

УДК 681.511.46

Л.Д. Певзнер, Т.З. Сулейменов, И-С.С. Югай

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОВША ЭКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ

Повышение эффективности использования ресурсов мощного шагающего экскаватора-драглайна возможно за счет выполнения основных транспортных операций в автоматическом режиме. Использование автоматики позволит облегчить труд машиниста и повысить безопасность производства работ. Кроме того, возможность прицельной трехмерной разгрузки в автоматическом режиме без потерь времени существенно расширяет технологические возможности драглайна. Решение данной задачи стало возможным с развитием современных интеллектуальных логически нечетких и нейросетевых алгоритмов.

Ключевые слова: автоматизация, драглайн, нечеткая логика, управление ковшом, безопасность, прицельная разгрузка.

Мощные шагающие экскаваторы-драглайны широко используются в горнодобывающей промышленности преимущественно для ведения вскрышных работ с укладкой породы в выработанное пространство или на борт карьера. Гибкая подвеска ковша и легкая решетчатая стрела драглайна обеспечивает наибольший радиус, наибольшую глубину копания, а также наибольшую высоту выгрузки по сравнению с другими типами экскаваторов. Простота монтажа, технического обслуживания и ремонта, надежность, повышенная готовность механизмов к работе, высокая маневренность, хорошая проходимость, широкие технологические возможности позволяют эксплуатировать экскаваторы с большой эффективностью. Экскаваторы надежно работают при температуре от минус 50° до плюс 40°С.

Сегодня в России находится в эксплуатации 91 крупный драглайн с ковшом вместимостью от 15 до 100 м³ и длиной стрелы 90–130 м. Только на

угледобывающих предприятиях Российской Федерации, где драглайны эксплуатируются более пятидесяти лет, ими по бестранспортным схемам перемещается около 30% от общего объема всех вскрышных пород.

За пределами России 243 крупных драглайна работают на горных предприятиях 12 стран мира, перемещая каждый год 3360 млн м³ горной массы. Наибольшие парки таких машин эксплуатируются в США, Австралии, ЮАР, Канаде и Индии. Только в одних США 101 крупный драглайн ежегодно переваливает 1450 млн м³ горной массы.

Одной из основных проблем эксплуатации драглайнов является существенная зависимость показателей работы экскаватора от уровня квалификации машиниста, его индивидуального психофизического состояния в течение рабочей смены. Недостаточно высокий уровень эксплуатационной производительности объясняется недоиспользованием мощности приводов главных механизмов, их

скоростных и силовых параметров; нерациональным управлением механизмами при выполнении экскаваторного цикла; недоиспользованием конечной нагрузки экскаватора; нарушениями технологической дисциплины, которые приводят к потерям времени на дополнительные работы. Эмоциональное напряжение и усталость на фоне отсутствия достаточного объема информации о ходе рабочего процесса и дефицита времени зачастую создают условия, когда возникают дополнительные динамические нагрузки на оборудование, теряется производительность, повышается вероятность ошибочных действий, ведущих к аварийным ситуациям. Установленный коэффициент использования мощного драглайна в условиях реального технологического процесса не превышает в среднем 0,7.

Повышение эффективности и надежности эксплуатации экскаватора-драглайна может быть достигнуто путем создания автоматизированной системы управления технологическим процессом экскавации. В которой основной является подсистема автоматизированного выполнения операций транспортного перемещения груженого ковша на разгрузку в отвал и порожнего ковша на черпание. Выполнение транспортных операций цикла в автоматическом режиме позволяет повысить текущую производительность экскаватора, облегчить труд машиниста и создать условия для надежной, безаварийной работы, что в целом повышает эффективность эксплуатации экскаваторов.

Задача исследования и проектирования комплексных систем управления шагающим экскаватором-драглайном впервые была поставлена в середине 60-х годов прошлого столетия. В СССР решением данной задачи

занимались Уральский завод тяжелого машиностроения и Московский горный институт. В число проблем автоматизации была включена задача создания автоматизированной системы управления рабочими операциями транспортирования и черпания.

Первые работы по автоматизации технологического процесса драглайна, в которых ставилась и решалась задача автоматического управления движением рабочего органа при выполнении транспортных операций, появились в конце 80-х годов. В результате исследований были получены следующие результаты:

В работе Л.Д. Певзнера [1] ставилась задача управления приводами подъема, тяги и поворота, осуществляемыми автоматически транспортное перемещение ковша. Проведены исследовательские промышленные испытания разработанных алгоритмов. В работе М.А. Розенцвайга [2] поставлена и решена на модельном уровне упрощенная задача автоматического управления процессом подъема и опускания ковша без учета его колебаний. В работах А.И. Троеглазова [3], А.Ф. Фазылова [4] приводятся аналитические и экспериментальные результаты решения задачи субоптимального по времени автоматического управления разворотом поворотной платформы, которые обеспечивают заданную терминальную точность устранения поперечных колебаний ковша. Работы А.А. Демина [5], посвящены техническому совершенствованию рабочего оборудования драглайна, позволяющее осуществлять разгрузку ковша вне зоны саморазгрузки, что позволило бы использовать драглайн по транспортной технологии вскрыши.

Важный шаг в направлении создания современных интеллектуальных алгоритмов управления транспорт-

ными операциями драглайна представлен работой С.Н. Коваленко [6], в которой предложена и исследована интерактивная микропроцессорная система автоматизированного управления транспортированием ковша. Постановка задачи управления транспортными операциями является усеченной, предложенные алгоритмы не решают задачи устранения поперечных колебаний ковша. Возможность прицельной разгрузки не рассматривалась и не оценивалась.

Создание на базе мощного драглайна универсальной выемочно-погрузочной машины сдерживается в настоящий момент отсутствием алгоритмов автоматического управления транспортными операциями ковша с прицельной разгрузкой переменного радиуса внутри рабочего пространства.

К началу 80-х годов появились первые зарубежные публикации, в которых был отражен интерес к проблеме повышения эффективности использования драглайнов. Опубликованные работы ученых США, Канады и Австралии были посвящены проблемам учета и анализа технологических показателей эксплуатации, как средства повышения эффективности использования драглайна [7]. Задача повышения эффективности была поставлена в несколько отличной форме, речь шла не об автоматизации рабочих операций, а скорее об автоматизированном мониторинге технологического процесса экскавации.

Выполненный с глубиной двадцать пять лет анализ основных результатов исследований отечественных и зарубежных ученых позволяет утверждать, что задача синтеза алгоритмов автоматического управления транспортными операциями ковша мощного драглайна является актуальной.

Основные задачи, подсистемы автоматизированного управления транс-

портным движением ковша драглайна, заключаются в следующем:

- Автоматизация процесса транспортирования груженого ковша драглайна на разгрузку и порожнего ковша на черпание с обеспечением необходимой точности позиционирования в ключевых точках траектории с сохранением паспортного времени транспортирования. Процесс черпания выполняется вручную машинистом экскаватора.

- Обеспечение безопасности работы экскаватора-драглайна на всех этапах экскавации.

- Осуществление контроля ключевых рабочих параметров экскаватора-драглайна на всех этапах экскавации.

При разработке логической модели автоматизированного управления транспортным движением ковша драглайна авторами было решено использовать инструментарий теории нечеткого управления. Применение нечетких регуляторов позволило максимально точно имитировать управление движением ковша машинистом во всем рабочем пространстве драглайна.

В качестве объекта моделирования использовалась математическая модель драглайна, разработанная Л.Д. Певзнером – А.Л. Мейлахсом согласно расчетным схемам, приведенным на рис. 1 и 2. Движение рабочего органа – ковша драглайна рассматривалось в виде суммы двух движений: «поворотное», осуществляемое поворотной платформой (рис. 1) и «траекторное» в плоскости канатов и стрелы драглайна (рис. 2). При составлении соотношений модели была принята классическая система допущений, влияние которых на адекватность математического описания детально представленное в работах [8, 9].

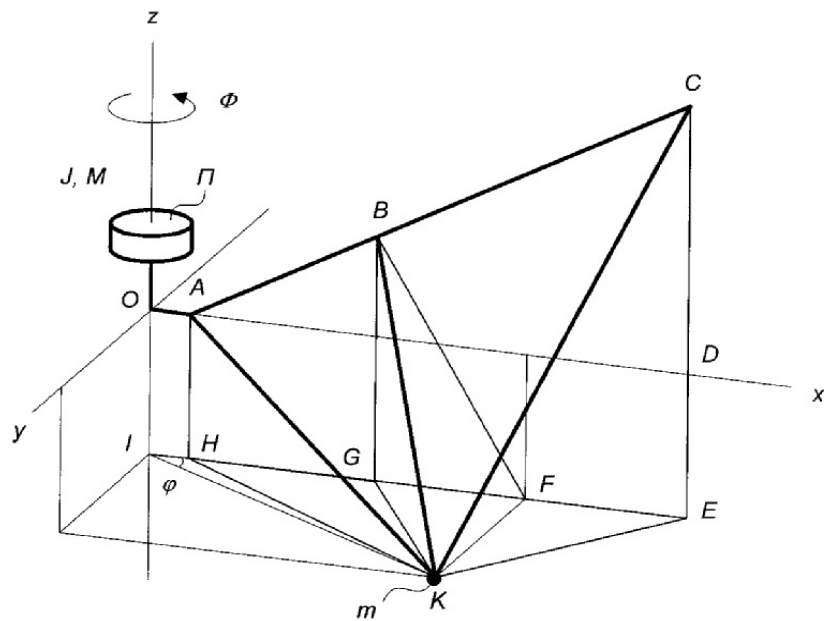


Рис. 1. Расчетная схема движения ковша драглайна поворотной платформой

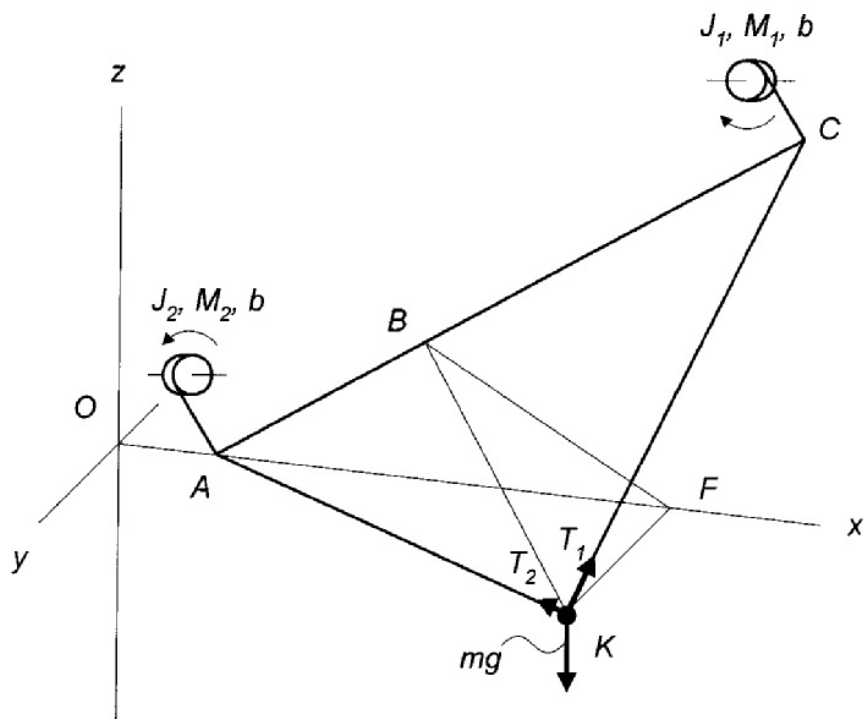


Рис. 2. Расчетная схема движения ковша драглайна в плоскости стрелы и канатов

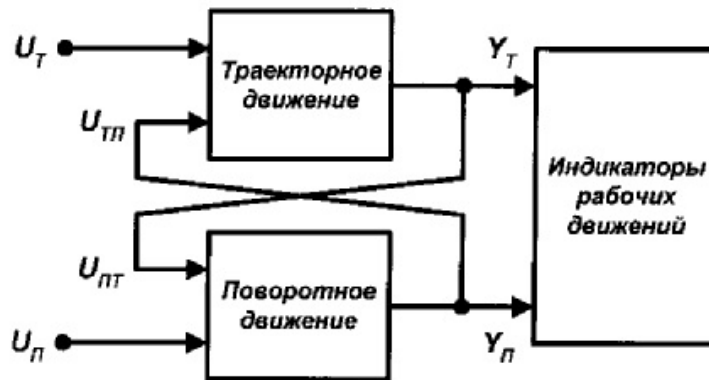


Рис. 3. Структура верхнего иерархического уровня имитационной модели

Для разработки алгоритмов управления рабочим органом драглайна использовалась имитационная модель, реализованная с использованием математической модели пространственных движений ковша.

Верхний иерархический уровень имитационной модели представлен взаимосвязанными блоками имитации траекторного и поворотного движений, структура уровня приведена на рис. 3.

Координаты U_T , $U_{ТП}$, $U_{ПТ}$, $U_П$, Y_T , $Y_П$ представляют собой векторные величины:

$$U_T = [U_1, U_2, l_1^0, l_2^0, m]^T, \quad U_{ТП} = [y, \eta]^T,$$

$$Y_T = [l_1', l_1, I_1, E_1, l_2', l_2, I_2, E_2, p, p', q, q', T_1, T_2]^T,$$

$$U_П = [U, \Phi^0]^T, \quad U_{ПТ} = [p, p', q, q', m]^T,$$

$$Y_П = [\Phi, \varphi, y, \eta, r, M_{ДВ}, M, I, E]^T,$$

где U_1 и U_2 – сигналы задания скорости для электроприводов механизмов подъема и тяги соответственно; m – значение массы ковша; l_1^0, l_2^0 – начальные условия по длинам подъемного и тягового канатов; y, η – метрическое отклонение ковша от вертикальной плоскости и параметр связи плоского и поворотного движений; l_1, l_2 – дли-

ны подъемного и тягового канатов; l_1', l_2' – скорости изменения длин подъемного и тягового канатов; p, p', q, q' – вспомогательные координаты плоского движения ковша и скорости по ним; E_1, E_2 – ЭДС генератора электроприводов механизмов подъема и тяги; I_1, I_2 – токи якорей электроприводов механизмов подъема и тяги; T_1, T_2 – усилия в подъемных и тяговых канатах; U – сигнал задания скорости для электропривода механизма поворота; I, E – ток и ЭДС генератора электропривода механизма поворота; $M_{ДВ}, M$ – момент, развиваемый двигателями поворота и момент, развиваемый механизмом поворота; Φ, Φ^0 – угол поворота платформы и соответствующее начальное условие; φ – угловое отклонение ковша от плоскости стрелы; r – приведенное расстояние от ковша до оси вращения платформы.

Внутренняя структура блоков имитации траекторного и поворотного движения содержит блоки электромеханических систем, механизмов,

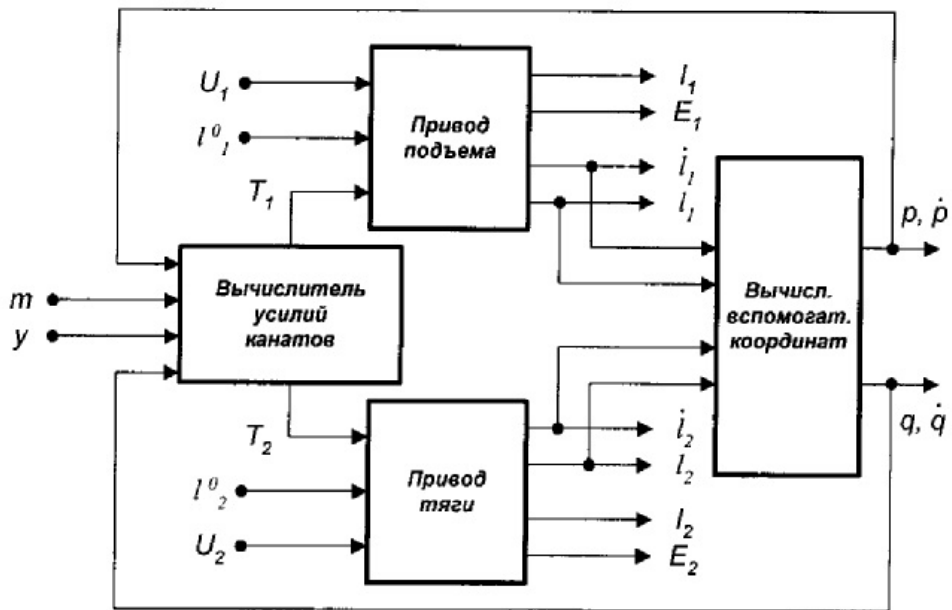


Рис. 4. Структура блока имитации траекторного движения ковша драглайна

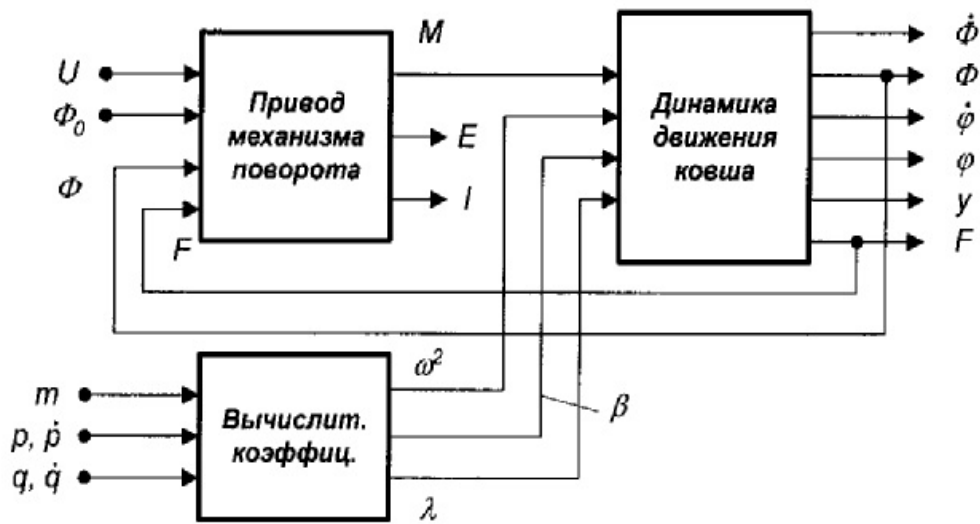


Рис. 5. Структура блока имитации плоского движения ковша драглайна

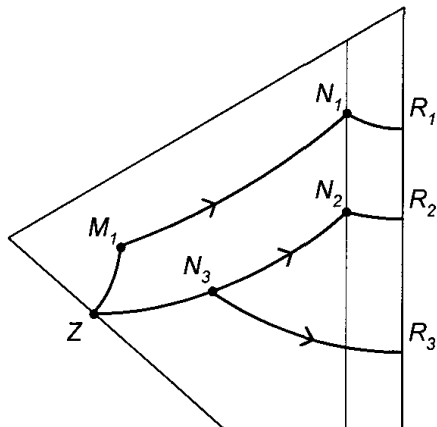


Рис. 7. Идеальная траектория ковша на разгрузку

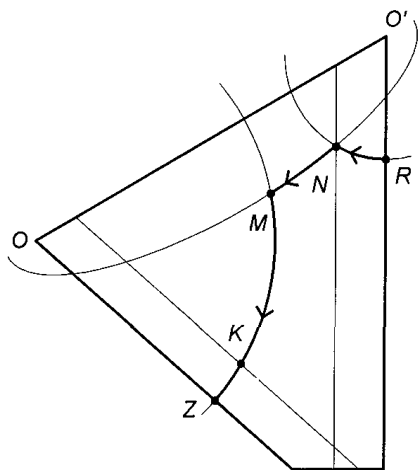


Рис. 8. Идеальная траектория ковша на черпание

5. Пакет должен обладать свойством расширяемости, когда состав базовых средств пакета можно пополнять или видоизменять, прибегая к программированию на алгоритмическом языке высокого уровня.

На основе представленной математической модели был произведен лингвистический анализ. Первоначально определены границы рабочего пространства (рис. 6). ОС – ограничение, определенное стреловой кон-

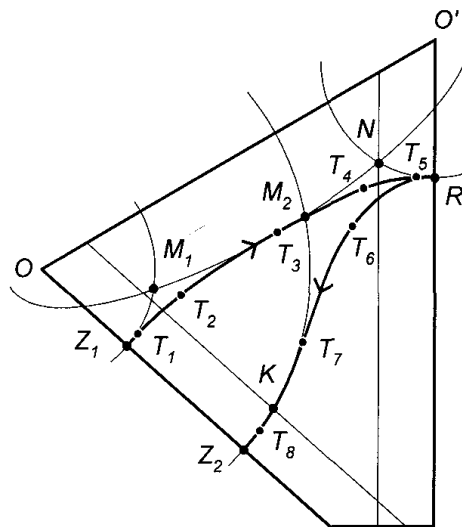


Рис. 9. Траектория реального движения ковша, наложенная на кусочно-предельную траекторию

струкцией, ОА – вскрышной уступ, АВ – прямая определенная высотой вскрышного уступа, ВС – естественная вертикальная граница рабочего пространства. Так же, важные ограничения предписывает безопасность движений ковша: а, б – окружности ограничивающие области перетяги и переподъема, в, г – граница области растяжки ковша.

Геометрический синтез кусочно-предельных траекторий движения ковша выполнен согласно технологическим требованиям к транспортному перемещению ковша в плоскости стреловой конструкции и канатов [10] в предположении об идеальности приводов подъема и тяги.

В течение рабочего цикла ковш экскаватора-драглайна совершает два основных транспортных перемещения: на разгрузку (рис. 7) и на черпание (рис. 8).

Основные технологические требования к движению ковша на разгрузку: траектория движения должна быть ортогональной к поверхности забоя

Технологический параметр	Первичный преобразователь	Необходимый интерфейсный модуль контроллера
ЭДС генератора (механизма подъема, тяги и поворота)	Измерительный трансформатор	Аналоговый вход по напряжению
Ток якорной цепи (механизма подъема, тяги и поворота)	Датчик Холла	Аналоговый вход по напряжению
Угол поворота вала двигателя (механизма подъема, тяги и поворота)	Энкодер	Дискретный вход с измерением частоты
Сигнал задания машиниста	Операционный усилитель	Аналоговый вход по напряжению
Сигнал задания для командоаппарата	Операционный усилитель	Аналоговый выход по напряжению

на участке отрыва ковша, движение вдоль траектории при входе ковша в сектор саморазгрузки должно иметь наискорейший темп, направление скорости ковша на этом участке должно быть горизонтальным, участок траектории в зоне саморазгрузки наикратчайшим. Основным технологическим требованием, накладываемым на движение ковша на черпание [10], является недопустимость в ходе движения провисания тягового каната, что может иметь место при вертикальном опускании ковша в наискорейшем темпе к дальним точкам черпания. Траектория движения на черпание может быть вертикальной к поверхности забоя на участке достижения точки черпания, механизм подъема должен быть плавно заторможен для достижения «мягкого» касания ковшем поверхности забоя.

Нечеткая модель безопасного траекторного движения ковша драглайна получена путем «фазификации» кусочно-предельных траекторий, как идеальных программ движения для идеальных исполнительных приводов,

с траекториями реального движения ковша при управлении им опытным машинистом-экскаваторщиком.

На рис. 9 представлена такая траектория, соответствующая транспортированию грузеного ковша на разгрузку, а затем порожнего ковша на черпание, наложенная на проведенные через опорные точки окружности и эллипс, направленное движение вдоль которых соответствует предельным участкам кусочно-предельных траекторий движения на разгрузку и черпание.

Изложенный выше алгоритм управления предъявляет высокие требования к вычислительной мощности аппаратного решения. В системе в режиме реального времени одновременно происходит несколько процессов:

- отслеживание аварийных ситуаций;
- нечеткое управление траекторным движением;
- нечеткое управление поворотным движением;
- синхронизация поворотного и траекторного движений;
- восстановление величин технологических параметров, недоступных для прямого измерения;
- ведение журнала работ, с описанием каждой операции;
- визуализация результатов работы для машиниста.

В то же время количество входов и выходов, дискретных и аналоговых невелико.

Условия окружающей среды:

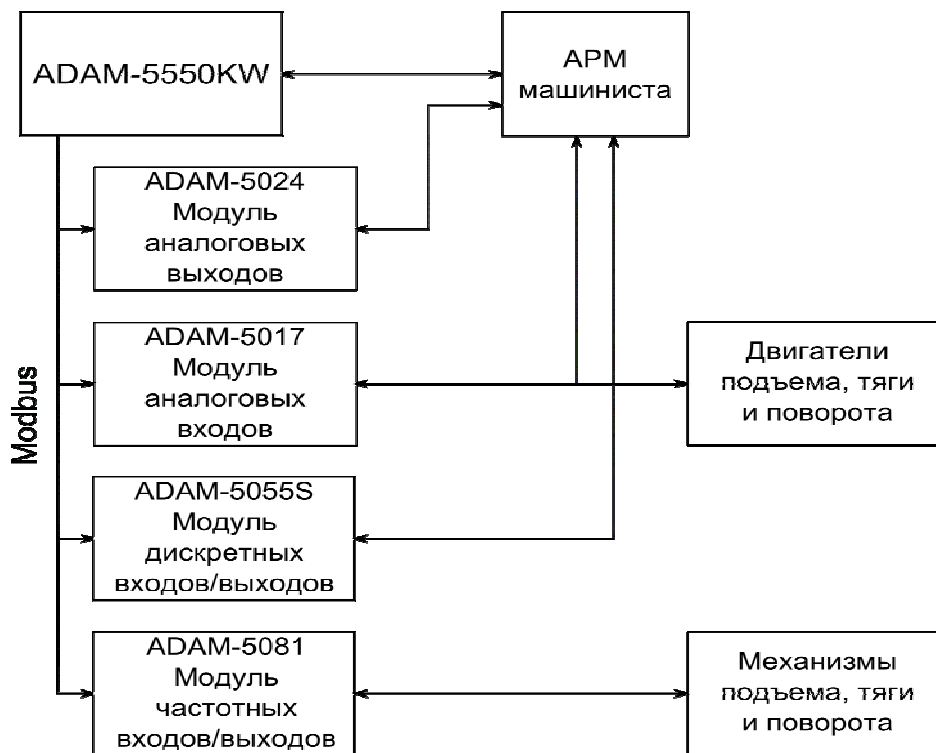


Рис. 10. Структурная схема системы

- диапазон температур в области датчиков – от -30° до $+40^{\circ}$ $^{\circ}\text{C}$, в области контроллера от $+10^{\circ}$ до $+30^{\circ}$ $^{\circ}\text{C}$;
- IP54.

В результате, в качестве платформы был выбран контроллер *ADAM-5550KW* фирмы *Advantech* [11]. Структурная схема системы представлена на рис. 10.

Разработанная система снабжена соответствующей периферией для вывода информации о текущих параметрах технологического процесса, ведении подробного журнала выполненных операций. Производится интеграция в существующую инфраструктуру предприятия, с использованием сетей *Ethernet* и *Modbus*.

В результате модельных испытаний, проведенные с использованием математической модели объекта

управления, подтвердились следующие положения:

- Подтвердилась возможность вести полноценный контроль за всеми эксплуатационными параметрами работы экскаватора, с ведением подробного журнала работы для каждого машиниста;
- как следствие постоянного слежения и контроля, повышается безопасность работ: система предупреждает аварийные ситуации – удар ковша по стреле или забою, перетяга, переподъем и растяжка ковша;
- автоматизация процесса разгрузки ковша и возвращение его на черпание позволяет сократить потери времени на транспортировку грунта и снять часть нагрузки с человека, что тоже повышает безопасность работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Певзнер Л.Д. Алгоритмический и структурный синтез автоматизированного управления шагающим экскаватором-драглайном: дис. д-ра техн. наук - М.: МГИ, 1987.
2. Розенцвайг М.А. Локальная система автоматизированного управления процессом транспортирования ковша мощного экскаватора-драглайна: дис. ... канд. техн. наук - М.: МГИ, 1988.
3. Троеглазов А.И. Автоматизация управления механизмов поворота экскаватора-драглайна: дис. ... канд. техн. наук - М.: МГИ, 1989.
4. Гулько Ф.Б., Морозов В.П., Новосельцева Ж.А., Певзнер Л.Д., Фазылов А. Синтез системы квазиоптимального управления механизмом вращения шагающего экскаватора-драглайна методом прогнозирования. Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, 1984, №1, с.59-66.
5. Залесов О.А., Певзнер Л.Д., Толпежников Л.И. Система программного автоматического управления мощными шагающими экскаваторами. В кн.: Научные основы создания высокопроизводительных комплексно-механизированных карьеров. Сб. научн. трудов МГИ - М.: МГИ, 1980, с.79-82.
6. Коваленко С.Н. Разработка микропроцессорной системы интерактивного автоматизированного управления электроприводами экскаватора-драглайна, выполняющей транспортировку ковша: дис. ... канд. техн. наук - М.: МЭИ, 1991.
7. Гриднев В.А. Тенденции развития и опыт применения мощных шагающих драглайнов за рубежом - М.: ЦНИЭИУголь, 1980.
8. Казеннова Н. В., Наумкина Л.Г., Дюков А.И. Влияние колебаний ковша на бифилярном подвесе на динамику стреловой конструкции при повороте экскаватора-драглайна II Изв. Вузов. Горный журнал, 1972, 1Ч24, с. 146 - 149.
9. Певзнер Л.Д. Алгоритмический и структурный синтез автоматизированного управления шагающим экскаватором-драглайном: дис. ... д-ра техн. наук - М.: МГИ, 1987.
10. Инструкция по эксплуатации экскаватора ЭШ 15/90А, № 1-1040. - Свердловск: УЗТМ, 1965.
11. ADAM-5550KW Series. Programmable Automation Controller. - Advantech Co., Lithuania

Коротко об авторах

Певзнер Л.Д. – профессор, доктор технических наук, зав. кафедрой АТ,
Сулейменов Т.З. – аспирант,
Югай И.С.С. – аспирант,
Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru

