

УДК 534.013.4

**ТУРУКТУУ МАГНИТТИК МАШТАШ
КЫЙМЫЛДАТКЫЧТАРДЫ КОШ БУРГУЛОО МАМЫСЫ
БАР ТЕСТИН ПАЙДАЛАНУУНУН НЕГИЗИ.**

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ
СТАНКА С ДВОЙНОЙ БУРОВОЙ КОЛОННОЙ**

**JUSTIFICATION OF THE USE OF SYNCHRONOUS MOTORS
WITH PERMANENT MAGNETS FOR A MACHINE WITH
DOUBLE DRILL STRING**

А.В. Анохин, С.Ф. Мурашова

A.V. Anokhin, S.F. Murashova

Макала бургулоочу куралда жүктөө өзгөрүүсүнө көз карандысыз айлануу жыштыгын кеңири диапазонунда башкаруусун абсолюттук катаал механикалык мүнөздөмөсүн камсыз кылууга мүмкүндүк берүүчү кош бургулоо мамылары бар тестин турактуу магниттер менен жабдууланган машташ кыймылдаткычтарды (ТММК) колдонуунун негиздөөсүнө арналган. ТММК өзгөчө адистештирилген бургулоо жабдуулар үчүн, төмөн жана орто кубаттуулуктагы кыймыл келтиргичтер үчүн абдан келечектүү электр машина болуп саналат. Бургулоо каражаты катары кош бургулоо мамы кабыл алынат, мында тышкы мамыга салыштырмалуу муунак жаздыктуу таянычтарга орнотулган ички бургулоо мамы аркылуу бардык жүк казма бетке өткөрүлөт. Мурунку изилдөөлөрдүн жүрүшүндө, ички мамынын айлантуу кыймыл келтиргичиндеги жүктөр куянын тереңдигине жараша иш жүзүндө өзгөрбөгөнү аныкталды, ал жүктөр аспап тоо тек менен өз ара аракеттенүү мүнөзүнө эле көз каранды экени аныкталган.

Статья посвящена обоснованию применения синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) для станка с двойной буровой колонной, позволяющих обеспечить абсолютно жёсткую механическую характеристику в широком диапазоне регулирования частоты вращения независимо от изменяющейся нагрузки на буровом инструменте. СДПМ является весьма перспективной электрической машиной для приводов малой и средней мощности, особенно для специализированного бурового оборудования. В качестве средства бурения принята двойная буровая колонна, в которой вся нагрузка на забой передаётся по внутренней буровой колонне, установленной в подшипниковых опорах относительно наружной трубы. В процессе проведённых ранее исследований было установле-

но, что нагрузки на привод вращения внутренней колонны практически не изменялись с глубиной скважины, а зависели только от характера взаимодействия инструмента с породой.

The article is devoted to the rationale for the use of permanent magnet synchronous motors (PMSM) for a rig with a double drill string, which allows to provide an absolutely rigid mechanical characteristic in a wide range of speed control, regardless of the changing load on the drilling tool. PMSM is a very promising electric machine for low and medium power drives, especially for specialized drilling equipment. As a means of drilling, a double drill string is adopted, in which the entire load on the bottomhole is transmitted through the inner drill string installed in bearing supports relative to the outer pipe. In the course of previous studies, it was found that the loads on the rotation drive of the inner string practically did not change with the depth of the well, but depended only on the nature of the interaction of the tool with the rock.

Түйүн сөздөр: бургулоочу тес, кыймыл өткөөл, кош бургулоо мамысы, математикалык жана эсептөө үлгүсү, туруктуу магнитери бар машааш кыймылдаткыч.

Ключевые слова: бурильная машина, трансмиссия, двойная буровая колонна, математическая и расчётная модель, синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Key words: drilling machine, transmission, double drill string, mathematical and computational model, permanent magnet synchronous motor.

Введение. В течение многих лет в разных странах активно ведутся исследования, направленные на разработку новых методов и средств проходки направленных скважин. Под направленным бурением подразумевается проходка скважин по заранее заданному направлению, что может включать как искусственное искривление, так и высокоточное прямолинейное бурение. Внедрение инновационных подходов и оборудования в эту сферу имеет критическое значение, поскольку оно позволяет существенно ускорить скорость бурения, повысить качество скважин и снизить общую стоимость работ. В современных условиях к процессу проходки направленных скважин и их параметрам предъявляются все более высокие требования, выполнение которых невозможно без использования современного высокотехнологичного оборудования.

Одним из перспективных решений, многократно подтвердивших свою эффективность на практике при бурении высокоточных

прямолинейных скважин, является буровая машина с двойной раздельноприводной буровой колонной. Этот метод предусматривает очистку скважины с помощью воздуха или воды, а также транспортировку керна и шлама обратным потоком очистного агента.

В конструкции разрабатываемого бурового комплекса предполагается применение частотнорегулируемого привода на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). В отличие от других видов бесщёточных электродвигателей СДПМ не требуют тока возбуждения для образования магнитного потока ротора, что позволяет им обеспечивать максимальный крутящий момент на единицу объёма. Это делает их оптимальным выбором, когда на первый план выходят требования к массогабаритным показателям.

По внешнему виду электродвигатель на постоянных магнитах незначительно отличается от конструкции асинхронного двигателя. Основным их отличием является ротор.

Как правило, в двигателях СДПМ используются магниты, в состав которых входят редкоземельные сплавы, например, такие как SmCo (Самарий-Кобальт), который обладает не только лучшей коэрцитивной силой (удерживанием), но и невысокой остаточной индукцией.

Для сравнения:

- SmCo обладает лучшей коэрцитивной силой и относительно невысокой остаточной индукцией. Его максимальная рабочая температура может достигать 400°C, однако основным недостатком является высокая стоимость [1];
- NdFeB превосходят SmCo магниты по магнитным свойствам, но имеют существенные недостатки: хрупкость, подверженность коррозии (что требует защитного слоя) и сильная зависимость магнитных свойств от температуры [1].

Особое значение имеет форма магнита, которая предопределяет выбор соответствующей конструкции ротора. Магниты с большой коэрцитивной силой и относительно малыми значениями остаточной индукции имеют большую площадь поперечного сечения и малую высоту. Учитывая очень большую коэрцитивную силу со-

временных редкоземельных магнитов (Nd–Fe–В или Sm–Co), можно считать индукцию магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами ротора в зазоре СД, неизменной.

Форма магнита предопределяет выбор соответствующей конструкции ротора. Учитывая очень большую коэрцитивную силу современных редкоземельных магнитов (Nd–Fe–В или Sm–Co), индукцию магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами ротора в зазоре СД, можно считать неизменной.

Для синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов, ввиду отсутствия обмоток возбуждения и демпферной обмотки, служащей для успокоения колебаний ротора, важным параметром является устойчивость его работы. Пока проблема устойчивости синхронных машин в общем и СДПМ, в частности, далека от своего разрешения. Анализ устойчивости носит в основном качественный характер [2]. В частности, в некоторых работах устойчивость анализируется по коэффициентам демпфирующего и синхронизирующего моментов. Такой анализ, как правило, ведёт к существенному сокращению области рабочих режимов и завышенным требованиям по устойчивости.

В то же время эксплуатационные характеристики синхронных двигателей (СД) с постоянными магнитами на роторе являются весьма перспективными электрическими машинами, особенно для приводов малой и средней мощности. Отсутствие обмотки возбуждения на роторе, а также успокоительной обмотки существенно упрощает математическое описание процессов в СД. Однако сложность явлений, происходящих в электрических машинах переменного тока при переходных процессах, делает их математическое описание и исследование без ряда упрощающих допущений практически невозможным [2].

Стремление учесть главные факторы, определяющие свойства машины, и пренебрежение второстепенными позволяет рассматривать идеализированную электрическую машину, обладающую следующими свойствами [2]:

- отсутствием насыщения, гистерезиса и вихревых токов в магнитной цепи;

- отсутствием вытеснения тока в проводниках обмоток;
- синусоидальным распределением в воздушном зазоре магнитодвижущей силы и магнитной индукции;
- полной симметрией обмоток статора;
- независимостью индуктивностей рассеяния обмоток статора от положения ротора.

Обычно идеализируют и источник питания, считая его выходное сопротивление нулевым, а электродвижущую силу (ЭДС) – образующими трехфазную симметричную систему.

Следующим преимуществом синхронных электродвигателей с постоянными магнитами является то, что они обеспечивают абсолютно жёсткую механическую характеристику в широком диапазоне регулирования частоты вращения буровой колонны и независимо от изменяющихся нагрузок на буровом инструменте [1, 3].

Известно, что в трансмиссиях машин, в частности буровых, возникают существенные колебания всех составляющих её элементов [4]. Причём колебательные нагрузки возникают не только при бурении, но и в процессе холостого хода, возбуждающего свободные колебания.

Методы исследования. Предложенный метод основан на идее, описанной в авторском свидетельстве № 270845 «Способ и устройство для бурения направленных скважин» Анохина А.В. и др., зарегистрированном 01.03.1988 г. [5]. Суть предложенной идеи состоит в применении двойной, отдельно приводной колонны.

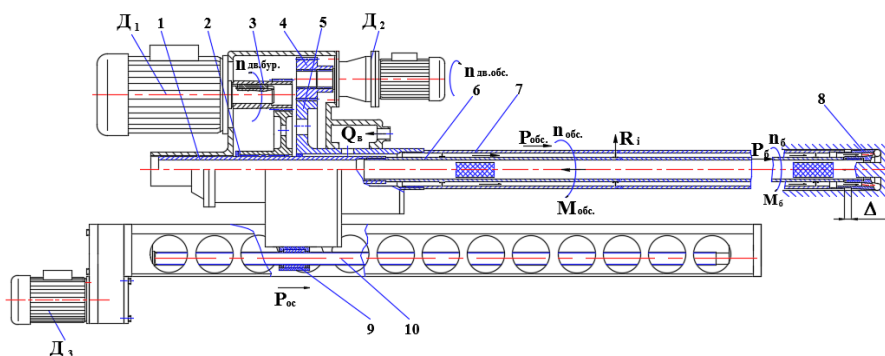
В ней:

- внутренняя колонна с буровым инструментом является буровой;
- наружная колонна, медленно вращающаяся, выполняет функцию центрирующей колонны, защищая буровую колонну от взаимодействия со стенками скважины.

Внутренняя буровая колонна устанавливается на подшипниковых опорах скольжения в каждой секции наружной трубы. Конструкция подшипниковой опоры обеспечивает свободное прохождение очистного агента по межтрубному пространству двойной колонны до забоя, с выходом его через буровой инструмент по центральному каналу буровой трубы. Наружная, медленно вращающаяся-

ся труба, имеющая отдельный привод, не взаимодействует с буровым инструментом, а защищает буровую колонну от взаимодействия со стенками скважины. Для защиты от разгерметизации межтрубного пространства ввиду разности продольной деформации внутренней и наружной колонн в головном снаряде предусмотрен компенсационный зазор в паре скольжения этих участков.

Принцип работы бурильного механизма заключается в передаче вращательного движения от электродвигателя 1 (рис. 1) через цилиндрическую зубчатую передачу 3 и 2, в которой размещён шпиндель, имеющий подвижное шлицевое соединение, передаётся буровой колонне 6, соединённой с породоразрушающим инструментом 8.



D_1 – двигатель буровой колонны, D_2 – мотор-редуктор обсадной колонны, D_3 – двигатель подачи;

1 – шпиндель, 2 – зубчатое колесо, 3 – приводная шестерня главного привода, 4 – приводная шестерня обсадной колонны, 5 – приводное колесо обсадной колонны, 6 – внутренняя колонна, 7 – наружная колонна, 8 – буровая коронка, 9 – гайка подачи, 10 – винт подачи.

Рисунок 1 – Схема буровой машины с двойной колонной и отдельным приводом

Буровая колонна, установленная на подшипниковых опорах через определённые интервалы, гарантирует продольную устойчивость при передаче максимальной осевой нагрузки на буровой инструмент. Расчёты по устойчивости буровой колонны, приведённые в работе [6], показывают, что при заданной осевой нагрузке и жёсткостных параметрах буровой штанги критическая длина штанги из

материала Д16Т не должна превышать 3,5 м. Для стальной трубы из стали 40Х эта длина должна составлять не более 7,5 м.

Согласно правилам техники безопасности в шахтах, опасных по пыли и газу, запрещается использовать легкосплавные материалы в качестве бурового инструмента. Поэтому для промышленных испытаний в условиях шахты была изготовлена стальная двойная буровая колонна труб общей длиной 200 м с длиной секций по 1,5 м.

Результаты и обсуждения. В результате проведённых исследований выяснено, что СДПМ (одинаковой конструкцией статора и с одним и тем же частотным преобразователем) обладают КПД на 2% выше, чем высокоэффективные асинхронные электродвигатели. По сравнению с другими электродвигателями СДПМ также демонстрируют лучшие показатели мощность/объем и мощность/масса. [1, 2]. Максимальная скорость вращения СДПМ ограничивается только механической прочностью крепления магнитов.

В таблице 1 приведены характеристики трёх электродвигателей примерно равной мощности, но различных по типу исполнения [3].

Таблица 1 – Сравнительные параметры двигателей с СДПМ

Параметры	Асинхронный двигатель	Двигатель постоянного тока	СД с постоянными магнитами
Мощность, кВт	7,5	8,3	7,5
Скорость, об/мин	2900	3200	3000
Длина, мм	400	625	390
Полная масса, кг	66	195	38,6
Масса ротора, кг	17	29	8,2
Момент инерции $J_d \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$	280	496	87,4
Номинальный момент, M_n , Н·м	24,7	24,7	24
Максимальный момент, M/M_n	1,8 M_n	1,6 M_n	3,0 M_n
Максимальное ускорение, с^{-2}	1588	797	8238
Охлаждение	индивидуальное	индивидуальное	конвекцией

Анализ показывает, что СДПМ обладает наименьшей массой и габаритами, а также максимальным крутящим моментом, который в

три раза превышает номинальный, что является существенным преимуществом.

В процессе полигонных и шахтных испытаний [6, 7] установлено, что для двойной колонны с внутренней буровой трубой критические поперечно-изгибные колебания не возникают даже при значительном увеличении расстояния между подшипниковыми опорами, что обусловлено конструктивными особенностями двойной колонны. Однако крутильные колебания могут оказывать значительное влияние на неравномерность вращения бурового инструмента, особенно при бурении крепких и неоднородных пород или при большой протяжённости буровой колонны. Этот фактор необходимо учитывать и контролировать.

Большой объём полигонных испытаний [6, 7], проведённых на плотных сухих глинах III–IV категории буримости с прохождением искусственно созданных участков трассы с блоками различных материалов (бетон, известняк, мрамор, ракушечник и др.), показал, что затраты мощности на вращение буровой колоны в скважине протяженностью более 100 м практически не изменялись.

Крутящий момент при прохождении бурового инструмента по участкам с крепкими породами изменялся незначительно, так как автоматически менялась скорость подачи. Имеющиеся контрольно-измерительные приборы позволяли мгновенно реагировать на изменения в забое скважины. Все испытания проходили в режиме бурения горизонтальных скважин. Главным контролируемым параметром был наименьший уход скважины от прямолинейности. Все остальные параметры, включая затраты мощности, скорость бурения и другие факторы, влияющие на процесс бурения, не принимались во внимание, но регистрировались.

При бурении скважин с двойной, отдельно приводной колонной с пневмо- или гидротранспортом керна на испытательном полигоне с выходом на дневную поверхность склона на расстоянии от 50 до 100 м от бурового станка отклонение скважин не происходило, и они просматривались визуально. При бурении более 150 м скважины не просматривались, но по азимуту они не отклонялись.

Промышленные испытания бурового комплекса КБ-76 [7], разработанного и изготовленного в Институте машиноведения НАН КР, по заказу АО УД «Испат-Кармет», проводились на шахте им. В. И. Ленина в г. Шахтинске Карагандинской области в 1998 году. Дальнейшая эксплуатация бурового комплекса продолжалась до капремонта в 2005 году.

Испытания и работа комплекса показали, что для бурения дегазационных скважин по угольным пластам двойная буровая колонна является идеальным инструментом по многим показателям. Комплекс не только продемонстрировал высокую производительность проходки скважин по углю, но также обеспечил безопасность работ в условиях сверхкатегорийности пластов угля по газу ($36,3 \text{ м}^3/\text{т}$) и прямолинейности скважин протяженностью до 200 м.

Хотя показатель прямолинейности не регламентировался при дегазационных работах, но он оказался полезен при бурении направленных скважин для прокладки технических скважин. Проектная длина первой опытной скважины составляла 70 м с возможностью выхода бурового снаряда на откаточный штрек. Угол падения пласта составлял $9\text{--}14^\circ$, а отклонение скважины не превышало величины диаметра скважины. При выходе бурового инструмента в конвейерный или вентиляционный штрек скважины протяжённостью до 100 м просматривались визуально.

Режимы бурения скважин находились в следующих пределах:

- частота вращения буровой колонны – $300\div 500 \text{ об/мин.}$;
- крутящий момент – $100\div 170 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- усилие подачи – $4\div 8 \text{ кН}$;
- частота вращения обсадной колонны – $8\div 10 \text{ об/мин.}$;
- крутящий момент на приводе обсадки возрастал по мере углубления скважины от 50 до $400 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Выводы:

- СДПМ являются перспективной электрической машиной для приводов малой и средней мощности, в частности для специализированного бурового оборудования;

- СДПМ обладают наименьшей массой и габаритами, а также максимальным крутящим моментом, превышающим в 3 раза номинальный, что является существенным преимуществом для работы станка с двойной буровой колонной;
- СДПМ позволяют обеспечить абсолютно жёсткую механическую характеристику с возможностью регулирования частоты вращения в диапазоне допустимых внешних нагрузок;
- применение СДПМ показывают лучшие показатели мощность/объем и мощность/масса. Максимальная их скорость вращения ограничивается лишь механической прочностью крепления магнитов.

Таким образом, в результате проведённых полигонных и промышленных испытаний было установлено, что с глубиной скважины нагрузки на привод вращения внутренней колонны зависели только от характера взаимодействия инструмента с горной породой и её крепости. На холостое вращение внутренней колонны с увеличением её протяженности эти нагрузки были незначительны. Также установлено, что двойная колонна позволяет исключить аварийные ситуации с резким изменением крутящего момента на приводе вращения, которые могут повлечь выход двигателя СДПМ из синхронизации.

Приведённые выводы свидетельствуют о том, что рассматриваемая технология бурения с двойной раздельно приводной колонной труб позволит более эффективно использовать в качестве привода бурового станка частотно регулируемые синхронные двигатели с постоянными магнитами.

Литература

1. Бисов А.А. Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами / А.А. Бисов // Молодой ученый. – 2014. – № 21 (80). – С. 104–108. – URL: <https://moluch.ru/archive/80/14447/> / Дата обращения 20.04.2023 г.
2. Павлов О.П. Синхронный двигатель с постоянными магнитами, управляемый при помощи прогнозирующей модели. Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова.

- «Молодой учёный». – № 25 (263), июнь 2019. – С. 135–138. – URL: <https://moluch.ru/archive/263/61104/> . Дата обращения 27.02.2023 г.
3. Синхронный двигатель с постоянными магнитами. <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/> / Дата обращения 14.10.2022 г.
 4. Манжосов В.К. и др. Крутильные колебания в трансмиссиях буровых машин. – Фрунзе: Илим, 1982. – 166 с.
 5. Анохин А.В. и др. Способ и устройство для бурения скважин. А. с. № 270845 СССР, Е21 В 3/00. Заявлено 10.04.87. Зарегистрировано 01.03.88.
 6. Анохин А.В. Разработка и исследование буровых станков с двойным раздельно-приводным буровым ставом для направленного бурения горизонтальных скважин [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / А.В. Анохин. – Иркутск, 1991. – 237 с.
 7. Анохин А.В. Испытания бурового комплекса КБ-76 на шахте им. Ленина в г. Шахтинске [Текст] / А.В. Анохин и др. // Т-77 Труды Кыргызского ин-та минерального сырья: Сб. науч. тр. (КИМС). – Бишкек, 2000. – С. 200–206.