УДК 007.51, 621.865.8

Ананьев Кирилл Алексеевич, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Kirill A. Ananev, docent, Ph.D. in Engineering
(KuzSTU, Kemerovo)
Ермаков Александр Николаевич, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Alexander N. Ermakov, docent, Ph.D. in Engineering
(KuzSTU, Kemerovo)
Хорешок Алексей Алексеевич, профессор, д.т.н.
Aleksei A. Khoreshok, professor, Doctor of Engineering Sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

ЭКЗОСКЕЛЕТ КАК СРЕДСТВО МЕХАНИЗАЦИИ ГОРНЫХ РАБОТ И СИСТЕМА БИОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Россия является одним из мировых лидеров по добыче угля. За 2023 год в РФ было добыто 430 млн тонн угля, из которых подземным способом чуть менее 100 млн. При этом запасы каменного угля по данным Минприроды на 2024 г. составляют более 120 млрд тонн. Для обеспечения очистных работ за 2023 г. проведено 365,7 км горных выработок, из которых более 90% при помощи проходческих комбайнов. Данная информация говорит о том, что добыча угля подземным способом еще долгое время будет иметь огромное значение в экономике России, а комбайновый способ являться основным при проходке горных выработок [1].

При этом дальнейшее развитие техники и технологий горного производства нацелено на создание «умных шахт» («Intelligent mine»), предполагающих широкое применение IT-технологий во всех сферах деятельности предприятия, включая автоматизацию производственных процессов и уменьшение персонала, работающего в тяжелых, опасных условиях. Однако окончательный уход от рабочего персонала в шахтах в ближайшее время не осуществим из-за огромного количества случайных факторов, возникающих при ведении горных работ.

Наиболее опасными в угольных шахтах являются очистные и проходческие работы. Проходческие работы к тому же являются и наиболее трудоемкими. Несмотря на наличие определенных средств механизации, проходческие работы несут повышенную физическую нагрузку на рабочих, связанную с перемещением материалов, оборудования и иных грузов. В условиях, когда тяжелый труд человека невозможно исключить,

целесообразно снизить негативное влияние на его здоровье при помощи экзоскелетов. При этом применение экзоскелетов в горной промышленности имеет определённый задел [2, 3].

В контексте выполняемых работ при помощи экзоскелетов их необходимо классифицировать как средство механизации, т. е. как горную машину, только имеющую особый вид управления.

Управление экзоскелетом.

С точки зрения управления экзоскелет принципиально отличается от традиционных средств механизации горных работ. Для горных машин в настоящее время характерны ручное, дистанционное, автоматическое и автоматизированное управление. В первом случае управляющее воздействие непосредственно формируется оператором посредством органов управления машины; при дистанционном управлении команды передаются на исполнительные механизмы с некоторого расстояния; автоматическое управление предполагает выполнение заданного алгоритма без непосредственного участия человека в формировании каждого управляющего воздействия.

Экзоскелет занимает промежуточное положение между человеком и машиной, поскольку оператор не задает управляющее воздействие посредством традиционных органов управления. Управление осуществляется непосредственно по движениям человека: экзоскелет воспринимает кинематические и силовые параметры движений оператора и в соответствии с ними формирует управляющие сигналы для исполнительных механизмов. Такой принцип управления целесообразно определить как биомеханическое управление (управление по биомеханическим параметрам движений человека).

В отличие от традиционного ручного управления, при котором оператор сначала формирует команду органами управления, а затем машина реализует ее, при биомеханическом управлении само движение оператора является источником управляющего воздействия. При этом человек сохраняет функцию формирования цели и характера движения, тогда как экзоскелет обеспечивает необходимое силовое усиление, перераспределение нагрузки и выполнение части механической работы. Таким образом, возникает замкнутая система «человек — экзоскелет — внешняя среда», в которой человек одновременно является оператором и источником управляющего воздействия.

Классификация систем управления экзоскелетом.

С учетом особенностей взаимодействия человека и экзоскелета системы управления такими устройствами могут быть классифицированы по способу формирования управляющего воздействия. В отличие от традиционных

горных машин, где команда оператором формируется посредством органов управления, в экзоскелете управляющее воздействие может формироваться непосредственно на основе физиологических и биомеханических параметров человека.



Рисунок 1 – Классификация систем управления экзоскелетом

В общем виде системы управления экзоскелетом можно разделить на следующие основные классы:

1. Ручное управление – управление посредством традиционных органов управления (кнопок, переключателей, джойстиков и т. п.);
2. Кинематическое управление – формирование управляющего воздействия на основе параметров движения оператора;
3. Силовое управление – формирование управляющего воздействия на основе усилий и моментов, возникающих при взаимодействии человека с экзоскелетом;
4. Миоэлектрическое управление – управление на основе электрической активности мышц оператора;
5. Нейроинтерфейсное управление – формирование команд на основе сигналов нервной системы;
6. Комбинированное управление – использование нескольких типов биомеханической информации одновременно.

Кинематическое управление.

Кинематическое управление основывается на регистрации положения, перемещения, скорости и ускорения отдельных звеньев тела оператора. Полученная информация используется для определения направления и характера предполагаемого движения. Например, при начале сгибания коленного сустава человека система управления регистрирует изменение его углового положения и формирует соответствующее управляющее воздействие на привод экзоскелета. Преимуществом данного способа является относительная простота регистрации параметров движения. Однако

кинематические параметры не всегда позволяют однозначно определить намерение оператора, особенно при выполнении медленных или статических операций.

Силовое управление.

Силовое управление предполагает регистрацию сил и моментов, возникающих между телом человека и элементами экзоскелета. В этом случае изменение силы взаимодействия может использоваться в качестве команды для включения, отключения или изменения режима работы привода. Такой подход особенно перспективен для выполнения операций, связанных с перемещением грузов, поскольку позволяет экзоскелету реагировать непосредственно на увеличение физической нагрузки на рабочего. Недостатком является необходимость точной настройки датчиков и алгоритмов, позволяющих отделить намеренное управляющее воздействие от случайных нагрузок, возникающих при контакте с окружающей средой.

Миоэлектрическое управление.

Миоэлектрическое управление основано на регистрации электрической активности мышц, как правило, посредством электромиографических датчиков. Изменение электрического сигнала, возникающего при сокращении мышцы, используется для определения намерения человека совершить определенное движение или развить определенное усилие. Основным преимуществом такого способа является возможность распознавания намерения оператора еще до значительного изменения положения соответствующего звена тела. Вместе с тем применение миоэлектрических датчиков в условиях горных работ связано с рядом проблем: загрязнением поверхности электродов, воздействием влаги, вибрации, помех и необходимостью индивидуальной настройки системы.

Нейроинтерфейсное управление.

Нейроинтерфейсное управление предполагает использование сигналов центральной или периферической нервной системы для определения намерения оператора. В настоящее время данный способ имеет преимущественно исследовательское значение для промышленных экзоскелетов, поскольку требует сложных средств регистрации и обработки биологических сигналов. Для эксплуатации в тяжелых условиях подземных горных работ его практическое применение в ближайшей перспективе представляется ограниченным.

Комбинированное управление.

Наиболее перспективным для горных экзоскелетов является комбинированное биомеханическое управление, при котором одновременно используются несколько групп параметров: кинематические, силовые и, при необходимости, миоэлектрические. В таком случае информация от различных

датчиков объединяется в единой системе распознавания намерения оператора. Это позволяет повысить устойчивость управления и снизить вероятность ошибочного срабатывания исполнительных механизмов.

Особое значение комбинированный подход приобретает при выполнении проходческих работ. Рабочий может одновременно изменять положение тела, прикладывать значительные усилия и взаимодействовать с перемещаемым объектом. Поэтому использование только одного параметра, например угла сгибания конечности, может оказаться недостаточным для однозначного определения требуемого действия экзоскелета. Совместная обработка кинематической и силовой информации позволяет более точно определить намерение оператора и обеспечить требуемый уровень силового усиления.

Выводы.

Таким образом, экзоскелет является самостоятельным классом горной машины. Для экзоскелетов, предназначенных для применения в горных работах, целесообразно выделить биомеханическое управление в качестве самостоятельного класса человеко-машинного управления, включающего кинематический, силовой, миоэлектрический и комбинированный способы. Комбинированный способ управления, основанный на кинематическом и силовом, является наиболее достижимым в настоящее время.

Список литературы

1. Мешков Г. Б., Петренко И. Е., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. 2024. № 3. С. 18–29.
2. Liang Y. et al. Research on intelligent monitoring and protection equipment of vital signs of underground personnel in coal mines //Sensors. – 2024. – Т. 25. – №. 1. – С. 63.
3. Akinwande F. et al. Perspectives of mining personnel on adopting occupational exoskeletons: Comparisons between a developed and a developing country //Mining, metallurgy & exploration. – 2025. – Т. 42. – №. 2. – С. 523-536.