
Lobachev I.V., Ryzhenko M.A., Arutyunyan G.A., Muravyev A.S., Dubinkin D.M. Selection of the Control System Architecture for an Unmanned Ground Vehicle Operating in Confined Areas. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva.* 2024;(2):87-91. (In Russ.).
13. Лобачев И.В., Масленников А.Л. Моделирование работы двухмерного лидара для применения в задачах управления движением наземных транспортных средств в карьере / XLVIII Академические чтения по космонавтике: Сборник тезисов, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, Москва, 23-26 января 2024 года. М.: ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 2024. С. 514-517.
14. Якимов Е.В., Вавилова Г.В., Клубович И.А. Цифровая обработка сигналов: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 307с.
15. Сюзев В.В. Основы теории цифровой обработки сигналов. Учебное пособие. М.: Издательство «РТСофт», 2014. 752 с.
16. Курс лекций «Основы цифровой обработки сигналов». URL: https://habr.com/ru/articles/460445/ (дата обращения: 15.11.2025).
17. Диагностика горных машин и оборудования. Учебное пособие / Б.Л. Герике, Г.И. Козовой, В.С. Квагинидзе и др. М., 2012. 400 с.
18. Frigo M., Johnson S.G. "FFTW: An Adaptive Software Architecture for the FFT." Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1998;(3):1381-1384.
19. Алгоритмы обработки информации навигационных систем и комплексов летательных аппаратов / М.С. Селезнева, К. Шэнь, К.А. Неусыпин и др. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 234 с.

Authors Information
Sadovets R.V – Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: r.sadovec1296@yandex.ru

Lobachev I.V. – Senior Lecturer, Lead Programmer Brother, KAMAZ-BAUMAN R&D, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: lobivit@bmstu.ru,

Syrkin I.S. – PhD (Engineering), Associate Professor, Deputy Leader of the Digital Technologies Research Center, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: syrkin@kuzstu.ru

Sadovets V.Yu. – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Digital Technologies Research Center, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: svyu.pmh@kuzstu.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 3.10.2025
Поступила после рецензирования: 15.11.2025
Принята к публикации: 28.11.2025

Paper info
Received October 3, 2025
Reviewed November 15, 2025
Accepted November 28, 2025