

АНАЛІЗ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА БУРОВИХ УСТАНОВОК ПРИ ПРОХОДЦІ ТРІЩИНУВАТИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД

¹Л.М. Заміховський, ²О.А. Шаповал

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727170, e-mail: ktsu.nung@gmail.com

²Івано-Франківський університет права імені Короля Данила Галицького, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Євгена Коновальця, 35, e-mail: inst.doktor@gmail.com

Показники стану гірської породи за тріщинуватістю є збурювальними факторами, які суттєво впливають на режим роботи електропривода і нормальний хід технологічного процесу буріння. При бурінні тріщинуватої породи знос коронки зростає зі збільшенням як осьових навантажень, так і частоти обертання. Для підвищення ефективності буріння в тріщинуватих породах необхідно забезпечити правильний вибір частоти обертання породоруйнівного інструменту та осьового навантаження на початку рейсу. У випадку буріння в тріщинуватих породах установками з плавно регульованою частотою обертання проходка за рейс значно підвищується. Застосування регульованого електропривода дає можливість значно поліпшити його функціональні показники, сприяє вирішенню завдань щодо забезпечення оптимальних режимів роботи механізмів, підвищення ефективності використання енергії, надійності та терміну служби обладнання.

Ключові слова: електропривод, проходка, тріщинуватість, потужність, гірська порода, осьове навантаження, частота обертання.

Показатели состояния горной породы по трещиноватости является возмущающими факторами, существенно влияющими на режим работы электропривода и нормальный ход технологического процесса бурения. При бурении трещиноватых пород износ коронки возрастает с увеличением как осевых нагрузок, так и частоты вращения. Для повышения эффективности бурения в трещиноватых породах следует обеспечить правильный выбор частоты вращения породоразрушающего инструмента и осевой нагрузки в начале рейса. При бурении в трещиноватых породах установками с плавно регулируемой частотой вращения проходка за рейс значительно увеличивается. Применение регулируемого электропривода позволяет значительно улучшить его функциональные показатели, способствует решению задач по обеспечению оптимальных режимов работы механизмов, повышению эффективности использования энергии, надежности и срока службы оборудования.

Ключевые слова: электропривод, проходка, трещиноватость, мощность, горная порода, осевая нагрузка, частота вращения.

Values of rock state on fracturing are disturbing factors which significantly affect the operation of the electric and normal course of the drilling process. During the fractured rocks drilling the crown wear increases due to both the axial loads and the frequency of its rotation. To improve the efficiency of the fractured rock drilling, it is necessary to ensure the correct choice of rock cutting tool rotation frequency and the axial load at the beginning of the trip. Drilling in fractured rocks using equipment with a continuously adjustable speed the penetration per trip significantly increases. The application of adjustable electric drive enables substantial improvement of its functional properties, problems solving on ensuring the optimal modes of mechanisms operation, energy efficiency, reliability and life time of equipment.

Key words: electric drive, excavation, fracturing, power, rock, axle load, frequency of rotation.

Постановка проблеми. Показники стану гірської породи за ступенем тріщинуватості є збурювальними факторами, які суттєво впливають на режим роботи електропривода і нормальний хід технологічного процесу буріння. Високий ступінь тріщинуватості породи призводить до додаткового руйнування керна; скорочення тривалості циклів буріння у зв'язку із його заклинюванням; підвищеного зносу бурового устаткування, породоруйнівного інструменту; передчасного зносу двигунів головного електропривода і підвищення питомих витрат електроенергії на проходку свердловин та виникнення аварійних ситуацій. При бурінні в тріщинуватих породах утворюється велика кількість крупних частинок шламу, більшість яких роздрібнюється під торцем коронки, викликаючи посилений знос матриць і алмазів. Наванта-

ження електропривода при цьому має різко змінний випадковий характер. У зв'язку з цим при бурінні тріщинуватої породи умови роботи алмазної коронки на вибої свердловини і електропривода установок є більш важкими, а витрати потужності виявляються на 15...20% вищими, ніж при бурінні монолітної породи [1].

При бурінні тріщинуватої породи зношування коронки зростає зі збільшенням як осьових навантажень, так і частоти обертання. Зі зміною цих режимних параметрів змінюється також механічна швидкість буріння, вихід керна і його якість. З підвищенням частоти обертання снаряда проходка за рейс і вихід керна різко знижуються внаслідок руйнування керна від вібрації та підклинювань, що зменшує ефективність високооборотного алмазного буріння. Підклинювання керна в процесі формування в

керноприймальній трубі призводить до його поділу на частини, взаємного перетирання та втрати кернового матеріалу. Нерідко це слугує причиною передчасного підймання та вилучення інструменту зі свердловини при колонковому бурінні. Макротріщини істотно впливають на показники роботи електроприводів установок розвідувального буріння і зношування породоруйнівного інструменту. Зі збільшенням ступеня тріщинуватості породи працездатність коронок знижується. При цьому спостерігається висока витрата алмазів, низька стійкість коронок і недостатній вихід керна [2, 3].

Виникнення пульсуючого з різкими поштовхами навантаження на електропривод при бурінні в тріщинуватих породах пояснюється особливостями механізму їх руйнування. При підході коронки до тріщини під дією осьового навантаження відбувається протискання та відрив керна від частини породи вибою і моноліту, що призводить до збільшення споживаної потужності. Потім, при перетині зазору тріщини, коронка долає менший опір і потужність, споживана електродвигуном головного привода, спадає до рівня, визначеного холостим обертанням бурильної колони. Після цього відбувається розбурювання частинок шламу і забурювання нового вибою. При цьому споживана електродвигуном потужність різко зростає, а відтак повільно знижується до початкового рівня.

Перехід до буріння з високими швидкостями обертання снаряда стримується через зростання вібрації бурильної колони. Проведені дослідження [1] показали, що на алмазну коронку передаються одночасно поперечні і поздовжні коливання, в результаті чого зростає колове зусилля на коронці. Особливо помітним це є при бурінні в сильно тріщинуватих породах коронками з твердими матрицями.

Аналіз досліджень і публікацій. Як показали неодноразові дослідження [1, 4, 5], при проходці тріщинуватої породи значна частина рейсів припиняється через самозаклинювання керна, яке відбувається в основному при бурінні в зонах тектонічних порушень або у випадку перешарування породи у зв'язку зі сколюванням керна в керноприймачі. В момент підклинювання керна і після цього спостерігається короткочасне збільшення крутного моменту. Самозаклинюванню керна сприяють також часті зупинки обертання колони бурильних труб. Тому з метою підвищення ефективності буріння в тріщинуватих породах необхідно забезпечити правильний вибір частоти обертання снаряда на початку рейсу. Як показали дослідження професора Козловського Є.О. [1], при бурінні в тріщинуватих породах установками з плавно регульованою частотою обертання породоруйнівного інструменту проходка за рейс може бути значно підвищена. Таким чином, стан буримої породи за ступенем тріщинуватості і регульовані властивості приводів визначають умови оперативного керування процесом буріння, а особливості реакції електропривода

при руйнуванні гірських порід можуть визначати їх властивості та стан.

Незважаючи на значну кількість проведених досліджень, при визначенні потужності холостого ходу електропривода не враховується глибина свердловини. У зв'язку з цим метою статті є проведення експериментальних досліджень потужності холостого ходу електропривода з врахуванням невідомих раніше факторів.

Викладення основного матеріалу. Електроприводи бурових установок піддаються дії різних випадкових факторів, які істотно впливають на навантаження електропривода, частоту обертання, продуктивність і надійність роботи. Випадковий характер навантаження зумовлюється неоднорідністю гірської породи, глибиною буріння, станом породоруйнівного інструменту і характером руйнування породи, технологічним режимом проходки свердловини. Діаграми запису потужності, затрачуваної установкою УКБ-5П на буріння розвідувальної свердловини, наведені на рисунку 1. З отриманих діаграм видно, що навантаження на електропривод має вкрай нерівномірний (випадковий) характер. Це викликано дією випадкових факторів на породоруйнівний інструмент. При проходці розвідувальних свердловин на процес руйнування гірської породи впливає цілий ряд факторів. Це міцність самої породи, її тріщинуватість і перешарування, пластовий тиск і умови очищення вибою, ступінь стабільності режимних параметрів та інші. Істотні ускладнення вносить довга бурильна колона, на яку діють різноманітні навантаження, що призводить до виникнення поздовжніх, поперечних та крутих коливань. Перелічені фактори визначають режим роботи електропривода, який за даних умов стає випадковим. При цьому випадково змінюються коефіцієнти потужності та корисної дії привода, що стає причиною надмірних енерговитрат.

На діаграмах запису витрат потужності на буріння (рисунк 1), отриманих на свердловинах Алмаликської ГРЕ, простежується підвищення потужності зі збільшенням глибини свердловини.

Потужність електропривода бурового верстата залежить від двох основних процесів: власне процесу буріння, в результаті якого здійснюється поглиблення свердловини, і спуско-підймальних операцій. Визначальними для вибору необхідної потужності електропривода вважають витрати потужності на буріння. Сумарна потужність всієї бурової установки визначається середнім одночасним навантаженням. Вважається, що середнє навантаження є найбільшим при забурюванні свердловини, найменшим – у режимі спуско-підймальних операцій. Однак за великих глибин свердловини і геолого-технологічних ускладненнях навантаження при спуско-підймальних операціях може наближатися до абсолютного максимуму.

Випадкові фактори, які діють на породоруйнівний інструмент, є причиною випадкового режиму роботи електропривода. Момент наван-

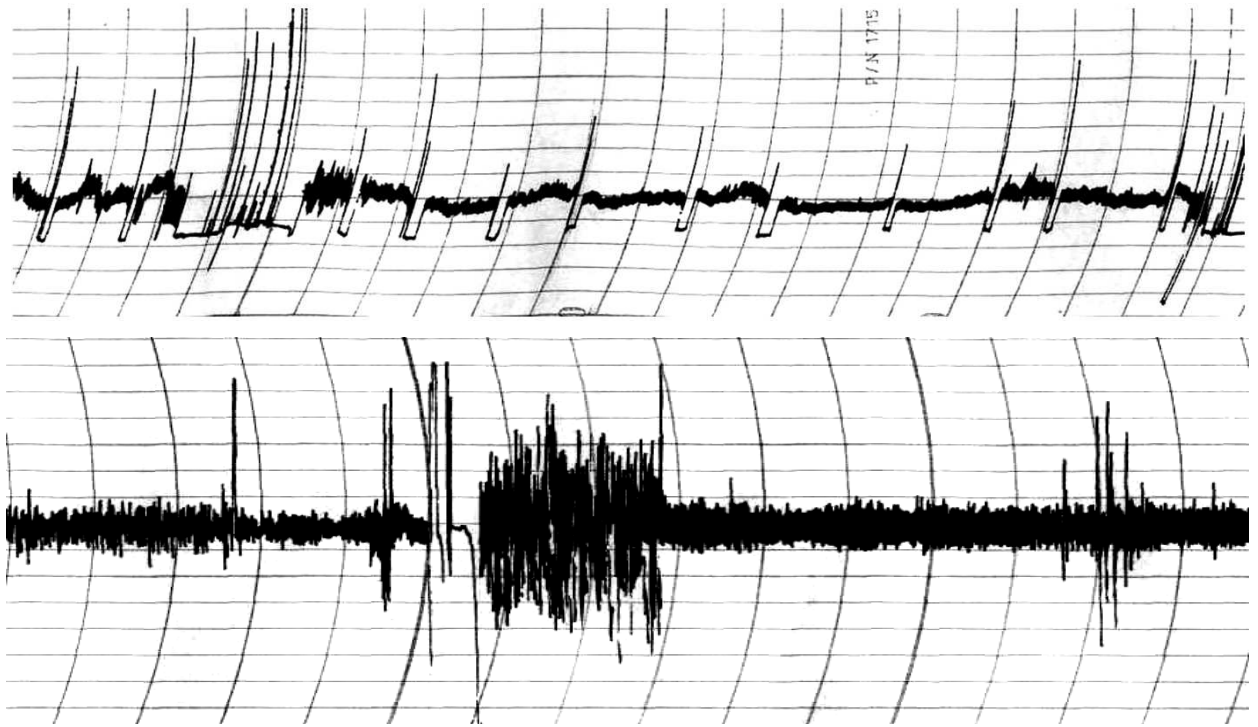


Рисунок 1 – Діаграми запису потужності бурової установки УКБ-5П при проходці свердловини

таження при цьому також є випадковим. Це призводить до змін напруги живлення, в результаті чого відбувається зміна частоти обертання електропривода і навантаження на його валу. При цьому коефіцієнт потужності та коефіцієнт корисної дії (ККД) також змінюються. Проведення розрахунків електроприводів при випадкових навантаженнях передбачає використання традиційної методики вибору потужності з урахуванням впливу випадкових факторів та визначенням фактичного навантаження електропривода за допомогою ймовірнісних методів. Іншим напрямком є заміна традиційної розрахункової діаграми навантажувальними діаграмами, які враховують вплив випадкових факторів, а саме: усереднена навантажувальна діаграма, статистична усереднена навантажувальна діаграма, статистична функція розподілу, а також гістограми. Потужність електропривода вибирають, використовуючи лінію регресії. Застосовують також чисто математичні методи розрахунків навантажень, для чого необхідно визначити ймовірні характеристики технологічного процесу.

За наявності випадкових впливів розгляд окремих циклів подачі бурильного інструменту не дозволяє об'єктивно оцінити ефективність навантаження на електропривод, а також визначити керуючі дії на хід технологічного процесу проходки свердловини. В даному випадку єдиним дієвим методом є статистичний. Перевагами даного методу є те, що в умовах впливу випадкових навантажень при аналізі досить великого числа циклів закономірності проявляються в певній статистичній характеристиці. Випадкові навантаження електроприводів, які працюють у повторно-короткочасному режимі,

загалом відносять до процесів, у яких відносна тривалість вмикання і частота включень також є випадковими. При цьому процес навантаження можна розглядати як процес загального типу, який послідовно використовує ряд значень, що включають і нульові. В даному випадку розрахунок еквівалентних величин проводиться статистичними формулами без урахування відносної тривалості включення. Даний метод може бути застосований як для повторно-короткочасного випадкового процесу, так і для переміжного. Якщо паузи в роботі електропривода виражені конкретними значеннями, то для такого режиму розраховують функцію навантаження у вигляді безперервної реалізації без пауз.

Потужність двигуна, яка витрачається на поглиблення свердловини, складається з трьох складових: потужності, яка витрачається на руйнування породи на вибої $P_{виб}$, потужності обертання бурильної колони $P_{об}$, потужності втрат у механічних вузлах бурового верстата $P_{м}$. Потужність, яка витрачається при роботі породоруйнівного інструменту, залежить від багатьох різноманітних чинників. Для визначення цієї потужності рекомендуються різні алгоритми [3]. Використовуючи дані алгоритми, нами проведено розрахунки витрат потужності на вибої $P_{виб}$ буровою установкою УКБ-5П при бурінні свердловини глибиною до 800м алмазними, твердосплавними коронками і шарошковими долотами діаметром 59-мм. Під час розрахунку задавались осьовим навантаженням $F=10\text{kN}$ при частоті обертання $n=1500\text{хв}^{-1}$. В результаті розрахунків отримано такі результати:

- при бурінні твердосплавними коронками $P_{\text{виб.тв}} = 20$ кВт;
- при бурінні алмазними коронками $P_{\text{виб.алм}} = 14.1$ кВт;
- при безкерновому бурінні $P_{\text{виб.бк}} = 35.4$ кВт;
- при шарошковому бурінні $P_{\text{виб.ш}} = 8.85$ кВт.

Висвітлення невирішених проблем. Потужність на обертання колони бурильних труб у свердловині $P_{\text{виб}}$ становить значну частку витрат потужності на буріння свердловини, причому вона складається з двох складових: $P_{\text{виб.х}}$ – потужності на неробоче обертання колони бурильних труб у свердловині та $P_{\text{виб.д}}$ – додаткової потужності, яка витрачається на обертання стисненої частини бурильної колони, якою створюється осьове навантаження на породоруйнівний інструмент, тобто:

$$P_{\text{виб}} = P_{\text{виб.х}} + P_{\text{виб.д}} \quad (1)$$

Визначимо додаткову потужність з виразу [6]:

$$P_{\text{виб.д}} = 2,45 \cdot 10^{-4} \delta \cdot F \cdot n \quad (2)$$

де δ – радіальний проміжок між трубами, м; $\delta = (D - d_T) / 2$, D – діаметр свердловини, м; d_T – зовнішній діаметр бурильних труб, м; F – осьове навантаження на породоруйнівний інструмент, Н; n – частота обертання бурильної колони, хв^{-1} .

Підставивши числові значення, одержимо $P_{\text{виб.д}} = 1,8$ кВт. Отримане значення додаткової потужності, яка витрачається на обертання стисненої частини бурильної колони при створенні осьового навантаження на породоруйнівний інструмент, є безумовно заниженим. Для визначення залежності потужності, яка витрачається на неробоче обертання бурильної колони, від глибини свердловини

$$P_{\text{х.об}} = a + bH \quad (3)$$

де $P_{\text{х.об}}$ – потужність, що затрачається на холосте обертання бурильної колони;

H – глибина свердловини.

Нами проведено експериментальні дослідження на свердловині розвідувального буріння.

Глибина свердловини склала $H = 565$ м. Середня потужність на неробоче обертання бурильної колони визначалася через кожні 14 м проходки. В результаті розрахунку отримано наступний вираз потужності:

$$P_{\text{х.об}} = 4,14 + 9,07 \cdot 10^{-4} H \quad (4)$$

Оцінюючи отриману залежність (4), можна зробити висновок, що за досліджуваних умов потужність на неробоче обертання бурильної колони мало залежить від глибини свердловини і в досить широкому інтервалі глибин залишається практично незмінною. Нами було зроблено припущення, що від глибини свердловини залежить додаткова потужність $P_{\text{виб.д}}$, хоча в формулах ряду авторів [4] для визначення потужності на руйнування вибою та додаткової потужності глибина свердловини не враховується. На діаграмах запису витрат потужності при проходці свердловини спостерігалося зрос-

тання потужності в міру збільшення глибини свердловини.

Формулювання цілей статті. Для встановлення значущості цієї залежності нами розроблено програму та проведено відповідні розрахунки, в результаті яких отримано таке рівняння лінійної регресії:

$$P_{\Sigma} = 9,57 + 1,66 \cdot 10^{-2} H \quad (5)$$

Значення коефіцієнта лінійної кореляції між потужністю і глибиною свердловини склало 0,9, що підтвердило безпосередній зв'язок між ними. Таким чином, проведені дослідження дали підставу для висновку, що додаткова потужність, яка визначається з виразу

$$P_{\text{виб.д}} = P_{\Sigma} - (P_{\text{виб.х}} + P_{\text{виб.д}}) \quad (6)$$

залежить не тільки від додаткового осьового навантаження на вибій, а й від глибини свердловини. Цю залежність можна пояснити тим, що зі збільшенням глибини проявляється ряд додаткових факторів впливу, а саме: сили тертя бурильної колони до стінок свердловини під дією відцентрових сил, вібрації бурильної колони, внутрішнє тертя труб та їх з'єднань, (тобто втрати енергії деформації), а також ударні навантаження бурильних труб до стінок свердловини.

При розробці регульованих електроприводів одним з найважливіших завдань є вибір асинхронного двигуна. Від того, наскільки правильно він буде вибраний, залежать техніко-економічні показники як самого двигуна, так і привода загалом. Попри значні досягнення в розвитку регульованих асинхронних електроприводів, відсутні чіткі рекомендації щодо вибору двигунів для них. Це пов'язано зі значними труднощами, що виникають при формалізації процесу вибору загальнопромислових двигунів для роботи в складі регульованого привода. Вибір залежить від типу, розміру та режиму роботи навантажувального механізму привода, необхідного діапазону регулювання, типу напівпровідникових перетворювачів, виду регулювання та закону частотного керування, застосовуваного в ньому. Застосування регульованих асинхронних двигунів, спроектованих з урахуванням специфіки їх роботи в умовах регульованого електропривода, замість загальнопромислових асинхронних двигунів, дає можливість значно зменшити масу, габарити і вартість електроприводів, поліпшити їхні функціональні показники. Якщо оптимально спроектувати двигун для частотного регулювання, можна отримати на 25% більшу потужність, ніж у загальнопромислових двигунів того ж габариту, або зменшити їх об'єм за тієї ж потужності. Однак створити універсальний, придатний для всіх випадків регульований двигун неможливо. Оптимальним він може бути тільки для кожного конкретного типу перетворювача, виду регулювання, способу керування, закону частотного регулювання, діапазону регулювання частоти обертання, характеру і величини навантаження. Удосконалення технологічних

процесів та автоматизація виробництва пов'язані із застосуванням регульованого електропривода. Застосування регульованого електропривода сприяє вирішенню завдань щодо забезпечення оптимальних режимів роботи механізмів, підвищення ефективності використання енергії, надійності та терміну служби обладнання.

Вибір раціонального типу електропривода для конкретної технологічної установки і переході від нерегульованого електропривода до регульованого передбачає виконання таких операцій:

- аналіз технологічного процесу, умов експлуатації та розробка технічних вимог до електропривода;
- вибір перспективних варіантів систем електроприводів, їх техніко-економічне порівняння і вибір раціонального типу електропривода;
- розрахунок системи електропривода, у тому числі встановленої потужності, та розробку системи керування;
- розробку конструкторської документації.

Регульований електропривод під час роботи впливає на мережу електропостачання, що виражається в зниженні коефіцієнта потужності на вході перетворювача, коливаннях напруги в мережі та спотворенні синусоїдальної форми напруги. Зниження коефіцієнта потужності збільшує реактивну потужність системи електропостачання, що призводить до додаткових втрат напруги та енергії і вимагає збільшення пропускної здатності її елементів.

Аналітичне дослідження реакції електродвигуна головного привода на описані збурення в навантаженні є досить складним завданням. Асинхронний двигун (АД) є сукупністю складних тривимірних електричних і магнітних ланцюгів, що містять ділянки з різними магнітними проникностями. Найбільш простим є опис АД як неявнополюсної машини з симетричними обмотками і лінійними електромагнітними зв'язками. Наступними за рівнем складності є математичні моделі, що враховують нелінійність електромагнітних зв'язків. При цьому враховується тільки перша гармонічна складова коефіцієнтів індуктивностей обмоток. Такі моделі є найбільш використовуваними при дослідженні асинхронних електроприводів.

Основними припущеннями при отриманні математичних моделей АД є:

- нехтування втратами в сталі та вихровими потоками;
- симетричність обмоток статора і ротора;
- синусоїдальний розподіл магнітних полів навколо повітряного зазору;
- взаємна незалежність насичення шляхом основного магнітного потоку і шляхами розсіювання.

Привод бурової установки має забезпечувати її роботу в усіх нормальних і ускладнених режимах буріння та виконання допоміжних операцій при оптимальній витраті потужності. Як привод для установок розвідувального буріння застосовуються в основному електродвигуни. На даний час в якості електродвигунів

головного привода використовуються асинхронні електродвигуни змінного струму з короткозамкненим ротором, а також двигуни постійного струму, за допомогою яких реалізується плавна зміна частоти обертання породоруйнівного інструменту. Прогрес в області напівпровідникової техніки, зокрема використання тиристорних перетворювачів і напівпровідникових систем керування, дають змогу не лише поліпшити техніко-економічні показники існуючих систем керування на електроприводах постійного струму, що застосовуються в розвідувальному бурінні, але і дає можливість застосувати принципи керування, які раніше були економічно невиправдані або технічно неможливі. Це стосується, в першу чергу, електроприводів змінного струму, в яких здійснення нових алгоритмів керування двигуном дозволяє створити більш надійні системи з покращеними статичними і динамічними характеристиками.

Електропривод є основним засобом автоматизації сучасних виробничих технологічних процесів. Автоматизований електропривод може входити складовою частиною в більш складну автоматичну систему керування процесом. Така система обробляє інформацію про хід технологічного процесу згідно заданих алгоритмів і видає параметри керування електроприводом. У простому випадку алгоритм забезпечує автоматичний пуск або зупинку електродвигунів, у більш складних – оптимальне керування ними протягом усього процесу. Автоматизована система керування технологічним процесом (АСК ТП) буріння висуває підвищені вимоги до обсягу і якості інформації про параметри електропривода, а також до форми її передачі. Водночас створення АСК ТП дозволяє виявити також нові можливості електроприводів: динамічну адаптацію систем керування приводом до змінюваних технологічних параметрів, оптимізацію більш широкого кола параметрів.

Ступенева зміна частоти обертання і швидкості підймання снаряда є істотним недоліком бурових установок. Для підвищення ефективності їх роботи необхідно забезпечити плавну зміну частоти обертання. Застосування на бурових установках плавно регульованих електроприводів основних механізмів дозволяє забезпечити оптимальні параметри режиму в межах, обмежених технічними можливостями обладнання. Електроприводи головних механізмів бурової установки є найбільш зручними виконавчими елементами систем оперативного керування. При цьому стає можливим вирішення якісно нового завдання – комплексної автоматизації технологічних процесів буріння на основі вибраного критерію.

Для визначення оптимальних режимів буріння рекомендується контролювати такі технологічні та енергетичні параметри процесу [7, 8, 9]:

- момент обертання на буровому валу;
- осьове навантаження;
- поточний час буріння;
- частоту обертання бурового вала;
- механічну швидкість проходки;

- витрату промивального агента;
- потужність, затрачену на буріння;
- питому витрату енергії;
- прохідку за рейс;
- час роботи породоруйнівного інструменту на вибої.

При цьому обертаючий момент оцінюється як одна з головних характеристик вибійного процесу, що визначає технологічні показники буріння та основні режимні параметри привода [2, 10].

На підставі дослідних даних буріння електробуром авторами встановлено [11], що між обертовим моментом і осьовим навантаженням на долоті існує прямолінійна залежність. Таким чином, оперативне керування процесом буріння свердловин можна здійснювати, контролюючи і підтримуючи обертаючий момент у певних межах, що відповідають заданим значенням осьового навантаження. Оптимальне керування процесом буріння може бути здійснено оперативною зміною осьового навантаження на долото, частоти обертання і швидкості подачі долота, витрат промивальної рідини при заданому тиску. Названі параметри визначаються режимом роботи основних виконавчих механізмів – роторного стола, бурових насосів і пристрою подачі долота на вибій, а можливість їх зміни відповідно до оптимальної програми буріння визначається регульовальними властивостями приводів.

Комплексна механізація та автоматизація технологічних процесів буріння свердловин обумовлюють вдосконалення виконавчих механізмів, зокрема електропривода обертання верстата, а також методів і засобів отримання інформації про властивості та стан буримих гірських порід. Потужність електропривода бурового верстата зумовлюється двома основними складовими технологічного процесу: поглибленням свердловини і спуско-підймальними операціями. Більшість дослідників вважають, що визначальними для вибору необхідної потужності електропривода є витрати потужності на поглиблення свердловини. Удосконаленням бурового устаткування є впровадження регульованого електропривода. Регульований електропривод дає можливість встановлювати найбільш ефективні режими технологічного бурового процесу в залежності від гірничо-технічних умов проходки свердловини і оперативних їх коригувати. Електропривод бурових верстатів є електромеханічною системою, призначеною для приведення в рух виконавчих органів робочого механізму і керування цим рухом у ході технологічного процесу. Електропривод складається із взаємодіючих електричних, електромеханічних та механічних перетворювачів, керуючих та інформаційних пристроїв, а також пристроїв з'єднання із зовнішніми електричними, механічними, керівними та інформаційними системами. В буровому технологічному процесі така сукупність утворює електротехнічні комплекси.

Випадковий характер навантаження зумовлюється неоднорідністю гірської породи та її

станом, глибиною буріння, станом породоруйнівного інструменту і характером руйнування породи, технологічним режимом проходки свердловини. Випадкові фактори, що діють на породоруйнівний інструмент, стають причиною того, що режим роботи електропривода також є випадковим. Стають актуальними ймовірнісні дослідження електропривода механізмів і машин, навантаження яких підпадають під випадковий вплив. Дана проблема вкрай актуальна для електроприводів бурових комплексів як розвідувального, так і нафтогазового буріння.

Динаміка роботи електропривода визначається коливальними властивостями бурильної колони, зміною режиму руйнування породи, а також динамічними властивостями електродвигуна. За відсутності збурень на вибої бурильний інструмент схильний до низькочастотних коливань, які обумовлені хвилюваними процесами в колоні [12]. При цьому аналогічним способом змінюються електричні параметри привода бурового верстата [13]. Значні збурення моменту опору на бурильному валу при руйнуванні неоднорідної за властивостями і станом гірської породи призводить до коливань електромеханічної системи "електропривод - верстат - бурильна колона". Можливість регулювання частоти обертання бурильного вала та оперативної оцінки рівня і характеру зміни моменту опору буримої породи дозволяє коригувати режимні параметри з метою підвищення надійності роботи бурильного інструменту, електропривода верстата, а також попередження аварій та підвищення ефективності буріння.

Ступенева зміна частоти обертання і швидкості підймання бурильного інструменту є дуже істотним недоліком вище перелічених бурових установок. Для сучасної технології буріння характерна тенденція до збільшення верхньої межі частоти обертання, що необхідно для підвищення ефективності алмазного буріння [2]. Тому стає актуальною проблема розробки і впровадження високонадійного асинхронного електропривода бурових верстатів з широким діапазоном регулювання частоти його обертання. Регулювання частоти обертання електродвигуна визначається відповідно до вимог технологічного процесу проходки свердловини і динамічних характеристик бурильної колони. При цьому електропривод характеризується такими показниками:

- діапазоном регулювання, який визначає межу зміни частоти обертання як відношення максимальної частоти обертання до його мінімальної частоти обертання;
- плавністю регулювання, яка характеризується мінімальною зміною частоти обертання двигуна при переході з однієї механічної характеристики на іншу;
- напрямком можливої зміни частоти обертання двигуна (зоною регулювання);
- економічністю регулювання, яка визначається за додатковими капітальними витратами, необхідними при створенні регульовальних пристроїв, а також за втратами електроенергії при регулюванні;

• допустимими навантаженнями двигуна при його роботі на регульованих характеристиках, які оцінюються допустимим нагріванням двигуна і визначаються механічними характеристиками верстата і бурильної колоні.

Обертаючий момент бурового інструменту є одним з основних технологічних параметрів процесу буріння [7, 14, 15]. Він дає оцінку показників ефективності буріння і визначає основні вимоги щодо привода бурових установок. При бурінні свердловин у тріщинуватих породах виникають значні коливання моменту опору бурового валу з боку буримої породи. Ці коливання можуть перевищувати допустимі межі [1]. Тому контроль обертаючого моменту є необхідною умовою запобігання аварійним ситуаціям при проходці свердловин. Обертаючий момент може бути обраний також як інформативна ознака при визначенні показників тріщинуватості гірських порід.

У даний час в якості приводних двигунів бурових установок в основному використовуються асинхронні електродвигуни, в яких між обертовим моментом двигуна електропривода і активною потужністю на валу P_{Σ} існує функціональна залежність:

$$M_{об} = \frac{P_{\Sigma}}{n_c(1-s)}, \quad (7)$$

де $M_{об}$ – обертаючий момент, кН·м;
 n_c – синхронна частота обертання, с⁻¹;
 P_{Σ} – потужність на валу, кВт;
 s – ковзання електродвигуна, відн. од.

Таким чином, обертаючий момент на валу електродвигуна можна виміряти непрямим методом за величиною споживаної активної потужності. Для визначення вимірюваної величини обертаючого моменту активну потужність, споживану електродвигуном з мережі, подамо у вигляді [14, 16]:

$$P_{\Sigma} = P_{виб} + \Delta P_{cn} + \Delta P_{\kappa} + \Delta P_{\delta\epsilon}, \quad (8)$$

де $P_{виб}$ – потужність, що затрачається на руйнування вибою, кВт;

ΔP_{cn} – витрати потужності в струмопідводі, кВт;

ΔP_{κ} – витрати потужності на неробоче обертання бурової колоні (або в шпинделі електрорура), кВт;

$\Delta P_{\delta\epsilon}$ – втрати потужності в електродвигуні, кВт.

З урахуванням виразу (8), обертаючий момент на руйнування породи можна подати у вигляді:

$$M_{об} = \frac{(P_{\Sigma} - P_{\kappa} - \Delta P_{ТП} - \Delta P_{\delta\epsilon}) \cdot 9,55}{n_c(1-s)}. \quad (9)$$

При цьому відносна методична похибка вимірювання обертаючого моменту залежить від збільшення втрат у струмопідводі, електродвигуні, втрат на обертання бурової колоні, величини ковзання електродвигуна привода бурової установки і визначається за формулою [14]:

$$\gamma = \left(\frac{(P_{\Sigma} - P_{\kappa} - \Delta P_{ТП} - \Delta P_{\delta\epsilon}) \cdot (1-s)}{P_{виб}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (10)$$

Підвищення точності вимірювання обертаючого моменту електродвигуна досягається за рахунок обліку зміни втрат потужності холостого ходу при зміні навантаження на його валу, а отже, і частоти обертання.

Втрати потужності холостого ходу асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором складаються з механічних втрат, основних і додаткових втрат у сталі, обумовлених зубчатістю сердечника статора і ротора:

$$P_{xx} = P_{mx} + P_{CT} + P_{\delta}. \quad (11)$$

Механічні втрати асинхронного двигуна складаються із втрат на тертя в підшипниках P_n і вентиляційних втрат. Втрати в підшипниках рівні [8]:

$$P_n = \frac{26}{\gamma_m} d_n l_n v_n^{1,5}, \quad (12)$$

де v_n – окружна швидкість шийки вала, м/с;
 d_n, l_n – діаметр і довжина шийки вала, м;
 γ_m – температура мастила (оливи), °С.

Вентиляційні втрати:

$$P_e = 1,5 \cdot V \cdot v^2, \quad (13)$$

де V – кількість повітря, що проганяється вентилятором через машину, м³;
 v – колова швидкість вентиляційних крил за їх зовнішнім діаметром, м/с.

Основні втрати в сталі виникають у зубцях та ярмі статора асинхронних машин:

$$P_{CT} = P_{CC} + P_{CZ}, \quad (14)$$

де втрати в сталі ярма статора асинхронного двигуна:

$$P_{CC} = \kappa_{\delta} \cdot \Delta P \cdot B_C^2 \cdot G_C \cdot 10^{-8}. \quad (15)$$

Тут κ_{δ} – коефіцієнт, що враховує дефекти при обробці і нерівномірність розподілу індукції в магнітопроводі; ΔP – питомі втрати в сталі, Вт; B_C індукція в ярмі статора, Тл; G_C – вага ярма статора, кг.

Втрати в сталі зубців статора асинхронного двигуна:

$$P_{CZ} = \kappa_{\delta} \cdot \Delta P \cdot B_Z^2 \cdot G_Z \cdot 10^{-8}, \quad (16)$$

де G_Z – маса зубців статора, кг.

Основні втрати в сталі складаються із втрат від гістерезису і вихрових струмів. Втрати від гістерезису пропорційні першому ступеню частоти зміни індукції (частоти перемагнічування) f_1 , і квадрату максимального значення індукції B_m . Втрати від вихрових струмів при рівномірному розподілі індукції перетином листа пропорційні $(\delta f B)^2$, де δ – товщина листа, м. Крім того, вони залежать від форми кривої основного поля.

Додаткові втрати P_{δ} при обертанні двигуна виникають в обмотках і сталі машини та обумовлені зубчатістю статора і ротора і несинусоїдним розподілом намагнічувальної сили в повітряному зазорі машини. З достатнім ступенем точності можна вважати, що додаткові втрати в сталі змінюються пропорційно квадрату напруги, а додаткові втрати в міді змінюються пропорційно квадрату струму і враховуються при визначенні втрат у міді статора.

Потужність, що підводиться до електродвигуна при навантаженні, складає:

$$P_1 = k \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (17)$$

де U – напруга ланцюга живлення електродвигуна, В;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності;

I – струм у ланцюзі живлення, А.

Цю ж потужність, за відсутності механічних втрат, можна визначити за формулою:

$$P_1' = k \cdot U \cdot I' \cdot \cos \varphi, \quad (18)$$

де I' – струм у ланцюзі двигуна при навантаженні та відсутності механічних втрат.

Тоді механічні втрати:

$$P_M = P_1 - P_1' = k \cdot U \cdot \cos \varphi (I - I'). \quad (19)$$

З (19) видно, що механічні втрати функціонально пов'язані зі зміною струму в ланцюзі живлення. Покажемо, що зі збільшенням навантаження і зниженням частоти обертання вала електродвигуна, механічні втрати зменшуються. Механічні втрати при холостому ході електродвигуна:

$$P_{mx} = P_{nx} + P_{ex}. \quad (20)$$

Механічні втрати при навантаженні:

$$P_{mn} = P_{nn} + P_{vn}. \quad (21)$$

Підставивши в (20), (21) P_n і P_e згідно (12), (13), визначимо зміну механічних втрат при зміні навантаження на валу:

$$\begin{aligned} \Delta P_M &= P_{mx} - P_{mn} = (P_{mx} + P_{ex}) - (P_{nn} + P_{vn}) = \\ &= (P_{ex} - P_{vn}) + (P_{nx} - P_{nn}) = \\ &= 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot (v_x^2 - v_n^2) + \\ &+ 0,52 \cdot 10^{-3} \cdot d_n \cdot l_n \cdot (v_{nx}^{1,5} - v_{nn}^{1,5}) = \\ &= 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot d_n \cdot V (n_x^2 - n_n^2) + \\ &+ 0,52 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot d_n^2 \cdot l_n \cdot (n_x^{1,5} - n_n^{1,5}), \end{aligned} \quad (22)$$

де d_n – зовнішній діаметр вентиляційних крил, м;

n_x – частота обертання холостого ходу, c^{-1} ;

n_n – номінальна частота обертання електродвигуна, c^{-1} .

При номінальному навантаженні ковзання електробурів досягає 10...12% [8]. Тоді механічні втрати, що визначаються виразом (22), зменшуються за рахунок вентиляційної складової на 19...22% і за рахунок складової втрат у підшипниках на 14...16%. Проведений аналіз вказав на принципову можливість розробки структурних схем пристроїв для контролю обертаючого моменту електропривода бурових установок підвищеної точності. На основі результатів аналізу авторами розроблена структурна схема пристрою для вимірювання обертаючого моменту електропривода на руйнування вибою [14].

Застосування регульованого привода бурових верстатів є перспективним напрямком якісної зміни в проведенні пошукових геологорозвідувальних робіт. Це уможливує проходку свердловин в оптимальних режимах, що забезпечує отримання більш якісної геологічної інформації про гірський масив. Найбільш пер-

спективним напрямком розробки регульованого привода бурових верстатів є привод «тиристорний перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ТПЧ-АД). При цьому стає актуальним вибір принципу побудови системи регулювання. На наш погляд, при розробці регульованого асинхронного електропривода доцільно використовувати принцип підлеглого регулювання з послідовною корекцією [17]. Використання даного принципу в електроприводах бурових установок може забезпечити режим проходки свердловин при усталених енерговитратах, здійснюючи безпосереднє регулювання тільки осьового навантаження. При цьому буде забезпечуватися автоматична корекція швидкості обертання породоруйнівного інструменту. Суть принципу полягає в наступному. Для кожної регульованої координати утворюється свій замкнений контур регулювання, який охоплює об'єкт регулювання і спеціальний регулятор, що забезпечує необхідну якість регулювання даної координати. На вході кожного регулятора порівнюється задане і фактичне значення регульованої координати, а вихідний сигнал регулятора при цьому є заданим сигналом для наступного (внутрішнього) контуру. Оптимізацію контурів здійснюють незалежно, починаючи з внутрішнього. Обмеження будь-якої координати здійснюється обмеженням його заданого значення. Необхідна якість регулювання забезпечується в кожному контурі окремо.

Крім технологічного процесу проходки свердловини, який зумовлює випадкові навантаження на електропривод, у циклі роботи бурового верстата значну частку складають спуско-підймальні операції, при яких переважаючим фактором є глибина свердловини. При спуско-підймальних операціях характер навантаження також є випадковим зі змінним середнім значенням. Це ще більше ускладнює як розрахунки навантажень, так і вибір приводних електродвигунів. Таким чином, процес навантаження електропривода бурового верстата має циклічний характер і є нестационарним у зв'язку з неперервною зміною глибини свердловини.

Для визначення потужності електродвигуна на підймання бурильної колони використовуємо наступну формулу [6]:

$$P_n = \frac{G_k \cdot v_k}{\eta \cdot \lambda}, \quad (23)$$

де G_k – навантаження на гак, Н;

v_k – швидкість підймання гака, м/с;

η – коефіцієнт корисної дії (ККД) передачі від електродвигуна до гака;

λ – коефіцієнт перевантаження двигуна; $\lambda=1,5...2,0$.

Розрахуємо навантаження на бурильний верстат СКБ-5 при бурінні на глибину 800-м трубами СБТН-54 при довжині свічки 14-м. Промивання свердловини здійснюється водою. Підйомна здатність лебідки $F_n = 35,0$ кН; Маса 1м бурильної труби $q_0=6,48$ кг/м. Швидкість навівки каната на барабан лебідки: на першій передачі $v_1=0,81$ м/с; на другій – $v_2=1,73$ м/с; на третій – $v_3=2,71$ м/с; на четвертій – $v_4=3,61$ м/с.

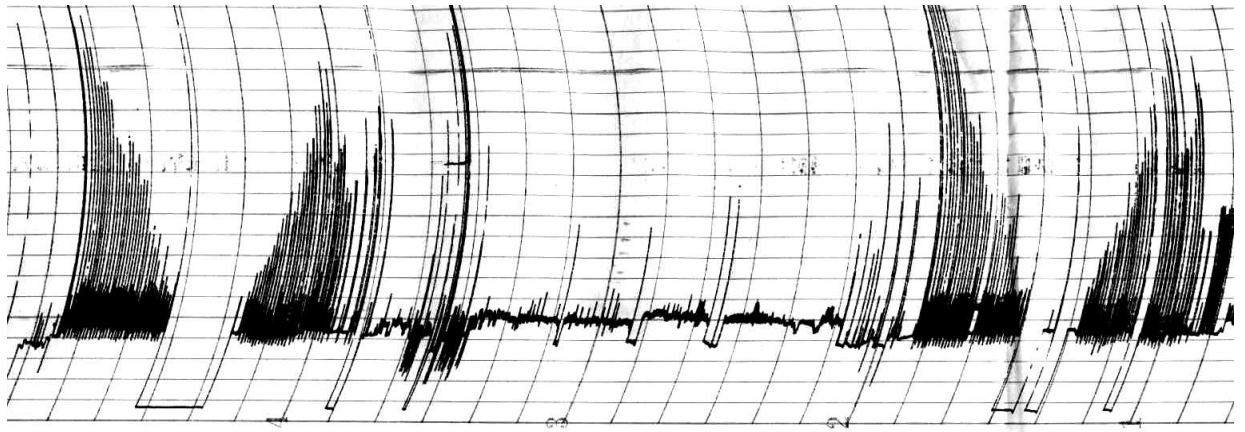


Рисунок 2 – Діаграма запису потужності електродвигуна бурового верстата при спуско-підймальних операціях

Діаграма запису потужності бурового верстата СКБ-5 при спуско-підймальних операціях наведена на рисунку 2.

Для визначення раціонального режиму підймання бурильної колони розраховуємо довжину колони, яка може бути піднята при різних частотах обертання барабана лебідки за такою формулою [6]:

$$L_i = \frac{P \cdot \eta}{q_0 \cdot v_{zi}}, \quad (24)$$

де P – номінальна потужність електродвигуна, Вт;

q_0 – навантаження на гаку 1м труби, яка піднімається, Н/м.

З використанням наведеної формули розраховуємо довжину колони, яку можна підняти на кожній швидкості обертання лебідки. Довжина колони, яку можна підняти:

на першій передачі – $l_1 = L_1 - L_2$;

$$n_{св1} = l_1 / l_{св};$$

на другій передачі – $l_2 = L_2 - L_3$;

$$n_{св2} = l_2 / l_{св};$$

на третій передачі – $l_3 = L_3 - L_4$;

$$n_{св3} = l_3 / l_{св};$$

на четвертій передачі – $l_4 = L_4$;

$$n_{св4} = l_4 / l_{св}.$$

Максимальна швидкість підймання при довжині свічки $l_{св} \geq 4,7$ м становить 2 м/с.

Навантаження на гак при підйманні бурильних труб із свердловини визначимо з виразу [6]:

$$G = k g L q (1 - \rho / \rho_m), \quad (25)$$

де $k=1,2$ – коефіцієнт, який враховує наявність викривлених ділянок свердловини;

$$g=9,81 \text{ м/с}^2;$$

L – довжина колони бурильних труб, м;

$q=6,48$ кг/м, маса 1 м колони бурильних труб;

ρ – щільність промивальної рідини для води $\rho=1000$ кг/м³;

ρ_m – щільність для матеріалу труб, $\rho_m=7850$ кг/м³.

$$G = 1.2 (9.81 (800 (6.48 (1-1000/7850) = 53250 \text{ Н} = 53,25 \text{ кН}.$$

Для вибору кількості рухомих витків канату талевої системи використовуємо наступне співвідношення:

$$m = \frac{G}{F_n \cdot \eta_c} = \frac{53,25}{35,0 \cdot 0,97} = 1,57 \approx 2, \quad (26)$$

$$\text{де } \eta_c = \frac{\eta(1-\eta^m)}{m(1-\eta)} = \frac{0,98 \cdot (1-0,98^2)}{2 \cdot (1-0,98)} = 0,9$$

$\eta=0,93$ – коефіцієнт корисної дії (ККД) одного шків в талевих блоках;

$F_n=35,0$ кН – вантажопідймальність лебідки.

Розрахуємо раціональний режим підймання бурильної колони зі свердловини. Для цього розрахуємо довжину колони, яка може бути піднята на різних передачах лебідки. Визначимо навантаження на гаку від 1м труби q_0 [6]:

$$q_0 = \frac{G}{L} = \frac{53250}{800} = 66,6 \text{ Н/м}.$$

Швидкість підймання гака:

$$v_k = \frac{v_i}{m}. \quad (27)$$

Довжина бурового снаряда, який може бути піднятий за різних частот обертання барабана лебідки:

$$L_i = \frac{P \cdot \eta \cdot \eta_c}{q_0 v_{ki}}, \quad (28)$$

де P – номінальна потужність двигуна, Вт
Підставивши числові значення величин, отримаємо:

на першій передачі

$$P_1 = 19,8 \text{ кВт} \quad W_A^1 = 4,95 \text{ кВт-год};$$

на другій передачі

$$P_2 = 24,4 \text{ кВт} \quad W_A^2 = 1,21 \text{ кВт-год};$$

на третій передачі

$$P_3 = 26,1 \text{ кВт} \quad W_A^3 = 0,38 \text{ кВт-год};$$

на четвертій передачі

$$P_4 = 15,0 \text{ кВт} \quad W_A^4 = 0,48 \text{ кВт-год}.$$

Споживана активна енергія при нерегульованому електроприводі:

$$W_A = W_A^1 + W_A^2 + W_A^3 + W_A^4 = 7,02 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Повна потужність двигуна:

$$S_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\cos \varphi_n} = \frac{30,0}{0,84} = 35,7 \text{ кВА.} \quad (29)$$

Реактивна потужність:

$$Q_{\text{дв}} = \sqrt{S_{\text{дв}}^2 - P_{\text{дв}}^2} = \sqrt{35,7^2 - 30^2} = 19,4 \text{ кВАр.} \quad (30)$$

Споживана реактивна енергія при нерегульованому електроприводі:

$$W_p = \frac{19,4 * 1245}{3600} = 6,71 \text{ кВАр}\cdot\text{год.}$$

Коефіцієнт потужності при нерегульованому електроприводі:

$$\cos \varphi = \frac{W_A^2}{\sqrt{W_A^2 + W_p^2}} = \frac{7,02}{\sqrt{7,02^2 + 6,71^2}} = 0,72. \quad (31)$$

При використанні регульованого електропривода споживана активна енергія:

$$W_A^p = 6,59 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Споживана реактивна енергія при регульованому електроприводі:

$$W_p^p = \frac{19,4 * 791}{3600} = 4,26 \text{ кВАр}\cdot\text{год.}$$

Коефіцієнт потужності при регульованому електроприводі:

$$\cos \varphi_p = \frac{W_A^p}{\sqrt{W_A^p^2 + W_p^p^2}} = \frac{6,59}{\sqrt{6,59^2 + 4,26^2}} = 0,84. \quad (32)$$

Висновки

1. Установлено, що додаткова потужність, яка витрачається на холосте обертання колони бурильних труб, залежить не тільки від величини прикладеного осьового навантаження на вибій, а й від глибини свердловини.

2. В результаті проведених розрахунків визначено, що при використанні регульованого електропривода зменшується споживання активної електроенергії (6,1%), реактивної енергії (36,5%), при цьому коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ підвищується від 0,72 до 0,84.

Перспективи подальшої роботи. З метою підвищення ефективності проходки свердловини, особливо в тріщинуватих породах, доцільно проводити дослідження при використанні плавно регульованого електропривода.

Література

1 Козловский Е.А. Оптимизация процесса разведочного бурения / Е.А. Козловский. – М.: Недра, 1975. – 303 с.

2 Козловский Е.А. Кибернетические системы в разведочном бурении / Е.А. Козловский, М.А. Комаров, В.М. Питерский. – М.: Недра, 1985. – 285 с.

3 Методические рекомендации по использованию диаграмм затрат мощности для регулирования процесса алмазного бурения / О.И. Шерстюк, Н.Н. Михеев, Г.А. Блинов. – Л.: ВИТР, 1984. – 46 с.

4 Калинин А.Г. Разведочное бурение / А.Г. Калинин, О.В. Ошкордин, В.М. Питерский, Н.В. Соловьев. – М.: ООО Недра-Бизнес-центр, 2000. – 748 с.

5 Пономарев П.П. Алмазное бурение трещиноватых пород / П.П. Пономарев. – Л.: Недра, 1985. – 144 с.

6 Михайлова Н.Д. Техническое проектирование колонкового бурения / Н.Д. Михайлова. – М.: Недра, 1985. – 200 с.

7 Козловский Е.А. Автоматизация процесса геологоразведочного бурения / Е.А. Козловский, Р.Х. Гафиятуллин. – М.: Недра, 1977. – 215 с.

8 Фоменко Ф.Н. Бурение скважин электробуром / Ф.Н. Фоменко. – М.: Недра, 1974. – 272 с.

9 Чефранов К.А. Регулирование процесса бурения / К.А. Чефранов. – М.: Недра, 1992. – 60 с.

10 А. с. №1198277. Устройство для определения границ залегания горных пород различной буримости и износа алмазной коронки / Е.А. Козловский, М.А. Комаров, В.М. Питерский, Е.И. Павлов, А.А. Сотников. – Бюл. №26 от 15.07.1984.

11 Шаповал А.А. Научное обоснование использования технических средств контроля для автоматизации и оптимизации бурения разведочных скважин: монография / А.А. Шаповал. – Ивано-Франковск, 2011. – 304 с.

12 Керимов З.Г. Динамические расчеты бурильной колонны / З.Г. Керимов. – М.: Недра, 1970. – 160 с.

13 Особенности контроля и управления процессом бурения в трещиноватых горных породах / А.А. Шаповал, Т.И. Биншток, В.Ф. Закрытый // Техника и технология геологоразведочных работ; организация производства. – 1984. – Вып. 8. – С.15–24.

14 А. с. № 717573. Устройство для измерения крутящего момента на роторе буровой установки / Семенов Г.Н., Шаповал А.А. – Бюл. № 7 от 25.02.80.

15 А. с. № 739219. Система автоматического управления процессом механического бурения / В.А. Флянтиков, В.А. Бабышин, А.Г. Кудрявцев. – Бюл. №21 от 24.08.80.

16 Бражников В.А. Информационное обеспечение оптимального управления бурением скважин / В.А. Бражников, А.Н. Фурнэ. – М.: Недра, 1989. – 202 с.

17 Ильинский Н.Ф. Автоматизированный электропривод / Н.Ф. Ильинский, М.Г. Юньков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
05.09.12

Рекомендована до друку професором
В.С. Костишиним