

УДК 621.313.13

ТУРАКТУУ МАГНИТТЕРИ БАР МАШТАШ КЫЙМЫЛДАТКЫЧТАРДЫ БУРГУЛОО ЖАБДУУНУН ЭЛЕКТР ИШТЕТКИЧИН ЖЫШТЫК- ЖӨНДӨӨ ҮЧҮН КОЛДОНУУ КЕЛЕЧЕКТҮҮЛҮГҮ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

PROSPECTS OF APPLICATION OF SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS FOR FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE OF DRILLING EQUIPMENT

А. В. Анохин, С. Ф. Мурашова, Алымбек у. Ч., Д. Д. Давлеталиев
A. V. Anokhin, S. F. Murashova, Alymbek u. Ch., D. D. Davletaliev

Жөндөлбөс электр иштеткичтен жөндөлүүчүгө өтүү өндүрүштө жана тиричиликте энергия үнөөмдөнүн жеке негизги бир жолу эмес, ошондой эле башкаруунун сапатын жогорулатуу максатында жана анын колдонуусунун коопсуздугунун негизги фактору болуп эсептелет. Бул жерде белгилеп кетиши керек, жыштык жөндөөчү башкаруу блогу бар беймаштык электр кыймылдаткычтардын кеңири түрлөрү пайда болушуна карабастан, алар механикалык мүнөздөмөсүнүн жетиштүү ийкемсиздигин кеңири диапазондо жөндөөсүн камсыздай албайт, анысы механикалык системадагы серпилгич механикалык термелүүлөрдүн басаңдатуусун ишенимдүүлүгүн азайтат, жекече бургулоо мамыда. Бул иште кош мамы түтүктүү бургулоо машинанын кыймыл келтиргич катары турактуу магниттери бар машташ машиналарды колдонуу мүмкүнчүлүгү каралды, мындай нерсе келечекте бургулоочу машиненин аткаруу ишинде башкаруу системасынын ишенимдүүлүгүн, иш сапатын жана өндүрүмдүүлүгүн жогорулашына мүмкүндүк түзүп берет.

Переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому является не только одним из основных путей энергосбережения в производстве и быту, но и главным фактором повышения качества управления и безопасности его эксплуатации. Надо отметить, что, несмотря на появление широкой линейки асинхронных электродвигателей с частотно-регулируемым блоком управления, они не обеспечивают достаточную жёсткость механической характеристики в широком диапазоне регулирования, а это

снижает надёжность демпфирования упругих механических колебаний в механической системе, в частности буровой колонне. В настоящей работе рассматривается возможность использования синхронных машин с постоянными магнитами в качестве приводов бурильной машины с двойной колонной труб, что в перспективе позволит увеличить надёжность системы управления, качество и производительность работы, выполняемой буровой машиной.

The transition from an unregulated electric drive to a regulated one is not only one of the main ways of energy saving in production and in everyday life, but also is the main factor in improving the quality of management and safety of its operation. It should be noted that despite the appearance of a wide range of asynchronous electric motors with a frequency-controlled control unit, they do not provide sufficient rigidity of the mechanical characteristics in a wide range of regulation, and this reduces the reliability of damping elastic mechanical vibrations in a mechanical system, in particular a drilling string. In this paper, we consider the possibility of using synchronous machines with permanent magnets as drives for a drilling machine with a double string of pipes, which in the future will increase the reliability of the control system, the quality and productivity of the work performed by the drilling machine.

Түйүн сөздөр: машташ машиналар; жыштыктуу жөндөө; сейрек кездешүүчү турактуу магниттер; санбагытты кбашкаруу; ийкемсиздик механикалык мүнөздөмөсү; ротордун бурулуу бурчун билгизгичтери; бургулоо механизми; кош бургулоо мамылуу түтүк.

Ключевые слова: синхронные машины; частотное регулирование; редкоземельные постоянные магниты; векторное управление; жесткая механическая характеристика; датчики угла поворота ротора; бурильный механизм; двойная буровая колонна.

Keywords: synchronous machines; frequency control; rare-earth permanent magnets; vector control; rigid mechanical characteristic; rotor angle sensors; drilling mechanism; double drilling string.

В конце 90-х годов в Институте машиноведения НАН КР был разработан буровой комплекс КБ-76 для бурения глубоких направленных скважин в угольных газонасыщенных пластах с целью их дегазации. Особым пунктом в техническом задании проекта было требование о механическом способе очистки скважины от буровой мелочи.

Из всех известных механических способов очистки скважин наиболее производительным и эффективным в данном классе является шнековый инструмент. Однако шнековый способ очистки скважины с увеличением её глубины является самым энергозатратным и требует больших затрат мощности на транспортирование

разрушенной породы. Большинство исследователей и производителей считают, что наиболее эффективно этот способ бурения можно применять до глубины 70 метров [1]. При проектировании бурового комплекса была поставлена задача об использовании гидропривода и систем управления на давление не менее 20 МПа. В проекте были заложены самые последние отечественные и зарубежные разработки комплектной гидроаппаратуры на указанное давление с возможностью обеспечить необходимые энергетические параметры для шнекового бурения.

В итоге экспериментальный буровой комплекс КБ-76 с комплектной экскаваторной трёхнасосной станцией и системой управления Danfos был разработан, изготовлен и прошёл заводские испытания. Однако из-за технической сложности изготовления шнековой колонны и возможности невыполнения этим буровым снарядом требуемой глубины бурения (200 метров) нами было предложено опробовать новую разработку – легкосплавную двухприводную буровую колонну с внутренней буровой трубой, установленной относительно наружной на подшипниковых опорах. Эта разработка использовалась ранее для специальных работ и показала очень хорошие результаты. При глубине скважин 100 метров отклонение было практически нулевым. Скважина просматривалась насквозь. По результатам контроля рабочих параметров бурового комплекса энергозатраты на бурение оказались существенно ниже предполагаемых.

В дальнейшем, учитывая требования техники безопасности при эксплуатации оборудования на сверхкатегорийных шахтах, легкосплавные трубы из сплава Д16Т были заменены на стальные.

Промышленные испытания проводились на шахте им. В. И. Ленина Карагандинского угольного бассейна, которая относится к разряду сверхкатегорийной по выделению метана и опасной по внезапным выбросам. В процессе испытаний были отработаны режимы бурения направленных скважин и оценена точность проходки с использованием двухприводной буровой колонны.

Шахтные испытания подтвердили работоспособность бурового комплекса и его технологические возможности при бурении разгрузочных скважин, которые заключаются в следующем [2]:

- станок позволил выполнить точное забуривание снаряда на заданное направление (в допустимых пределах отклонения 1 м на 100 м длины) и его поддержание до проектной глубины скважины;

- минимальное воздействие буровой колонны на стенки скважины и практическое отсутствие в ней штыба позволило исключить и значительно снизить вероятность заклинивания бурового снаряда в скважине;

- образцы керна позволили точно определить физические свойства угольного пласта и степень насыщенности газом;

- наличие двойной колонны труб с внутренним буровым ставом позволило практически без потерь передавать осевую нагрузку и крутящий момент от бурильной машины до породоразрушающего инструмента в забое;

- затраты мощности на вращение внутренней буровой колонны практически не изменялись по мере углубления скважины.

Данные испытания подтвердили работоспособность двухприводной буровой колонны при бурении направленных скважин, и буровой комплекс КБ-76 был рекомендован для бурения разгрузочных скважин в выбороопасных пластах.

Как показали испытания при бурении двухприводной буровой колонной с внутренней буровой трубой, установленной относительно наружной на подшипниковых опорах, энергозатраты на проходку глубокой скважины с увеличением её глубины практически не изменились, а зависели только от крепости конкретной породы, по которой проводилось бурение. Медленно вращающаяся наружная колонна защищала буровой инструмент от соприкосновения со стенками скважины, вследствие чего затраты мощности на вращение внутренней буровой колонны не превысили 5 кВт. Поскольку частота вращения наружной колонны с выходного вала редуктора составляла 6÷8 об/мин, для данных параметров расчетная мощность привода не превысила 1 кВт. Высокая продольная жёсткость двойной буровой колонны позволила сохранить прямолинейность на протяжении всего этапа бурения скважины.

Отсутствие резких изменений нагрузок на приводе вращения бурильной машины позволило напрямую использовать

электрический привод при бурении глубоких скважин с двухприводной буровой колонной с внутренней буровой трубой.

Современный электропривод – это совокупность множества электромашин, аппаратов и систем управления ими. Он является основным потребителем электрической энергии и главным источником её преобразования в механическую энергию. Из всего объёма электроэнергии, вырабатываемой в мире, примерно 65% [3, 4] потребляют электроприводы и преобразуют её в механическую энергию, необходимую для работы машин и механизмов в производстве и быту.

Качество и надёжность электрических приводов зависит от типа приводов, его технических характеристик, возможности обеспечить продолжительную работу с максимальной эффективностью.

Регулирование привода может быть ручным, программным, автоматическим и т. п.

1. *Нерегулируемый* – самый простой вид электропривода. Он применяется в обычном режиме пуска и остановки электрического двигателя с постоянной скоростью вращения. В некоторых случаях его можно оснащать коробкой передач с возможностью ступенчатого регулирования частоты вращения выходного вала (например, токарный станок).

2. *Регулируемый или частотно-регулируемый* электропривод. Главным назначением частотно-регулируемого электропривода является бесступенчатое регулирование частоты вращения вала асинхронного электродвигателя. Частотный привод позволяет управлять асинхронным электродвигателем, осуществлять защиту двигателей, поддерживать высокий КПД и оптимизировать режим его работы в зависимости от нагрузки. Использование регулируемых электроприводов – это существенная экономия электроэнергии [4, 5] в отличие от электродвигателей, работающих в постоянном режиме. Применяются данные виды приводов в станках с числовым, программным обеспечением, бытовых кондиционерах, стиральных машинах, автоматизированных конвейерах, в системах вентиляции и водоснабжении.

Переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому является одним из основных путей энергосбережения в производстве и в быту с помощью современных средств управления.

Электрические машины переменного тока не имеют ограничений по предельной мощности. Питание обмотки статора может производиться от сети с напряжением в десятки киловольт. Электродвигатели переменного тока являются самыми распространенными видами электрических машин, которые применяются во всех областях человеческой деятельности, где есть необходимость в преобразовании электрической энергии в механическую.

В ранее проводимых исследованиях [6], где рассматривались асинхронные частотно-регулируемые электродвигатели, отмечалось, что регулируемый электропривод должен обеспечивать высокую жёсткость механической характеристики с возможностью демпфирования упругих механических колебаний в механической системе, в частности буровой колонне.

В настоящей работе рассмотрим возможность использования синхронных машин с постоянными магнитами в качестве привода бурильной машины с двойной колонной труб.

В синхронных машинах этого типа постоянно направленное поле возбуждения в роторе образуется с помощью постоянных магнитов. Синхронные машины с постоянными магнитами не нуждаются в возбудителе и благодаря отсутствию потерь на возбуждение обладают высоким КПД, их надёжность существенно выше, чем у обычных синхронных машин. Кроме того, они практически не нуждаются в обслуживании в течение всего срока службы.

По сравнению с асинхронными двигателями синхронные имеют более сложную конструкцию и, следовательно, их стоимость выше. Однако эти двигатели обладают способностью оказывать энергосберегающее влияние на участке электрической сети, в котором они работают. Дело в том, что если у работающего синхронного двигателя постепенно увеличивать ток в обмотке возбуждения, то будет уменьшаться реактивная (индуктивная) составляющая тока статора. В результате будет уменьшаться угол фазового сдвига между током статора двигателя и напряжением сети. При некотором значении тока в обмотке возбуждения синхронного двигателя реактивная составляющая тока статора уменьшится до нуля, ток статора станет чисто активным и коэффициент мощности синхронного двигателя $\cos \varphi = 1$.

Если продолжать увеличение тока возбуждения (перевозбуждать двигатель), то реактивная составляющая тока статора вновь появится, но теперь она будет опережать по фазе напряжение, т. е. станет ёмкостной [7].

Вращающий момент на валу синхронного электродвигателя пропорционален напряжению сети в первой степени, в то время как момент асинхронного электродвигателя пропорционален его квадрату. Это определяет более надёжную работу синхронных двигателей при снижении напряжения питания. Кроме того, синхронный электродвигатель имеет возможность компенсации снижения напряжения питания статора путём увеличения тока возбуждения ротора [7].

К другим достоинствам синхронных электродвигателей относятся:

- высокий КПД, составляющий 96–98%, что на 1–2% выше КПД асинхронных двигателей той же мощности;
- абсолютно жёсткая механическая характеристика, что позволяет стабилизировать частоту вращения и определять пройденное угловое перемещение без применения датчиков положения;
- простота охлаждения внешним вентилятором вследствие большого воздушного зазора в пазах статора синхронных двигателей;
- особенности конструкции синхронных двигателей, позволяющие изготавливать их на мощности в десятки мегаватт.

Синхронные машины наиболее перспективные электромеханические преобразователи энергии, и их применение в сервоприводах мехатронных систем непрерывно расширяется.

К недостаткам синхронных двигателей следует отнести сложность конструкции ротора по сравнению с асинхронными двигателями, сложность пуска без применения специальных средств управления и сложность переходных процессов при изменении нагрузки на валу. Угловая характеристика на начальном участке по сути является графиком зависимости момента упругого элемента от угла закручивания, т.е. ротор двигателя, обладающий моментом инерции, ведет себя как маятник на спиральной пружине. Эта особенность обуславливает высокую степень колебания переходных процессов и сложность управления двигателем. Для уменьшения колебаний ротора

применяют короткозамкнутую успокоительную обмотку, укладываемую в пазах.

Управление синхронными машинами осуществляется при помощи частотных преобразователей и сервоконтроллеров[7]. Существует несколько принципов управления синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), а выбор их схемы осуществляется исходя из требований к электроприводу и экономической целесообразности.

Для бурильной машины с двойной колонной труб представляют интерес синхронные двигатели с прямым управлением серии Dyneo[8]. Это новая серия синхронных двигателей с постоянными магнитами, обладающих высоким КПД, повышенными скоростями вращения и относительно широким диапазоном мощностей.

Серия представлена моделями: LSRPM – с алюминиевым корпусом с IP55 для общепромышленных применений; PLSRPM – со стальным корпусом с IP23 для применений, где требуется высокая удельная мощность.

В таблице 1 приведены сокращенные технические характеристики некоторых типов синхронного двигателя с постоянными магнитами [9].

Таблица 1 – Основные параметры двигателей Dyneo

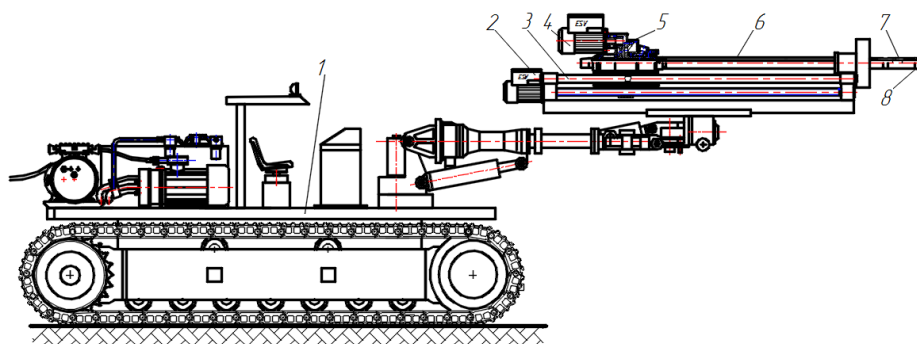
Тип	P, кВт	Mн, Нм	I, А	η, %	Mп/Mн	Масса, кг
3000 об/мин						
LSRPM 90SL	5,8	19	11	91,5	1,37	14
LSRPM 90L	7,3	23	13,5	93	1,37	17
1500 об/мин						
LSRPM 90L	3,7	24	7,2	89	1,37	17
LSRPM 100L	6	38	10,9	91,5	1,37	26

За счет использования постоянных магнитов в роторе в нем отсутствуют потери, что влечет к увеличению КПД на 2–4 пункта по сравнению со стандартным асинхронным двигателем аналогичной мощности. При этом, в отличие от асинхронного двигателя, КПД остается постоянным на всем диапазоне регулирования скорости.

Поскольку данная серия предназначена для использования в составе частотно-регулируемого электропривода, двигатели Duneo адаптированы к использованию с преобразователями частоты Emerson серий Unidrive M, Powerdrive MD2 и Powerdrive FX и других типов. Благодаря этому достигается превосходная точность регулирования скорости и момента приводного двигателя в сочетании с высокой надежностью.

Теперь, когда появилась возможность использовать компактные частотно-регулируемые приводы вращения, нами предлагается усовершенствовать буровую установку за счет применения синхронного двигателя.

На рисунке 1 представлен вариант разработанной бурильной машины с синхронными двигателями СДПМ на приводах вращения и подачи буровой колонны.



- 1 – гусеничная платформа с манипулятором, 2 – синхронный электродвигатель подающего механизма, 3 – рама из трубных направляющих, 4 – привод СДПМ бурильного механизма, 5 – бурильный механизм, 6 – двойная буровая колонна, 7 – головной снаряд, 8 – буровая коронка

Рисунок 1 – Бурильная машина с синхронными двигателями СДПМ

В предложенном варианте колонковое бурение осуществляется вращательным способом с использованием двойной колонны труб и коронки с алмазно-твёрдосплавными резцами. Транспортировка керна и шлама осуществляется продувкой сжатым воздухом или промывкой.

На основании проведённого анализа о возможности использования синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) в качестве основных приводов в бурильной машине можно сделать следующие выводы:

1. Оснащение бурильной машины СДПМ позволяет существенно (в $1,5 \div 2$ раза) снизить массу и габариты электродвигателя по сравнению с асинхронным при одинаковой мощности.

2. СДПМ обеспечивает абсолютно жёсткую механическую характеристику в широком диапазоне регулирования частоты вращения буровой колонны независимо от изменяющейся нагрузки на буровом инструменте, позволяет существенно снизить энергозатраты в электросети и обеспечивает высокий КПД.

3. Благодаря отсутствию потерь на возбуждение в роторе повышается надёжность работы синхронных двигателей даже при снижении напряжения питания.

Таким образом, на основании приведенных выводов можно сделать следующее заключение— применение синхронных двигателей с постоянными магнитами для частотно-регулируемого электропривода бурового оборудования в перспективе позволит увеличить надёжность системы управления, качество и производительность работы, выполняемой буровой машиной.

Литература

1. Башкатов Д. Н., Олоновский Ю. А. Вращательное шнековое бурение геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1968. – 192 с.
2. Анохин А. В. Испытания бурового комплекса КБ-76 на шахте им. Ленина в г. Шахтинске [Текст] Т-77. Труды Кыргызского ин-та минерального сырья: Сб. науч. тр. (КИМС). – Бишкек, 2000. – С. 200 – 206.
3. Бекишев Р. Ф. Электропривод. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studme.org/84176/tehnika/elektroprivod>. Дата обращения: 26.03.2021 г.
4. Гейлер Л. Б. Основы электропривода. Мн., «Вышэйш. школа», Минск, 1972. – 608 с. с ил.
5. Виды и особенности электроприводов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=tGbENeV1Q9c>. Дата обращения: 10.03.2021 г.
6. Анохин А. В., Мурашова С. Ф. Буровой станок с частотно-регулируемым электроприводом [Текст] / А. В. Анохин, С. Ф. Мурашова //Машиноведение. Научно-технический журнал. – № 1 (13). – Бишкек: Илим, 2021. – С. 73–81.
7. Управление синхронным двигателем с постоянными магнитами. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://drives.ru>. Дата обращения: 22.10.2021 г.
8. Синхронные двигатели. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://driveka.ru/>. Дата обращения: 15.04.2022 г.
9. Синхронный двигатель с постоянными магнитами. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/#control>. Дата обращения: 21.10.2021 г.