

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи

Довгань Александр Юрьевич

УДК 622.232.72

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА
ТИПА КСП-35 НА ОСНОВЕ ОБОСНОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И
ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

Специальность 2.8.8 Геотехнология, горные машины (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ШАБАЕВ Олег Евгеньевич
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», (г. Донецк), заведующий кафедрой «Горные машины»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
КОРНЕЕВ Сергей Васильевич
ФГБОУ ВО «ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (г. Алчевск), профессор кафедры «Горные энергомеханические системы»

кандидат технических наук, доцент
ПАЛАМАРЧУК Татьяна Николаевна
ФГБОУ ВО «Донецкий институт железнодорожного транспорта» (г. Донецк), доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог»

Ведущая организация: ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ» (г. Макеевка)

Защита состоится « 28 » ноября 2024 года в 12 часов на заседании диссертационного совета 24.2.491.02 при ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, аудитория 1.203.

Тел. факс: +7(856) 301-07-69, e-mail: donntu.info@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДонНТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус и на сайте <http://donntu.ru>

Автореферат разослан « » 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.491.02
доктор технических наук, доцент

В.О. Гутаревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Традиционным ископаемым энергетическим ресурсом Российской Федерации является каменный уголь. Донбасс обладает значительными запасами угля высокого качества в недрах и полноценной производственной базой для его добычи и обогащения. Основными потребителями угля являются теплоэлектростанции и металлургические предприятия.

По данным института ДонУГИ среднемесячное подвигание линии действующих очистных забоев на шахтах ДНР составляет до 68,3 м/мес. При этом скорость проведения подготовительных выработок не превышает 45,6 м/мес. Своевременная подготовка новых забоев и магистральных выработок требует повышения темпов проходки. Механизированный способ прохождения выработок позволяет развить наибольшие темпы среднемесячного продвижения проходческого забоя. При этом эффективность работы проходческого участка определяется производительностью проходческого комбайна, отлаженностью производственного процесса и скоростью выполнения вспомогательных операций. На шахтах Донецкой Народной Республики применяются проходческие комбайны стреловидного типа как с продольно-осевыми коронками – ГПКС, КСП32, КСП35, EBZ-160, так и с поперечно-осевыми – КПД. Наибольшее распространение (75,3%) получили проходческие комбайны серии КСП производства ООО «НПО «Ясиноватский машиностроительный завод».

Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации позволили выявить значительную неравномерность значений характеристик рабочего процесса комбайна, обусловленную смещением машины относительно продольной оси выработки, вследствие погрешностей ручного управления. В результате имеют место отклонения от рациональных режимов обработки забоя, перебор породы по контуру выработки, недостаточное использование мощности привода резания и, как следствие, снижение производительности проходческого комбайна и ресурса элементов трансмиссии.

Поэтому одним из основных направлений повышения эффективности работы проходческого комбайна является повышение его производительности и ресурса путем обеспечения требуемой точности позиционирования комбайна в выработке, что требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Степень разработанности темы исследования. К проблеме позиционирования горных машин в выработке обращались ученые с момента появления идеи безлюдной добычи полезных ископаемых в 1970-х годах. При этом основное внимание уделялось безопасности ведения проходческих работ и, по возможности, выведению оператора из опасной зоны. В современных же исследованиях упор делается на позиционировании машины с определением траектории ее движения в толще породы и установлением направления движения. Все большее количество научных работ посвящается развитию мехатронных подходов при создании горных машин. Оснащение машин интеллектуальными

системами управления на базе компьютерной техники позволяет существенно повысить их технический уровень и устранить недостатки ручного управления.

Однако, вопросу влияния позиционирования проходческого комбайна в выработке уделяется внимание только с точки зрения сохранения направления выработки. Не достаточно изучено и теоретически не обосновано влияние смещение машины относительно продольной оси выработки на производительность, энергоэффективность и ресурс проходческого комбайна.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение эффективности работы проходческого комбайна типа КСП-35 на основе разработанных методов и средств его позиционирования в выработке с учетом установленных закономерностей влияния положения комбайна относительно забоя на ресурс и производительность.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие основные **задачи**:

1. Установить степень реализации потенциальных возможностей проходческого комбайна КСП-35 по разрушению забоя в представительных условиях его эксплуатации.

2. Разработать математическую модель формирования вектора внешнего возмущения на исполнительном органе проходческого комбайна с продольно-осевой коронкой.

3. Исследовать влияние позиционирования проходческого комбайна КСП-35 в проходческом забое на эффективность его функционирования и обосновать требуемую точность позиционирования машины.

4. Разработать метод определения положения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки и обосновать требования к параметрам измерений.

5. Разработать структуру и алгоритм работы средств позиционирования проходческого комбайна и формирования контура выработки.

Объект исследования. Процесс разрушения забоя проходческим комбайном стреловидного типа с продольно-осевой коронкой

Предмет исследования. Закономерности влияния позиционирования проходческого комбайна относительно продольной оси выработки на эффективность процесса разрушения забоя.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые теоретически установлены и экспериментально подтверждены зависимости производительности, удельных энергозатрат и ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа от величины смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки.

2. Разработана математическая модель процесса разрушения горного массива проходческим комбайном избирательного действия с осевой коронкой, **отличающаяся** формированием стружки с учетом предыдущего реза в текущем цикле разрушения и соответствующих проходов исполнительного органа в предыдущих циклах, а также с учетом смещения комбайна относительно продольной оси выработки при его передвижке между циклами обработки забоя.

3. Впервые предложен метод определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки с использованием дальномера с изменяемым углом поворота чувствительного элемента и с коррекцией по трем осям наклона корпуса комбайна.

4. Впервые разработаны алгоритм и математическая модель определения местоположения проходческого комбайна в системе координат выработки, учитывающие его смещение в процессе работы и после передвижки с учетом изменения углов наклона корпуса комбайна по трем осям.

Теоретическая значимость работы заключается в дальнейшем развитии теории функционирования проходческого комбайна избирательного действия на основе разработанных методов и средств позиционирования комбайна в выработке с учетом установленных закономерностей влияния его положения относительно забоя, обеспечивающих повышение производительности и ресурса, а также снижение удельных энергозатрат.

Практическая значимость работы заключается в:

- разработке методики обработки экспериментальных данных длительной записи нагрузочных характеристик электродвигателя исполнительного органа проходческого комбайна избирательного действия для оценки энергоемкости и производительности процесса разрушения;

- установлении показателей параметров рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна избирательного действия с осевой коронкой в представительных условиях его эксплуатации;

- разработке алгоритма, математической модели и программной реализации метода определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки;

- разработке методики обработки массивов данных расстояния до стоек крепи при обосновании требований к точности и количеству измерений для удержания машины в пределах заданного диапазона смещения относительно продольной оси выработки;

- установлении требований к точности позиционирования проходческого комбайна, обеспечивающих повышение его эффективности работы и надежности;

- разработке структуры и алгоритма функционирования дальномера с изменяемым углом наклона чувствительного элемента с компенсацией углов поворота по осям корпуса проходческого комбайна;

- разработке структуры и алгоритма функционирования системы позиционирования проходческого комбайна в выработке и формирования ограничительного контура выработки с учетом позиционирования машины в системе координат выработки и изменения углов наклона по осям;

- разработке методики определения ограничивающих углов подъема и поворота исполнительного органа, допустимого поля координат коронки и в формировании требуемого контура выработки любой формы.

Методология и методы исследования. Достижение цели исследования обеспечивалось на основе системного подхода к изучению проблемы и рационального сочетания теоретических и экспериментальных исследований. При разработке математической модели формирования вектора внешнего возмущения

на осевой коронке использовались методы теории резания угля и породы резцовыми рабочими инструментами выемочных машин. Экспериментальные исследования по установлению влияния смещения проходческого комбайна на его производительность и энергоемкость разрушения забоя реализованы на основе методов планирования эксперимента в представительных условиях эксплуатации проходческих комбайнов с использованием современных методов и средств измерений. Для проведения теоретических исследований применен модельный эксперимент (методы имитационного моделирования).

Положения, выносимые на защиту:

1. Впервые в представительных условиях эксплуатации проходческого комбайна КСП-35 установлена значительная неравномерность характеристик рабочего процесса разрушения проходческого забоя ($Q_{ц} = 0,23 \pm 0,10$ м³/мин, $W_{ц} = 4,33 \pm 2,28$ кВт·ч/м³, $P_{ц} = 56,45 \pm 18,90$ кВт), обусловленная смещением машины относительно продольной оси выработки вследствие погрешности ее «ручного» управления.

2. Теоретически установлено, что смещение комбайна относительно продольной оси выработки на величину более 0,05 м приводит к существенному снижению теоретической производительности до 43,7%, повышению удельных энергозатрат на разрушение до 64,1 %, а также снижению ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа до 64 %.

3. Предложен метод определения местоположения проходческого комбайна в системе координат выработки с использованием дальномера с изменяемым углом поворота чувствительного элемента и с коррекцией по трем осям наклона корпуса комбайна. Установлено, что необходимым и достаточным условием реализации точности позиционирования проходческого комбайна относительно продольной оси выработки в пределах коридора $\pm 0,05$ м является обеспечение точности определения расстояния до арок крепи не хуже 0,5 % при количестве измерений равном 6.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается методологической базой исследований, основанной на системном подходе, рациональном сочетании теоретических и экспериментальных методов исследования, корректностью поставленных задач и принятых допущений. Теоретические исследования базируются на фундаментальных положениях теоретической механики, аналитической геометрии и теории резания горных пород. Экспериментальные исследования реализованы на основе методов планирования эксперимента в представительных условиях эксплуатации с использованием современных средств и методов электрических измерений. Максимальное расхождение результатов сравнения интегральных показателей эффективности разрушения забоя проходческим комбайном при модельном и шахтном эксперименте не превысило $\pm 15\%$.

Основные положения диссертации опубликованы в 10 научных трудах в том числе: 5 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, а также 5 публикаций материалов и тезисов на международных и всероссийских форумах и конференциях.

Подана заявка на изобретение № 2024101050 от 03.07.2023 г. «Система позиционирования проходческого комбайна и коронки его исполнительного органа»

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 153 страницы машинописного текста и состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 122 источников на 15 страницах. Основной текст, изложенный на 133 страницах, иллюстрируется 43 рисунками и содержит 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, проведен краткий обзор и анализ научной и технической литературы по теме диссертации, сформулирована цель и задачи исследований, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первом разделе «Состояние проблемы, цель и задачи исследований» обоснована актуальность проведения научных изысканий в области повышения эффективности проходческой техники, выполнен анализ современного состояния теории разрушения пород и формирования нагрузок на исполнительном органе (ИО) проходческого комбайна (ПК), позиционирования ПК в выработке.

Актуальность вопроса повышения эффективности работы ПК обусловлена наличием значительных промышленных запасов угля, существенным отставанием проходческих забоев от очистных.

Теории разрушения пород, формирования нагрузок, формированию вектора внешнего возмущения (ВВВ) на исполнительном органе ПК посвящены работы ученых: Л.И. Барона, А.И. Берона, В.А. Бреннера, Б.А. Верклова, В.Н. Гетопанова, П.А. Горбатова, В.Г. Гуляева, В.П. Кондрахина, С.В. Корнеева, Ю.Д. Красникова, А.Г. Лаптева, Н.А. Малевича, Н.В. Паламарчука, П.В. Семенчи, А.К. Семенченко, В.И. Силаева, Н.И. Стадника, В.А. Мизина, Г.В. Петрушкина, Д.А. Семенченко, В.В. Синенко, Е.Ю. Степаненко, В.В. Тона, А.И. Хиценко, Н.В. Хиценко, О.Е. Шабаетова, А.В. Шендрика. На основе большого числа экспериментальных и теоретических исследований исполнительных органов очистных и проходческих комбайнов, выявлены закономерности формирования составляющих ВВВ и предложены математические модели (ММ) для его описания. При математическом описании динамических процессов в комбайне выделены подсистемы привода, механизма подачи и механизма фиксации исполнительного органа.

Вместе с тем, следует отметить, что в настоящее время не в полной мере изучен вопрос влияния смещения ПК относительно продольной оси выработки на показатели эффективности его функционирования. Необходимы дополнительные исследования для установления закономерностей влияния положения ПК в выработке на формирование нагрузки на исполнительном органе, а также влияние на производительность и ресурс проходческой машины. Это позволит разработать техническое решение (рекомендации по требуемой точности позиционирования) и предложить структуру и алгоритм работы средств позиционирования проходческого комбайна.

Во втором разделе «Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого

комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации» приведены условия проведения, методика и средства экспериментальных исследований, методика обработки результатов и результаты эксперимента, показывающие влияние смещения проходческого комбайна на показатели эффективности его функционирования.

Исследования проводились при прохождении проходческим комбайном КСП-35 монтажного хода 8-й восточной лавы пл. l_4 на шахте им. А.Ф. Засядько.

Забой имел слоистую структуру с алевролитом у почвы и в основной кровле, непосредственная кровля толщиной 1,2 м представлена аргиллитом. Мощность пласта составляла 0,9 м, угол падения пласта – 11 град. Сечение выработки – 17,8 м² в проходке с шагом установки крепи – 0,65 м.

В качестве основного параметра, дающего информацию об эффективности процесса разрушения, принят ток двигателя резания исполнительного органа. Фиксация токов электродвигателя исполнительного органа проходческого комбайна осуществлялась непрерывно штатной системой управления.

В рамках проводимого исследования проанализировано 25 циклов обработки проходческого забоя в различные добычные смены. В качестве примера на рисунке 1 представлен фрагмент записи тока электродвигателя привода ИО за цикл разрушения забоя комбайном КСП-35.

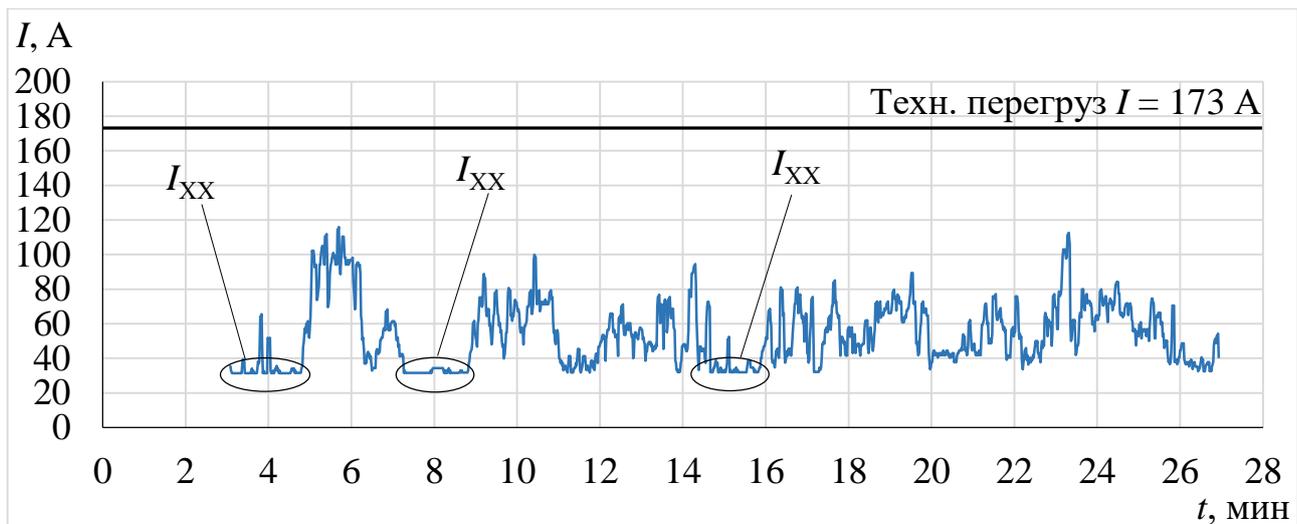


Рисунок 1 – Фрагмент записи тока двигателя за цикл обработки забоя

Для оценки энергоемкости процессов разрушения горного массива коронкой ИО на основе результатов проведенного шахтного эксперимента разработана методика обработки экспериментальных данных, с помощью которой получены i - дискретных значений тока j - цикла I_{ij} с равным шагом $\Delta t = 1$ с, по которым определялись время цикла $T_{цj} = n_{Ij} \cdot \Delta t$ и средние значения тока за цикл $I_{цсрj}$:

$$I_{цсрj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Ij}} I_{ij}}{n_{Ij}}, \quad (1)$$

где n_{Ij} – количество дискретных значений тока в j -том цикле.

Определение и исключение токов свободного вращения ИО проходческого комбайна осуществлялось при отыскании на графике нагрузки привода минимальных значений тока $I_{XX} = 31,5$ А (обведены овалами на рисунке 1).

Определение мощности комбайна, расходуемой на разрушение массива:

$$P_{Цсрj} = \sqrt{3} (I_{Цсрj} - I_{XXj}) \cdot \frac{P_{НОМ}}{I_{НОМ} \cdot \eta_{\Sigma}} \cdot \cos(\varphi(I)) \quad (2)$$

По полученным массивам значений времени цикла, средней мощности за цикл на разрушение забоя с использованием паспорта выработки определялись значения теоретической производительности и удельных энергозатрат за цикл, представленные на рисунке 2.

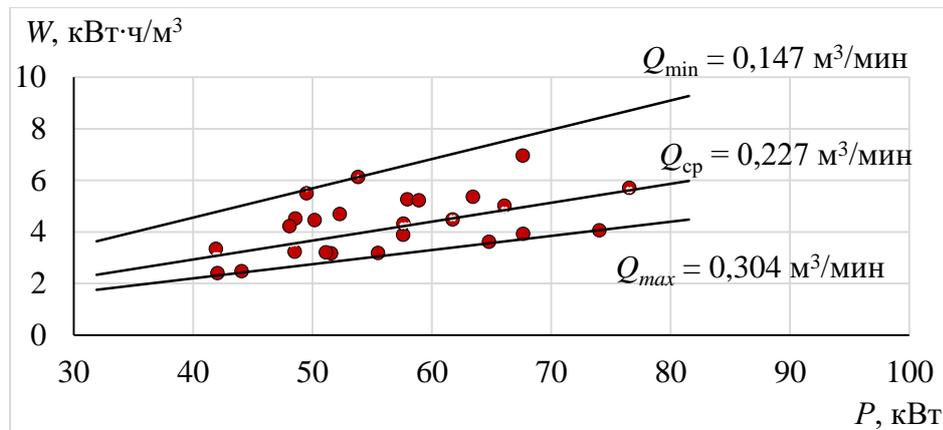


Рисунок 2 – Значения производительности процесса разрушения забоя за цикл

Как видно из рисунка 2, большинство значений теоретической производительности за цикл Q_j (14 из 25, или 56%) попадает в область, характеризующуюся высокими энергозатратами и теоретической производительностью ниже средней.

Отличие отдельных циклов из общей выборки с определенной периодичностью указывает на влияние человеческого фактора при разрушении забоя, в частности при позиционировании проходческого комбайна относительно продольной оси выработки. Наилучшие результаты относятся к циклам с наименьшим смещением относительно продольной оси выработки. Повышение эффективности проходческого комбайна может быть реализовано на основе мехатронного подхода при проектировании машины, который бы стал симбиозом интеллектуальной системы управления и эффективной силовой части и позволил бы реализовать необходимую точность позиционирования комбайна в выработке.

Третий раздел «Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения, действующего на осевую коронку при разрушении массива» посвящен формализации рабочего процесса разрушения забоя осевой коронкой ИО ПК с учетом положения комбайна в выработке.

Разработанная комплексная ММ формирования ВВВ на осевой коронке состоит из ММ разрушаемого массива и поверхности забоя, определения координат резца в системе координат выработки, определения параметров процес-

са разрушения массива резцами коронки, учитывающие условие наличия контакта резца с забоем для определения усилий резания и подачи на резце. Для определения координат вершины i -того резца осевой коронки ПК в неподвижной системе координат выработки $OXYZ$ составлена расчетная схема, представленная на рисунке 3. Локальная система координат (ЛСК) $A_0X_1Y_1Z_1$ привязана к комбайну, α и β – углы подъема и поворота стрелы, L_1 – расстояние между осями подъема и поворота стрелы, L_2 – длина стрелы. O_kxyz – ЛСК в основании коронки.

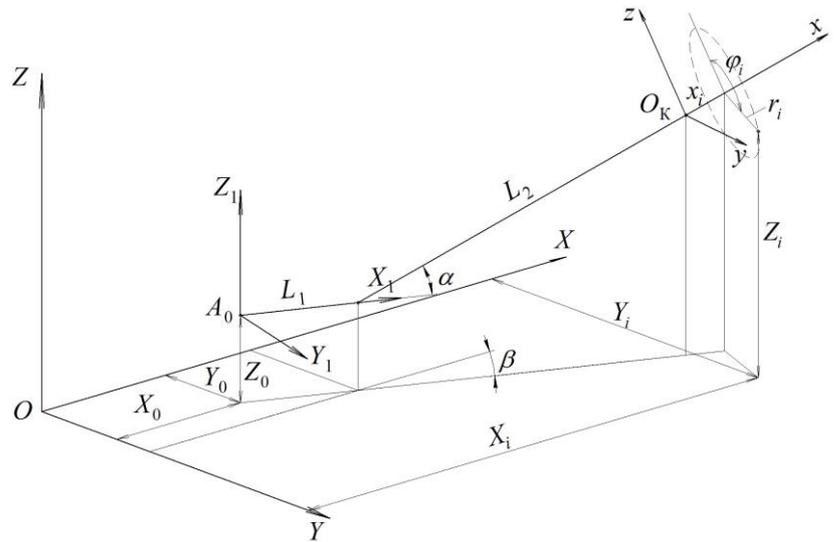


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения координат положения вершины резца осевой коронки в системе координат выработки

Математическая модель определения координат вершины резца в ЛСК $A_0X_1Y_1Z_1$, согласно расчетной схемы (рисунок 3), запишется:

$$\begin{cases} X_{1i} = (L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha) \cos \beta \\ Y_{1i} = (L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha + r_i \sin \varphi_i) \cos \beta \\ Z_{1i} = (L_2 + x_i) \sin \alpha + r_i \cos \varphi_i \cos \alpha \end{cases} \quad (3)$$

Для определения координат i -го резца (X_i, Y_i, Z_i) в неподвижной системе координат выработки после передвижки комбайна использовалась матрица направляющих косинусов:

$$(X_i, Y_i, Z_i) = R \cdot \begin{bmatrix} X_{1i} \\ Y_{1i} \\ Z_{1i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{0x} + \Delta X \\ A_{0y} + \Delta Y \\ A_{0z} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $R = R_Z(\varphi) \cdot R_X(\theta) \cdot R_Z(\psi)$ – матрица направляющих косинусов; ΔY – смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки после передвижки; ΔX – передвижка комбайна вдоль оси выработки.

Условие контакта резца с забоем. Наряду с параметрами разрушаемого массива на величину и характер изменения нагрузок, действующих на исполнительный орган при его взаимодействии с разрушаемым массивом, определяющее влияние также оказывают величина и форма обрабатываемого сечения. Эти характеристики определяют количество резцов одновременно участвующих в разрушении массива, начало и длительность формирования нагрузки на каждом резце. Поэтому необходимо составить математическую модель оценки контактирования резца с разрушаемым массивом с учетом поверхности

забоя, образованной предшествующими горизонтальными резами. На рисунке 4 представлена расчетная схема для определения признака контактирования резца с забоем.

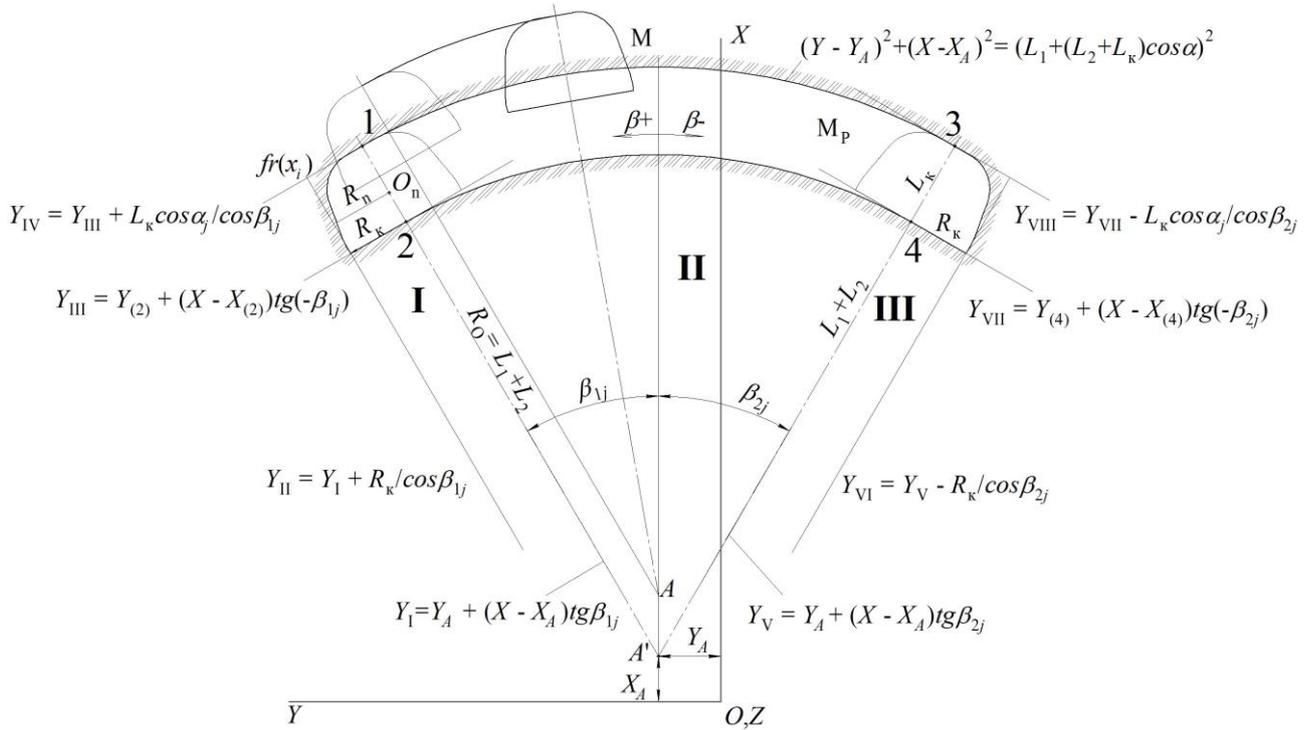


Рисунок 4 – Расчетная схема для определения контакта резца с забоем

На рисунке 4 приняты следующие обозначения: β_{1j} , β_{2j} – углы предельного положения стрелы слева и справа; L_k – длина коронки проходческого по оси вращения; B_i , O_n и R_n – соответственно положение вершины резца, центр и радиус окружности ограничивающей поверхность забоя.

С учетом ограничений на основании расчетной схемы (рис. 4) составлена математическая модель (5) определения логического состояния признака контактирования i -го резца при j -м горизонтальном проходе с разрушаемым массивом, приведенная в интегрированном виде:

$$a = \bar{F}_{кр}(\bar{X}_i, \bar{P}_{кр}), \quad (5)$$

где a – признак 1/0 контактирования резца с разрушаемым массивом; $\bar{F}_{кр}$ – вектор-функция определения величины признака контактирования резца с массивом; $\bar{P}_{кр}(L_{ст}, R_0, R_k, fr(x), N_n, \beta_{1n}, \beta_{2n}, \alpha_n, X_{An}, Y_{An}, Z_{An}, n = \overline{1, N_n})$ – вектор параметров для оценки условия контактирования резца с массивом.

Параметры среза – толщина стружки h_i и шаг резания t_i – на каждом резце, контактирующем с забоем, определяются схемой стружкообразования. Для их определения необходимо знать траектории движения резцов, образующих забой для i -го резца. В интегрированном виде математическая модель определения параметров процесса разрушения массива коронкой ИО как ФЗЭ запишется:

$$\bar{Y}_p = \bar{F}_p(\bar{X}_p(\bar{Y}_{сн}, \bar{R})), \quad (6)$$

где $\bar{Y}_p = (h_i, t_i, i = \overline{1, N_l})$ – выходной вектор параметров процесса разрушения массива резцами осевой коронки; \bar{F}_p – вектор-функция определения параметров процесса разрушения массива резцами лопасти осевой коронки; $\bar{X}_p(\bar{Y}_{сн}, \bar{R})$ – входной вектор, компонентами которого являются схема набора коронки $\bar{Y}_{сн}$ и вектор параметров режима ее работы $\bar{R}(L_1, \alpha, \beta, \omega_k, V_{п}, \omega_\beta)$.

Таким образом, комплексная ММ формирования ВВВ на осевой коронке:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i = \bar{F}_M(\bar{X}_i(X_i, Y_i, Z_i), \bar{P}_M) \\ \bar{X}_i = \bar{F}_{пр}(\bar{X}_{пр}, \bar{P}_{сн}) \\ \text{Условие контакта резца:} \\ \text{Если } \begin{cases} (X_{ij} - (X_A + L_1 \cos \beta))^2 + (Z_{ij} - Z_A)^2 \geq R_1^2 \\ (X_{ij} - X_A)^2 + (Y_{ij} - Y_A)^2 \geq R_2^2 \\ Z_{ij} \geq Z_k(X_{ij}) \end{cases} \\ \text{Если } (X_{ij} - X_{O_j})^2 + (Y_{ij} - Y_{O_j})^2 + (Z_{ij} - Z_{O_j})^2 \geq R^2 \\ \text{то } a = 1, j = j + 1, \text{ иначе } a = 0, j = n \\ a = \bar{F}_{кр}(\bar{X}_i, \bar{P}_{кр}) \\ \{h_i, t_i\} = \bar{F}_p(\bar{X}_p(\bar{Y}_{сн}, \bar{R})) \\ \{Z_i, Y_i\} = F_1(P_{zi}, P_{yi}, \bar{r}_i) \\ \{\bar{P}_M, \bar{M}_M\} = F_2(Z_i, Y_i) \end{array} \right. , \quad (7)$$

где m_i – номер, прослойка массива, разрушаемого i -м резцом; $F_{пр}(\)$ – вектор-функция расчета положения резца; $F_1(\)$ – вектор-функция расчета мгновенных значений усилия на резце; $F_2(\)$ – вектор-функция расчета ВВВ на коронке.

Адекватность ММ оценивалась путем сравнения интегральных показателей: средней мощности на разрушение за цикл, теоретической производительности, удельных энергозатрат за цикл, длительности обработки забоя. Расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных не превышают $\pm 15\%$.

Четвертый раздел «Исследование влияния позиционирования проходческого комбайна КСП-35 в проходческом забое на эффективность его функционирования» посвящен теоретическим исследованиям влияния смещения проходческого комбайна от оси выработки на его производительность, энергоэффективность и ресурс, разработке метода определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки.

Для оценки влияния позиционирования ПК в выработке на эффективность его работы проведено имитационное моделирование. В качестве варьируемых параметров приняты смещение относительно продольной оси выработки ΔL (0,1 м, 0,2 м, 0,25 м), контактная прочность породы p_k (320 МПа, 600 МПа), шаг фрезерования ΔH (0,2 м, 0,4 м) и сечение выработки S (20,1 м², 13 м²). Разработан план проведения моделирования и методика обработки данных. Моделирование проводилось с перебором всех возможных вариантов сочетаний параметров.

Выходными величинами являлись массивы мгновенных значений крутящего момента M на коронке и мощности привода ИО P , а также время $t_{\text{ц}}$ и объем разрушенного горного массива V за полный цикл обработки забоя.

Теоретическая производительность $Q_{\text{ц}}$ и удельные энергозатраты $W_{\text{ц}}$ за цикл определялись следующим образом:

$$Q_{\text{ц}} = V_{\text{ц}} / t_{\text{ц}}, \quad (8)$$

$$W_{\text{ц}} = P_{\text{срц}} / Q_{\text{ц}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{срц}}$ – средняя мощность за цикл разрушения, $V_{\text{ц}}$ – объем породы за цикл.

Для примера на рисунке 5 представлены полученные зависимости технической производительности и изменения ресурса за цикл разрушения для трех смещений влево и трех – вправо (соответственно, положения № 2...7).

Полученные в результате моделирования данные показывают, что смещение ПК относительно продольной оси выработки, обусловленное ручным принципом управления, на величину более 0,05 м приводит к снижению производительности ПК до 43,7% и ресурса до 64% при любом сочетании сечения выработки и шага фрезерования.

В качестве критерия влияния смещения проходческого комбайна на его ресурс использовалась накопленная повреждаемость за цикл.

В соответствии с расчетной схемой (рисунок 6) разработан метод определения положения ПК в системе координат выработки. Метод заключается в поочередном измерении расстояния до арок крепи в плоскости параллельной почве выработки и предусматривает фиксацию расстояния от места установки датчиков (дальномеров) на корпусе комбайна до количества арок крепи m слева и справа при соответствующих углах поворота чувствительного элемента (ЧЭ) $(l_{\text{лд}}, \beta_{\text{л}})$, $(l_{\text{пд}}, \beta_{\text{п}})$. По полученным данным вычисляется смещение ПК относительно оси выработки и выдается значение корректирующего смещения. При передвижке комбайна на величину $\Delta X_{\text{к}}$, соответствующую глубине зарубки коронки, оператор устанавливает проходческий комбайн относительно продольной оси выработки со смещением ΔL в допустимом коридоре $\pm 0,05$ м с учетом рекомендованного корректирующего смещения. После передвижки машины повторно измеряются

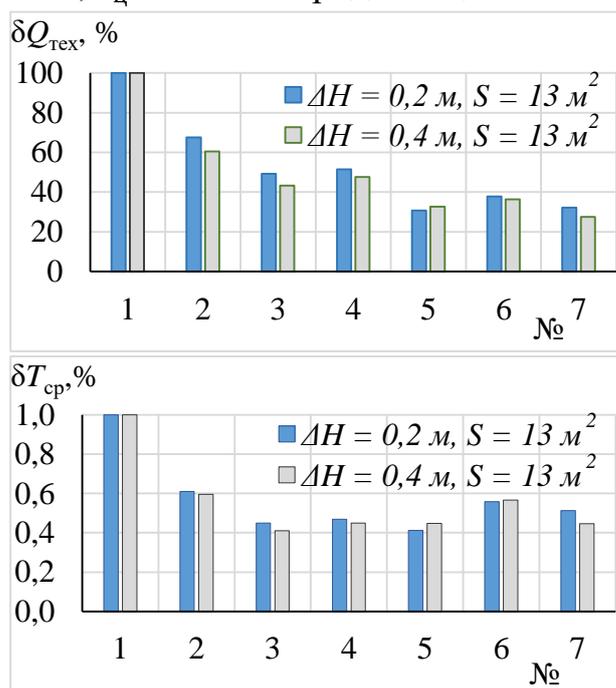


Рисунок 5 – Зависимости изменения технической производительности и ресурса за цикл от смещения ПК

расстояния до предыдущих арок ($m-1$), а также производится измерение до следующей арки.

Алгоритм определения корректирующего воздействия на комбайн для удержания его в заданном коридоре предполагает поэтапную обработку данных, полученных от левого и правого дальномеров и заключается в следующем:

1. Массив данных измерений преобразуется в матрицу сдвигов для левого и правого дальномеров $\Delta L_{\text{ЛД}}$, $\Delta L_{\text{ПД}}$:

$$\begin{cases} \Delta L_{\text{ЛД}i,j} = L_{\text{ЛЕВ}i,j} - L_{\text{ЛЕВ}i+1,j-1}, i = 1 \dots m-1, j = 2 \dots n \\ \Delta L_{\text{ПД}i,j} = L_{\text{ПР}i,j} - L_{\text{ПР}i+1,j-1} \end{cases} \quad (10)$$

2. Сдвиг ПК $\Delta L_{\text{Л}j}$ относительно предыдущего положения, смещение ПК $\Delta L_{\text{ЛК}}$ по левому дальномеру, и координаты $Y_{\text{ЛА}i,j}$ левых арок крепи в системе координат выработки определяются аналогично правым:

$$\begin{cases} \Delta L_{\text{Л}j} = \sum_{i=0}^k \Delta L_{\text{ЛД}k,j} / k \\ \Delta L_{\text{ЛК}} = \sum_{i=0}^n \Delta L_{\text{Л}i} \\ Y_{\text{ЛА}i,j} = L_{\text{ЛЕВ}i,j} - Y_{\text{К}j} \end{cases} \quad (11)$$

где $Y_{\text{К}i} = (\Delta L_{\text{ЛК}i} + \Delta L_{\text{ПК}i})/2$ текущая координата комбайна после передвижки; $k = 1 \dots m-1$; n – текущее количество передвижек с начала прохождения выработки.

Для определения влияния количества измерений и допустимой погрешности дальномеров на точность позиционирования ПК относительно продольной оси выработки было проведено имитационное моделирование процесса определения положения ПК в выработке.

Входными величинами являлись значения расстояний от места установки датчиков до стоек крепи, углы поворота чувствительного элемента при каждом измерении и сгенерированные случайным способом значения погрешности измерений. Изменяемыми параметрами являлись количество измерений (4, 6, 8) и

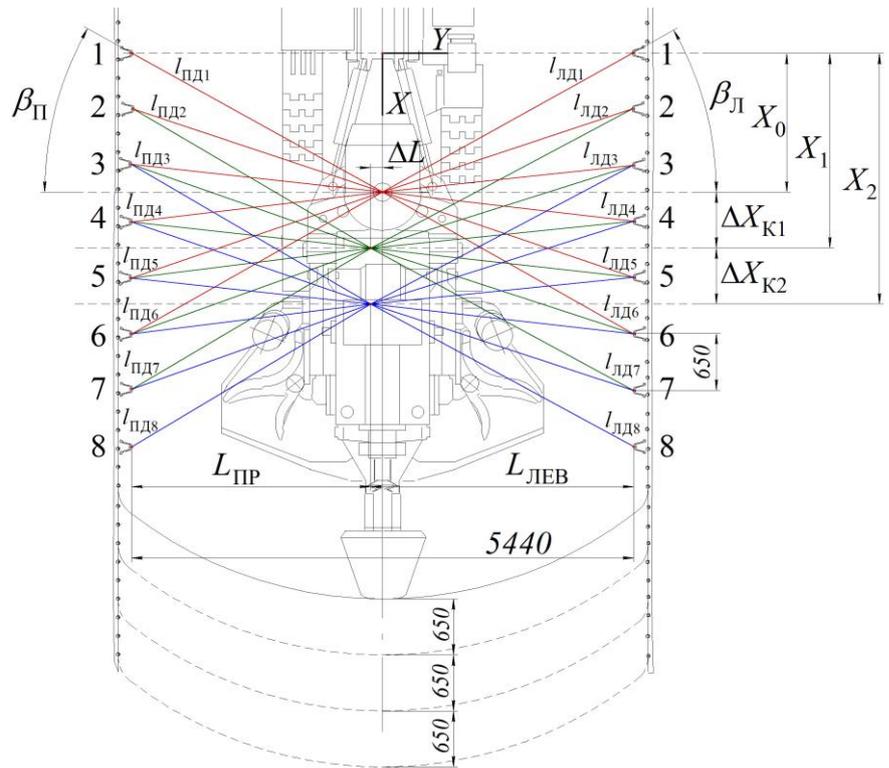


Рисунок 6 – Расчетная схема к методу определения положения ПК с системе координат выработки

погрешность измерений (0,1; 0,5; 1; 2 %). Математическое моделирование производилось с перебором всех возможных сочетаний параметров.

В качестве примера на рисунке 7 представлены полученные зависимости координаты Y_K , соответствующие величинам смещения ПК относительно оси выработки после применения корректирующего воздействия, для шести измерений с изменяющейся погрешностью 0,1%, 0,5%, 1%, 2% (графики 1...4 соответственно), от пройденного расстояния L .

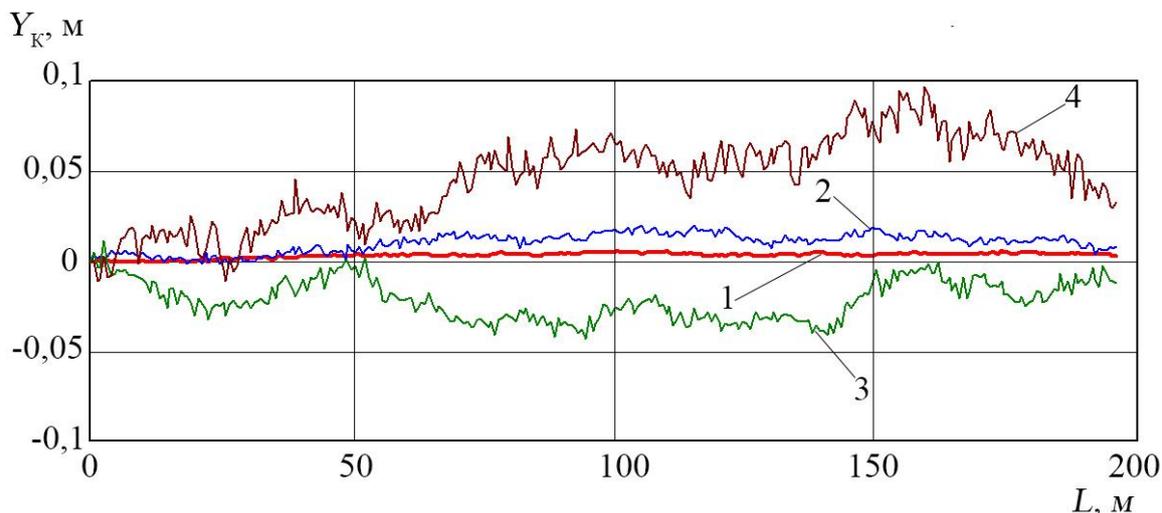


Рисунок 7 – Смещения проходческого комбайна относительно оси выработки после корректировки для шести измерений

Таким образом, необходимым и достаточным условием реализации требуемой точности позиционирования в пределах заданного коридора является оснащение ПК автоматизированной системой позиционирования, обеспечивающей точность определения расстояния до арок не хуже 0,5 % при количестве измерений равном 6. Предложенный метод измерения возможно применить при прохождении выработок разного сечения различными типами ПК с требуемой точностью позиционирования при сохранении точности измерения.

Пятый раздел «Разработка структуры и средств позиционирования проходческого комбайна» посвящен разработке структуры и алгоритма работы средств позиционирования ПК в выработке. По результатам разработки подана заявка на патент на изобретение №2024101050 «Система позиционирования ПК и коронки его исполнительного органа в координатах выработки».

На рисунке 8 представлена структурная схема разработанной системы позиционирования ПК и коронки его ИО, отличающаяся тем, что перед определением местоположения по показаниям инклинометра №1 корпуса ПК производится корректировка углов наклона измерительного луча дальномеров №1 и №2 для сохранения параллельности почвы и плоскости измерения. Далее производится поочередное измерение дальномерами расстояния до стоек постоянной крепи горной выработки слева и справа от корпуса ПК. При помощи инклинометра №2 стрелы ПК определяются координаты основания коронки ИО в системе координат выработки.

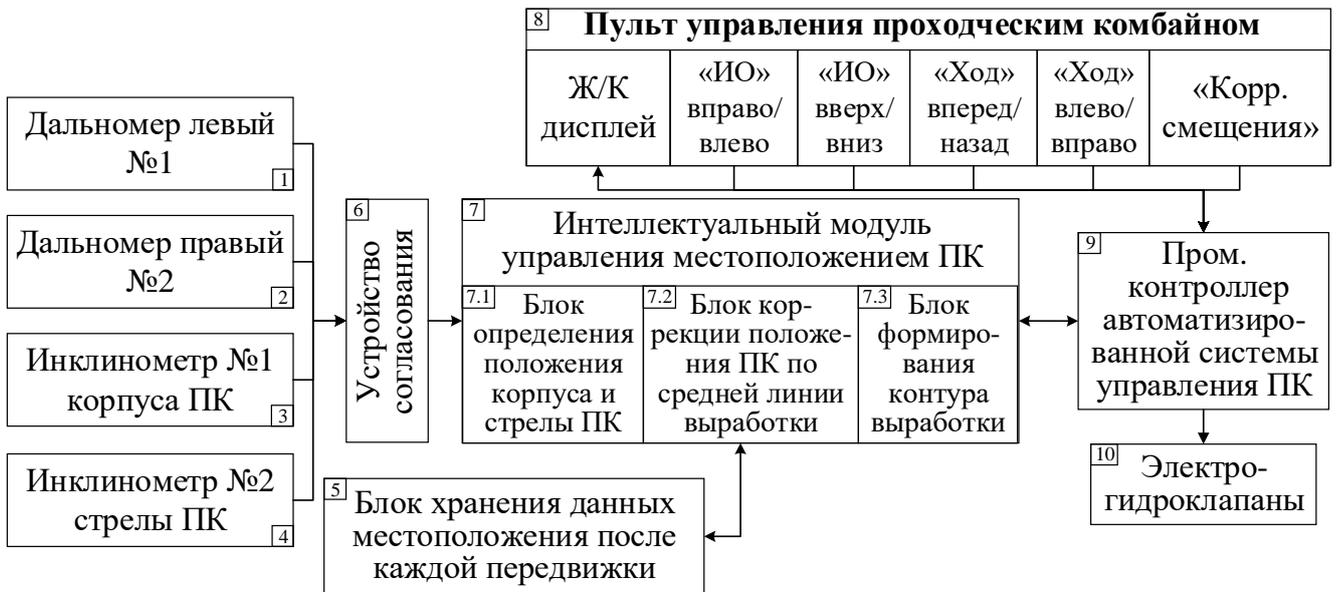


Рисунок 8 – Структурная схема системы позиционирования ПК и коронки его ИО в координатах выработки

В блоке 7.1 вычисляются координаты корпуса ПК, коронки ИО и стоек постоянной крепи в системе координат выработки и определяется смещение ПК относительно продольной оси выработки согласно зависимостям (11). В блоке 7.3 вычисляются ограничивающие углы подъема и поворота стрелы ИО ПК с учетом смещения и поворота корпуса по трем осям в координатах выработки. Текущие данные о положении ПК в выработке записываются в память блока 5 и выводятся на Ж/К дисплей блока 8. Блок 7.2 определяет необходимые корректировочные значения углов и смещения корпуса. Корректировка местоположения ПК в выработке производится оператором при помощи кнопки «Корр. смещения».

Функции дальномера №1 и №2 выполняет устройство измерения расстояния с функцией коррекции углов наклона луча (рисунок 9). Разработана структура и алгоритм работы устройства. Сигнал рассогласования $\Delta\alpha$ преобразуется в измеряемую величину расстояния до арок L . Корректировку угла наклона производит привод управления положением дальномера по осям XYZ.

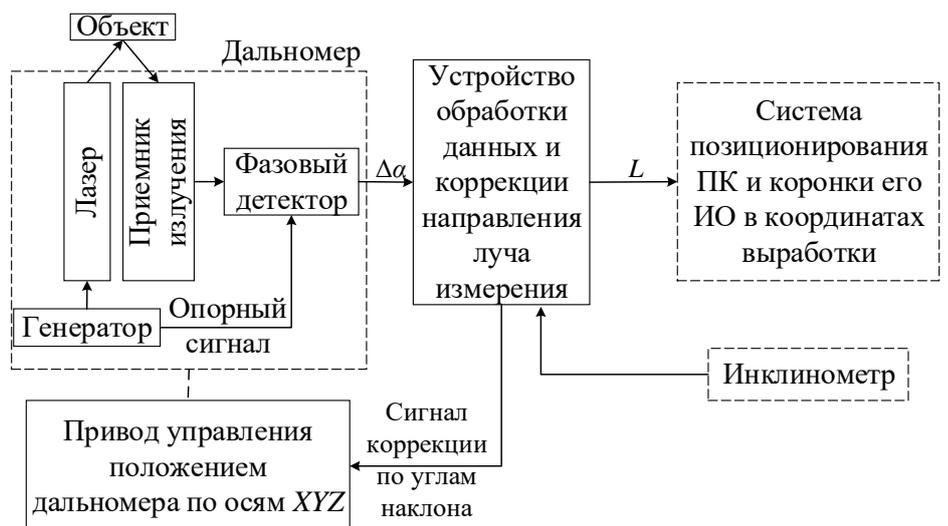


Рисунок 9 – Структурная схема устройства измерения расстояния с коррекцией углов наклона по осям XYZ (дальномера)

На рисунке 10 представлен алгоритм работы дальномера с изменяемым углом наклона луча. На первом этапе алгоритма происходит задание исходных

углов ориентации ПК в пространстве выработки ($\varphi_0, \psi_0, \theta_0$), допустимого отклонения δ и количества измерений m . Далее производится корректировка направления измерительного луча с заданной точностью δ . На втором этапе происходит циклическое измерение расстояния до объекта заданное число раз. По окончании алгоритма измеренные значения расстояний и углов передаются в систему позиционирования.

На рисунке 11 представлена программная реализация работы алгоритма разработанной системы. Области 1 и 2 показывают конструктивные возможности комбайна по разрушению массива до и после передвижки со смещением. Области 3 и 4 обозначают координаты ограничивающего контура выработки и соответствующего ему допустимого поля координат коронки ИО.

Принятые технические решения позволяют сохранять выбранное направление, форму обрабатываемого забоя и минимизировать переборы породы независимо от ошибок позиционирования ПК в выработке, обусловленных ручным способом управления, и от изменения углов наклона корпуса по осям в процессе разрушения забоя.

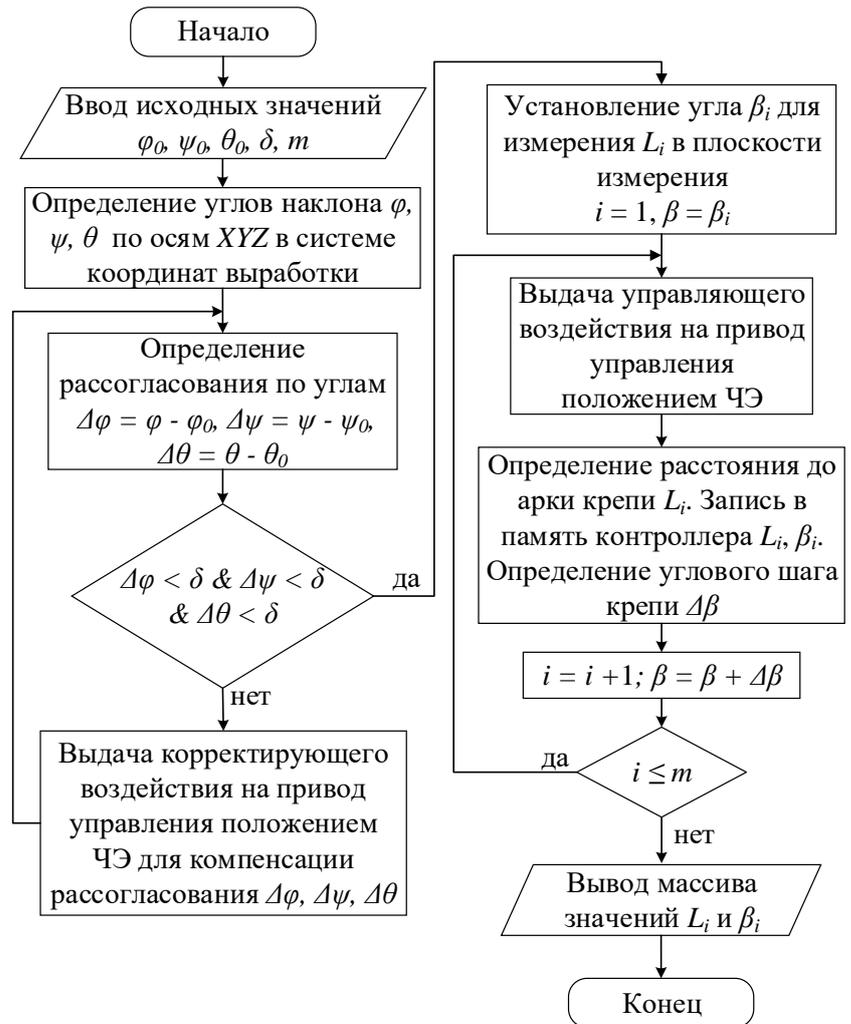


Рисунок 10 – Алгоритм работы устройства измерения расстояния (дальномера)

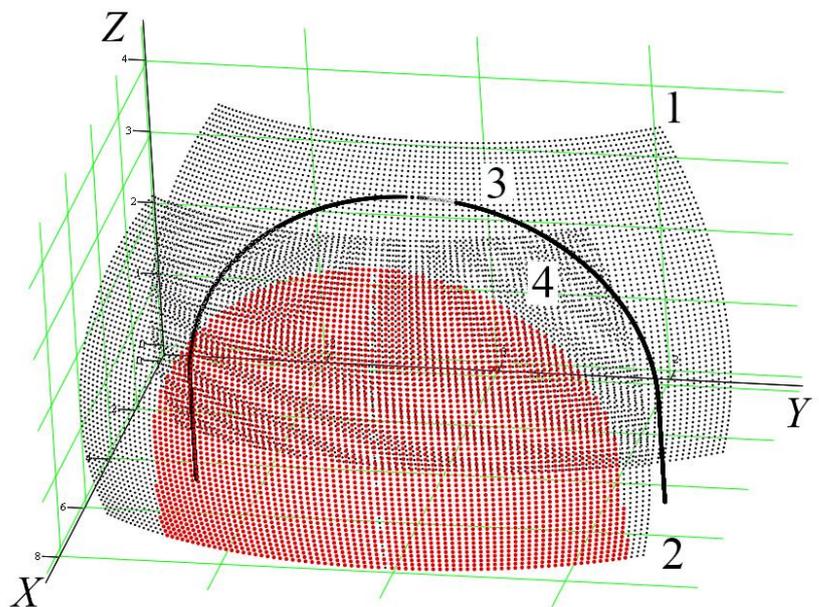


Рисунок 11 – Формирование ограничивающего контура выработки при вычислении координат коронки ИО

Заключение

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное значение для горной промышленности, заключающаяся в повышении эффективности работы проходческого комбайна избирательного действия с осевой коронкой на основе разработанных методов и средств его позиционирования в выработке с учетом установленных закономерностей влияния положения комбайна относительно забоя на ресурс и производительность.

На основе результатов научных исследований, сформулированы следующие выводы:

1. Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации позволили выявить значительную неравномерность значений характеристик рабочего процесса комбайна, обусловленную смещением машины относительно продольной оси выработки вследствие погрешностей «ручного» управления (с вероятностью 0,95 значение средней мощности двигателя исполнительного органа за цикл обработки забоя находится в пределах 37,55-75,35 кВт, производительность – в пределах 0,13-0,33 м³/мин, а удельные энергозатраты – в пределах 2,05-6,61 кВт·ч/м³). В результате имеют место отклонения от рациональных режимов обработки забоя, недостаточное использование мощности привода, что приводит к повышению удельных энергозатрат на разрушение, а также снижение производительности комбайна и ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа.

2. Разработана комплексная математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке, **учитывающая** влияние горно-геологических условий и режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива, **которая состоит** из моделей разрушаемого массива и поверхности забоя, определения координат вершины резца в забое, оценки условия контактирования резца с массивом, определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки, **отличающаяся** формированием стружки с учетом предыдущих резов в текущем и предшествующем циклах обработки забоя и контакта резца с горным массивом, а также с учетом смещения комбайна относительно продольной оси выработки при его передвижке между циклами обработки забоя. Максимальное расхождение результатов сравнения интегральных показателей эффективности разрушения забоя проходческим комбайном при модельном и шахтном эксперименте не превысило $\pm 15\%$.

3. На основе модельных исследований рабочего процесса проходческого комбайна КСП-35 с осевой коронкой теоретически установлено:

– в результате смещения проходческого комбайна от оси выработки происходит существенное изменение глубины зарубки в процессе обработки забоя с явным смещением максимума в одну сторону. При этом диапазон изменения глубины зарубки при боковом резе находится в пределах от 0,1 до 0,63 м (для выработки сечением 20,1 м² и величины смещения 0,25 м). Это обуславливает снижение теоретической производительности проходческого комбайна до 43,7%, повышение удельных энергозатрат на разрушение и времени цикла обработки

забоя соответственно до 64,1% и 56,6%, а также снижение ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа (для подшипников до 43%, валов и зубчатых колес до 64%) При этом с увеличением сечения выработки с 13 м² до 20,1 м² негативный эффект от смещения комбайна на производительность и удельные энергозатраты увеличивается и усугубляется при изменении шага фрезерования от $\Delta H = 0,4$ м до $\Delta H = 0,2$ м;

– смещение комбайна относительно продольной оси выработки, обусловленное ручным принципом управления (в виду психофизиологических возможностей и квалификации оператора), на величину более 0,05 м приводит к существенному снижению эффективности функционирования комбайна при любом сочетании сечения выработки и шага фрезерования.

4. Предложен метод определения местоположения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки при помощи дальномера с изменяемым углом поворота луча, который позволяет определить отклонение проходческого комбайна от продольной оси выработки и сформировать корректирующее смещение после передвижки в реальном времени. Для реализации метода разработаны математическая модель и алгоритм, позволяющие уменьшить влияние разброса значений и погрешности измерений на формирование корректирующего смещения комбайна. Необходимым и достаточным условием реализации необходимой точности позиционирования в пределах заданного коридора является оснащение проходческого комбайна автоматизированной системой позиционирования, обеспечивающей точность определения расстояния до арок не хуже 0,5 % при количестве измерений равном 6. Предложенный метод позиционирования возможно применить при прохождении выработок разного сечения различными типами проходческих комбайнов с требуемой точностью позиционирования при сохранении точности измерения.

5. Разработана структура и алгоритм работы устройства измерения расстояния с коррекцией углов наклона по осям и системы позиционирования проходческого комбайна и коронки его исполнительного органа, учитывающие предложенный метод определения местоположения проходческого комбайна, **отличающаяся** тем, что при передвижке проходческого комбайна производится поочередное измерение расстояния до стоек постоянной крепи горной выработки слева и справа от корпуса проходческого комбайна, перед определением местоположения производится корректировка углов наклона измерительного луча дальномера для сохранения параллельности почвы и плоскости измерения, а перед определением местоположения производится корректировка угла поворота корпуса проходческого комбайна в плоскости параллельной почве, по показаниям дальномеров вычисляются координаты корпуса, коронки исполнительного органа и стоек постоянной крепи в неподвижной системе координат горной выработки, определяется смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки, определяются координаты ограничивающего контура выработки, вычисляются ограничивающие углы подъема и поворота стрелы исполнительного органа проходческого комбайна с учетом смещения и поворота корпуса проходческого комбайна в пространстве выработки.

6. Повышение технического уровня и эффективности работы проходческих комбайнов избирательного действия может быть достигнуто на базе разработанных методов и средств автоматизированного позиционирования комбайна в выработке на основе перманентного анализа информации от датчиков о параметрах рабочего процесса, обеспечивающей повышение теоретической производительности до 44% и ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа до 64 %.

7. Результаты диссертационной работы были использованы институтами ГБУ «Донгипрошахт» и ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова» при выполнении научно-исследовательской и проектно-конструкторской работ, приняты ООО «НПО «Ясиноватский машиностроительный завод» в качестве научно-методической основы для совершенствования проходческих комбайнов избирательного действия типа КСП, материалы исследования были включены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Курносов, В.Г. Автоматизация технологических процессов добычи угля – стратегическое направление повышения безопасности труда на шахте / В.Г. Курносов, **А.Ю. Довгань** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – №5-1. – С.413-421.

2. Шабаев, О.Е. Исследование нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации / О.Е. Шабаев, **А.Ю. Довгань** // Вестник ДонНТУ. – 2018. – № 4(14). – С.34-40.

3. Шабаев, О.Е. Влияние позиционирования проходческого комбайна КСП-35 в проходческом забое на эффективность его функционирования / О.Е. Шабаев, **А.Ю. Довгань** // Вестник ДонНТУ. – 2020. – №3(21). – С.35-42.

4. Шабаев, О.Е. Способ позиционирования проходческого комбайна в выработке/ О.Е. Шабаев, **А.Ю. Довгань** // Вестник ДонНТУ. – 2021. – № 1(23). – С.11-19.

5. Шабаев, О.Е. Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке исполнительного органа проходческого комбайна / О.Е. Шабаев, **А.Ю. Довгань** // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2024. – № 2 (22). – С. 55-72.

Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций

6. Курносов, В.Г. Автоматизация технологических процессов добычи угля – стратегическое направление повышения безопасности труда на шахте / В.Г. Курносов, **А.Ю. Довгань** // Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке: тезисы докладов III Международной научно-практической конференции (20-21 октября 2016 г.). – Санкт-Петербург, Санкт-петербургский горный университет, 2016. – С. 70.

7. **Довгань, А.Ю.** Влияние позиционирования проходческого комбайна в забое на его устойчивость / А.Ю. Довгань, О.Е. Шабаев // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых: сборник тезисов докладов II

международной научно-практической конференции (18 марта 2021 г.). — Алчевск, ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. – С. 51-53.

8. **Довгань, А.Ю.** Математическая модель для оценки контактирования резцов осевой коронки проходческого комбайна с забоем в процессе разрушения // Донбасс будущего глазами молодых ученых, г. Донецк, 23 ноября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – С. 6-10.

9. **Довгань, А.Ю.** Влияние смещения проходческого комбайна относительно оси выработки на его производительность и энергоэффективность / А.Ю. Довгань, О.Е. Шабаев // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 24-26 мая 2021 г. – Донецк: ДОННТУ, 2021. Т. 3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2021. – С. 6-11.

10. Шабаев, О.Е. Оптимизация рабочего процесса обработки забоя проходческим комбайном с осевой коронкой/ О.Е. Шабаев, **А.Ю. Довгань** // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополь 13-19 сентября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – С. 576-583.

Подписано в печать 26.09.2024. Формат 60x84x1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Печать лазерная.

Бумага 80 г/м². Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Отпечатано в типографии _____ на _____,

тел. +7(856) 348-01-79, <http://>

Свидетельство о регистрации серия ____ от __. __. 20__ г.