

С.Н. Окорочков, В.Н. Савицкий, В.В. Синенко

## СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОХОДЧЕСКИМИ КОМБАЙНАМИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ КАК МЕХАТРОННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

*Принципы синтеза горной машины как мехатронного объекта с интеллектуальной системой управления. Функциональные задачи систем автоматизированного управления проходческим комбайном, учитывающих многообразие схем обработки забоя разной горно-геологической структуры.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* проходческий комбайн, мехатронный объект, модель синтеза, интеллектуальная система управления, функциональные задачи.

*Принципи синтезу гірничої машини як мехатронного об'єкту з інтелектуальною системою керування. Функціональні завдання систем автоматизованого керування прохідницьким комбайном, враховуючих різноманіття схем обробки вибою різної гірничо-геологічної структури.*

*К л ю ч о в і с л о в а:* прохідницький комбайн, мехатронний об'єкт, модель синтезу, інтелектуальна система керування, функціональні завдання.

**Постановка проблемы.** Одним из направлений повышения добычи угля является своевременная, быстрая и менее затратная подготовка новых лав. Наиболее прогрессивным является комбайновое проведение выработок, которое позволяет совместить во времени основные операции, сделать рабочий процесс непрерывным, обуславливает увеличение в 2...2,5 раза темпов ведения работ, повышает безопасность, снижает затраты на поддержание горных выработок. Широкое распространение получили проходческие комбайны (ПК) с избирательным рабочим органом (РО), отличающиеся хорошей приспособляемостью к изменяющимся горно-геологическим условиям и возможностью раздельной выемки угля и породы.

Значительное увеличение энерговооруженности и производительности ПК, улучшение эксплуатационных показателей, переход систем электроснабжения на напряжение 1140 В требуют создания специальных комплектных устройств управления и защиты приводов повышенной энергоемкости и надежности, т.к. повышение энерговооруженности ПК до 200...250 кВт и выше приводит к увеличению их массы, снижению маневренности и стабилизации в пространстве выработки. В то же время выбор низкой скорости подачи связан с недоиспользованием мощности при-

вода, а ее увеличение – с угрозой перехода электродвигателя в режим с заторможенным ротором.

Средние темпы проведения выработок ПК избирательного действия в настоящее время недостаточно высоки (100...150 погонных метров в месяц) по следующим причинам:

а) значительна доля ручного труда (80...85 % от общих трудозатрат), широко применяющегося при возведении крепи и забутовке пустот, образовавшихся в результате перебора пород по сечению;

б) несовершенство ручного управления;

в) недостаточное использование энерговооруженности ПК;

г) низкий коэффициент машинного времени;

д) недооценка возможности оператора по управлению ПК при значительных темпах проведения выработок, неучет ряда правил, которым должна соответствовать система управления в координатах «человек-машина-среда».

Опыт эксплуатации показывает, что потенциальные возможности ПК в полной мере не используются, причем производительность разрушения горного массива обеспечивается на уровне не более 60 % от возможного за средний цикл обработки забоя [1] из-за недостаточного использования мощности привода, нерациональных режимов обработки забоя, особенностей функционирования ПК при ручном управлении. Необходима также более точная обработка забоя, сокращающая время его крепления.

Совокупность взаимосвязанных механических, гидравлических, электротехнических и информационных составляющих, высокие функциональные характеристики, обработка многочисленных параметров и повышенные требования к безопасности при эксплуатации приводят к качественно новым характеристикам оборудования, ориентированным на объединение электромеханической системы с компьютерным устройством управления.

Использование в качестве коммутационных аппаратов вакуумных малогабаритных контакторов, высокоинтегрированных микроэлектронных устройств и новых датчиков дает возможность уменьшения габаритных размеров и массы комплектных устройств управления ПК, повышает их надежность и уровень безопасности, снижает эксплуатационные затраты при эксплуатации.

В этой связи актуальной проблемой является синтез систем автоматического управления ПК как мехатронного объекта.

**Анализ исследований и публикаций.** В настоящее время из-за кризисной ситуации в машиностроительной отрасли большинство производителей горного оборудования так и не смогли реализовать современные системы автоматического управления, а изготавливают громоздкое и морально устаревшее, неконкурентоспособное оборудование, не отвечающее современным мировым требованиям. Использование традиционных, уста-

ревших подходов порождает ряд системных ошибок, не позволяющих получить горную машину с полной реализацией её возможностей.

В работах [1,2] разработаны общие математические модели синтеза горных машин как пространственных многомассовых динамических систем переменной структуры, которые, однако, в недостаточной степени учитывают особенности ПК как мехатронного объекта в условиях эксплуатации, а именно:

- а) обработку, сбор и отображение информации о работе всех сборочных единиц и рабочих процессов с использованием высокоинтегрированных датчиков;
- б) самообучение и адаптацию к условиям эксплуатации;
- в) объединение механических, электротехнических, гидравлических, электронных и информационных компонентов;
- г) перепрограммирование для реализации оптимального и более сложного функционирования;
- д) интеллектуализацию рабочих процессов, сбора и передачи информации в шахтную информационную сеть;
- е) самодиагностику и оперативное устранение неисправностей при появлении опасных или нештатных ситуаций.

**Цель статьи.** Обосновать применение принципов мехатроники при создании комплектных устройств как звена системы управления ПК.

**Результаты исследований.** Ведущей тенденцией при создании современных горных машин является переход функциональной нагрузки от традиционных компонентов к интеллектуальным, комплексное единение всех частей системы и объектов управления. Синергетическая интеграция элементов в мехатронных объектах является основным принципом построения мехатронных систем.

В качестве объекта исследований рассмотрим ПК избирательного действия типа П110 производства ОАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (Донецкая обл.) повышенной производительности и надежности (в 1,5...2 раза) со стреловым РО, предназначенный для механизированной отбойки и погрузки горной массы при проведении арочной, трапецевидной и прямоугольной выработок.

Комбайн можно идентифицировать структурной схемой в системе «комбайн-внешняя среда», приведенной на рисунке 1. Исполнительное устройство ПК обеспечивает функцию обработки забоя и погрузки горной массы и взаимодействие с объектами автоматизации на основе управляющих воздействий, формируемых устройством управления в соответствии с управляющей программой мехатронными модулями. Оно обеспечивает логическую последовательность действий и обслуживания всего комплекса сопрягаемого оборудования. В эту подсистему вводится человек-оператор как исключительно важное интеллектуальное звено при человеко-машинном управлении, обеспечивающее дистанционный, интерактивный

или программный режим работы. Пульт управления дает возможность ввода в управляющее устройство заданий в виде программы или отдельных команд, осуществления дистанционного и ручного управления, а также контроля правильности выполнения задания.

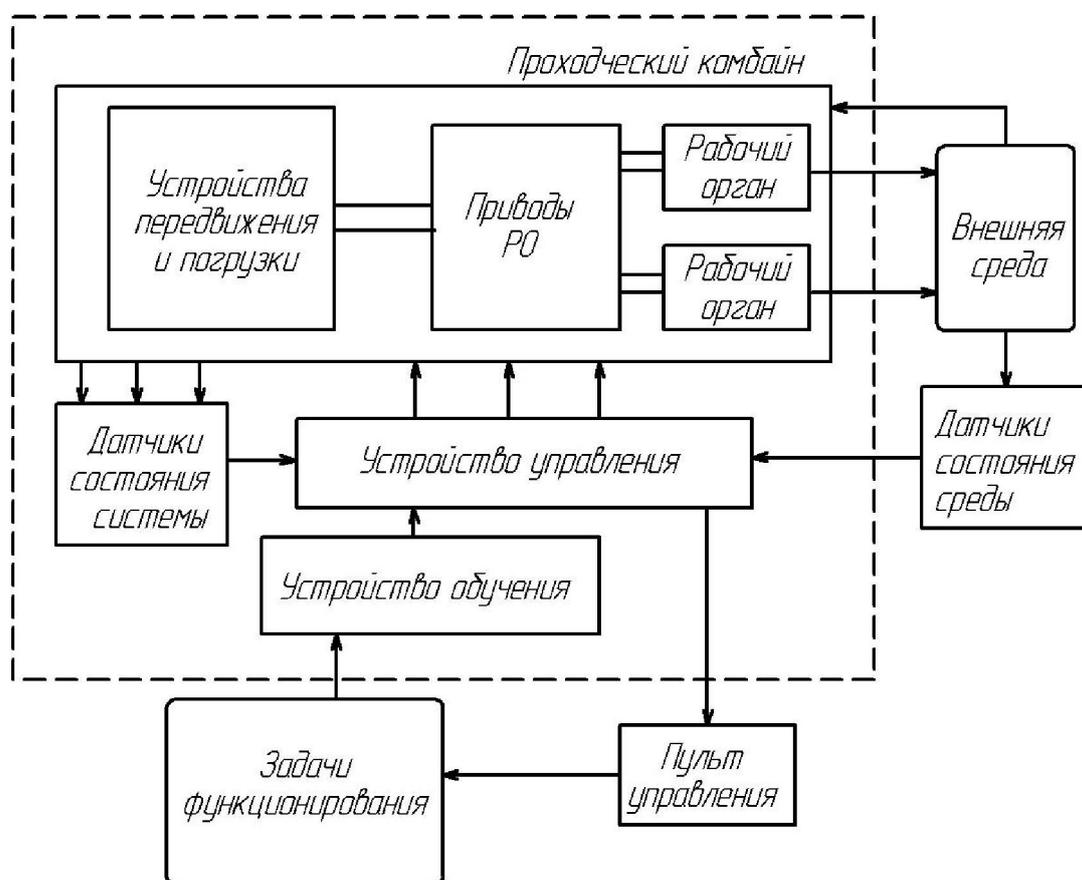


Рисунок 1- Структурная схема проходческого комбайна в системе «комбайн - внешняя среда»

Устройство управления реализовано на основе промышленных модульных компьютеров, многофункциональных плат обработки сигналов для распределительных систем сбора данных и управления. Последние позволяют передавать управляющие сигналы на исполнительные устройства РО и контролировать их состояние. Управление осуществляется в соответствии с управляющей программой, подготовленной в лабораторных условиях.

Перспективным является использование адаптивного и интеллектуального управления с высоким быстродействием. Решение этой проблемы за счет совершенствования элементной базы приводит к существенному удорожанию новых разработок. Поэтому целесообразнее создание вычислительной системы с параллельной организацией вычислений.

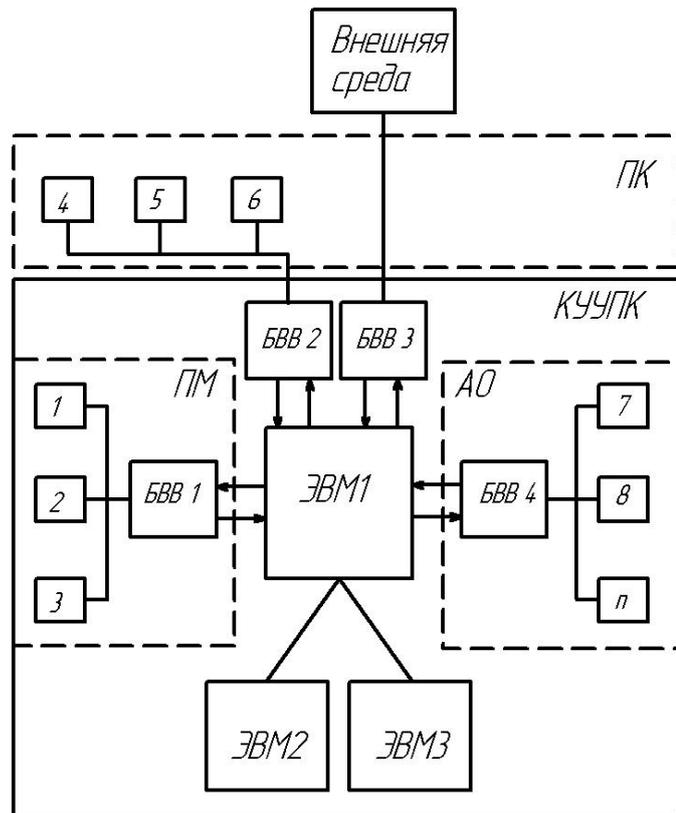
Как подтверждает практика [3], требуемая производительность, высокая скорость обработки информации, удобные формы ее хранения и передачи в вычислительной системе достигаются за счет параллельной орга-

низации вычислений с памятью – многопроцессорных ядер. При этом нужна реализация сложной математической обработки данных и их поиска в выбранные интервалы времени.

Принцип централизованной обработки данных не отвечает высоким требованиям к надежности процесса обработки, затрудняет развитие систем при обработке данных в многопользовательском режиме. Кратковременный выход из строя центрального процессора приводит к роковым последствиям для системы. Появление многоядерных процессоров потребовало нового подхода к организации и созданию информационных технологий. Возникло требование перехода от использования отдельных ЭВМ в системах централизованной обработки данных к их распределенной обработке, выполняемой на независимых, но связанных между собой компьютерах [4]. На рисунке 2 представлена структурная схема мехатронного объекта с распределенной обработкой данных. Блоки ввода и вывода (БВВ) схемы обеспечивают обмен между информационной компонентой объекта, периферийными устройствами (1,2...n) и интеллектуальной системой управления на базе ЭВМ.

- АО – аппаратный отдел;*
- БВВ – блок ввода-вывода;*
- КУУПК – комплектное устройство управления проходческим комбайном;*
- ПК – проходческий комбайн;*
- ПМ – пульт местный;*
- ЭВМ – электронно-вычислительная машина*

*Рисунок 2 – Структурная схема мехатронного объекта управления проходческим комбайном*



Проходческий комбайн представляет собой сложную, многоцелевую систему функционирования. В ней можно выделить три уровня управления, на каждом из которых формируется управляющая информация с передачей другим уровням для выполнения поставленной задачи (рисунок 3). На первом, интеллектуальном уровне планируются действия с учетом прогнозируемых изменений состояния внешней среды, определения задач и плани-

рования решений, проведения диагностики и дублирования текущего состояния системы с участием человека-оператора. На втором уровне формируется последовательность выполнения команд в соответствии с целью управления и осуществляется коррекция её программ в диалоговом общении с оператором. На третьем уровне выполняются дифференциация планов действий на типовые операции, планирование движения РО и формирование управляющих команд с отображением текущих параметров на мониторе.

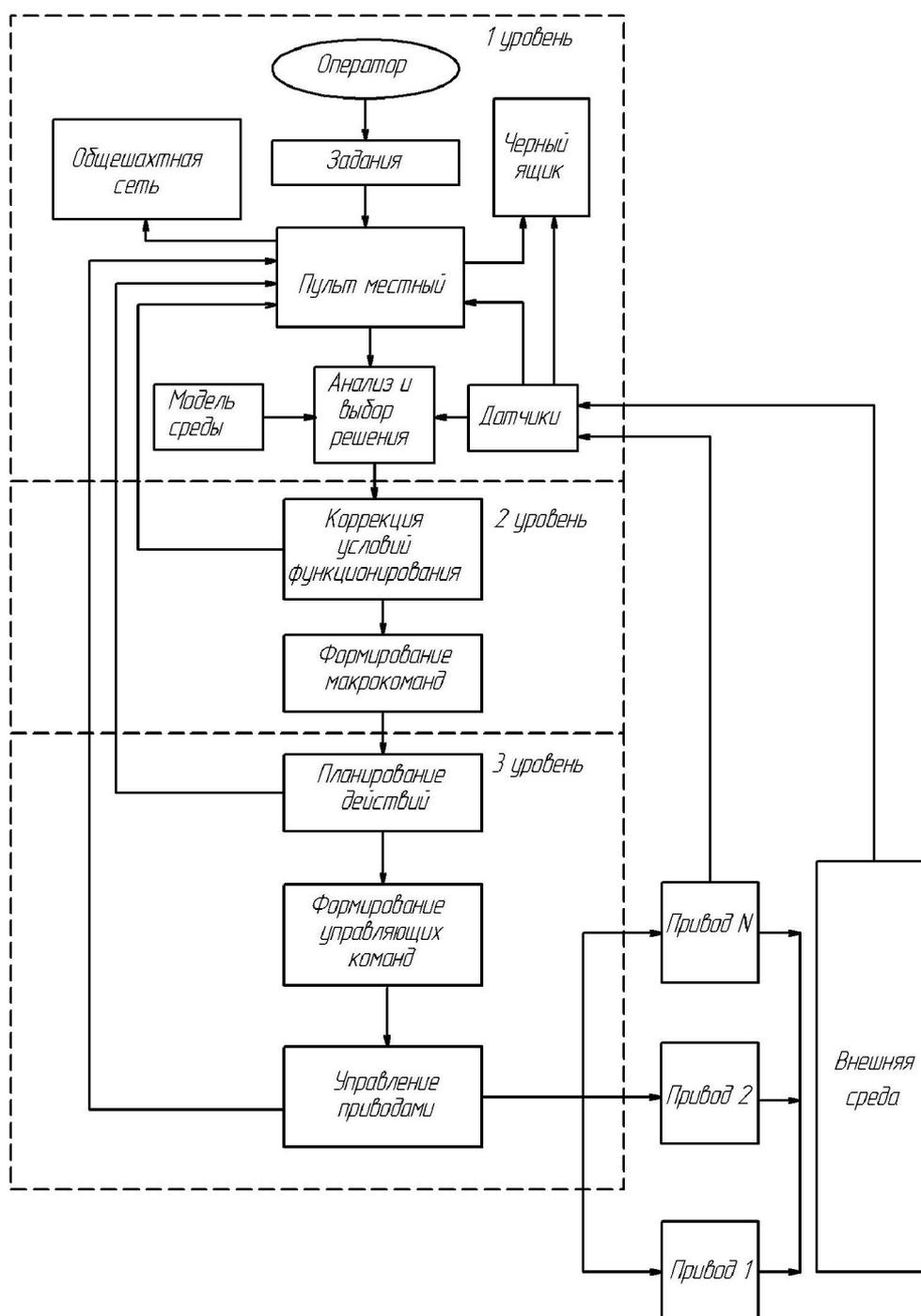


Рисунок 3 – Иерархическая структура управления проходческим комбайном

При формировании потоков команд и данных определяется структура обработки данных, на основе которой выбирается производительность процессоров и максимальное время обработки потоков информации. Для создания идеального конвейера с максимальным быстродействием необходимо эти потоки по процессорам распределить так, чтобы время работы  $T_i$  каждого процессора было одинаковым  $T_i = T_1 = T_2 = T_n$ . При отказе какого-либо процессора функции обработки передаются рабочим процессорам, при этом увеличивается время обработки, но повышается отказоустойчивость.

Если для элементов внутри  $L$ -го класса требуется обработка информации одновременно, то получаем конвейерно-векторную структуру (рисунок 4), функционирующую по программе

$$RO = \sum_{i=1}^L RO_i$$

длиной

$$|RO| = \sum_{i=1}^L |RO_i|.$$

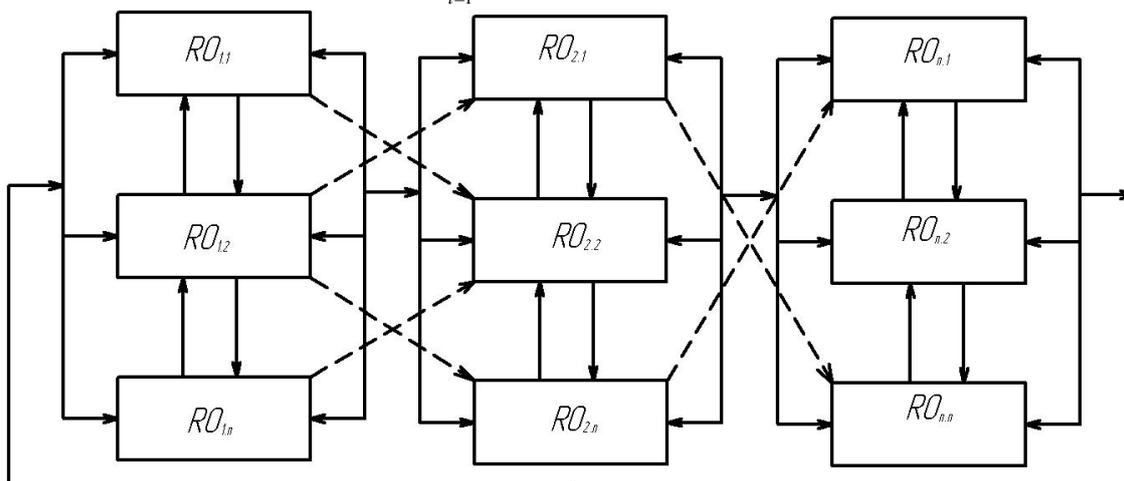


Рисунок 4 – Конвейерно-векторная структура организации вычислительной системы

Время  $T_R$  обработки информации определяется по формуле

$$T_R = \sum_{i=1}^L \sum_{r \in RO_i} t_i^{(l)},$$

где  $t_i^{(l)}$  – время выполнения элементов, принадлежащих соответственно  $l$ -му и  $(l+1)$ -м классам.

Если порядки двух классов эквивалентности  $l$  и  $(l+1)$  равны между собой, значит все микропроцессорные модули системы загружены и простоев не будет.

Если обработка информации требуется одновременно для всех поль-

зователей, то получаем матричную структуру обработки информационных данных. Время выполнения всей программы  $RO^{(j)}$  матричной структуры вычисляется по формуле

$$T_R = \sum_{r \in RO} t_i^{(l)} + \bigcap_{l=1}^L \sum_{r \in RO_l / RO_1} t_i^{(j)}.$$

Длина всей программы обработки информации находится как сумма длины одного из данных  $RO^{(j)}_1$  и длины пересечения разностей данных оставшихся классов относительно выбранного:

$$|RO| = |RO_1| + \bigcap_{l=2}^L |RO_l \setminus RO_1|.$$

В результате получаем сложную конвейерно-векторную структуру, в которой исходные данные при обработке информации «распараллеливаются» как в матричной структуре, а ряд элементов – как в конвейере.

Для управления сложным мехатронным объектом со встроенной многоядерной вычислительной системой требуется современное программное обеспечение (ПО) с реализацией диалоговых языков различного уровня сложности, которое формирует, редактирует и отлаживает программы управления, выполняет их в пошаговом или непрерывном режиме, формирует управляющие воздействия в реальном масштабе времени. Важнейшей функцией ПО является достижение согласованной работы всех подсистем ПК в условиях многочисленных и разнотипных событий, возникающих независимо друг от друга в различные моменты времени. Основными компонентами операционной системы являются монитор и набор служебных и сервисных программ, осуществляющих функции управления заданиями, данными и объектами, обеспечивающих запуск и контроль выполнения системных и управляющих программ, управление операциями ввода-вывода, распределение памяти и манипуляцию файлами. Объединение аппаратной и программной структур с учетом интеллекта в составе мехатронного объекта значительно расширяет функциональные возможности ПК, в том числе за счет использования прогнозирующих и адаптивных алгоритмов. В процессе работы и обработки программных режимов возникают различного рода отклонения, вызванные кратковременными случайными возмущениями и сбоями информационно-измерительной системы. Вероятность возникновения аварийных ситуаций при отклонениях от заданного режима работы и параметров движения снижается за счет использования прогнозирующих алгоритмов управления, исключающих погрешности и случайные ошибки, оценивая ошибки в каждом узле управления путем сравнения измеренных и прогнозируемых значений параметров.

Важным в управлении является планирование движения вдоль заданной траектории с определенной ориентацией и скоростью, прогнозирование поведения РО в узловых точках, число которых зависит от сложности и протяженности выполняемой траектории с учетом ограничений движе-

ния в рабочем пространстве и последующей проверки. Задача планирования состоит в разработке математического описания желаемого движения ПК при отработке заданной траектории. При подготовке алгоритмического обеспечения и ПО используются кинематические модели, включающие алгоритмы решения прямых и обратных задач кинематики о положении, скорости и ускорении и позволяющие описать движение системы в трехмерном пространстве в зависимости от времени без учета сил и моментов, вызывающие это движение.

Информация, получаемая от датчиков положения РО, позволяет определить его положение в базовых системах координат, а от датчиков скорости – рассчитать фактическую скорость движения и ускорение. Если обобщенные координаты ПК заданы функциями времени  $G(t)=[q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]$ , то алгоритмы решения о положении РО позволяют получить закон его движения  $X(t)=[x(t), y(t), z(t), \alpha(t), \beta(t), \gamma(t)]$ . Используя алгоритмы решения прямой задачи о положении и компьютерную графику, моделируется рабочая зона при наличии ограничений на перемещение обобщенных координат. Для этого строится матрица для каждой из узловых точки:

$$R_{\delta\delta} = \begin{bmatrix} q_1^0 & q_1^1 & \dots & q_1^m \\ q_2^0 & q_2^1 & \dots & q_2^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_n^0 & q_n^1 & \dots & q_n^m \end{bmatrix}.$$

Столбцы матрицы определяют конфигурацию РО в конкретной узловой точке, а строки задают траекторию его движения. При построении траектории перемещения РО следует учитывать изменение его положения при выполнении работ, изменение состояния окружающей среды, форму, габаритные размеры и инерционные свойства конструкции ПК.

Траектория движения РО в общем случае может быть разделена на 3 участка, каждый из которых соответствует определенному виду операций (рисунок 5): вертикальный подъем ( $P_0 \rightarrow P_1$ ), прямолинейное перемещение ( $P_1 \rightarrow P_2$ ), вертикальный подъем и ориентирование в зоне работы ( $P_2 \rightarrow P_3$ ).

Точки траектории строятся в системе координат горной выработки. Для их описания удобно использовать матрицу  $S_t$ , каждый столбец которой содержит координаты точек  $P_i$  и углы поворота, описывающие ориентацию в каждой точке:

$$S_t = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ \alpha_i \\ \beta_i \\ \gamma_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \dots & x_n \\ y_0 & y_1 & \dots & y_n \\ x_0 & z_1 & \dots & z_n \\ \alpha_0 & \alpha_1 & \dots & \alpha_n \\ \beta_0 & \beta_1 & & \beta_n \\ \gamma_0 & \gamma_1 & \dots & \gamma_n \end{bmatrix}.$$

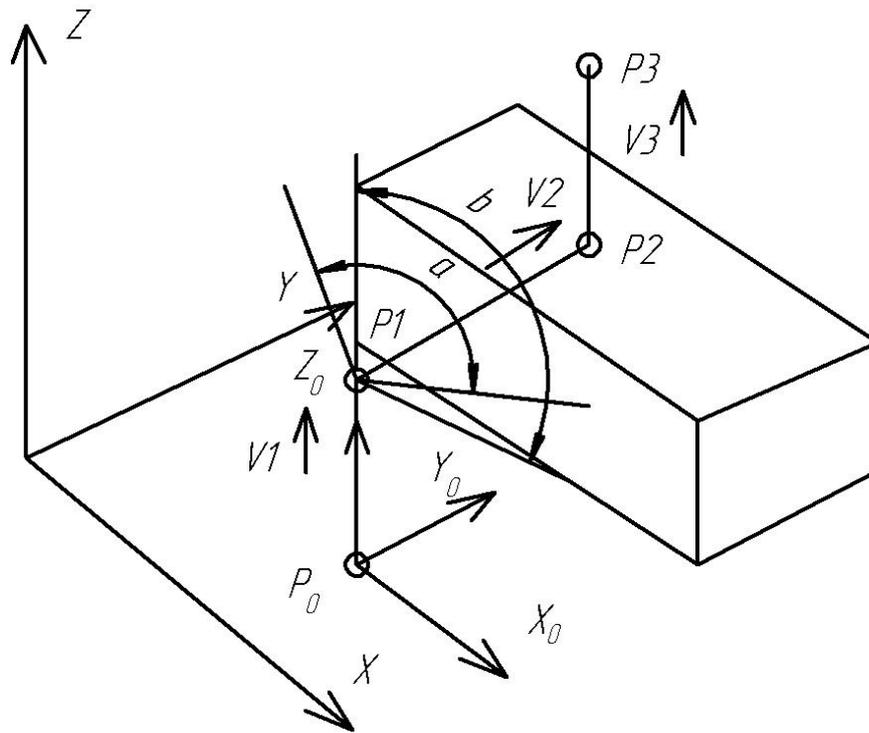


Рисунок 5 – Траектория движения рабочего органа комбайна в зоне заоя

При построении траектории движения составляется матрица скорости  $V_T$ :

$$V_T = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \\ \dot{\alpha}_i \\ \dot{\beta}_i \\ \dot{\gamma}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dot{x}_1 & \dots & 1 \\ 0 & \dot{y}_1 & \dots & 1 \\ z_0 & \dot{z}_1 & \dots & z_n \\ 0 & \dot{\alpha}_1 & \dots & 2 \\ 0 & \dot{\beta}_1 & \dots & 3 \\ 0 & \dot{\gamma}_1 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Полученные результаты планирования движения должны быть преобразованы в управляющие воздействия для исполнительного уровня и на их основе сформированы зависимости, обеспечивающие устойчивость движения относительно программной траектории.

При построении адаптивных систем предпочтение отдается многопроцессорным устройствам, у которых регуляторы приводов реализуются на процессорных модулях. Для построения адаптивного управления используется привод с обратными связями по положению ( $q$ ) и скорости ( $v$ ). По значению возникающих деформаций  $\sigma$  измеряются усилия и моменты. Модуль процессора, кроме формирования закона пропорционального интегрально-дифференцированного (ПИД) регулирования, обеспечивает реализацию адаптивной настройки коэффициентов регулятора. С этой целью в состав математического обеспечения и ПО процессора привода включен

модуль расчета параметра адаптации  $\tau = I(q, v, \sigma)$  и коэффициентов настройки  $k_i(\tau)$ . Расчет параметров адаптации выполняется на основе текущих значений с учетом возникшей ошибки позиционирования  $\Delta q = q_{\text{зад}} - q$  с помощью оценочной функции  $I$  для каждого шага движения [4].

При каждом шаге управления можно с помощью полинома прогнозировать ожидаемое значение положения. Если измеренное значение положения отклоняется от прогнозируемого в момент следующего шага на значение, превышающее допустимое, то это является признаком аварийной ситуации. Ожидаемое значение прогнозируется на один шаг управления, а текущее значение перемещения принимает прогнозируемое значение.

При многократном прогнозе вывод вычислительных выражений существенно усложняется.

Адаптивное управление в окружающей обстановке определяется его информационной системой, которая обеспечивает сбор и обработку информации о внешней среде и предоставление управляющей системе или оператору данных, необходимых для управления. Сбор такой информации осуществляется сенсорными датчиками внешней среды. Они должны быть устойчивы к механическим воздействиям и помехоустойчивыми. При выполнении проходческих работ необходимо задавать проектные оси и плоскости, выполнять постоянный контроль положения ПК и его РО относительно проектных положений, обеспечивать их надежное ведение по сложным криволинейным траекториям без превышения допустимых по технологии отклонений от заданного направления проходки.

Важное значение имеет крепление и обработка поверхности выработки. Для автоматизации процесса контроля положения используют лазерный луч. Монохроматический лазерный источник позволяет создавать системы контроля с высокой помехоустойчивостью и точностью. Наличие высокоточной измерительной системы позволяет производить как пространственную ориентацию луча под землей, так и привязку исходного и конечного положения забоя к трехмерной системе координат. Основой для контроля положения ПК является точная подземная трехмерная сеть опорных точек [5], связанных через стартовую выработку с наземной измерительной сетью (рисунок 6).

Для получения информации о состоянии и свойствах внешней среды на определенном расстоянии используются акустические принципы построения локационных датчиков. Сущность работы ультразвуковых датчиков заключается в излучении в окружающую среду ультразвуковых сигналов и приеме их от отражающего объекта. Расстояние до объекта определяется соответствующими приборами по времени прохождения отраженного сигнала, скорость перемещения объектов – по изменению его частоты.

Решение задач управления значительно облегчается при использовании информации о текущем положении РО и окружающей среды. Это позволило придать ПК адаптивные свойства [6].

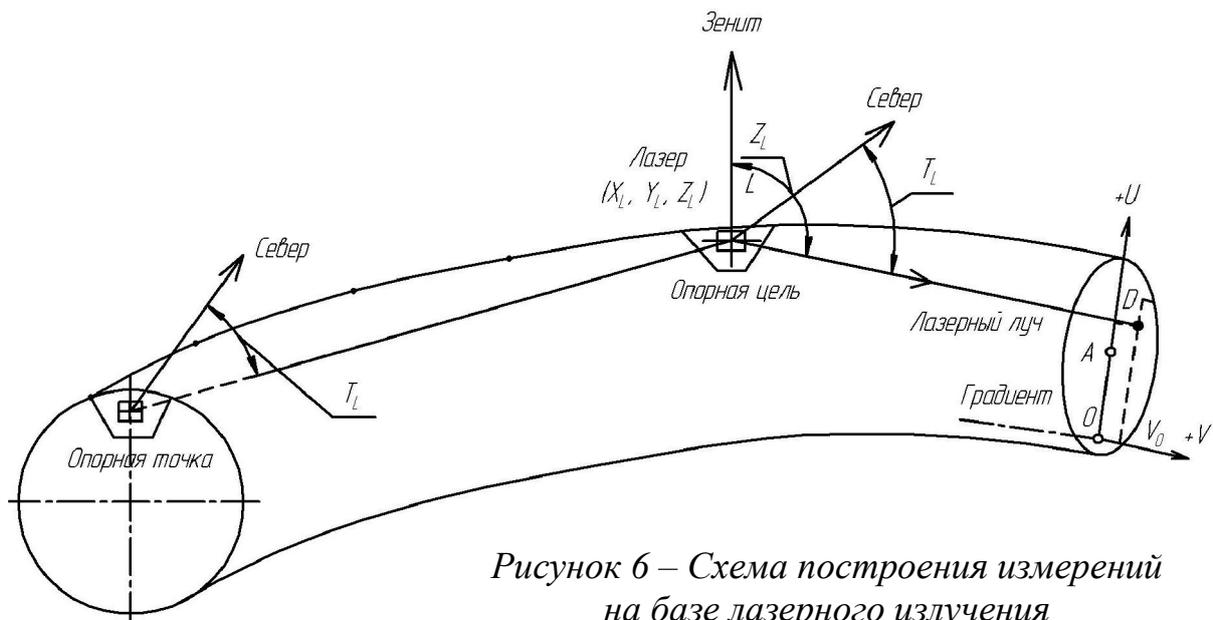


Рисунок 6 – Схема построения измерений на базе лазерного излучения

Оценка разработанной модели синтеза выполнялась на основе модельных исследований путем сравнения показателей рабочего процесса комбайна типа П110 до и после решения соответствующих задач адаптивной оптимизации. При этом использовались анализы рабочего процесса ПК как мехатронного объекта и адаптивной оптимизации. Адаптивный принцип управления с использованием многоядерной вычислительной системы позволил существенно повысить ресурс элементов конструкции ПК, улучшить управляемость и точность выполнения рабочих операций по сравнению с автоматизированным управлением.

### **Выводы:**

1. Обоснованы принципы синтеза горного ПК как мехатронного объекта, в том числе с интеллектуальной системой управления. Предложенный подход позволит существенно повысить эффективность использования горной машины, снизить металлоемкость и повысить ее энергооборуженность.

2. Проходческий комбайн – это многофункциональная сложная машина и управление ею – многогранный процесс, требующий решения ряда функциональных задач автоматизированного управления, в том числе:

- поддержки точности параметров обработки забоя;
- стабилизации заданной нагрузки на электроприводы;
- стабилизации местоположения ПК;
- обеспечения безопасных и комфортных условий для оператора;
- выполнения функций блокирования согласно требованиям Правил безопасности угольных шахт;
- максимально возможного повышения информативности технологических параметров ПК;
- отображения и хранения текущей информации о состоянии сбороч-

ных единиц и механизмов ПК и системы управления.

3. Практический интерес представляют системы управления с элементами искусственного интеллекта. В этих системах выделяется высший уровень – интеллектуальный. На основе прогнозируемых изменений внешней среды определяется степень сложности задач, синтезируются и корректируются модели внешней среды разной степени абстракции и планируются дальнейшие действия с минимальным участием человека-оператора.

4. Решение поставленных задач приводит к необходимости создания автоматизированных систем управления с высокими качественными показателями, учитывающих многообразие схем обработки забоя, возможно максимальное энерговооружение, геологическое строение сечения обрабатываемой выработки, обеспечение максимизации надежности работы оператора, минимизации напряженности его работы и его безопасности.

#### Список литературы

1. Семенченко А.К. Теоретические основы анализа и синтеза горных машин и процесса их восстановления как динамических систем/А.К. Семенченко, В.М. Кравченко, О.Е. Шабаев.– Донецк: РВА ДонНТУ, 2002.–302 с.

2. Горбатов П.А. Выемочные комбайны нового поколения как энергетические системы мехатронного класса / П.А. Горбатов, В.В. Косарев, Н.М. Лысенко. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – 176 с.

3. Головкин Б.А. Параллельные вычислительные системы/ Б.А.Головкин.– М.: Наука, 1980.– 520 с.

4. Злобин В.К. Нейросети и нейрокомпьютеры: учеб. пособ. / В.К. Злобин, В.Н. Ручкин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011.– 256 с.

5. Булгаков А.Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. Серия «Библиотека инженера» / А.Г.Булгаков, В.А.Воробьев. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. – 488 с.

6. Козлов Ю.М. Адаптация и обучение в робототехнике / Ю.М Козлов. – М.: Наука, 1990. – 248 с.