

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА ДИНАМИЧЕСКОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ В ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРАХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Жуков И.А., Верховский М.И., Максимов И.В.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: горные машины, направленное бурение, бурильные машины, роботизированные комплексы, планетарный редуктор, динамическая уравновешенность, принцип Ассура, многосателлитный планетарный механизм.

Аннотация. В статье представлен анализ технических решений в области направленного бурения и роботизированных проходческих комплексов с акцентом на развитие конструкций планетарных редукторов. Отмечено, что эффективность буровых комплексов во многом определяется характеристиками редукторов, обеспечивающих передачу крутящего момента к исполнительным органам. Проведён анализ патентных разработок, в которых реализованы уравновешенные многосателлитные планетарные механизмы, основанные на принципе Ассура. Установлено, что введение дополнительных подвижных звеньев позволяет устранить статическую неопределённость, обеспечить равномерное распределение нагрузок между сателлитами и повысить надёжность работы редукторов. Особое внимание уделено патентам РФ №232948 и №236067, разработанным авторами, в которых предложены конструкции пяти- и шестисателлитных редукторов с полной динамической уравновешенностью. Полученные результаты подтверждают перспективность использования данных механизмов в составе роботизированных буровых и проходческих комплексов нового поколения. Реализация уравновешенных планетарных передач способствует увеличению ресурса, устойчивости и энергоэффективности приводов, а также открывает возможности для создания автономных систем направленного бурения и поисково-спасательных роботов.

APPLICATION OF THE DYNAMIC BALANCING PRINCIPLE IN PLANETARY GEARBOXES OF ROBOTIC DRILLING RIGS

Zhukov I.A., Verkhovskiy M.I., Maksimov I.V.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: mining machines, directional drilling, drilling machines, robotic complexes, planetary gearbox, dynamic balance, Assur principle, multi-satellite planetary mechanism.

Abstract. The article presents an analysis of technical solutions in the field of directional drilling and robotic tunneling systems, with a focus on the development of planetary gearbox designs. It is noted that the efficiency of drilling systems is largely determined by the performance of the gearboxes that transmit torque to the actuators. A review of patented developments is carried out, in which balanced multi-planet planetary mechanisms based on the Assur principle are implemented. It is established that the introduction of additional movable links makes it possible to eliminate static indeterminacy, ensure uniform load distribution among the planet gears, and improve the reliability of gearbox operation. Special attention is given to Russian patents No. 232948 and No. 236067, developed by the authors, which propose the designs of five- and six-planet gearboxes with complete dynamic balancing. The obtained results confirm the potential of these mechanisms for use in next-generation robotic drilling and tunneling systems. The implementation of balanced planetary transmissions contributes to increased service life, stability, and energy efficiency of drives, as well as enables the creation of autonomous directional drilling systems and search-and-rescue robots.

Введение

Современное развитие горной промышленности и подземного строительства характеризуется активным внедрением технологий направленного бурения и роботизированных систем, обеспечивающих повышение точности, производительности и безопасности проходческих работ. В условиях усложняющихся горно-геологических и эксплуатационных факторов особое значение приобретают компактные, надёжные и энергоэффективные исполнительные органы буровых комплексов, способные стабильно работать в ограниченном пространстве и при высоких нагрузках [1-3].

В мировой и отечественной практике разработано множество технических решений, направленных на совершенствование буровых систем [4-6]. Особое место среди них занимают турбинные и винтовые забойные двигатели, роторно-управляемые системы, а также роботизированные комплексы для проходки и бурения, которые объединяют в себе элементы механики, автоматики и интеллектуального управления [7-9]. Однако эффективность этих систем во многом определяется конструкцией редукторов, обеспечивающих передачу крутящего момента к исполнительным органам [10-12].

Планетарные редукторы, применяемые в приводах буровых машин (например, в установке «Стрела-77»), отличаются высокой компактностью, соосностью входного и выходного валов и требованием равномерного распределения нагрузки между несколькими сателлитами. Вместе с тем, традиционные многосателлитные механизмы обладают избыточностью кинематических связей, что приводит к неравномерному распределению нагрузки по сателлитам, локальным перегрузкам и повышенному износу элементов зацепления. Эти проблемы ограничивают долговечность и надёжность оборудования, особенно в роботизированных и автоматизированных комплексах, где высокая точность и динамическая устойчивость являются критическими параметрами [13-15].

Одним из перспективных путей решения указанных проблем является использование динамически уравновешенных планетарных механизмов, основанных на принципе введения дополнительных подвижных звеньев, формирующих группы нулевой подвижности по принципу Л.В. Ассура. Такой подход позволяет устранить статическую неопределённость и обеспечить равномерную передачу крутящего момента всеми сателлитами, что повышает устойчивость, снижает вибрации и увеличивает ресурс механизма.

Исследования в этой области активно развиваются отечественными конструкторами и инженерами. Наиболее существенные результаты получены в работах д.т.н., профессора Л.Т. Дворникова, а также в ряде авторских разработок последних лет, в том числе представленных в патентах РФ №232948 и №236067, в которых реализованы пяти- и шестисателлитные редукторы с полной динамической уравновешенностью. Эти решения демонстрируют возможность реализации принципа Л.В. Ассура и подтверждают перспективность данного подхода для построения многоступенчатых приводов в составе роботизированных буровых комплексов.

Целью настоящей работы является анализ и обобщение технических решений в области направленного бурения и роботизированных систем, а также исследование принципов построения уравновешенных многосателлитных планетарных механизмов, обеспечивающих кинематическую определённость и равномерное распределение нагрузок по сателлитам.

Материалы и методы исследований

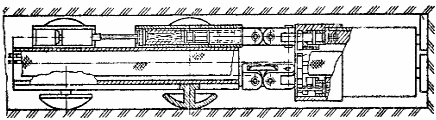
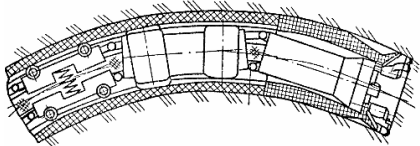
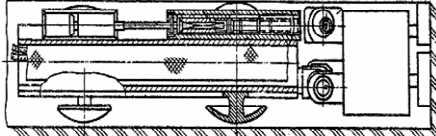
Методологической базой исследования выступил анализ и обобщение патентной информации, сравнительный анализ технических решений и обзор существующих научных исследований по указанной теме. В частности, анализ технологий направленного бурения выявил ряд перспективных разработок, которые могут быть адаптированы для создания роботизированных комплексов для подземных горных выработок [16-18]. Обзор охватывает патенты и авторские свидетельства, продемонстрировавшие потенциал в разработке таких систем.

Развитие технологии направленного бурения датируется 1980-ми годами в СССР, когда уже велись разработки дистанционно управляемых буровых установок, способных формировать точные траектории с минимальным воздействием на породу, примеры таких устройств представлены в таблице 1. Рассматриваемые решения отражают принципы автоматизированного и управляемого бурения, применимые в строительстве, добыче полезных ископаемых и бестраншейных работах, что делает их перспективной базой для современных горнопроходческих роботов.

Первым в таблице 1 представлено устройство (а.с. №1561578) для бурения криволинейных скважин малого диаметра. Конструкция состоит из передней и задней секций,

соединённых управляемым отклонителем в виде двойных карданных шарниров. Предусмотрен механизм блокировки шарниров с использованием электромагнита, что обеспечивает надёжную фиксацию при проходке прямых участков и эффективную управляемость на криволинейных траекториях. Внедрение такой схемы значительно повышает точность наведения, надёжность работы и ремонтпригодность бурового комплекса.

Табл. 1. Выбранные патенты

№	Номер авторского свидетельства, название, даты приоритета и опубликования	Авторы	Схема
1	№1561578, Устройство для образования скважин, 06.07.1988, 10.10.1995	Л.Т. Дворников, И.Д. Шапошников, П.Г. Гришин, Г.И. Хромых	
2	№1549153, Проходческий робот и транспортирующий механизм проходческого робота, 06.07.1988, 10.10.1995	Л.Т. Дворников, И.Д. Шапошников, В.А. Жуков, Е.С. Замулин, П.Г. Гришин, В.В. Ершов, А.Я. Пономарев, В.А. Туров, Г.И. Хромых	
3	№1637394, Проходческий робот, 22.08.1989, 10.10.1995	Л.Т. Дворников, И.Д. Шапошников, П.Г. Гришин	

Следующие два технических решения, приведенные в таблице 1, имеют одинаковую дату опубликования, но с разной датой приоритета, что свидетельствует о целенаправленной работе авторского коллектива и актуальности решаемой научно-практической задачи.

Под №2 в таблице 1 показан проходческий робот (а.с. №1549153), предназначенный для создания горизонтальных и слабонаклонных обсаженных скважин малого сечения. Робот включает буровую головку с рабочим органом, разделённую на переднюю и заднюю секции, скользящую гибкую опалубку (формирующую обсадную оболочку прямо в процессе бурения), податчик, а также транспортирующий механизм со шнеком и гибким шламопроводом. В конструкции применены дополнительные приводы вращения для улучшения подачи и удаления разрушенной породы. Особенностью устройства является формирование прочной обсадной оболочки непосредственно в процессе бурения за счёт применения компонентов закрепляющего материала. Такое техническое решение расширяет области применения робота и обеспечивает повышенные надёжность и ремонтпригодность в условиях подземных выработок.

Авторское свидетельство №1637394 (табл. 1, №3) описывает проходческий робот для создания криволинейных горизонтальных скважин малого диаметра. Конструкция включает переднюю и заднюю секции, соединённые сферическими шарнирными узлами. Управление изменением направления бурения осуществлено при помощи мотор-редукторов, торсионного вала и дифференциально-винтового механизма. Мотор-редуктор через торсион приводит во вращение винтовой дифференциальный механизм, линейно перемещающий входные звенья шарниров. Сферические шарниры таким образом получают необходимую подвижность и точность при изменении направления бурения, позволяя прокладывать сложные траектории скважин с минимальным радиусом кривизны. Это решение обеспечивает плавное управление направлением и стабильность движения робота на поворотах траектории.

Во всех рассмотренных устройствах широко применяются редукторы в составе приводов. Например, авторское свидетельство №1549153 включает планетарный редуктор в составе мотор-редуктора тягового шасси, а также мотор-редуктор в буровой головке для вращения породоразрушающего инструмента. Аналогично, в авторском свидетельстве №1637394 мотор-редуктор соединён с торсионным валом, таким образом передавая усилие на дифференциально-винтовой механизм, что позволяет точно корректировать траекторию движения. В устройстве №1561578 мотор-редукторы через карданные шарниры обеспечивают надёжное управление и требуемую жёсткость при проходке скважины. Применение редукторов во всех узлах привода повышает точность наведения, надёжность работы механизмов и удобство обслуживания роботизированных проходческих комплексов.

В качестве примера использования планетарных редукторов в уже существующих горных машинах, рассмотрим горную машину «Стрела-77», предназначенную для проходки восстающих (наклонных 40-90°) выработок круглого сечения диаметром до 1 м и длиной до 100 м в породах крепостью до $f=10$. Основным рабочим узлом является буровой снаряд-вращатель – исполнительный орган машины. Привод вращателя выполнен в виде электродвигателя мощностью 35 кВт, который через плоский планетарный редуктор передаёт крутящий момент на буровой инструмент.

Буровой инструмент представляет собой водило с тремя шарошечными долотами по периферии (на каждом долоте по три сменные шарошки) и одним центральным долотом для проходки пилотной скважины (рис. 1). Применение планетарного редуктора в головной части буровой машины обеспечивает значительное увеличение выходного крутящего момента, необходимого для разрушения твёрдой породы, при сохранении компактных размеров привода.

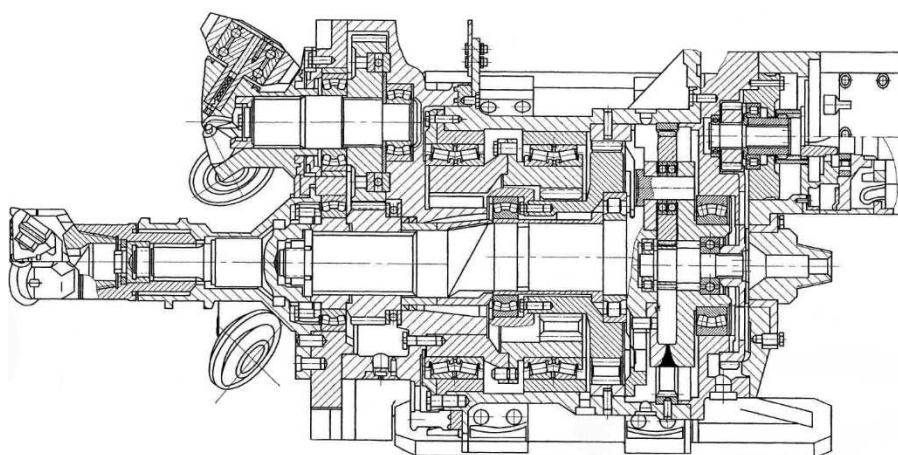


Рис. 1. Снаряд-вращатель горной машины «Стрела-77»

Использование планетарной зубчатой передачи (редуктора) даёт «Стреле-77» ряд важных преимуществ. Планетарные редукторы отличаются высокой компактностью и меньшей массой по сравнению с обычными многоступенчатыми передачами, поскольку нагрузка в них должна распределяться между несколькими сателлитами (планетарными шестернями) – благодаря этому напряжения на зубьях каждого колеса могут быть существенно снижены.

Однако применение обычных планетарных механизмов, особенно многосателлитных, сопряжено с рядом конструктивных проблем, среди которых выделяется неравномерность распределения нагрузки между сателлитами. В многосателлитных планетарных механизмах вследствие избыточности связей часто возникает неравномерность нагрузки, что приводит к локальному перегрузу отдельных сателлитов, ускоренному износу их элементов и снижению общей надёжности механизма. Поэтому в современных высоконагруженных узлах возникает необходимость применения динамически уравновешенных планетарных редукторов – специальных конструкций с дополнительными подвижными звеньями, обеспечивающими выравнивание нагрузки между всеми сателлитами и равномерную передачу крутящего

момента. Это позволяет реализовать потенциал планетарной передачи в полной мере: все сателлиты участвуют в работе одновременно, снижается нагрузка на каждый зуб и возрастает ресурс и надёжность узла.

Исследования профессора Л.Т. Дворникова показывают, что введение групп звеньев нулевой подвижности (по принципу Л.В. Ассура) позволяет обеспечить одновременную и равномерную передачу крутящего момента всеми сателлитами [19-20]. Тем самым устраняется статическая неопределённость и отпадает необходимость искусственных зазоров в зацеплениях между сателлитами и центральным колесом. В результате исчезает перекопс нагрузки (когда один сателлит фактически несёт всю мощность), а требования к точности изготовления и сборки становятся мягче, поскольку пропадает потребность в тонкой подгонке люфтов.

В таблицу 2 сведены данные по современным разработкам уравновешенных многосателлитных планетарных передач.

В таблице 2 первым представлен патент РФ № 145286, в котором предложен уравновешенный двухсателлитный планетарный механизм. В нём реализована передача мощности одновременно через оба сателлита на всём протяжении работы. Конструктивно это достигнуто за счёт шарнирного соединения двух сателлитов с трёхпарным промежуточным звеном в форме кольца, которое, в свою очередь, через шарнир связано с водилом, выполненным в виде стержня. Такая симметричная компоновка устранила проблему статической неопределённости: ранее в двухсателлитных системах подвижность была равна нулю, и для проворачивания механизма приходилось выводить один сателлит из зацепления с помощью зазоров. В новом же механизме оба сателлита участвуют в передаче движения без каких-либо люфтов, равномерно разделяя нагрузку между собой, что повысило его стабильность и надёжность.

Под №2 в таблице 2 указан патент РФ № 186099, описывающий уравновешенный трёхсателлитный планетарный механизм с уникальной схемой рычажных связей. В данной конструкции водило выполнено в виде стержня (длиной, равной двум межосевым расстояниям), а три сателлита соединены с водилом через два трёхпарных шатуна, выполненных в форме полуколец радиусом, равным межосевому расстоянию механизма. Эти полукольцевые рычаги расположены в одной плоскости и шарнирно соединены между собой, причём сателлиты установлены под равными углами (120°) относительно центральной оси. Благодаря такой симметричной конфигурации достигается полная динамическая уравновешенность – все три сателлита передают вращающий момент равномерно, без перекопсов и вибраций. Нагрузка распределяется поровну, что уменьшает износ каждого сателлита и увеличивает срок службы редуктора.

В патенте РФ № 229267 (табл. 2, №3) предложен усовершенствованный вариант четырёхсателлитного планетарного механизма, отличающийся полной динамической уравновешенностью. В нём применены три трёхпарных шатуна, выполненные в виде симметричных элементов относительно центральной оси вращения механизма. В частности, два из этих рычагов имеют форму полуколец с радиусом, равным межосевому расстоянию, и установлены симметрично относительно центральной оси, а третий рычаг выполнен в форме квадрата, диагональ которого равна двум межосевым расстояниям, с центром на оси механизма. Сами четыре сателлита расположены под углами 90° друг к другу, что вместе с указанной рычажной системой устраняет возникновение инерционных сил. Все сателлиты одновременно передают движение выходному звену одинаково, обеспечивая равномерное распределение нагрузки и существенно повышая ресурс и надёжность всего редуктора.

Патент РФ № 232948 (табл. 2, №4) распространил принцип динамической балансировки на пятисателлитный планетарный механизм. В данной модели все пять сателлитов одновременно участвуют в передаче вращения от центрального солнечного колеса к водилу, причём каждый из них нагружен одинаково. Такая одновременная работа сразу пяти сателлитов позволяет значительно снизить их суммарный износ и тем самым увеличить срок службы механизма. Для реализации этого были добавлены специальные промежуточные

звенья-рычаги, благодаря которым конструкция остаётся подвижной даже при увеличенном числе спутников. Механизм сохраняет кинематическую определённости движения и динамическую сбалансированность, несмотря на усложнение конструкции, что подтверждает работоспособность выбранного подхода для большого числа спутников.

Табл. 2. Выбранные патенты

№	Кол-во спутников	Схема механизма	Выходные данные патента	Группа с нулевой подвижностью
1	2		№145286. Уравновешенный двухспутнический планетарный механизм / Дворников Л.Т., Андреева Я.А., Жуков И.А. – 20.09.2014	
2	3		№186099. Уравновешенный трехспутнический планетарный механизм / Хайдукова Я.А. – 29.12.2018	
3	4		№229267. Уравновешенный четырехспутнический планетарный механизм / Жуков И.А., Филипенко И.А., Максимов И.В. – 30.09.2024	
4	5		№232948. Уравновешенный пятиспутнический планетарный механизм / Жуков И.А., Филипенко И.А., Максимов И.В., Верховский М.И. – 28.03.2025	
5	6		№236067. Уравновешенный шестиспутнический планетарный механизм / Жуков И.А., Филипенко И.А., Максимов И.В., Верховский М.И. – 24.07.2025	

Примечания: 1) числами на схемах обозначены номера подвижных звеньев; 2) p_4 и p_5 – кинематические пары соответственно четвертого и пятого классов.

В патенте РФ № 236067 (табл. 2, №5) представлен уравновешенный шестисателлитный планетарный механизм, в котором также достигнуто полное динамическое уравновешивание. Конструкция этого редуктора характеризуется симметричным расположением шести сателлитов и пяти промежуточных рычажных звеньев, образующих правильную шестигранную (гексагональную) конфигурацию вокруг центральной оси. Водило выполнено в виде стержня, диаметрально пересекающего механизм, а все трёхпарные шатуны рассчитаны таким образом, что их массы распределены относительно оси строго равномерно. Такой подход устранил проблемы, наблюдавшиеся в прежних опытных конструкциях с шестью сателлитами, где несимметричное расположение звеньев приводило к дисбалансу инерционных сил, перегрузкам подшипников и вибрациям. В новом решении все шесть сателлитов передают нагрузку синхронно, что повышает долговечность и надёжность работы редуктора.

Результаты исследования

Анализ указанных разработок показывает, что во всех патентах реализован единый базовый принцип создания уравновешенных многосателлитных передач. Он заключается во введении в структуру механизма дополнительных подвижных звеньев (рычагов) в количестве, равном числу сателлитов. Тем самым достигается кинематическая определённость системы при любом числе сателлитов: каждое дополнительное звено компенсирует избыточную связь, и все сателлиты движутся согласованно. В результате мощность передаётся через все сателлиты одновременно, отсутствуют «лишние» статически неопределимые связи, и нет необходимости искусственно выводить какой-либо сателлит из работы путём создания зазоров в зубчатых зацеплениях.

Кроме того, во всех рассмотренных механизмах элементы распределяются максимально симметрично относительно оси – будь то установка сателлитов под равными углами или выполнение рычажных звеньев особой формы (полукольца, квадрат, правильный многоугольник) – что обеспечивает динамическую балансировку сил инерции. Таким образом, можно вывести общую «формулу» создания таких редукторов:

1. Симметрия: сателлиты устанавливаются равномерно по окружности; все дополнительные звенья (рычаги, полукольца, рамки) выполняются геометрически симметричными относительно центральной оси.

2. Один компенсирующий рычаг на сателлит (или эквивалентная группа): вводятся трёхпарные звенья, устраняющие избыточные связи и формирующие группы нулевой подвижности по принципу Л.В. Ассура.

3. Кинематическая определённость: структура настраивается так, чтобы общая подвижность системы была $W=1$ при любом числе сателлитов, без необходимости технологических зазоров для обеспечения подвижности.

Применение планетарных механизмов в качестве исполнительного органа робота-бурильщика позволяет при установке режущего инструмента на сателлиты с эксцентриситетом относительно их геометрической оси (рис. 2), осуществлять разрушение породы по всей поверхности забоя скважины.

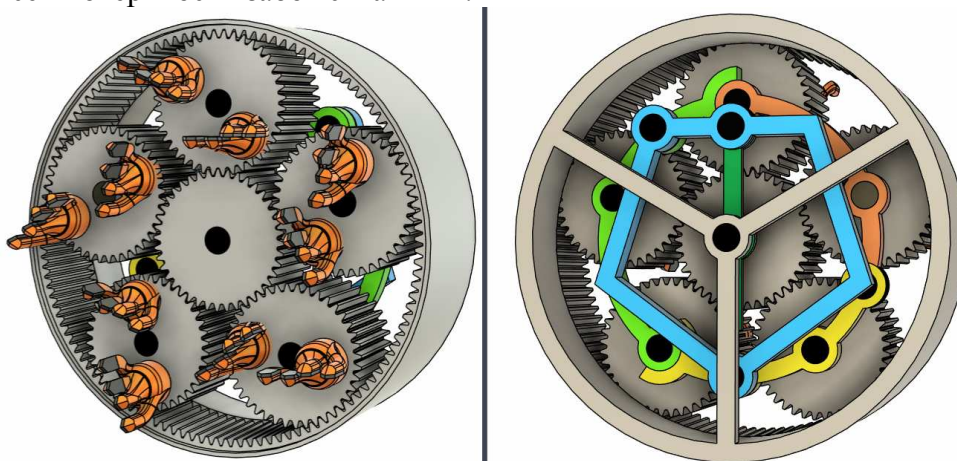


Рис. 2. Схема установки резцов на сателлиты

Заключение

В результате проведённого исследования выполнен комплексный анализ существующих технических решений в области направленного бурения и роботизированных проходческих комплексов. Особое внимание уделено планетарным редукторам, как ключевому звену в приводах исполнительных органов. Установлено, что повышение эффективности и надёжности таких систем тесно связано с устранением статической неопределённости и неравномерности распределения нагрузок между сателлитами.

Основные выводы

1. Установлено, что основным направлением повышения эксплуатационных характеристик планетарных редукторов является реализация принципа динамического уравнивания на основе добавления к ведущему колесу групп звеньев нулевой подвижности согласно принципу Л.В. Ассура.

2. Выявлены общие закономерности построения уравновешенных многосателлитных механизмов, обеспечивающих кинематическую определённость при любом числе сателлитов (от двух до шести и более).

3. Разработанные авторами уравновешенные пяти- и шестисателлитные планетарные редукторы (патенты РФ №232948 и №236067) подтверждают эффективность предложенного подхода, обеспечивая равномерное распределение нагрузок и полную динамическую уравновешенность.

4. Применение таких редукторов в роботизированных проходческих и буровых установках позволяет снизить вибрации, увеличить ресурс узлов и повысить общую надёжность и устойчивость системы.

5. Технологическая интеграция динамически уравновешенных планетарных передач с современными приводами и управляющими системами создаёт основу для формирования роботизированных комплексов нового поколения, предназначенных для автономной работы в подземных условиях.

Результаты анализа показывают, что применение уравновешенных планетарных механизмов в составе роботизированных бурильных и проходческих комплексов открывает новые возможности для повышения эффективности и надёжности оборудования, особенно при работе в сложных горно-геологических условиях и ограниченных подземных пространствах.

Список литературы

1. Данилов Б.Б., Смоляницкий Б.Н., Чешин Д.О. Перспективы развития технологий направленного бурения скважин в прочных горных породах // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 2, №3. – С. 49-53.
2. Ананьев К.А., Ермаков А.Н., Сидоров М.С., Варнавский К.А. Обзор исполнительных органов буровых установок // Техника и технология горного дела. – 2022. – №4(19). – С. 35-61. – doi.org/10.26730/2618-7434-2022-4-35-61.
3. Никишин В.В., Блинов П.А., Гореликов В.Г., Силичев Н.М., Ли В.Ю., Степацкий А.А., Кузнецова Д.С. Обзор роторно-управляемых и наддолотных систем для бурения горизонтальных и наклонно-направленных скважин // Деловой журнал «Neftegaz.RU». – 2024. – Т. 150, №6. – С. 58-61.
4. Ma J., Li X., Yao Q., Xia Z., Xu Q., Shan C., Sidorenko A., Aparin A. Numerical simulation on mechanisms of dense drilling for weakening roofs and its application in roof control // Journal of Central South University. 2023, vol. 30, pp. 1865-1886. doi.org/10.1007/s11771-023-5345-1.
5. Kazanin O., Sidorenko A., Drebenstedt C. Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia // Acta Montanistica Slovaca. 2020, vol. 26(1), pp. 60-69. doi.org/10.46544/AMS.v26i1.05.
6. Габов В.В., Задков Д.А., Прялухин А.Ф., Садовский М.В., Молчанов В.В. Совершенствование конструкции шнекового исполнительного органа очистного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №11-1. – С. 51-71. – doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_51.
7. Zuev B.Yu., Zubov V.P., Fedorov A.S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals // Eurasian mining. 2019, no. 1. pp. 8-12. doi.org/10.17580/em.2019.01.02.
8. Ишейский В.А., Мартынушкин Е.А., Васильев А.С., Смирнов С.А. Особенности сбора данных в процессе бурения взрывных скважин для формирования геоструктурных блочных моделей // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13, №4(50). – С. 608-619. – DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619.

9. Genske D.D. Subsidence. In: Engineering Geology // Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Springer, Berlin, Heidelberg. 2024, pp. 303-334. doi.org/10.1007/978-3-662-68762-8_11.
10. Park S., Choi Y. Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review // Minerals. 2020, vol. 10, p. 663. doi.org/10.3390/min10080663.
11. Shahmoradi J., Talebi E., Roghanchi P., Hassanalian M. A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry // Drones. 2020, vol. 4, p. 34. doi.org/10.3390/drones4030034.
12. Imam M., Bařna K., Tabii Y. The Future of Mine Safety: A Comprehensive Review of Anti-Collision Systems Based on Computer Vision in Underground Mines // Sensors. 2023, vol. 23, p. 4294. doi.org/10.3390/s23094294.
13. Yoshida H., Yamazaki T., Nakajima M., Tanaka M. Excavation by snake robots with fins and a drill // Advanced Robotics. 2023, vol. 37(14), pp. 942-958. doi.org/10.1080/01691864.2023.2223261.
14. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020, vol. 37, pp. 1385-1399. doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1.
15. Литвиненко В.С., Двойников М.В. Методика определения параметров режима бурения наклонно прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 105-112. – doi.org/10.31897/PMI.2020.1.105.
16. Мендебаев Т.Н., Исмаилов Х.К., Изаков Б.К., Смашов Н.Ж. Конструктивные особенности и технологические возможности забойной компоновки для бурения скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №12. – С. 114-124. – doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-114-124.
17. Юнгмейстер Д.А., Уразбахтин Р.Ю., Нгуен К.Л., Тимофеев М.И. Комплекс для создания хранилищ особо опасных отходов: обоснование конструкции и параметров // Обогащение руд. – 2023. – №6. – С. 47-51. – doi.org/10.17580/or.2023.06.08.
18. Двойников М.В., Сидоркин Д.И., Юртаев С.Л., Грохотов Е.И., Ульянов Д.С. Бурение глубоких и сверхглубоких скважин с целью поиска и разведки новых месторождений полезных ископаемых // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 945-955. – doi.org/10.31897/PMI.2022.55.
19. Dvornikov L.T., Zhukov I.A. Fundamentals of a Unified Theory of Planetary Gears // Russian Engineering Research. 2022, vol. 42, no. 6, pp. 541-547. doi.org/10.3103/S1068798X22060090.
20. Гудимова Л.Н., Серебряков И.А. К вопросу о распределении нагрузки в многосателлитных планетарных редукторах // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 10(2). – С. 243-248. – doi.org/10.17513/snt.39376.

References

1. Danilov B.B., Smolyanitskiy B.N., Cheschin D.O. Prospects for the development of technologies for directional drilling of wells in durable rocks // Interexpo Geo-Siberia. 2015, vol. 2, no. 3, pp. 49-53.
2. Ananyev K.A., Ermakov A.N., Sidorov M.S., Varnavsky K.A. Review of the executive bodies of drilling rigs // Mining engineering and technology. 2022, no. 4(19), pp. 35-61. doi.org/10.26730/2618-7434-2022-4-35-61.
3. Nikishin V.V., Blinov P.A., Gorelikov V.G., Silichev N.M., Li V.Yu., Stepatsky A.A., Kuznetsova D.S. Overview of rotary-controlled and above-ground systems for drilling horizontal and directional wells // Business Journal "Neftegaz.RU". 2024, vol. 150, no. 6, pp. 58-61.
4. Ma J., Li X., Yao Q., Xia Z., Xu Q., Shan C., Sidorenko A., Aparin A. Numerical simulation on mechanisms of dense drilling for weakening roofs and its application in roof control // Journal of Central South University. 2023, vol. 30, pp. 1865-1886. doi.org/10.1007/s11771-023-5345-1.
5. Kazanin O., Sidorenko A., Drebenstedt C. Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia // Acta Montanistica Slovaca. 2020, vol. 26(1), pp. 60-69. doi.org/10.46544/AMS.v26i1.05.
6. Gabov V.V., Zadkov D.A., Pryalukhin A.F., Sadovsky M.V., Molchanov V.V. Improving the design of the screw executive body of a combine harvester // Mining information and analytical bulletin. 2023, no. 11-1, pp. 51-71. doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_51.
7. Zuev B.Yu., Zubov V.P., Fedorov A.S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals // Eurasian mining. 2019, no. 1, pp. 8-12. doi.org/10.17580/em.2019.01.02.
8. Isheiskiy V.A., Martynushkin E.A., Vasiliev A.S., Smirnov S.A. Data collection features of during the blast wells drilling for the formation of geostructural block models // Sustainable Development of Mountain Territories. 2021, vol. 13, no. 4(50), pp. 608-619. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619.
9. Genske D.D. Subsidence. In: Engineering Geology // Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Springer, Berlin, Heidelberg. 2024, pp. 303-334. doi.org/10.1007/978-3-662-68762-8_11.
10. Park S., Choi Y. Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review // Minerals. 2020, vol. 10, p. 663. doi.org/10.3390/min10080663.
11. Shahmoradi J., Talebi E., Roghanchi P., Hassanalian M. A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry // Drones. 2020, vol. 4, p. 34. doi.org/10.3390/drones4030034.
12. Imam M., Bařna K., Tabii Y. The Future of Mine Safety: A Comprehensive Review of Anti-Collision Systems Based on Computer Vision in Underground Mines // Sensors. 2023, vol. 23, p. 4294. doi.org/10.3390/s23094294.

13. Yoshida H., Yamazaki T., Nakajima M., Tanaka M. Excavation by snake robots with fins and a drill // *Advanced Robotics*. 2023, vol. 37(14), pp. 942-958. doi.org/10.1080/01691864.2023.2223261.
14. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 37, pp. 1385-1399. doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1.
15. Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V. Methodology for determining the parameters of the drilling mode of obliquely rectilinear sections of a well with screw downhole engines // *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 105-112. doi.org/10.31897/PMI.2020.1.105.
16. Mendebaev T.N., Ismailov Kh.K., Izakov B.K., Smashov N.Zh. Design features and technological capabilities of the downhole layout for drilling wells // *Mining information and analytical bulletin*. 2020, no. 12, pp. 114-124. doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-114-124.
17. Yungmeister D.A., Urazbakhtin R.Yu., Nguyen K.L., Timofeev M.I. Complex for creating especially hazardous waste storage facilities: justification of design and parameters // *Ore processing*. 2023, no. 6, pp. 47-51. doi.org/10.17580/or.2023.06.08.
18. Dvoynikov M.V., Sidorkin D.I., Yurtaev S.L., Grokhotov E.I., Ulyanov D.S. Drilling of deep and ultra-deep wells for the purpose of prospecting and exploration of new mineral deposits // *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 258, pp. 945-955. doi.org/10.31897/PMI.2022.55.
19. Dvornikov L.T., Zhukov I.A. Fundamentals of a Unified Theory of Planetary Gears // *Russian Engineering Research*. 2022, vol. 42, no. 6, pp. 541-547. doi.org/10.3103/S1068798X22060090.
20. Gudimova L.N., Serebryakov I.A. On the issue of load distribution in multi-planet planetary gearboxes // *Modern High Technologies*. 2022, no. 10(2), pp. 243-248. doi.org/10.17513/snt.39376.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Жуков Иван Алексеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Машиностроения	Zhukov Ivan Alekseevich – doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of Department of Mechanical Engineering
Верховский Михаил Игоревич – аспирант	Mikhail Igorevich Verkhovsky – postgraduate student
Максимов Иван Владимирович – студент	Maksimov Ivan Vladimirovich – student
s245064@stud.spmi.ru	

Получена 09.10.2025