УДК 622.232

СИСТЕМА НАВИГАЦИИ ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА НА КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ*



Л. Ю. ЛЕВИН¹, зав. отделом аэрологии и теплофизики, д-р техн. наук, aerolog lev@mail.ru



Д. С. КОРМЩИКОВ¹, научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, канд. техн. наук



Е. Г. КУЗЬМИНЫХ¹ аспирант



A. M. MAЧЕРЕТ², главный маркшейдер, начальник маркшейдерского управления

 1 Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия 2 ПАО «Уралкалий», Березники, Россия

Введение

На рудниках ПАО «Уралкалий» применяют камерную систему разработки с использованием проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р». Одними из основных факторов безопасной реализации камерной системы разработки являются мощность межкамерных целиков и соосность очистных камер. Маркшейдерская служба регламентирует отклонение пройденной выработки от проектной оси не более чем на 20 см. Для выдерживания требуемой точности машинист проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» периодически выполняет визуальный контроль отклонения траектории проходки по двум вешкам, установленным маркшейдерской службой. Однако при работе комбайна в тупиковой выработке образуется сильно запыленная атмосфера, затрудняющая выполнение визуального контроля [1]. В связи с этим машинисты комбайна вынуждены делать периодические остановки в работе для снижения запыленности выработки и осуществлять визуальный контроль. При этом следует учитывать фактор влияния опыта машиниста комбайна на выполнение этих операций. Это приводит к простоям оборудования и снижению возможной производительности комбайна. Также стоит отметить большие трудозатраты маркшейдерской

Рассмотрены возможные способы построения навигационных систем управления проходческими и очистными комбайнами. По результатам анализа установлено, что наиболее перспективным вариантом навигации комбайнов на подземных работах являются системы, реализующие принципы инерционной навигации. Показано, что современные бесплатформенные инерциальные системы удовлетворяют условиям обеспечения необходимой точности. На их основе разработан опытный образец системы навигации комбайна и проведены его наземные испытания.

Ключевые слова: подземный рудник, комбайн, бесплатформенная инерциальная навигационная система, испытания, отклонение, точность, горные выработки.

DOI: 10.17580/gzh.2021.04.13

службы на постоянный контроль и задание траектории движения комбайну.

Современные тенденции модернизации технологических процессов добычи на горных предприятиях обусловливают необходимость разработки эффективного оборудования, повышающего уровень производства [2–6]. Автоматизация процесса задания траектории движения комбайна, а также определения фактического курса может снизить время проходки очистных камер. С этой целью предприятием ПАО «Уралкалий» была поставлена задача исследования и разработки опытного образца системы, позволяющей контролировать фактическое положение комбайна в пространстве.

Принципы действия системы контроля направления движения комбайна

Для обеспечения навигации комбайна в подземных условиях может служить опыт, используемый на поверхности, например в авиационной и морской навигации. В настоящее время можно выделить следующие методы [7]:

- обзорно-сравнительный;
- позиционный (метод поверхностей и линий положения);
- инерциальные методы счисления пути.

По типу измерителей методы счисления пути можно подразделить на воздушный, доплеровский и инерциальный.

На практике методы инерциального счисления пути реализованы с помощью специальных технических средств — инерциальных навигационных систем (ИНС). Основное назначение последних заключается в движении объекта к заданной точке при автоматическом или полуавтоматическом управлении и ориентации.

К достоинствам ИНС можно отнести их автономность от внешних источников данных, высокую информативность, более

^{*}Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-77-30008.

эффективную защиту от помех, быстродействие при передаче информации, отсутствие необходимости постоянного обслуживания.

Однако ИНС имеют некоторые недостатки. К ним можно отнести ошибки, которые накапливаются с течением времени [8]. Это могут быть как ошибки, вызванные неправильной исходной настройкой оборудования, так и методические ошибки. С целью коррекции ошибок создают комбинированные навигационные системы, где данные, получаемые ИНС, дополняют информацией, поступающей от неавтономных систем (системы контрольных реперных точек, спутниковые системы навигации и др.). Системы оснащены дополнительными корректирующими приборами (например, датчиками бокового сноса на самолетах) [9—14].

Разработка опытного образца системы

На начальном этапе разработки системы навигации комбайна авторами статьи был выполнен анализ существующего опыта навигации и автоматизации технологических процессов на горных производствах, технологического режима работы комбайнов на калийных рудниках, а также существующего оборудования, подходящего для построения системы навигации комбайна. На основе выполненного анализа были выделены основные ограничивающие факторы и обоснованы технические требования к опытному образцу системы.

Система навигации добычного комбайна в условиях подземных рудников обладает некоторыми особенностями построения в силу ограниченного пространства и способов коррекции показаний ИНС. К основным ограничивающим факторам применения инерциальных систем навигации комбайна относятся следующие.

- 1. Крайне низкая скорость движения комбайна. При скорости до 0,3 м/мин в инерциальной навигационной системе происходит накопление погрешности по приращению координаты пройденного пути в случае использования бесплатформенных инерциальных навигационных систем без коррекции.
- 2. Боковой снос комбайна. При малых скоростях и небольших постоянных боковых смещениях комбайна возникают трудности при определении направления вектора скорости, что в дальнейшем приводит к накоплению ошибки расчета координат. В результате этого комбайн может двигаться параллельно или уходить с требуемого курса. Поэтому в системе необходимо использовать дополнительные устройства коррекции, которые должны удовлетворять специфическим условиям работы добычного комбайна. К таким определяющим факторам для систем коррекции в условиях рудников ПАО «Уралкалий» можно отнести следующие.
- 1. Среда эксплуатации. В процессе работы комбайна образуется большое количество пыли, в результате чего значительно сокращается видимость в камере. Этот факт, а также оседание пыли на оборудовании накладывают ограничения на применение оптических систем коррекции в процессе эксплуатации оборудования.
- 2. Условия эксплуатации. После отработки камеры комбайн осуществляет откатку в начало камеры и перемещение на

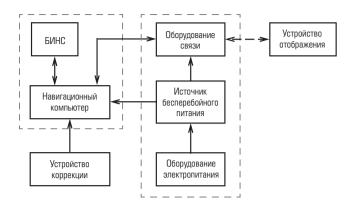


Рис. 1. Принципиальная схема системы навигации комбайна

новый участок. Использование стационарных установок приведет к усложнению и замедлению технологического процесса добычи за счет дополнительных операций по переносу оборудования. В связи с этим установка стационарного или сложного в эксплуатации оборудования нецелесообразна.

В качестве способов корректировки показаний работы бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) в условиях калийных рудников могут быть использованы методы, основанные на применении датчика пройденного пути, который может быть реализован на базе одометра, системы радиопозиционирования, камер машинного зрения или трехмерного георадара. На начальном этапе разработки системы навигации комбайна для проверки точности системы при испытаниях на земной поверхности был выбран способ коррекции, основанный на использовании датчика пройденного пути.

Исходя из параметров рудничной атмосферы, а также режима работы комбайна, к системе навигации были сформулированы основные требования, приведенные ниже. На **рис. 1** показана принципиальная схема устройства системы навигации комбайна.

Основные технические требования к системе

Основные технические треоования к системе	
Температура окружающей среды, ${}^{\circ}\mathcal{C}$	0 + 55
Относительная влажность воздуха,	
%, не более	98
Запыленность окружающей среды, мг/м ³	Нет ограничений
Исполнение оборудования	PB
Диапазон долготы, градус	Нет ограничений
Диапазон широты, не более южной	
и северной, градус	70
Диапазон угловых скоростей, рад/с	± 300
Точность определения угла курса,	
СКО, градус	<i>0,05•sec</i> (φ)
Ошибка проектирования пройденного пути	
на земную систему координат, СКО	0,25 % пройденного пути
Точность определения углов крена,	
тангажа, СКО, градус	0,03

Устойчивость к ударным воздействиям (длительность: 1 мс, форма: 1/2 синуса), д 100 Вибрация (устойчивость) (случайная 20 Гц — 1 КГц), д 5 П р и м е ч а н и е: ф — текущая географическая широта; РВ — рудничное взрывобезопасное; СКО — среднеквадратическое отклонение.

Необходимо отметить, что основным требованием по точности работы системы на этапе разработки опытного образца является обеспечение точности удержания заданного курса. На рудниках ПАО «Уралкалий» отклонение от проектной оси очистной камеры при проходке не должно превышать 20 см на 300 м пути.

Испытания опытного образца системы на поверхности

Основой системы навигации комбайна является бесплатформенная инерциальная навигационная система ГЛ-300 производства 000 «Гиролаб». Основные технические характеристики измерительного модуля приведены ниже.

Основные технические характеристики ГЛ-300 Погрешность СКО начального определения

угла курса о, градус, не более 0,04 / соs (широты)
Погрешность СКО удержания угла курса
за 1 чработы о, градус, не более 0,01
Погрешность СКО определения углов:

крена, тангажа о, градус, не более 0,02 (неподвижное

основание: 0,01)

Погрешность СКО счисления координат

о с коррекцией от одометра, %, не более
(от пройденного пути)

О,2
Погрешность СКО счисления высоты

Диапазон: X/Y/Z, рад/с ± 500 Диапазон линейных ускорений: X/Y/Z, g ± 10 (по заказу — до 30) Температура (рабочая, устойчивосты), °C -40...+55

(опционально -60...+55) Температура (предельная, прочность) , $^{\circ}C$ -55...+85

(опционально –70...+85)

Вибрация (устойчивость)
(случайная 60 Гц—1КГц), д 5
Устойчивость к ударным воздействиям
(длительность: 1 мс, форма: 1/2 синуса), д 100
Время функциональной готовности, с, не более 2
Время ускоренного гирокомпасирования, с, не более 360
Частота навигационных решений, Гц 1220
Напряжение питания,
В / потребляемая мощность, Вт 18...32/<20

Для проверки отклонения величины угла курса при продолжительном простое было проведено испытание измерительного модуля системы. Модуль находился неподвижным на протяжении 10 ч. Графики изменения углов курса, крена и тангажа приведены на рис. 2.

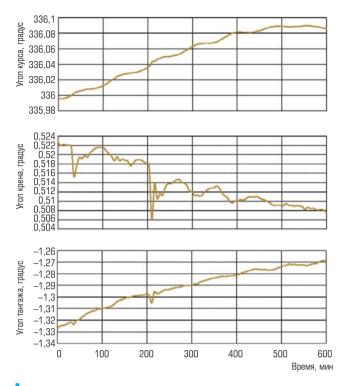


Рис. 2. Изменение углов курса, крена и тангажа во времени при неподвижном основании

По результатам испытаний установлено, что погрешности измерения углов курса, крена и тангажа за 10 ч не превысила 0,1°. Использование БИНС ГЛ-300 в качестве измерительного модуля в системе навигации комбайна обеспечит его корректную работу с удержанием углов курса, крена, тангажа в допустимом диапазоне даже после продолжительного простоя между рабочими сменами.

На следующем этапе были проведены наземные испытания системы на подвижном основании. С этой целью на прямолинейном участке дороги был построен маршрут протяженностью 300 м с использованием тахеометра Торсоп ES-105L и данных геодезической съемки при помощи прибора South Gnss Receiver Galaxy G1.

По результатам подготовки маршрута получены три базовые точки: две крайние и средняя, а также промежуточные точки с интервалом 25 м на протяжении всего маршрута. Для исключения влияния погрешности геодезической съемки было принято допущение, что базовые точки лежат на одной прямой.

Для удобства обработки результатов измерений в качестве координат положения изделия БИНС использовали координаты, пересчитанные относительно опорных. Данные координаты получены при задании в БИНС координат, отснятых с помощью геодезической съемки.

Для точного позиционирования установки при перемещении вдоль всего маршрута была натянута полиэтиленовая нить. Для перемещения объекта по контрольной прямой разработана специальная передвижная управляемая платформа (рис. 3).



Рис. 3. Передвижная платформа для испытаний системы контроля направления движения комбайна

В ходе испытаний выполнен ряд проездов, каждый осуществляли в двух режимах:

- с включенной коррекцией по данным датчика пройденного пути (проезд установки в прямом направлении вдоль натянутой нити на расстояние 300 м);
- без использования коррекции по данным датчика пройденного пути (проезд установки в обратном направлении вдоль натянутой нити на расстояние 300 м).

Для коррекции координат перемещение установки в обратном направлении выполняли с периодическими остановками.

Координаты, полученные от системы навигации комбайна, сравнивали с координатами прямой линии, построенной по геодезическим точкам. Отклонение измеряемых координат при прямом проезде установки с коррекцией от датчика пройденного пути и без коррекции представлено на **рис. 4**. В процессе испытаний ошибка определения координат относительно прямой линии не превышала 20 см. Полученные результаты удовлетворяют требованиям точности, указанным в нормативных документах.

Из рис. 4 видно, что применение устройств коррекции в системе навигации комбайна существенно уменьшает амплитуду пульсаций ошибки счисления координат. Результаты



Рис. 4. Зависимость ошибки от пройденного расстояния

испытаний показывают, что ошибка отклонения координаты не превышает 20 см на 300 м пройденного пути как при использовании данных коррекции, так и без них. При возврате установки на исходную позицию отклонение полученных координат от исходных составило 12 см. Однако в составе системы навигации комбайна необходимо использовать устройства коррекции для уменьшения ошибки счисления координат при простоях оборудования в период пересменки.

Взаимодействие с системой навигации комбайна и вывод измеряемых данных осуществляли с помощью специального программного обеспечения, разработанного авторами статьи. В дальнейшем это позволит машинисту комбайна оценивать ориентацию комбайна в пространстве и корректировать его курс по отношению к заданному.

Выводы

Результаты наземных испытаний показали, что опытный образец системы контроля направления движения комбайна обеспечивает точность определения координат в пределах 20 см на длине пути 300 м.

На следующем этапе планируется проведение опытнопромышленных испытаний системы в рудничных условиях на территории рудника БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий». В случае положительного результата внедрение системы поможет снизить затраты маркшейдерской службы на задание направления движения комбайну, а также уменьшить зависимость от опыта машиниста комбайна при выполнении визуального контроля отклонения движения машины.

Следует отметить, что система имеет хорошие перспективы применения по следующим направлениям:

- дистанционная работа маркшейдерской службы рудника при задании проектной траектории движении комбайна;
- автоматизация процесса передачи данных по проходческим и добычным работам в горно-геологическую информационную систему предприятия;
 - мониторинг параметров и циклограммы работы комбайна;
 - автоматизация процесса управления комбайном.

Библиографический список

- Левин Л. Ю., Исаевич А. И., Сёмин М. А., Газизуллин Р. Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горный журнал. 2015. № 1. С. 72—75. DOI: 10.17580/azh.2015.01.13
- Яценко С. Н., Яценко М. А., Николайчук Н. А. Применение системы автоматизации в добычных процессах на подземных горнорудных предприятиях // International Scientific Review. 2016. № 20(30). С. 23—26.
- Trifanov G. D., Shishlyannikov D. I., Lavrenko S. A. Assessment of URAL-20R machine use efficiency while developing potash salt fields // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. No. 9. P. 5722–5726.
- Сонг Ганг. Опыт внедрения автоматизации процессов подземной добычи угля на примере китайской угольной промышленности // Уголь. 2016. № 2. С. 25—29.
- Татаринович Б. А., Котляров В. О. Комплексный подход к проектированию подсистем ориентирования и управления движением мобильных роботов, применяемых в горном деле // ГИАБ. 2016. № 8. С. 183—189.
- Семыкина И. Ю., Григорьев А. В., Гаргаев А. Н. Подходы к созданию роботизированного проходческого комбайна в условиях безлюдной шахты // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Санкт-Петербургский горный ун-т, 2017. С. 202—205.
- Селиванова Л. М., Шевцова Е. В. Инерциальные навигационные системы : учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. Ч. 1: Одноканальные инерциальные навигационные системы. – 46 с.

- 8. *Степанов О. А.* Методы обработки навигационной измерительной информации : учеб. пособие. — СПб. : ун-т ИТМО, 2017. — 196 с.
- Шэнь Кай, Пролетарский А. В., Неусыпин К. А. Исследование алгоритмов коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2016. № 2(107). DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-28-39
- Кивокурцев А. Л., Соколов О. А. Особенности оптимизации алгоритмов ориентации бесплатформенной инерциальной навигационной системы современного самолета // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2019. № 3(24). С. 62—73.
- Qiangwen Fu, Yang Liu, Zhenbo Liu, Sihai Li, Bofan Guan. Autonomous In-motion Alignment for Land Vehicle Strapdown Inertial Navigation System without the Aid of External Sensors // The Journal of Navigation. 2018. Vol. 71. Iss. 6. P. 1312–1328.
- Hai Yang, Wei Li, Chengming Luo, Jinyao Zhang, Zhuoyin Si et al. Research on Error Compensation Property of Strapdown Inertial Navigation System Using Dynamic Model of Shearer // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 2045—2055.
- Kai Shen, Selezneva M. S., Neusypin K. A. Development of an Algorithm for Correction of an Inertial Navigation System in Off-Line Mode // Measurement Techniques. 2018. Vol. 60. Iss. 10. P. 991–997.
- Jiangning Xu, Hongyang He, Fangjun Qin, Lubin Chang. A Novel Autonomous Initial Alignment Method for Strapdown Inertial Navigation System // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017. Vol. 66. No. 9. P. 2274—2282.

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 92-96 DOI: 10.17580/gzh.2021.04.13

Navigation system for heading machines in potash mines

Information about authors

- L. Yu. Levin ¹, Head of Aerology and Thermophysics Department, Doctor of Engineering Sciences, aerolog_lev@mail.ru
- **D. S. Kormshchikov**¹, Researcher at Aerology and Thermophysics Department, Candidate of Engineering Sciences
- E. G. Kuzminykh ¹, Post-Graduate Student
- A. M. Macheret², Chief Surveyor, Head of Surveying Department

¹Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia ²Uralkali. Berezniki. Russia

Abstract

Mining operations at potash mines are carried out by heading machines. Setting of a direction and control of the movement of the machines is carried out by the mine surveyor and by the machine operator in the manual mode. The lack of automation of this process during production leads to large labor costs of the mine surveying service, while the experience of the machine operator affects accuracy of maintenance of a specified course. Currently, there are no ready-made technical products for automating the process of setting the course and controlling the movement of heading machines. This paper deals with the implementation of the navigation system for heading machines in the underground mines of Uralkali company. At the mines of Uralkali, the requirements for the accuracy of such a system are dictated by the requirements for the accuracy of mine surveying support for underground mining operations in driving new roadways. Possible ways of constructing navigation systems and the problems of their application are considered. The analysis of the existing methods shows that the most promising option for navigation of heading machines in underground mine openings are the systems based on the principles of inertial navigation. To use such systems in underground mines and to ensure the required accuracy, the technical requirements for the systems are formulated. It is shown that modern strapdown inertial navigation systems satisfy the required accuracy. On their basis, a prototype of the heading machine navigation system was developed, and its ground tests were carried out. The achieved accuracy of the system makes it possible to proceed to testing of a real heading machine in a mine.

The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-77-30008.

Keywords: underground mine, heading machine, strapdown inertial navigation system, testing, deviation, accuracy, mine openings.

References

- Levin L. Yu., Isaevich A. I., Semin M. A., Gazizullin R. R. Dynamics of air-dust mixture in ventilation of blind drifts operating a team of cutter-loaders. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 1. pp. 72–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13
- 2. Yatsenko S. N., Yatsenko M. A., Nikolaychuk N. A. Application of automation system in underground mining processes. *International Scientific Review*. 2016. No. 20(30). pp. 23–26.
- Trifanov G. D., Shishlyannikov D. I., Lavrenko S. A. Assessment of URAL-20R machine use efficiency while developing potash salt fields. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11, No. 9. pp. 5722–5726.
- Song Gang. Experience in the implementation of process automation and data communication for underground coal mining on the example of China's coal industry. Ugol. 2016. No. 2. pp. 25–29.
- Tatarinov B. A., Kotlyarov V. O. Control of two-mass system with a DC motor and change direction at the exit. GIAB. 2016. No. 8. pp. 183–189.
- Semykina I. Yu., Grigorev A. V., Gargaev A. N. Approaches to robotic heading machine engineering for manless mines. *Innovations and Prospects for Development in Mining Machine and Electrical Engineering — IPDME 2017: International Conference Proceedings*. Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gornyi universitet, 2017. pp. 202–205.
- 7. Selivanova L. M., Shevtsova E. V. Inertial navigation systems: Educational aid. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana, 2012. Part I: Single-channel inertial navigation systems. 46 p.
- Stepanov O. A. Processing methods for navigation measurement information: Educational aid. Saint-Petersburg: Universitet ITMO, 2017. 196 p.
- Kai Shen, Proletarskiy A. V., Neusypin K. A. The research into correction algorithms for aircraft navigation systems. Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Seriya Priborostroenie. 2016. No. 2(107). pp. 28–39.
- Kivokurtsev A. L., Sokolov O. A. Special features optimization of algorithms of orientation of the strapdown inertial navigation system of the modern plane. Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii. 2019. No. 3(24). pp. 62–73.
- Qiangwen Fu, Yang Liu, Zhenbo Liu, Sihai Li, Bofan Guan. Autonomous In-motion Alignment for Land Vehicle Strapdown Inertial Navigation System without the Aid of External Sensors. *The Journal of Navigation*. 2018. Vol. 71, Iss. 6. pp. 1312–1328.
- Hai Yang, Wei Li, Chengming Luo, Jinyao Zhang, Zhuoyin Si et al. Research on Error Compensation Property of Strapdown Inertial Navigation System Using Dynamic Model of Shearer. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. pp. 2045–2055.
- Kai Shen, Selezneva M. S., Neusypin K. A. Development of an Algorithm for Correction of an Inertial Navigation System in Off-Line Mode. Measurement Techniques. 2018. Vol. 60, Iss. 10. pp. 991–997.
- Jiangning Xu, Hongyang He, Fangjun Qin, Lubin Chang. A Novel Autonomous Initial Alignment Method for Strapdown Inertial Navigation System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2017. Vol. 66, No. 9. pp. 2274—2282.