Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Модернізація електромеханічного обладнання бурового верстату
Першотравневого кар'єру ПрАТ «ПІВНГЗК»

Здобувач групи ЕЕМ-22-2 _____ Артем ШЕВЧЕНКО

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг
2026

Криворізький національний університет

Факультет: *електротехнічний*

Освітній рівень: *бакалавр*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Шевченка Артема Дмитровича

1. Тема роботи: Модернізація електромеханічного обладнання бурового верстату Першотравневого кар'єру ПрАТ «ПІВНГЗК»

2. Строк подання здобувачем роботи: 10 червня 2026 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: модернізація електромеханічного обладнання обертального механізму долота бурового верстата за рахунок заміни електропривода постійного струму на змінний із впровадженням ПЧ-АД з системою стабілізації швидкості буріння

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити): характеристика електромеханічного обладнання бурового верстату СБШ-250МНА, у тому числі обертального механізму; прорахунок статичних і динамічних характеристик електроприводу обертального механізму бурового верстату; створення системи керування швидкістю обертального механізму СБШ-250МНА на базі частотно-регульованого електропривода

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): буровий станок СБШ-250МНА; характеристики М3ВР 250SMC 4: механічна, електромеханічна; статичні характеристики М3ВР 250SMC 4 у системі ПЧ-АД; динамічні характеристики М3ВР 250SMC 4 у системі ПЧ-АД; схема підключення ПЧ ABB ACS580-01-169A-4 до АД механізму обертання

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олександр ІЛЬЧЕНКО		
II	Олександр ІЛЬЧЕНКО		
III	Олександр ІЛЬЧЕНКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Загальна частина	18.05.26–24.05.26
2	Спеціальна частина	25.05.26–30.05.26
3	Проєктна розробка	31.05.26–31.05.26
4	Оформлення пояснювальної записки	01.06.26–07.06.26
5	Оформлення презентації	08.06.26–15.06.26

Дата видачі завдання: 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Артем ШЕВЧЕНКО

Керівник роботи _____ Олександр ІЛЬЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Модернізація електромеханічного обладнання бурового верстату Першотравневого кар’єру ПрАТ «ПІВНГЗК» містить 61 с., 28 рис., 5 табл., 15 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – електропривод обертального механізму бурової установки СБШ-250МНА, що експлуатується на Першотравневому кар'єрі ПрАТ «ПІВНГЗК».

Предмет дослідження – методи та засоби автоматизованого керування частотно-регульованим асинхронним електроприводом обертального механізму бурового верстата в умовах змінного навантаження.

Проаналізовано технологію відкритого видобутку залізної руди на Першотравневому кар'єрі ПрАТ «ПІВНГЗК» та умови експлуатації бурового верстата СБШ-250МНА, що характеризуються високою динамічною нерівномірністю навантажень при зміні міцності порід. Обґрунтовано переваги переходу від застарілої системи тиристорний перетворювач – двигун постійного струму до сучасного частотно-регульованого асинхронного електропривода. Виконано розрахунок потужності та обертового моменту, обрано трифазний асинхронний двигун ABB M3BP 250SMC 4 потужністю 90 кВт. Прораховано природні та штучні механічні й електромеханічні характеристики двигуна в діапазоні частот 10…60 Гц. Розроблено систему автоматичного керування швидкістю на базі ПІД-регулятора з використанням тахогенератора ТП-50-100-1 як датчика зворотного зв'язку. Проведене імітаційне моделювання підтвердило, що запропонована САК забезпечує тривалість перехідного процесу менше однієї секунди без коливальних явищ та перерегулювання, а замкнена структура гарантує стабілізацію частоти обертання долота за умов змінного статичного навантаження. Для практичної реалізації системи обґрунтовано вибір перетворювача частоти ABB ACS580-01-169A-4.

Розроблена система автоматичного керування та обране електрообладнання забезпечують підвищення продуктивності буріння, збільшення ресурсу обладнання та зниження енергоспоживання за рахунок адаптації технологічної швидкості до змінних геологічних умов, що робить запропоноване технічне рішення комплексно ефективним для впровадження на гірничодобувних підприємствах.

Ключові слова: БУРОВИЙ ВЕРСТАТ, СБШ-250МНА, ЕЛЕКТРОПРИВОД, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ЧАСТОТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, ПІД-РЕГУЛЯТОР, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

Зміст

Вступ.....7

Розділ 1. Загальна частина 8

1.1 Опис видобування руди в умовах Першотравневого кар'єру ПрАТ «ПІВНГЗК» відкритим способом.....9

1.2 Улаштування бурового станка СБШ-250МНА 12

1.3 Обрання системи електропривода обертального механізму бурового верстату.....17

1.3.1 Характеристика обертального механізму бурового верстату 17

1.3.2 Технічні вимоги до електроприводу обертального механізму 19

1.3.3 Аналіз можливих систем електроприводу обертального механізму бурового верстата 21

1.4 Розрахунок потужності електродвигуна обертального механізму бурового верстата СБШ-250МНА.....22

Висновки за розділом 1 25

Розділ 2. Спеціальна частина.....26

2.1 Прорахунок характеристик двигуна обертального механізму верстату СБШ 27

2.2 Прорахунок характеристик двигуна обертального механізму верстату СБШ в електроприводі ПЧ-АД.....31

2.3 Аналіз динаміки електроприводу обертального механізму бурової установки 34

Висновки за розділом 2 43

Розділ 3. Проектна розробка.....45

3.1 Розробка САК швидкістю електроприводу механізму обертання бурового верстата 46

3.1.1 Спрощена модель системи ПЧ-АД без зворотних зв'язків 46

3.1.2 Створення контуру САК швидкістю 48
3.2 Вибір перетворювача частоти для механізму обертання бурового верстата 51
3.3 Енергозбереження електромеханічного обладнання бурового верстата 55
Висновки за розділом 3 56
Висновки 58
Список використаних джерел 60

Вступ

У галузі відкритої розробки корисних копалин ключову технологічну ланку становлять бурові операції, оскільки саме вони забезпечують формування свердловин для закладання вибухових зарядів, що подальше руйнують гірський масив. Сучасне виконання таких завдань базується на застосуванні спеціалізованих механізованих комплексів, які відрізняються вбудованими системами безперервного контролю параметрів проходки та автоматизованими механізмами з'єднання й демонтажу бурових колон, що істотно перевершує можливості застарілого обладнання. Завдяки узгодженню оптимальних технологічних режимів із механізацією та автоматизацією ключових вузлів вдається суттєво наростити обсяги виконуваних робіт, продовжити експлуатаційний ресурс оснастки та повністю виключити потребу в ручній праці, що в сукупності формує високу техніко-економічну доцільність таких рішень.

Сама суть автоматизованого управління полягає в безперервному підтримуванні заданих показників процесу, котрі гарантують досягнення найвищої інтенсивності проходки та продуктивності агрегату за умов мінімізації витрат. Під час безпосереднього руйнування порід на робочий орган постійно впливають хаотичні динамічні навантаження, які дестабілізують технологічний цикл, тому критично важливим завданням стає точне утримання заданої частоти обертання бурової головки. Для вирішення цього питання найчастіше застосовують регульовані електроприводні системи, де традиційно домінували двигуни постійного струму з тиристорним живленням, однак сучасні підходи все частіше схиляються до використання асинхронних машин із частотним керуванням, які демонструють кращі регулювальні характеристики та загальну ефективність.

Саме цій проблематиці присвячена дана бакалаврська робота, у якій детально проаналізовано варіанти оновлення приводу обертання машини СБШ-250МНА через інтеграцію частотно-регульованого асинхронного електроприводу.

Розділ 1. Загальна частина

1.1 Опис видобування руди в умовах Першотравневого кар’єру ПрАТ «ПІВНГЗК» відкритим способом

ПрАТ «ПІВНГЗК» визнається одним із найбільших гірничодобувних активів Європи, що реалізує замкнутий технологічний цикл підготовки сировини для доменного виробництва, зокрема випускає залізорудний концентрат із масовою часткою заліза 66 відсотків, а також обкотиші з показниками феруму на рівні 60,3 та 63,5 відсотка. Підприємство є невід’ємною частиною корпорації «МЕТІНВЕСТ» – провідного приватного металургійного холдингу України, де всі стадії ланцюга створення вартості, починаючи від видобутку руди та вугілля й завершуючи збутом готової металопродукції, інтегровані в єдину виробничо-збутову систему.

Нинішні потужності комбінату дають змогу щорічно отримувати 14,2 мільйона тонн концентрату та 11,1 мільйона тонн обкотишів, а мінерально-сировинну базу формують масштабні родовища залізистих кварцитів, які експлуатуються Першотравневим і Ганнівським кар'єрами із загальними промисловими запасами на рівні 3,108 мільйона тонн.

Переробний блок підприємства функціонує на базі трьох дробильних та двох збагачувальних фабрик, доповнених двома цехами з виготовлення обкотишів. Окремої уваги заслуговує Першотравневий кар'єр, що входить до числа найбільших в Україні: за проєктом його заглиблення мало сягати 650 метрів, проте фактична глибина на сьогодні становить 400 метрів з нижнім горизонтом на позначці мінус 285 метрів, тоді як площа виробки простягається на понад три кілометри в довжину та близько 2,5 кілометра в ширину.

З моменту запуску третьої дробильної дільниці видобуток корисної копалини на Першотравневому кар'єрі здійснюється за принципом циклічно-потокової технології транспортування, реалізація якої суттєво скоротила логістичні витрати на доставку сировини до збагачувальних потужностей та одночасно розширила загальну пропускну здатність виробки. Ця інфраструктура виступає критично важливою ланкою функціонування всього гірничо-збагачувального комбінату, оскільки на відмітці мінус сто п'ятнадцять

метрів розташований ККД-1500/180, куди важкі кар'єрні самоскиди скидають видобуту гірничу масу для первинного подрібнення.

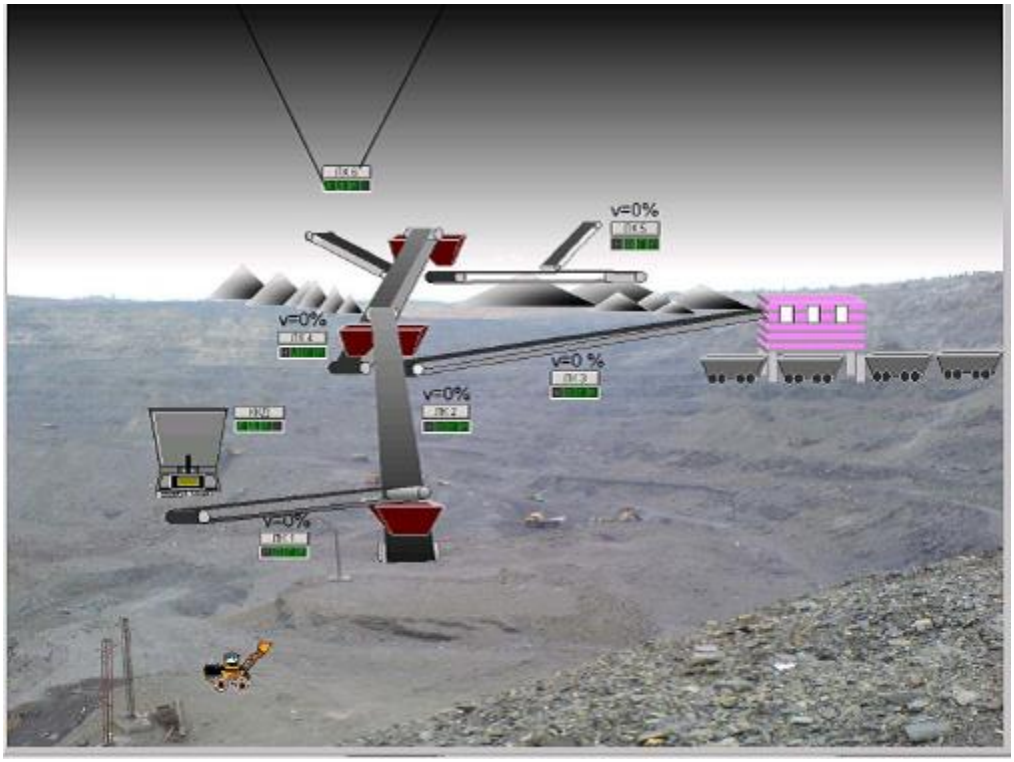

Рисунок 1.1 – 3D-схема циклічно-поточної технології Першотравневого кaєру

Після проходження першої стадії руйнування матеріал через дозувальні живильники потрапляє на стрічковий конвеєр СК-1, який піднімає сировину до перевантажувального вузла СП-1, звідки вона переходить на наступний транспортер СК-2, що спускає потік до нульової позначки на станцію СП-2. Саме тут технологічна лінія розгалужується: одна частина маси направляється конвеєром СК-3 безпосередньо у корпус завантаження залізничних думпкарів, а інша рухається по лінії СК-4, звідки через додаткові стрічки СК-5 та СК-6 потрапляє на рудний склад для подальшого зберігання. Подібний комплекс являє собою високотехнологічну систему, насичену різноманітними вимірювальними датчиками, засобами автоматизованого управління, мікропроцесорними контролерами, регульованими електричними приводами та допоміжним інженерним обладнанням, а повна технологічна схема переміщення гірничої маси з зазначеного горизонту наочно відображена на першому малюнку даної роботи.

Стрічковий конвеєр СК-3 відіграє вирішальну роль у функціонуванні циклічно-потокової транспортної системи, оскільки саме від його стабільної та безаварійної експлуатації напряму залежать обсяги виробництва третьої дробильної фабрики, здатної щомісяця переміщувати до дев'ятисот тисяч тонн сировини. Цей транспортер пролягає на технологічній ділянці між перевантажувальним вузлом СП-2 та спеціалізованим корпусом завантаження залізничних думпкарів, де відбувається безпосереднє формування потягів. Потрапляючи з конвеєрної стрічки до приймальної ємності КЗРД, подрібнена руда надходить на чотири пластинчасті живильники, які дозовано спрямовують матеріал у вагони. Для гарантування точності технологічного процесу рівень матеріальної подушки на кожному живильнику безперервно відстежується за допомогою чотирьох радіолокаційних вимірювачів типу РДР-2, тоді як загальний ступінь заповнення самого накопичувального бункера регулюється парою контактних датчиків, чиї сигнали автоматично ініціюють запуск або зупинку конвеєра СК-3, запобігаючи як перевантаженню, так і небажаним простоям обладнання.

Процес освоєння гірничого масиву на Першотравневому кар'єрі реалізується через послідовне проведення масштабних вибухових робіт та операцій з вторинного подрібнення надмірно великих фрагментів породи. Для формування вибухових свердловин у міцних скельних породах, що складають розкрив, а також безпосередньо в рудному тілі, експлуатуються спеціалізовані бурові установки шарошечного типу моделі СБШ-250МНА. Безпосереднє виймання та навантаження гірничої маси в зонах вибоїв, а також на перевантажувальних майданчиках, виконується потужним парком екскаваторного обладнання, до якого входять машини серій ЕКГ-5А, ЕКГ-8І, ЕКГ-10, ЕКГ-12,5, ЕКГ-15, а також сучасні гідравлічні екскаватори моделі Hitachi EX-3600/6, що забезпечують високу продуктивність на всіх етапах розробки. [1].

Живлення Першотравневого кар’єру провадиться напругою 35 кВ від ГПП-1 ПрАТ «ПІВНГЗК» [1].

1.2 Улаштування бурового станка СБШ-250МНА

Електричний самохідний буровий комплекс моделі СБШ-250МНА (рис. 1.2) спеціально адаптовано для формування вибухових свердловин діаметром у межах двохсот–двохсот сімдесяти міліметрів з використанням шарошкових доліт у рамках відкритих гірничих розробок, де доводиться працювати з надзвичайно міцними та високоабразивними породами твердістю від 6 до 18 одиниць за шкалою професора Протодьяконова. Дана машина оснащена власною ходовою частиною, що дозволяє їй вільно маневрувати безпосередньо на кар'єрних майданчиках, причому швидкість пересування плавно регулюється в інтервалі від нуля до одного кілометра за годину [4], забезпечуючи точне позиціювання агрегату перед початком технологічного циклу.

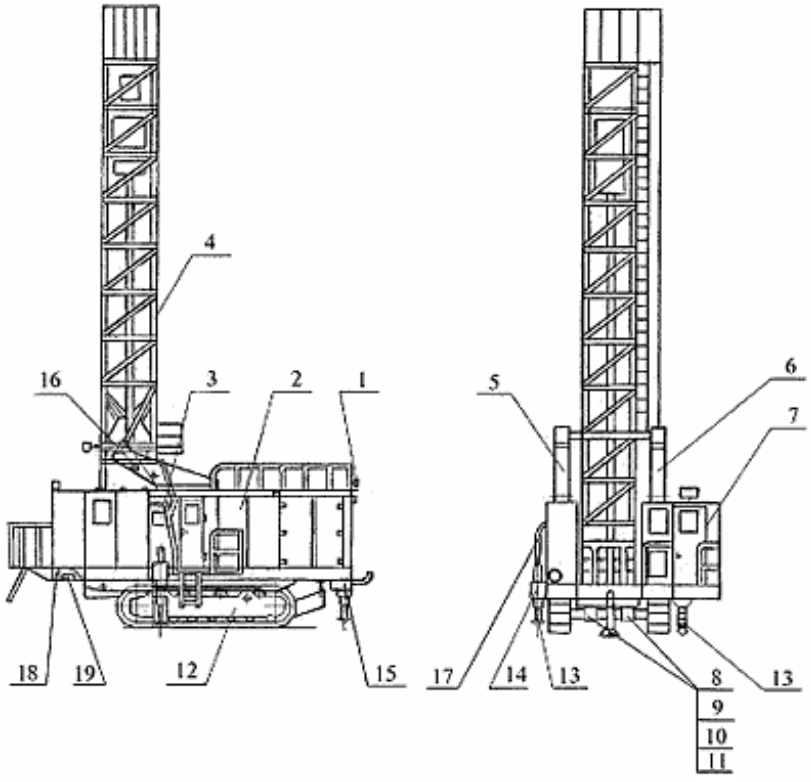

Рисунок 1.2 – Буровий станок СБШ-250МНА: 1 – освітлення; 2 – машинний відсік; 3 – кондиціонер; 4 – башта; 5, 6 – циліндри завалювання башти; 7 – кабіна оператора; 8, 9 – підстави підшипників; 10, 11 – кришки підшипників; 12 – хід на гусеницях; 13 – гідродомкрат; 14 – кронштейн; 15 –ввід кабельний; 16 – коробка перехідна

Дана модель бурової установки спроможна формувати свердловини завглибшки до сімнадцяти з половиною метрів за один безперервний технологічний цикл, що ідеально узгоджується зі стандартною висотою уступів на більшості відкритих гірничих виробок. Такий конструктивний підхід суттєво підвищує загальну продуктивність комплексу, оскільки повністю усуває потребу у проміжному нарощуванні чи демонтажі бурового става безпосередньо під час роботи, що набуває особливої ваги при розробці порід слабкої та середньої міцності, коли тривалість власне проходки часто співмірна з часом, що витрачається на допоміжні маніпуляції. Для реалізації рівномірного та безперервного ходу подачі, адаптованого під застосування подовжених штанг, інженери передбачили канатно-поліспастний привід, функціонування якого забезпечують дві синхронізовані лебідки.

Таблиця 1.1 – Паспортні дані бурового верстата СБШ-250МНА

Параметр	Величина
Діаметр свердловини, мм	250
Глибина буріння свердловин під кутом 0 град, м	32
Кути сведловин, °	0; 15; 30
Максимальна швидкість обертання става бурового, об/хв	150
Напруга, В	380
Потужність верстата, кВт	350
Швидкість переміщення верстата, км/год	0,773
Кут підйому, °	12
Тиск створюваний на ґрунт, МПа	0,21
Ширина гусениці візка, м	0,715
Потужність привода візка, кВт	44
Потужність обертача, кВт	118
Маса, т	65

Конструктивно агрегат СБШ-250МНА зібраний на гусеничному шасі, до якого інтегровано машинне відсік, операторську кабіну та вертикальну несучу башту. Саме на цій башті зосереджено все ключове технологічне оснащення: поєднаний обертально-подавальний механізм, спеціалізована касета для зберігання робочих штанг, пристрій для автоматичного розгвинчування трубного з’єднання, а також верхній гідравлічний ключ, що гарантує надійне обертання та жорстку фіксацію бурової колони під час виконання всіх операцій [4, 5].

Розташування технічного оснащення на буровому комплексі підпорядковане чіткій логіці зонування машинного відсіку, що наочно продемонстровано на відповідній схемі (див. рис. 1.3).

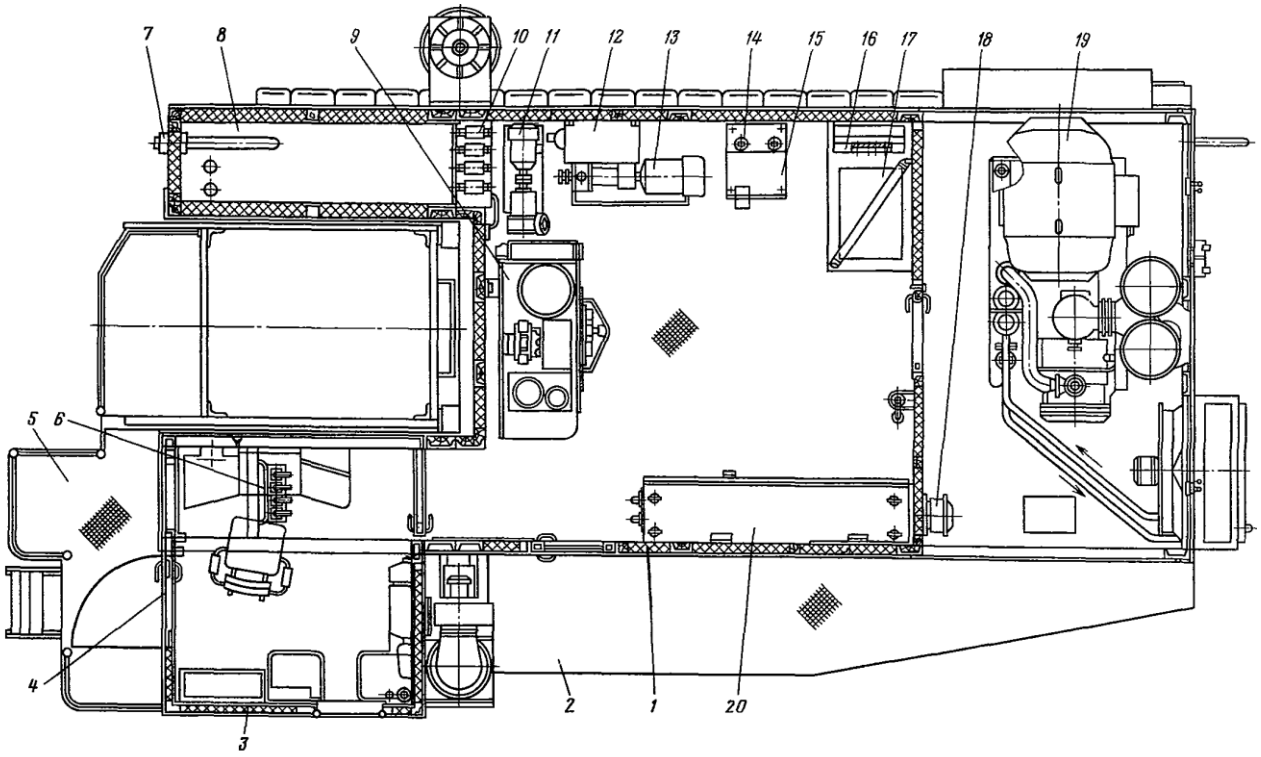

Рисунок 1.3 – Вигляд у розрізі бурового станка СБШ-250МНА

У холодній, неопалювальній зоні 1 інтегровано повітряну компресорну станцію 19, яка функціонує разом із розподільчим щитом 18, тоді як простір із термоізоляцією виділено під розміщення гідравлічного блоку, зокрема маслонасосного агрегату 9 та вузла гідроапаратури 10, що регулює тиск у системі. Окрім того, у цій утепленій секції змонтовано водяний насос 11 для наповнення резервуара, окрему помпу зрошення вибою 13, а також силову

електроніку: випрямляч 12, трансформатор 14 для живлення ланцюгів керування й освітлення, тиристорний перетворювач 17, пульт із кнопочною станцією 16, головну шафу автоматичного управління 20 та відсік для зберігання необхідного інструменту 15, що в комплексі забезпечує зручність обслуговування та надійність роботи всіх вузлів машини [5, 6].

По правому борту агрегату щодо напрямку його пересування встановлено резервуар для води 8, до якого підключені нагрівальні елементи 7, тоді як лівий бік відведено під операторську кабіну 3, що обладнана пультом керування 6 та кріслом 4 для машиніста. Доступ до машинного відсіку та самої кабіни організовано через вхідну платформу 2, тоді як перехід оператора безпосередньо до технологічного органу верстата здійснюється через окремий робочий майданчик 5 [5, 6].

Функціонування СБШ-250МНА координується через програмований логічний контролер, який виступає центральним елементом системи автоматизації, причому всі вхідні оперативні ланцюги живляться від джерела постійної напруги. Для забезпечення точності технологічного процесу реалізовано високошвидкісну систему керування обертачем, що дозволяє оперативно реагувати на зміни умов буріння [4, 5].

Два частотних перетворювача (ПЧ) реалізують керування асинхронними приводами ходу при пересуванні верстата СБШ-250МНА. У процесі буріння ПЧ переключаються на керування асинхронними приводами гідронасосу і обертача [4].

Критично важливим аспектом експлуатації є комплексний захист усіх електродвигунів від аварійних режимів, зокрема від перевантажень, коротких замикань та зникнення фази, що мінімізує ризик виходу обладнання з ладу. Візуалізація поточного стану машини та всіх технологічних параметрів здійснюється через інтуїтивно зрозумілу панель оператора, на екрані якої миттєво відображаються повідомлення про будь-які нештатні ситуації чи аварійні відключення. Безпосереднє керування виконавчими механізмами оператор здійснює ергономічним способом, використовуючи два джойстики,

що забезпечує зручне та точне регулювання всіх функцій верстата в реальному часі [4, 5].

Живлення до СБШ-250МНА підводиться кабелем від електромережі змінного струму 380 В [5].

Для забезпечення повного контролю над функціонуванням бурової установки передбачено три окремі пункти управління. Головний операторський інтерфейс в кабіні машиніста, і саме через нього здійснюється координація основного технологічного циклу проходки свердловин та всіх супутніх допоміжних маніпуляцій. У нижній зоні несучої башти додатково є резервний пульт, що дозволяє дублювати керування окремими вузлами за необхідності, зокрема під час налагодження обладнання або виконання робіт у безпосередній близькості до механізмів. Натомість переміщенням самохідного шасі верстата оператор керує за допомогою виносного дистанційного [4].

Ходова частина бурового верстата гусеничного типу сконструйована на базі двох автономних візків, кожен із яких має індивідуальний привід та з'єднаний із загальною рамою через спеціальні вісі. Регулювання натягу гусеничних стрічок реалізовано за допомогою гідроциліндра подвійної дії, що дозволяє оперативно адаптувати натягнення під конкретні умови експлуатації. Конструктивне рішення похилої форми рами, у поєднанні з монтажем підтримуючих роликів на консольних осях, ефективно запобігає накопиченню дрібнодисперсної породи та налипанию вологого ґрунту, що особливо актуально під час робіт у підвищеній вологості або за несприятливих погодних умов. Щодо підшипникових вузлів ходової частини, то в них застосовано необслуговувані підшипники, які заповнюються консистентним мастильним матеріалом на весь нормативний термін експлуатації, що суттєво спрощує технічне обслуговування та підвищує надійність вузла в цілому [4].

Машинний відсік бурового верстата виконаний у вигляді жорсткої зварної рами, де всередині компактно розміщене все критично важливе обладнання, необхідне для забезпечення технологічного циклу. Серед встановлених агрегатів функціонує компресорна станція, а також гідросистема на базі масляного блоку, до складу якого входять два спеціалізовані насоси:

головний із регульованою подачею, що формує необхідне технологічне зусилля на буровій колоні та живить інші функціональні вузли, і допоміжний, призначений для операцій прискореного підйому й опускання штанг під час їхнього з'єднання чи демонтажу става. Крім того, у цьому просторі змонтовано силові приводи механізмів обертання та пересування, шафи електричного керування та додаткове технічне оснащення, що в сукупності гарантує стабільну та безпечну роботу машини в різних режимах експлуатації [4].

Несуча башта бурового верстата виконана у вигляді просторової зварної ферми, яка кріпиться до опорних конструкцій за допомогою підшипників ковзання, що забезпечує необхідну маневреність при монтажі та експлуатації. На верхній обв'язці цієї конструкції зафіксовано опорний вузол блоку механізму подачі, тоді як у нижній частині змонтовано гідроциліндри канатно-поршневої системи, які відповідають за переміщення бурового става, а також механізми розгвинчування трубних з'єднань і верхній ключ. Переведення щогли з транспортного положення в робоче та навпаки здійснюється парою потужних гідроциліндрів, а її надійна фіксація у вертикальному стані гарантується спеціальними замковими фіксаторами. Гідравлічна система верстата виконує широкий спектр критично важливих функцій: вона формує необхідне осьове зусилля на шарошечному долоті, забезпечує плавне переміщення бурової колони, здійснює механізоване згвинчування та розгвинчування штанг і долота, автоматизує процеси підведення та відведення труб у касету, сприяє швидкому нарощуванню чи демонтажу става, а також керує підйомом і опусканням щогли та горизонтуванням усієї машини на гідродомкратах для стабільної роботи на нерівному рельєфі [4].

1.3 Обрання системи електропривода обертального механізму бурового верстату

1.3.1 Характеристика обертального механізму бурового верстату

Обертальний механізм бурового верстату, конструктивна схема якого відображена на рис. 1.4, інтегрує в собі електродвигун постійного струму 1,

який через двоступінчастий редуктор 2 та шинно-зубчасту муфту 3 передає крутний момент на виконавчі органи [7].

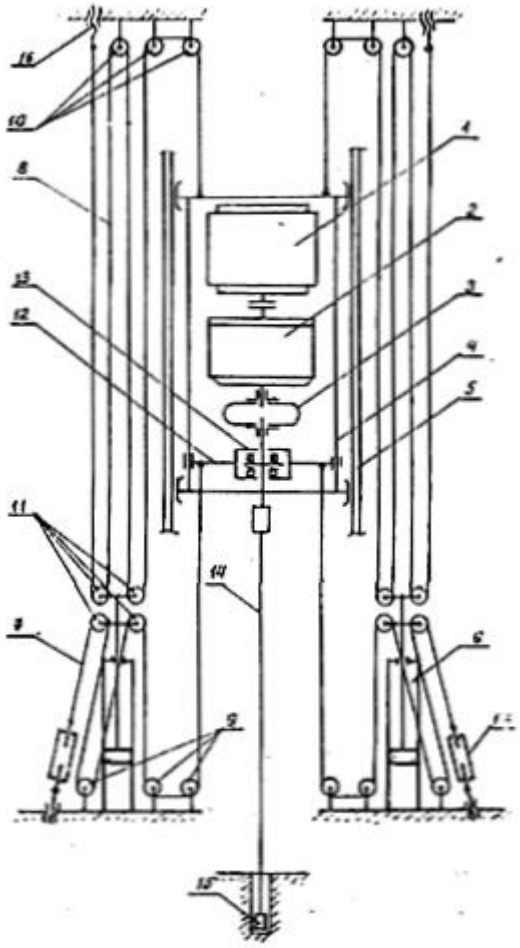

Рисунок 1.4 – Обертальний механізм СБШ-250МНА [7]

Увесь цей кінематичний вузол жорстко закріплено на пересувній каретці 4, здатній плавно рухатися у вертикальній площині вгору та вниз уздовж напрямних швелерів несучої башти 5 за рахунок роботи спеціалізованого механізму подачі. Даний вузол виконаний за канатно-гідравлічною принциповою схемою та складається з пари робочих гідроциліндрів 6 і канатно-поліспастних блоків. Попри те, що безпосередній хід поршнів гідравлічних домкратів обмежений двома метрами, завдяки чотирикратному кратному поліспасту вдається забезпечити суцільне поступальне переміщення бурового става на повну довжину однієї технологічної штанги, яка становить вісім метрів, що дозволяє суттєво оптимізувати процес нарощування колони та уникнути проміжних зупинок під час формування глибоких свердловин [7].

Кожна з двох канатно-поліспастних ліній формується за рахунок напірного 7 та підйомного 8 тросів, трьох нерухомих шківів 9, зафіксованих у нижній базі щогли, такої ж кількості верхніх нерухомих блоків 10, а також чотирьох рухомих роликів 11, що безпосередньо кріпляться до штоків гідравлічних циліндрів. Напірний трос одним своїм кінцем анкерується до основної рами машини, тоді як протилежний кінець з'єднується з жорсткою напірною траверсою 12, яка інтегрована з опорним вузлом 13. Натомість підйомний канат фіксується між верхнім поясом щогли та кареткою 4 обертального механізму. Сам принцип дії подавального вузла полягає в тому, що під час висування штоків гідроциліндрів відстань між нижніми 9 та рухомими 11 блоками збільшується, що призводить до натягування напірного троса та передачі осьового навантаження через траверсу, опорний елемент, бурову колону 14 безпосередньо на різальне долото 15 [7].

Паралельно з цим зменшується проміжок між верхніми 10 та рухомими шківами, внаслідок чого обертач переходить у підвішений стан, спираючись виключно на підйомні троси. Напірна траверса під'єднана до каретки за допомогою напрямних, що дозволяє їй здійснювати відносне переміщення, тоді як сам обертач прикріплений до каретки нерухомо. У режимі очікування або відключення траверса спирається на низ каретки, і обидва вузли утримуються підйомними канатами. Довжину тросів налаштовують таким чином, щоб під час активного буріння між траверсою та нижнім обмежувачем каретки залишався технологічний зазор у сімдесят міліметрів, який реалізується завдяки шліцьовій частині шинно-зубчастої муфти. Остаточне натягування всіх канатних систем здійснюється шляхом регулювання спеціальних болтів 16 або з'єднувальних муфт 17, що забезпечує точність та стабільність технологічного циклу [7].

1.3.2 Технічні вимоги до електроприводу обертального механізму

Електропривод, що забезпечує обертання головного технологічного вузла бурової установки, покликаний передавати крутний момент на бурову колону, де через редукторну передачу активується породоруйнівний

інструмент, а у синхронній взаємодії з подавальним механізмом формує необхідні технологічні параметри проходки свердловин. Умови експлуатації даного приводу відрізняються високою динамічною нерівномірністю навантажень, що обумовлено постійними змінами фізико-механічних властивостей вибою, специфікою процесу руйнування гірських порід та інтенсивними вібраціями, які супроводжують роботу верстата.

Під час безпосереднього буріння система працює у тривалому безперервному режимі S1, тоді як при виконанні спуско-підйомних маніпуляцій функціонування переходить у повторно-короткочасний цикл, де навантажені фази чергуються з холостими ходами та повними зупинками, при цьому відносна тривалість увімкнення становить 20…40%. Технічні параметри приводу передбачають можливість регулювання частоти обертання у співвідношенні 1:10, забезпечуючи при цьому утримання заданої швидкості в усіх статичних станах з допустимою похибкою до 10% відсотків та аналогічним рівнем перерегулювання, а також гарантують необхідний запас перевантажувальної здатності для подолання пікових опорів середовища.

Живлення агрегату може здійснюватися від 380 В або від 6 кВ, а $\cos\varphi_{сер\ зваж} = 0,75$ з урахуванням встановлених компенсуючих пристроїв.

Проектована система автоматизації має бути здатною реалізовувати комплекс функцій, де першочерговим завданням виступає безперервний моніторинг та миттєве обмеження струму електродвигуна, що прямо корелює з величиною крутного моменту, а також автоматичне пригнічення вібраційних коливань для запобігання динамічним перевантаженням конструкції. Паралельно з цим алгоритми керування повинні забезпечувати адаптивну підтримку сталої потужності обертання або використовувати альтернативні оптимізаційні критерії, спрямовані на досягнення максимальної швидкості проходки чи мінімізації собівартості кожного пробуреного метра. Критично важливою умовою стає реалізація синхронного та взаємозалежного регулювання трьох ключових технологічних підсистем: електроприводу обертача, механізму подачі бурової колони та дозувальної подачі

промивальної суміші, що дозволяє підтримувати збалансований режим роботи усього комплексу в реальному часі без потреби постійного ручного втручання оператора.

Керування: автоматичний або ручний режим.

Система електроприводу бурового верстата має бути оснащена комплексом захисних функцій. Зокрема, передбачається автоматичне спрацьовування захисту від перевантажень та коротких замикань у силових колах, а також алгоритм, що запобігає тривалій роботі двигуна зі струмом, наближеним до гранично допустимого значення, коли система функціонує в режимі стабілізації потужності. Також повинен бути нульовий захист, який блокує подачу напруги за відсутності командних сигналів завдання, включаючи ситуації з нульовим потокозчепленням при використанні частотного методу регулювання, а для машин постійного струму додатково реалізовано контроль цілісності кіл збудження. Також має діяти система сигналізації замикань на землю та стану допоміжних приводів і вентиляторів, інтегрована в загальний контур безпеки.

Інформаційна панель має відображати навантажувальні струми, напругу керування, швидкість проходки та осьове зусилля, що дозволяє оператору оперативно коригувати технологічний процес та запобігати аварійним ситуаціям.

Умови експлуатації мають відповідати кліматичним зонам У і ХЛ.

1.3.3 Аналіз можливих систем електроприводу обертального механізму бурового верстата

Електропривод обертального механізму бурового верстата має гарантувати високу інтенсивність проходки, автоматичне обмеження крутного моменту та мінімізацію вібрацій, чого не могли забезпечити перші нерегульовані асинхронні системи. Це зумовило перехід до керованих приводів, спочатку реалізованих за схемами генератор-двигун або з магнітними підсилювачами, а згодом через тиристорні перетворювачі

постійного струму (ТП-Д) з двоконтурним регулюванням швидкості та струму, де реверсування здійснювалося переключенням полярності збудження.

Сучасний етап розвитку визначає пріоритетність частотно-регульованих асинхронних електроприводів, які суттєво випереджають системи постійного струму за масогабаритними характеристиками, собівартістю та надійністю, оскільки відсутність колектора усуває потребу в постійному технічному обслуговуванні та розширює динамічні й перевантажувальні можливості машини. Базову силову структуру такого приводу формують керований випрямляч, фільтр постійного струму та автономний інвертор, а управління реалізується через пропорційно-інтегральні регулятори, що підтримують як задану швидкість обертання, так і режим сталості потужності шляхом введення додаткових коректуючих контурів на операційних підсилювачах. Використання перетворювачів частоти з проміжною ланкою постійного струму є найбільш виправданим через їх широку промислову доступність та здатність забезпечувати глибоке регулювання частоти в широкому діапазоні.

Попри те, що мікропроцесорні системи дозволяють впроваджувати складні алгоритми керування та цифрову діагностику, їхнє масове застосування обмежується недостатньою достовірністю оцінок забійних параметрів та обчислювальними затримками, тому оптимальним технічним рішенням залишається комбінована аналого-цифрова система частотного регулювання асинхронного приводу, яка поєднує високу швидкодію, стійкість до динамічних перевантажень та зручність експлуатації в умовах відкритих гірничих розробок.

1.4 Розрахунок потужності електродвигуна обертального механізму бурового верстата СБШ-250МНА

Процес подрібнення гірського масиву під час шарошкового буріння реалізується за рахунок послідовного вдавлювання зубчастих елементів долота у породу та відколу утворених уламків під час обертального руху шарошки безпосередньо по дну свердловини. Детальну ілюстрацію цього технологічного принципу, що наочно демонструє механізм взаємодії робочого

органу з вибоєм, можна побачити на рис. 1.5. Заглиблення зубців на глибину $h_{ст}$ провадиться завдяки зусиллю подачі $N_{под}$ [8, С. 162]:

$$N_{под} = (0,6\ldots0,7) f_{пр} D_{дол} \cdot 10^3 = 0,7 \cdot 10 \cdot 25 \cdot 10^3 = 1,75 \cdot 10^5 \ H, \qquad (1.1)$$

де $f_{пр} = 6\ldots10$ – міцність залізної руди за Протод'яконовим; $D_{дол}$ – діаметр долота у сантиметрах.

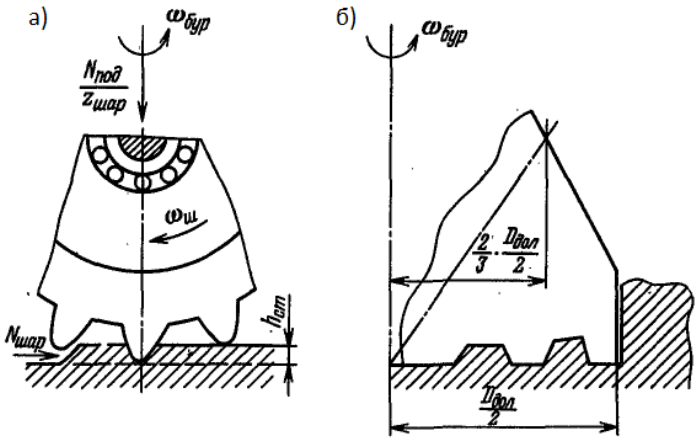

Рисунок 1.5 – Ілюстрація роботи шарошки у свердловинному забої

Заглиблення зубів шарошки у породу [8]:

$$h_{ст} = \frac{\upsilon_{бур}}{k_{ск} \cdot z_{шар} \cdot n_{дол}} = \frac{25}{0,5 \cdot 3 \cdot 81} = 0,206 \ м. \qquad (1.2)$$

Під час штатного функціонування бурового снаряда, за умови відсутності прослизання, робочі шарошки мають здійснювати суто перекочувальний рух поверхнею вибою, забезпечуючи послідовне вдавлювання зубців у гірську породу з подальшим відколюванням її фрагментів у напрямку до вільної площини свердловини, що й формує ефективний процес руйнування масиву без зайвих динамічних навантажень на оснастку (рис. 1.5, а). То ж, обертальний механізм має здолати опір стискаючого і сколюючого зусиль.

Опір, що має здолати обертальний механізм [8]:

$$N_{шар} = \frac{1}{2} h_{ст} D_{доп} \sigma_{бур} z_{шар} \cdot 10^{-4} = \\ = \frac{1}{2} 0,206 \cdot 25 \cdot 860 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 6,636 \cdot 10^4 \ Н. \quad (1.3)$$

При прорахунку обертового моменту долота вважають, що він прикладається від осі обертання долота на відстані $\frac{D_{дол}}{3}$ (рис. 1.5, б), тоді [8]:

$$M_{шар} = N_{шар} \frac{D_{шар}}{3} k_{тер} \cdot 10^{-2} = \\ = 6,636 \cdot 10^4 \cdot \frac{25}{3} 1,12 \cdot 10^{-2} = 6,193 \cdot 10^3 Н \cdot м. \quad (1.4)$$

Потужність двигуна обертального механізму [8]:

$$P_{шар} = \frac{M_{шар} \cdot \omega_{бур}}{\eta_{мех}} \cdot 10^{-3} = \frac{6,193 \cdot 10^3 \cdot}{0,65} 10^{-3} = 80,78 \ кВт. \quad (1.5).$$

Частоту обертання двигуна обертального механізму [8]:

$$n_{дв} = i \cdot n_{дол} = 6,3 \cdot 81 = 510,3 \ об/хв, \quad (1.6)$$

де i – передавальне число редуктора.

За $P_{шар}$ і $n_{дв}$ вибираємо для електроприводу обертального механізму бурового верстата СБШ-250МНА намічаємо асинхронний двигун М3ВР 250SMC 4 [9] (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Паспортні дані двигуна М3ВР 250SMC 4

Параметр	Значення
$P_{ном}, кВт$	90
$U_{ном}, В$	400
$I_{ном}, А$	163
$\omega_{ном}, об/хв$	1478 об/хв
$\cos\varphi$	0,84

$\eta, \%$	94,6
$M_{\max}/M_{ном}$	3,3
$M_{п}/M_{ном}$	3,1
$I_{п}/I_{ном}$	7,4
$J, кг \cdot м^2$	0,941

Висновки за розділом 1

У розділі проаналізовано технологію відкритого видобутку на Першотравневому кар'єрі ПрАТ «ПІВНГЗК» та визначено критичну роль обертального механізму верстата СБШ-250МНА. Дослідження умов експлуатації та порівняльний аналіз приводів довели переваги частотно-регульованих асинхронних приводів, якими можна замінити систему ТП-Д на обертальному механізмі задля повного переходу на електроприводи змінного струму на буровому верстаті. Виконаний розрахунок потужності та обертового моменту з урахуванням міцнісних характеристик залізистих кварцитів довів технічну відповідність асинхронного двигуна ABB M3BP 250SMC 4 вимогам технологічного циклу і можливість його залучення до приводу обертального механізму. Запропонована системи керування з багаторівневим захистом, синхронізованим регулюванням подачі й обертання та адаптивним операторським інтерфейсом гарантує безпечну та стабільну експлуатацію комплексу в складних кар'єрних умовах.

Розділ 2. Спеціальна частина

2.1 Прорахунок характеристик двигуна обертального механізму верстату СБШ

Щоб забезпечити роботу обертального механізму бурової установки СБШ-250МНА, було обрано трифазний асинхронний двигун серії М3ВР 250SMC 4. Усі необхідні номінальні параметри обраного обладнання зазначені в табл. 1.2, що дає змогу точно оцінити його технічні характеристики. Далі прорахуємо та відобразимо природні статичні характеристик двигуна.

$$U_{1н} = \frac{U_н}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,4\ В. \quad (2.1)$$

$$E_{1н} = 0,95 \cdot U_{1н} = 0,95\frac{380}{\sqrt{3}} = 208,43\ \text{В}. \quad (2.2)$$

$$P_{1ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} = \frac{90000}{0,94} = 95744,7\ Вт. \quad (2.3)$$

$$I_{1ном} = \frac{P_{1ном}}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos\varphi_{ном}} = \frac{95744,7}{3 \cdot 219,4 \cdot 0,89} = 163,45\ А. \quad (2.4)$$

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1487}{30} = 155,64\ с^{-1}. \quad (2.5)$$

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500\ об/хв, \quad (2.6)$$

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,08\ с^{-1}. \quad (2.7)$$

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{90000}{155,64} = 578,26\ Н \cdot м. \quad (2.8)$$

$$s_{ном} = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0} = \frac{157,08 - 155,64}{157,08} = 0,0092. \quad (2.9)$$

$$M_{\max} = \lambda_{\max} \cdot M_{ном} = 2.3 \cdot 580,7 = 1335,61\ Н \cdot м. \quad (2.10)$$

$$s_{\max} = s_{ном}\left(\lambda_{\max} + \sqrt{\lambda_{\max}^2 - 1}\right) = 0,0092\left(3,3 + \sqrt{3,3^2 - 1}\right) = 0,0593. \quad (2.11)$$

Додатково прораховуємо параметри замісної схеми М3ВР 250SMC 4 (рис. 2.1).

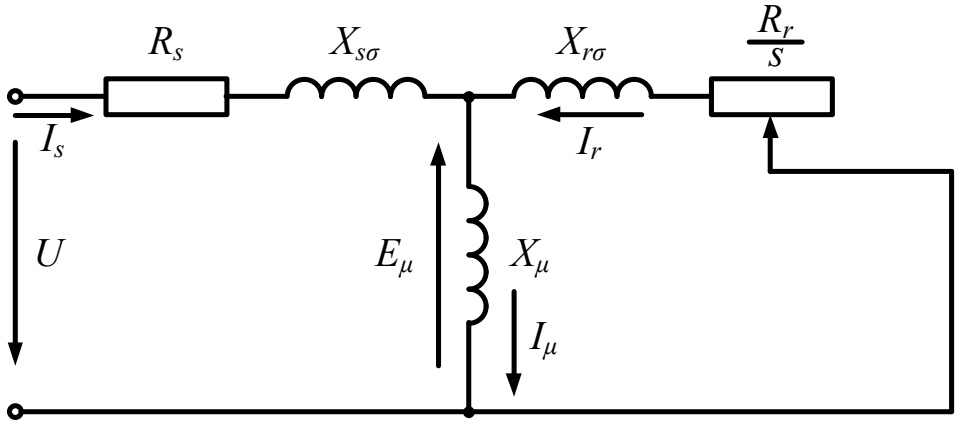

Рисунок 2.1 – Замісна Т-схема М3ВР 250SMC 4 (однієї фази)

Втрати механічні, опори статора і ротора:

$$\Delta P = \left(\sqrt{3}\cdot U_{н}\cdot I_{1ном}\cdot\cos\varphi - P_{н}\right)\cdot\left[1+\left(\frac{\omega_{ном}}{\omega_0}\right)^2\right]\cdot 0{,}05 = \\ = \left(\sqrt{3}\cdot 380\cdot 163{,}45\cdot 0{,}84 - 90\cdot 10^3\right)\cdot\left[1+\left(\frac{1487}{1500}\right)^2\right]\cdot 0{,}05 = 360\ Вт. \tag{2.12}$$

$$R_1 = \frac{3\cdot U_{1н}^2\cdot\left(1-s_{ном}\right)}{2\cdot b_{\max}\cdot\left(1+\frac{b_{\max}}{s_{\max}}\right)\cdot\lambda_{\max}\cdot\left(P_{ном}-\Delta P\right)} = \\ = \frac{3\cdot 219{,}4^2\cdot\left(1-0{,}0092\right)}{2\cdot 1{,}0593\cdot\left(1+\frac{1{,}0593}{0{,}0593}\right)\cdot 3{,}3\cdot\left(90\cdot 10^3-567\right)} = 0{,}017\ Ом, \tag{2.13}$$

де $b_{\max} = s_{\max}+1 = 0{,}0593+1 = 1{,}0593$.

$$R_2' = \frac{P_{н}+\Delta P}{3\cdot\left(1-s_{ном}+\frac{b_{\max}}{s_{\max}}\right)\cdot\lambda_{In}\cdot I_{1ном}^2} = \\ = \frac{90\cdot 10^3+567}{3\cdot\left(1-0{,}0092+\frac{1{,}0593}{0{,}0593}\right)\cdot 7{,}4\cdot 163{,}45^2} = 0{,}00785\ Ом. \tag{2.14}$$

Якщо індуктивності статора і ротора близькі, то:

$$L_1 \approx L_2 = \frac{U_{1н}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_{1ном} \cdot \left(\sqrt{1 - \cos\varphi} - \cos\varphi \frac{s_{ном}}{s_{\max}} \right)} = \\ = \frac{219,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 163,45 \cdot \left(\sqrt{1 - 0,84} - 0,84 \frac{0,0092}{0,0593} \right)} = 0,0334 \; Гн. \tag{2.15}$$

$$L_{s\sigma} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{1н}}{\sqrt{3} \cdot \lambda_{Iп} \cdot I_{1ном}} \right) - \left(R_1 + R_2' \right)^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \\ = \frac{\sqrt{\left(\frac{219,4}{\sqrt{3} \cdot 7,5 \cdot 163,45} \right) - \left(0,017 + 0,00785 \right)^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 5,64 \cdot 10^{-4} \; Гн. \tag{2.16}$$

$$L_\mu = L_s - L_{s\sigma} = 0,0334 - 5,64 \cdot 10^{-4} = 0,033 \; Гн. \tag{2.17}$$

Опір КЗ:

$$x_к = \sqrt{\left(\frac{R_2'}{s_{\max}} \right)^2 - R_1^2} = \sqrt{\left(\frac{0,00785}{0,0593} \right)^2 - 0,017^2} = 0,035 \; Ом. \tag{2.18}$$

За формулами (2.19) і (2.20) представимо природні залежності $s = f\left(M\right)$ і $s = f\left(I_1\right)$ двигуна М3ВР 250SMC 4 приводу обертального механізму СБШ (рис. 2.2):

$$M\left(s\right) = \frac{3U_{1н}^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega_0 \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(X_1 + X_2' \right)}}. \tag{2.19}$$

$$I_1\left(s\right) = \frac{U_{1н}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + x_к^2}}. \tag{2.20}$$

Характеристики двигуна серії М3ВР 250SMC 4, як механічні, так і електромеханічні, демонструють виражену нелінійність, що чітко простежується на відповідних графіках, зокрема рисунках 2.2 а, б та 2.3 а, б.

Аналіз цих залежностей дозволяє виокремити два функціональні діапазони, які визначаються значеннями ковзання. Перший із них охоплює робочу зону, де спостерігається від'ємна жорсткість характеристики, а сама залежність наближається до прямої лінії. У цьому інтервалі обертальний момент пропорційно залежить від величини струмів, що протікають як в обмотках статора, так і ротора. Другий діапазон, навпаки, відрізняється додатною жорсткістю та яскраво вираженою криволінійною формою. Тут із ростом ковзання відбувається спад крутного моменту, тоді як споживаний двигуном струм, відповідно, зростає.

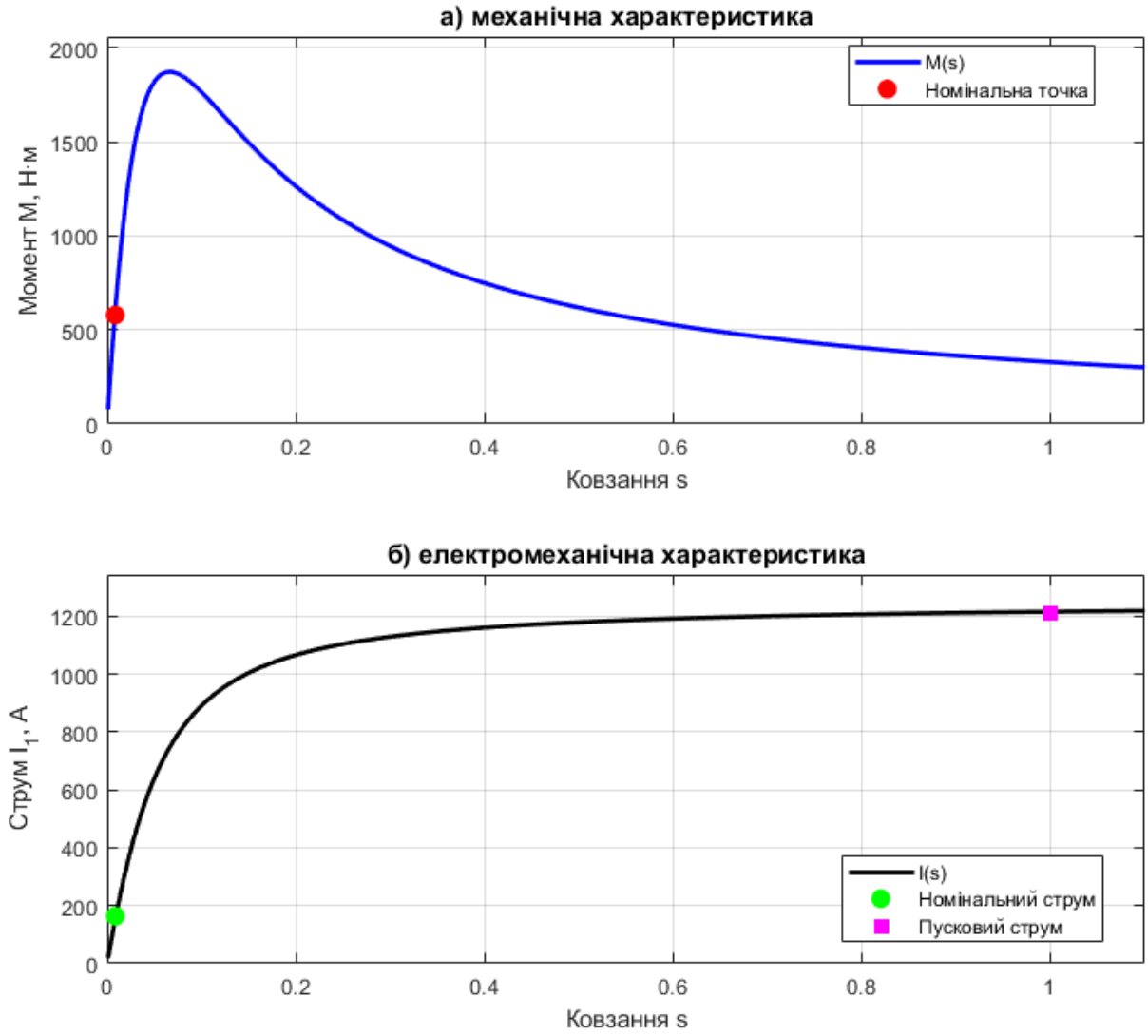

Рисунок 2.2 – Характеристики М3ВР 250SMC 4 (а) механічна;
(б) електромеханічна

Пряме підключення М3ВР 250SMC 4 до електромережі, не дає змоги керувати швидкістю. Раніше обґрунтоване застосування частотного регулювання для підтримки швидкості обертального механізму при різному рівні міцності породи, яку бурять. Розглянемо статику М3ВР 250SMC 4 при варіюванні частоти живлячої напруги.

2.2 Прорахунок характеристик двигуна обертального механізму верстату СБШ в електроприводі ПЧ-АД

У процесі частотного регулювання відносне ковзання електричного двигуна та напруга на статорі перебувають у функціональній залежності від відносної частоти напруги живлення, що відображено у формулі (2.21) з посиланням на джерело [10]

$$s_s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0 \cdot f_{s*}}; U_s = U_{1н} f_{s*}; f_{s*} = \frac{f_s}{f_н}, \tag{2.21}$$

Для формування статичних характеристик приводу обертального механізму бурового верстату, що оснащений системою частотного регулювання швидкості, доцільно застосувати замісну Т-схему, зображену на рис. 2.1. За умови використання системи ПЧ-АД реактивні опори двигуна, змінюються пропорційно до частоти напруги живлення, що описується залежністю, у якій враховуються номінальні значення індуктивних опорів обмоток статора, ротора, контуру намагнічування та короткого замикання:

$$X_s = X_{sн} f_{s*};\ X_r = X_{rн} f_{s*};\ X_\mu = X_{\mu н} f_{s*};\ X_k = X_{kн} f_{s*}, \tag{2.22}$$

Виходячи з аналізу замісної Т-схеми та припускаючи, що певними співвідношеннями можна знехтувати через їхню незначність, а також беручи до уваги вираз (2.23), вдається отримати кінцеву розрахункову залежність, що описує поведінку системи в умовах частотного керування.

$$R_r / s = \left(R_r \cdot \omega_0 \cdot f_{s*}\right) / \left(\omega_0 \cdot f_{s*} - \omega\right), \tag{2.23}$$

отримуємо:

$$M(\omega)=\frac{3\cdot\left(U_{1н}\cdot f_{s*}\right)^2\cdot\dfrac{R_r\cdot\omega_0\cdot f_{s*}}{\omega_0\cdot f^*-\omega}}{\omega_0\cdot f_{s*}\cdot\left[\left(R_s+\dfrac{R_r\cdot\omega_0\cdot f_{s*}}{\omega_0\cdot f_{s*}-\omega}\right)^2+\left(X_к\cdot f_{s*}\right)^2\right]}. \qquad (2.24)$$

З (2.20) виразимо:

$$I_r(\omega)=\frac{U_{1н}\cdot f_{s*}}{\sqrt{\left[\left(R_s+\dfrac{R_r\cdot\omega_0\cdot f_{s*}}{\omega_0\cdot f_{s*}-\omega}\right)^2+\left(X_к\cdot f_{s*}\right)^2\right]}}. \qquad (2.25)$$

Для візуалізації та аналізу експлуатаційних властивостей системи ПЧ-АД доцільно сформувати сімейства статичних характеристик, виходячи з припущення, що процес частотного регулювання реалізується за відповідним законом керування $U/f=\text{const}$. На основі цього підходу будується сімейство штучних механічних характеристик для різних значень частоти напруги, що підводиться до обмоток статора, що дозволяє комплексно оцінити поведінку електропривода в умовах зміни керуючих впливів, як це наочно представлено на рис. 2.3. На наведеному графіку відображено сімейство характеристик, отриманих при значеннях частоти живлення 10…60 Гц, причому застосований закон керування гарантує стабільність максимального обертального моменту в робочому діапазоні, однак при зниженні частоти спостерігається певне падіння цього показника, що зумовлено явищами перенасичення магнітопроводу та зростанням втрат у сталі.

Для аналогічного набору частотних значень 10…60 Гц також сформовано штучні електромеханічні характеристики, зображені на рис. 2.5, де важливо зазначити, що варіювання частоти спричиняє зміни величини пускового струму, у зв'язку з чим процес запуску двигуна рекомендується реалізовувати без спеціалізованого задатчика інтенсивності.

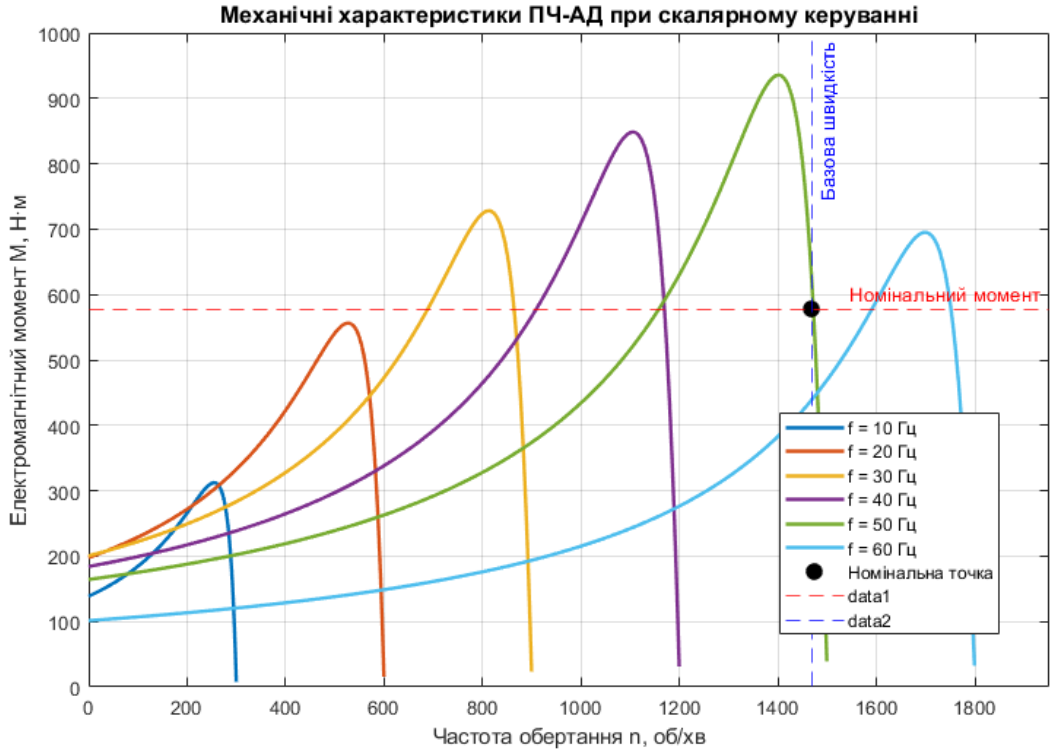

Рисунок 2.3 - Статичні характеристики M3BP 250SMC 4 у системі ПЧ-АД (механічні)

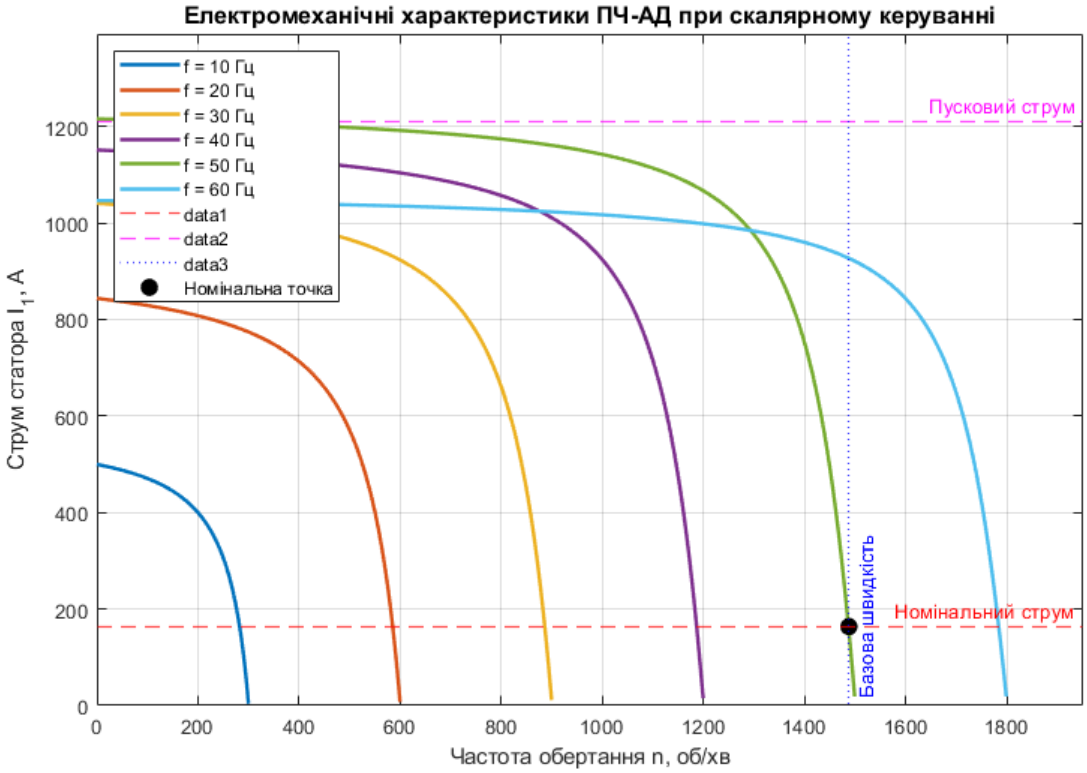

Рисунок 2.4 - Статичні характеристики M3BP 250SMC 4 у системі ПЧ-АД (механічні)

Використання ПЧ-АД для стабілізації швидкості руху обертального механізму є раціональним.

2.3 Аналіз динаміки електроприводу обертального механізму бурової установки

Описання перетворення енергії в асинхронній машині вирізняється значною складністю, оскільки базові диференційні рівняння мають виражений нелінійний характер, а трифазна природа обмоток суттєво збільшує розмірність системи. З метою спрощення аналізу двигунів зазвичай застосовують еквівалентну двофазну модель, головною умовою коректності якої виступає незмінність сумарної потужності при переході між системами рівнянь.

У ході моделювання кожна фізична величина, така як напруга, струм або потокозчеплення, інтерпретується як вектор, напрям якого жорстко фіксується відносно осей, пов’язаних із конкретною обмоткою. Для статора зазвичай вводиться нерухома ортогональна сітка з позначенням α та β, тоді як для ротора використовується власна координатна система d і q. Усі розрахункові параметри зручно представляти в довільній системі U і V, що обертається навколо нерухомого статора з кутовою швидкістю ω, причому перехід між фізичними та розрахунковими осями здійснюється шляхом геометричного проектування відповідних векторів згідно з класичними тригонометричними співвідношеннями.

Для глибшого аналізу фізичної природи перехідних режимів виконаємо дослідження динамічних властивостей електропривода обертального механізму бурового верстату, реалізованого на базі зв'язки ПЧ та АД, застосовуючи при цьому векторний математичний апарат еквівалентної двовимірної моделі машини, що дозволяє з високою точністю відтворити реальні процеси, а відповідні графічні залежності наведено на рис. 2.5.

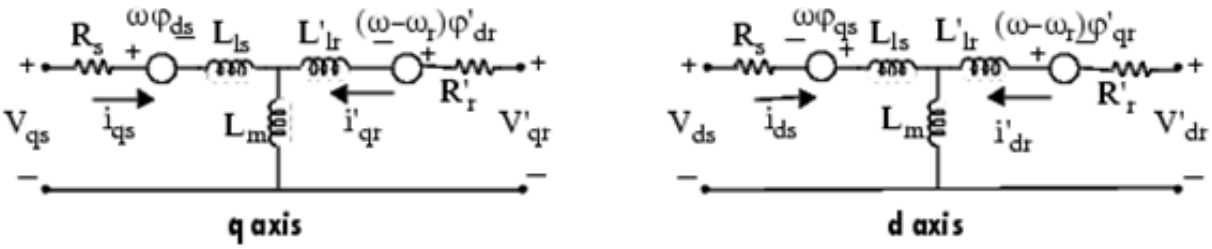

Рисунок 2.5 - Математична модель АД на основі замісної Т- схеми

Диференціальні рівняння АД у системі *U*, *V*, 0 [12, **Error! Reference source not found.**]:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs} + \omega\varphi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds} - \omega\varphi_{qs}$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt}\varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r)\varphi'_{dr}$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt}\varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r)\varphi'_{qr}$$

$$T_e = 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m$$

Розрахунок параметрів замісної Т-схеми (рис. 2.5) виконаємо за рівняннями:

$$C_1 = \frac{I_\mu}{2 \cdot \lambda_I \cdot I_{1ном}} + 1 = \frac{41,26}{2 \cdot 7,4 \cdot 163,45} + 1 = 1,017.$$

$$I'_{2ном} = I_{1ном} \cdot \cos\varphi = 163,45 \cdot 0,89 = 145,5\ A.$$

$$R'_2 = \frac{M_{ном} \cdot \omega_0 \cdot s_{ном}}{3I'^2_{2ном}} = \frac{580,7 \cdot 157,08 \cdot 0,0092}{3 \cdot 145,5^2} = 0,0191\ Ом.$$

$$R_1 = R'_2 \cdot 1,551 = 0,0191 \cdot 1,551 = 0,0296\ Ом.$$

$$A_0 = \frac{I_{1ном} \cdot \cos\varphi - I_\mu \cdot \cos\varphi_0}{U_{1ф}} = \frac{163,45 \cdot 0,84 - 41,26 \cdot 0,052}{219,393} = 0,653.$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U^2_{1ф} \cdot (1 - s_{ном})}{2 \cdot C_1 \cdot \lambda_{\max} \cdot P_{ном}} = \frac{3 \cdot 219,393^2 \cdot (1 - 0,0092)}{2 \cdot 1,017 \cdot 2,3 \cdot 90 \cdot 10^3} = 0,3384.$$

$$B = \frac{1}{s_{ном}} + \frac{1}{s_{\max}} - \frac{2 \cdot A_0 \cdot A_1}{s_{ном}} = \frac{1}{0,0092} + \frac{1}{0,0593} - \frac{2 \cdot 0,653 \cdot 0,3384}{0,0092} = 59,158.$$

$$C = \frac{1}{s_{ном} \cdot s_{\max}} - \left(\frac{1}{s_{ном}^2} + \frac{1}{s_{\max}^2} \right) \cdot A_0 \cdot A_1 =$$

$$= \frac{1}{0,0092 \cdot 0,0593} - \left(\frac{1}{0,0092^2} + \frac{1}{0,0593^2} \right) \cdot 0,653 \cdot 0,3384 = -21,37.$$

Уточнюємо значення коефіцієнтів:

$$\beta = -\frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} - C} = -\frac{59,158}{2} + \sqrt{\frac{59,158^2}{4} - (-21,37)} = 0,359.$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_{\max}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,0593^2} - 0,359^2} = 17,2.$$

$$X_{ном} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 17,2 \cdot 1,017 \cdot 0,0191 = 0,3341 \; Ом.$$

$$X_{2\sigma}' = \frac{0,58 \cdot X_{ном}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,3341}{1,017} = 0,19 \; Ом.$$

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{ном} = 0,42 \cdot 0,3341 = 0,14 \; Ом.$$

$$E_1 = \sqrt{\left(U_{1ф} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1ном}\right)^2 + \left(U_{1ф} \cdot \sin\varphi - X_{1\sigma} \cdot I_{1ном}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(219,4 \cdot 0,84 - 0,0296 \cdot 163,45\right)^2 + \left(219,4 \cdot 0,456 - 0,14 \cdot 163,45\right)^2} =$$

$$= 205,4 \; В.$$

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_\mu} = \frac{205,4}{41,26} = 4,98 \; Ом.$$

$$X_1 = X_\mu + X_{1\sigma} = 4,98 + 0,14 = 5,119 \; Ом.$$

$$X_2 = X_\mu + X_{2\sigma}' = 4,98 + 0,19 = 5,169 \; Ом.$$

$$L_s = \frac{X_1}{\omega_0} = \frac{5,119}{314} = 0,01629 \; Гн.$$

$$L_r = \frac{X_2}{\omega_0} = \frac{5,169}{314} = 0,01645 \; Гн.$$

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{\omega_0} = \frac{4,98}{314} = 0,01585\ Гн.$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_1} = \frac{0,01629}{0,0296} = 0,55\ с.$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_2'} = \frac{0,01645}{0,0191} = 0,861\ с.$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_s \cdot L_r} = 1 - \frac{0,01585^2}{0,01629 \cdot 0,01645} = 0,062.$$

Для комплексного дослідження динамічних режимів роботи асинхронного двигуна серії 3ВР 250SMC 4 було розроблено симуляційну модель у середовищі MATLAB/Simulink із використанням бібліотеки SimPowerSystems, структурна схема якої представлена на рис. 2.6. Центральним елементом цієї моделі виступає блок Asynchronous Machine SI Unit, що реалізує математичний опис машини на основі класичної Т-подібної схеми заміщення. Живлення двигуна моделюється за допомогою джерела програмованої трифазної синусоїдальної напруги Three-Phase Programmable Voltage Source, налаштованого на номінальні параметри мережі. Для реєстрації та графічного відображення ключових параметрів, таких як кутова швидкість, електромагнітний момент і струм ротора, застосовано інструменти візуалізації Bus Selector та Scope. Крім того, для імітації реальних умов експлуатації в модель інтегровано спеціалізовану підсистему Mc, що формує сигнал випадкового навантаження на валу двигуна, алгоритм роботи якої детально розкрито на рис. 2.7.

Виконаємо симуляції пуску двигуна 3ВР 250SMC 4 без навантаження при різних частотах 50, 30 і 60 Гц з дотриманням закону $\frac{U}{f} = const$. Результати симуляцій показуються на рис. 2.8 – 2.17.

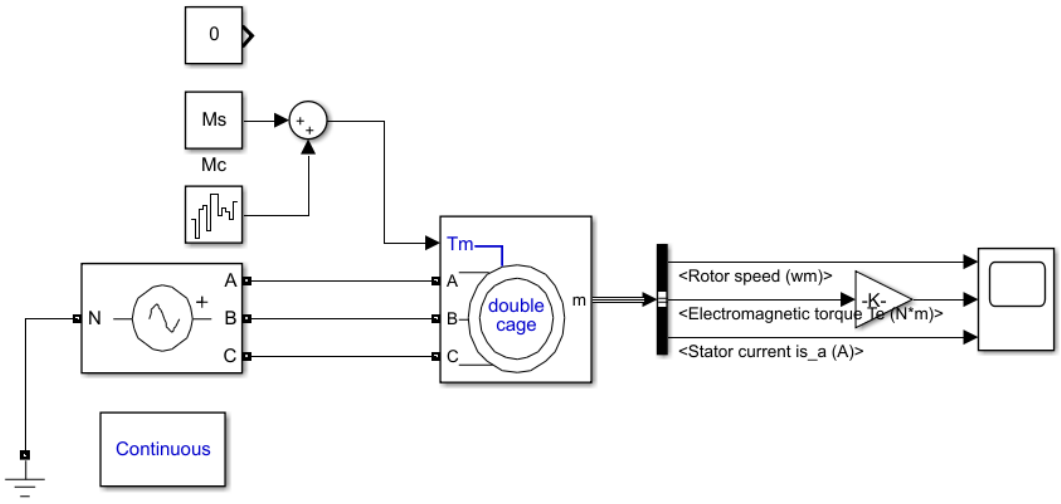

Рисунок 2.6 - Модель пуску М3ВР 250SMC 4

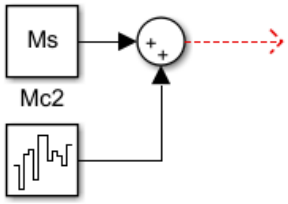

Рисунок 2.7 – Модель навантаження двигуна М3ВР 250SMC 4

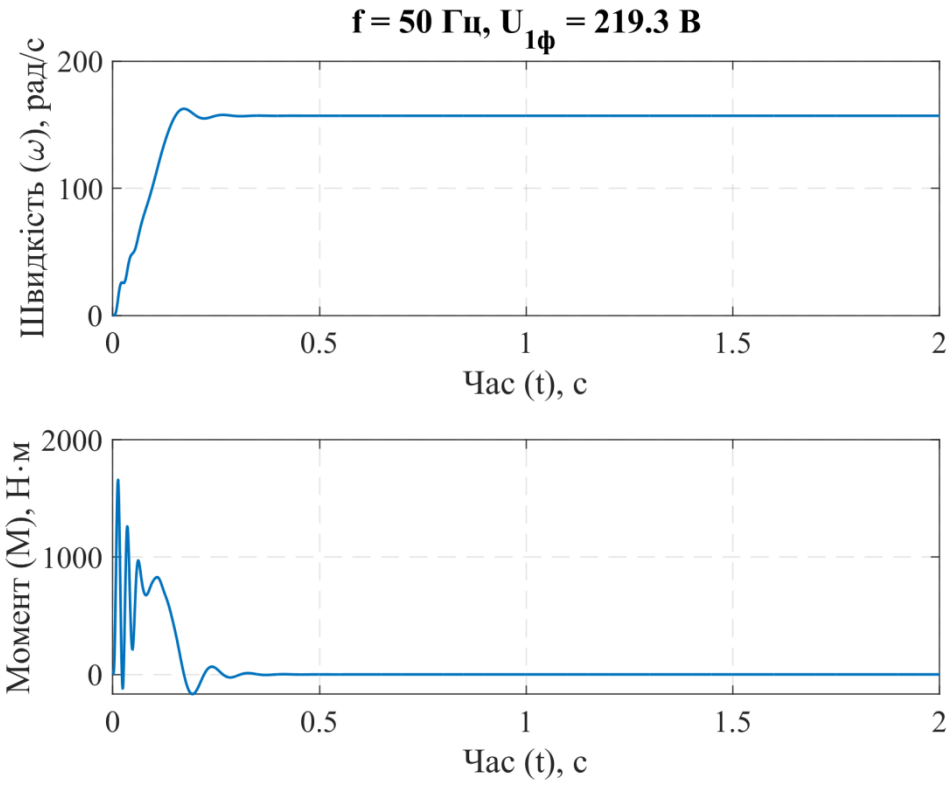

Рисунок 2.8 – Динаміка розгону двигуна М3ВР 250SMC 4 за швидкістю і моменту при частоті 50 Гц

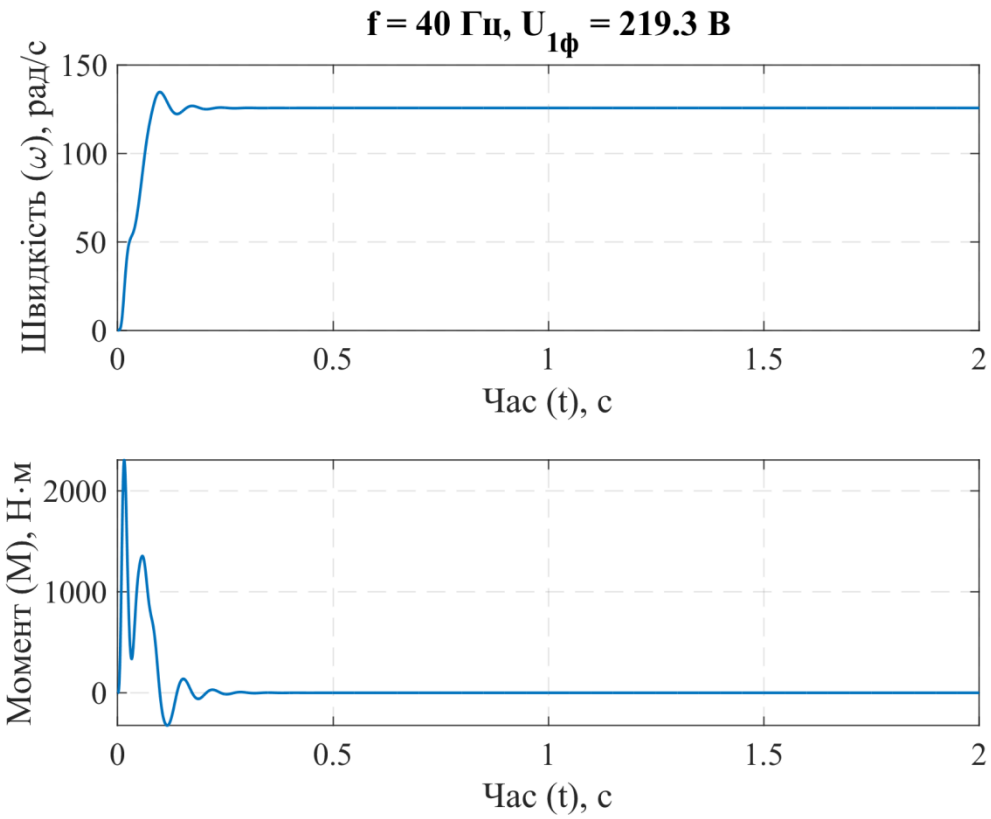

Рисунок 2.9 - Динаміка розгону двигуна M3BP 250SMC 4 за швидкістю і моменту при частоті 40 Гц

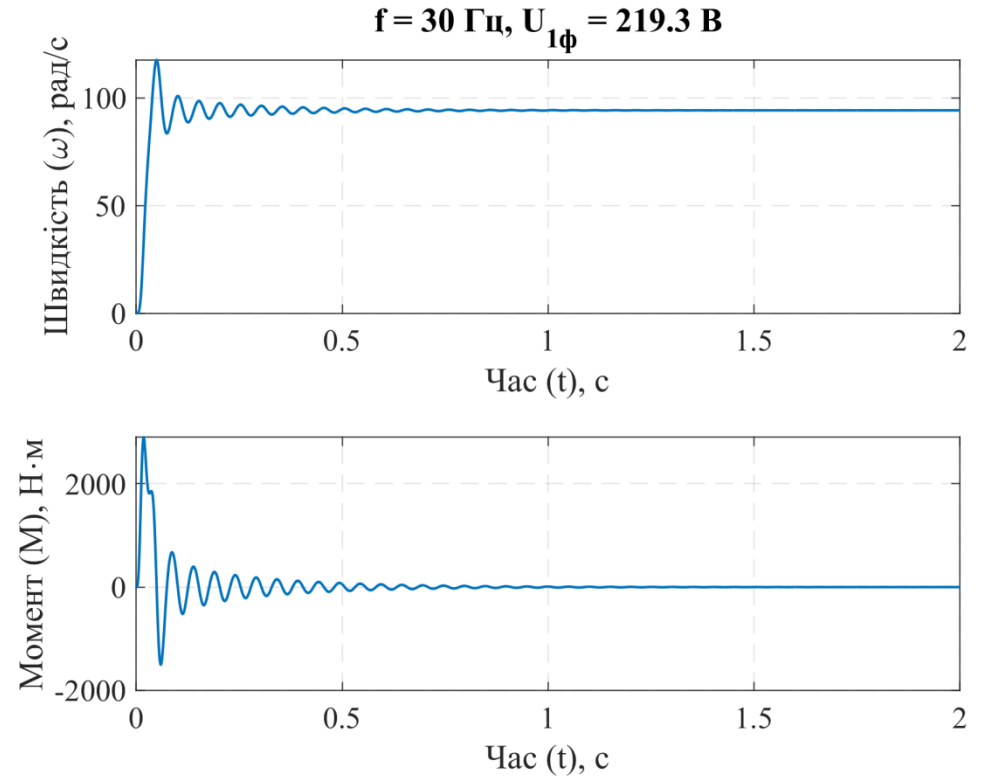

Рисунок 2.10 - Динаміка розгону двигуна M3BP 250SMC 4 за швидкістю і моменту при частоті 30 Гц

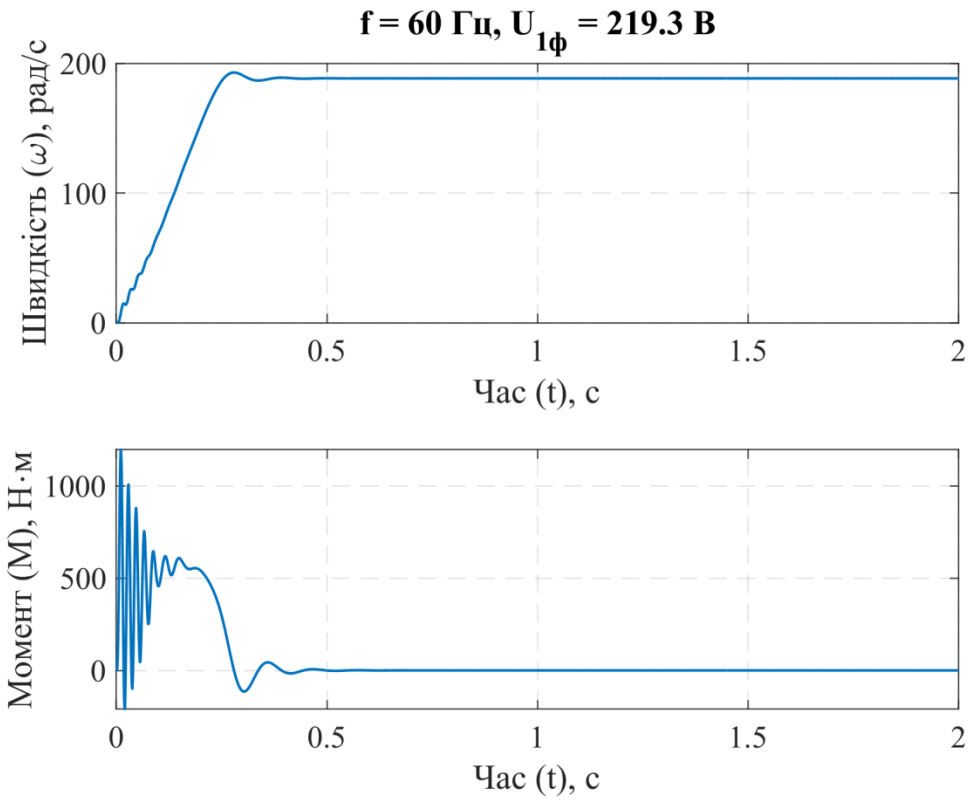

Рисунок 2.11 - Динаміка розгону двигуна М3ВР 250SMC 4 за швидкістю і моменту при частоті 60 Гц

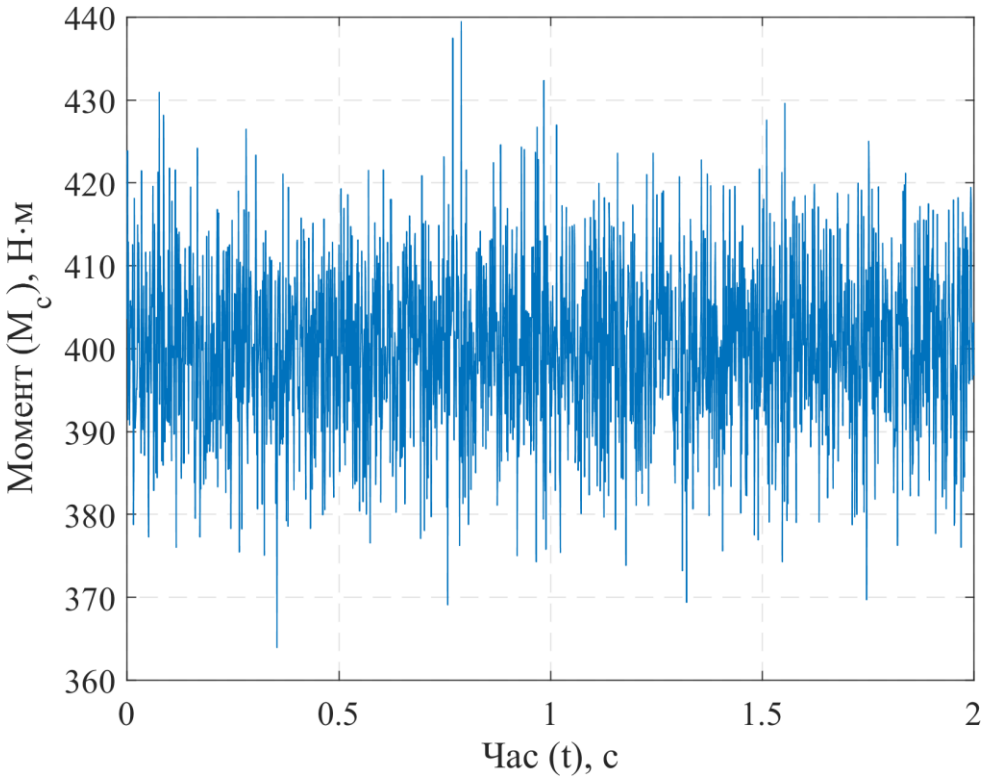

Рисунок 2.12 – Момент навантаження обертального механізму бурового верстата СБШ

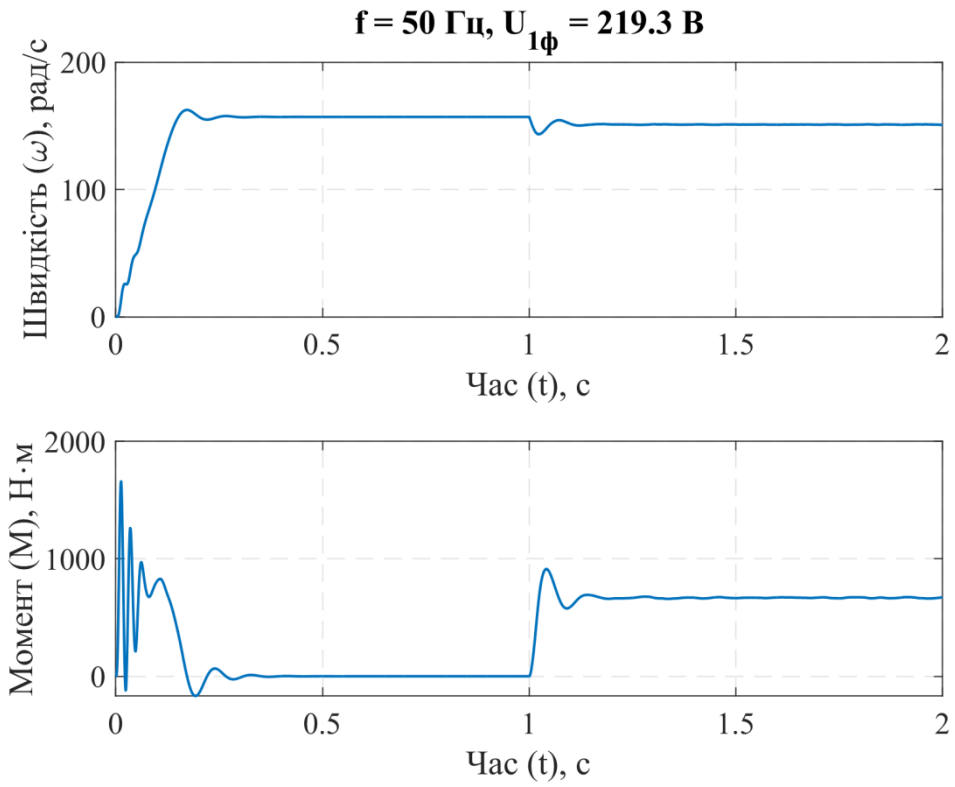

Рисунок 2.13 - Динаміка розгону двигуна М3ВР 250SMC 4 за швидкістю і моменту при частоті 50 Гц з накидом навантаження

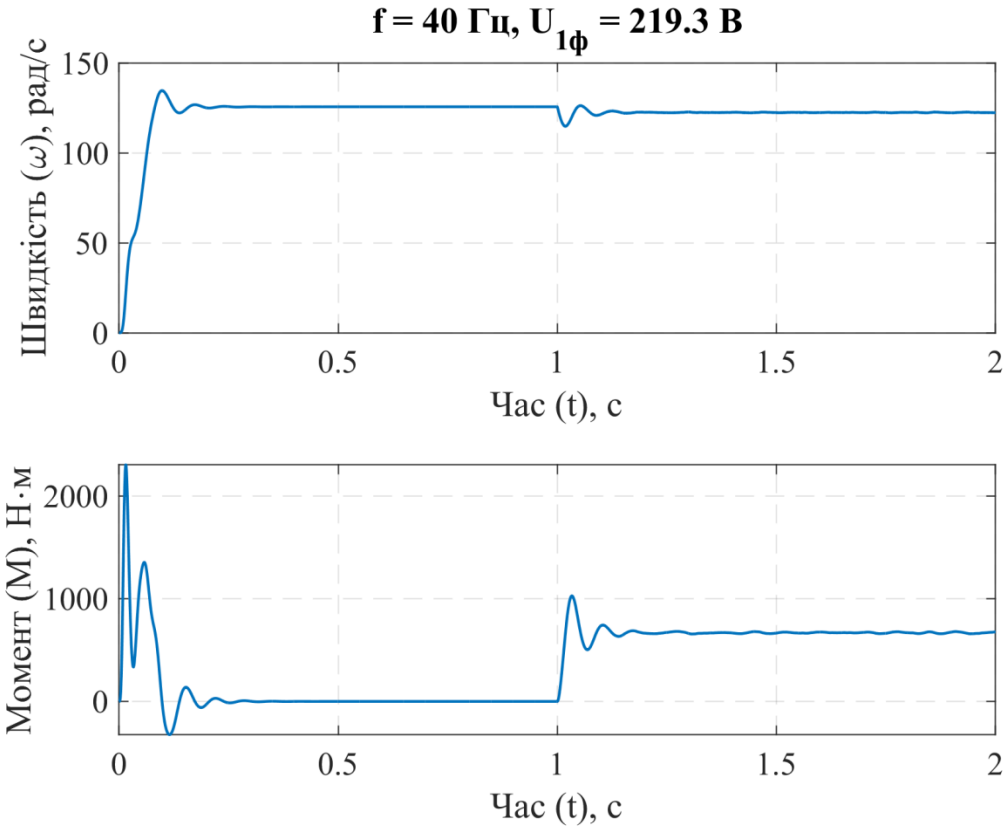

Рисунок 2.14 - Динаміка розгону двигуна М3ВР 250SMC 4 за швидкістю і моменту при частоті 40 Гц з накидом навантаження

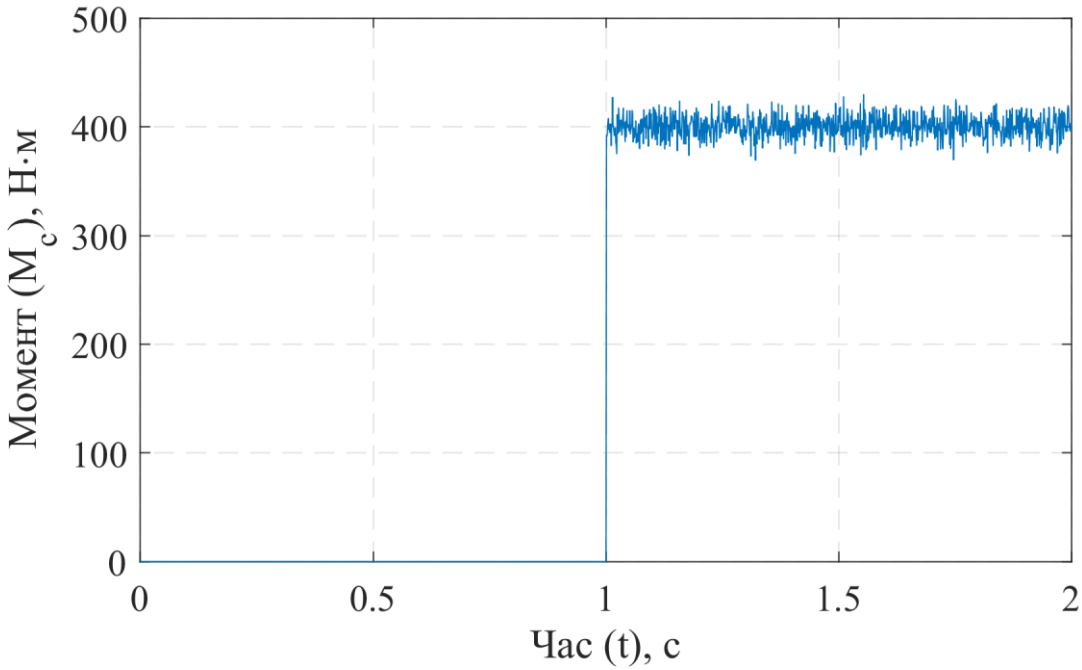

Рисунок 2.15 – Момент навантаження обертального механізму бурового верстата

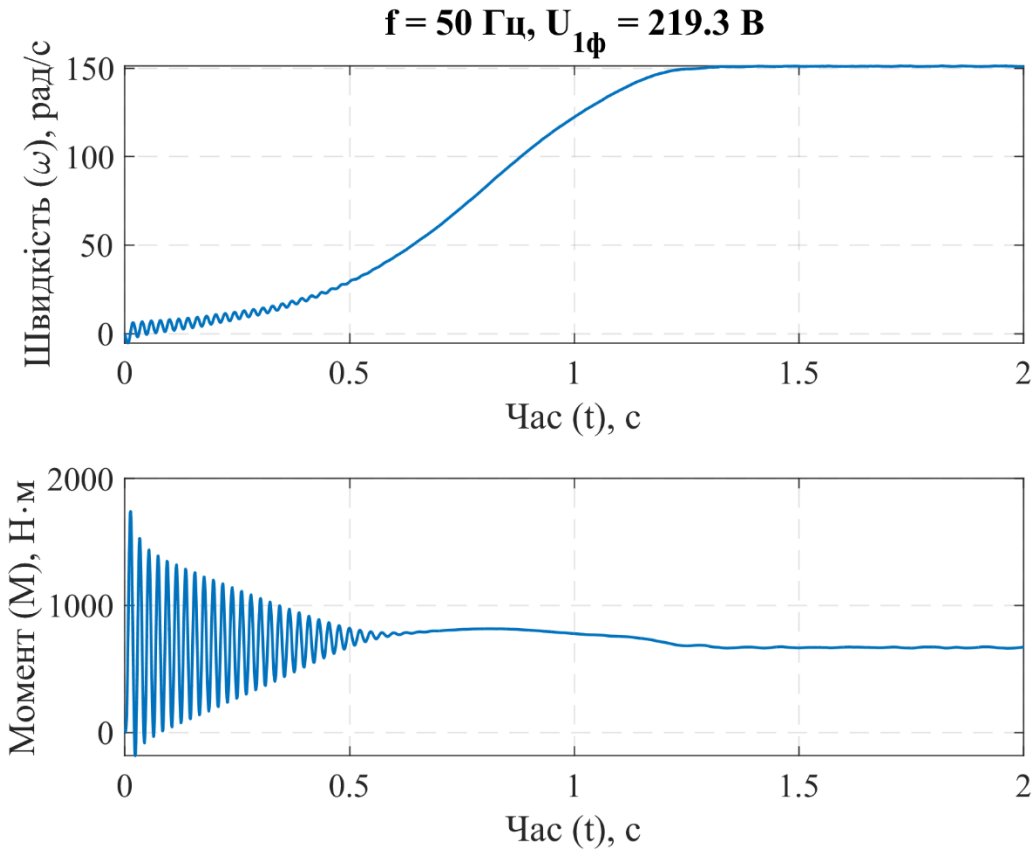

Рисунок 2.16 - Динаміка розгону двигуна M3BP 250SMC 4 за швидкістю і моменту при частоті 50 Гц і пуску в забої

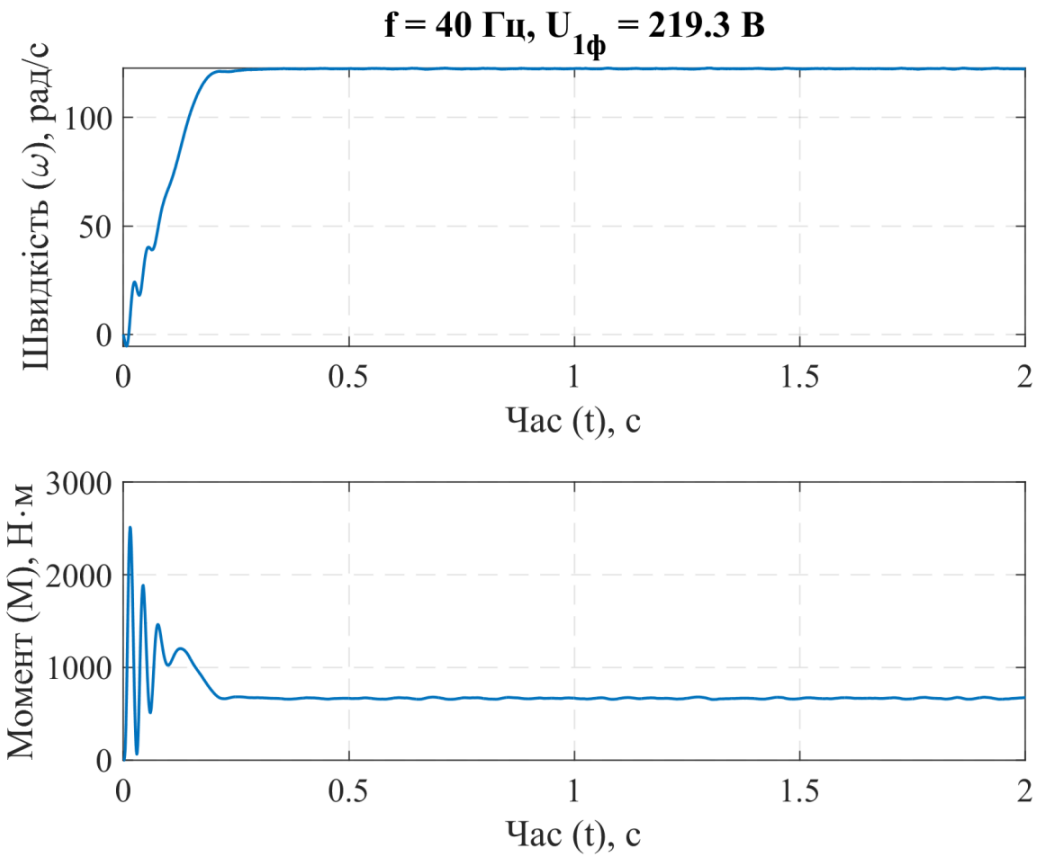

Рисунок 2.17 - Динаміка розгону двигуна М3ВР 250SMC 4 за швидкістю і моменту при частоті 40 Гц і пуску в забої

Проаналізувавши наведені графічні залежності, можна стверджувати, що зменшення частоти живлячої напруги закономірно призводить до зниження як установчої швидкості обертання, так і значення електромагнітного моменту в усталеному режимі роботи електропривода. Водночас спостерігається суттєве збільшення тривалості перехідного процесу, що стає особливо вираженим при роботі на частотах, які не перевищують позначку 40 Гц, де динамічні властивості системи помітно погіршуються через зростання часу виходу на робочі характеристики.

Висновки за розділом 2

У розділі проведений розрахунок природних характеристик М3ВР 250SMC 4 на базі замісної Т-схеми, який виявив нелінійний характер залежностей моменту та струму від ковзання, що дозволило виокремити робочу зону з від'ємною жорсткістю та зону підвищеного ковзання, важливу

для оцінки перевантажувальної здатності приводу. Впровадження частотного керування забезпечило формування сімейств штучних характеристик у діапазоні 10…60 Гц для плавного регулювання швидкості. Динамічний аналіз у MATLAB/Simulink із використанням двофазної моделі показав, що зниження частоти збільшує тривалість перехідного процесу, особливо на низьких частотах, що вимагає корекції параметрів регуляторів для плавності розгону. Отримані результати підтверджують доцільність частотно-регульованого асинхронного електропривода для стабілізації швидкості обертального механізму, що забезпечує підвищення продуктивності буріння та збільшення ресурсу обладнання.

Розділ 3. Проектна розробка

3.1 Розробка САК швидкістю електроприводу механізму обертання бурового верстата

3.1.1 Спрощена модель системи ПЧ-АД без зворотних зв’язків

У структурній побудові сучасних перетворювачів частоти з проміжною ланкою постійного струму традиційно виділяють три ключові функціональні модулі: керований випрямляч, що забезпечує перетворення змінної напруги мережі у постійну, згладжуючий фільтр для мінімізації пульсацій, а також автономний інвертор напруги, який формує вихідний сигнал із регульованими параметрами. Хоча транзисторний перетворювач за своєю природою є нелінійним дискретним динамічним об'єктом із певними обмеженнями щодо керування, на практиці його специфічні нелінійні властивості не справляють вирішального впливу на функціонування системи автоматичного регулювання електропривода. Це пояснюється тим, що частота зрізу контуру регулювання, в який інтегровано перетворювач, суттєво нижча за частоти, що визначають динаміку комутації силових ключів, а тривалість перехідних процесів у замкненій системі значно перевищує період дискретизації керуючих сигналів. Саме тому під час синтезу систем керування електроприводами змінного струму випрямляч зазвичай апроксимують типовою аперіодичною ланкою першого порядку, що дозволяє спростити математичний опис об'єкта без істотної втрати точності моделювання динамічних режимів [10].

Для створення САК швидкістю скористаємось линеаризованими моделями АД [12] (рис. 3.1) і ПЧ (рис. 3.2).

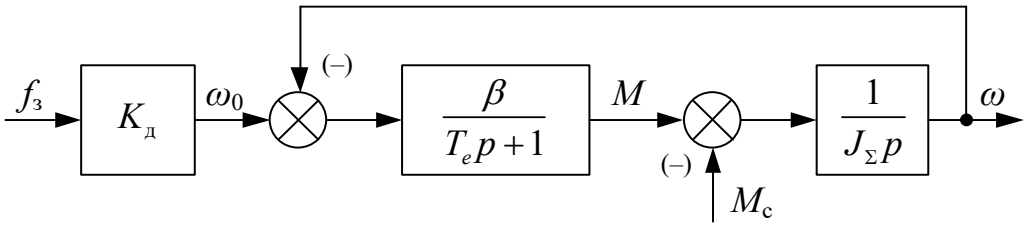

Рисунок 3.1 – Спрощена модель АД

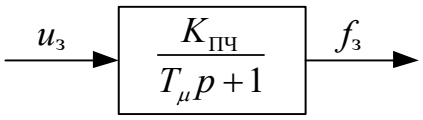

Рисунок 3.2 – Спрощена модель перетворювача

Прорахуємо лінеаризовану модель ПЧ-АД механізму обертання верстату.

Прораховуємо сталі часу двигуна:

$$T_e = \frac{1}{\Omega \cdot s_{\max}} = \frac{1}{314 \cdot 0,0581} = 0,0547\ c.$$

де $\Omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314\ c^{-1}.$

$$\beta = \frac{M_{ном}}{\omega_0 - \omega_н} = \frac{580,7}{157,08 - 154,9} = 277,2\ \frac{Н \cdot м}{c^{-1}}.$$

Допустиме число включень:

$$z = \frac{P_{ном} \cdot s_{ном} \cdot k \cdot 3600}{n_0^2 \cdot J_{дв}\left(1 + \frac{J_{бур}}{J_{дв}}\right)},\ включень / год \qquad (3.1)$$

де $k = 0,2...0,4$ – коефіцієнт охолодження двигуна.

Допустимо, що $z = 60$ тоді:

$$J_{нас} = \frac{P_н \cdot s_н \cdot k \cdot 3600}{n_0^2 \cdot z} - J_{дв} =$$

$$= \frac{90 \cdot 10^3 \cdot 0,013 \cdot 0,2 \cdot 3600}{1500^2 \cdot 60} - 0,4 = 0,182\ Н \cdot м.$$

$$J_\Sigma = J_{дв} + J_{бур} = 0,4 + 0,182 = 0,582\ кг \cdot м^2.$$

$$T_м = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{0,582}{277,2} = 0,0021\ c.$$

$$4 \cdot T_e = 4 \cdot 0,00547 = 0,219 \Rightarrow T_м < 4 \cdot T_e.$$

Динаміка буде коливальною.

Передавальна функція двигуна:

$$W_{дв}(p)=\frac{\frac{\beta K_{дв}}{J_\Sigma p(T_e p+1)}}{1+\frac{\beta}{J_\Sigma p(T_e p+1)}}=\frac{\beta K_{дв}}{J_\Sigma T_Э p^2+J_\Sigma p+\beta}=$$

$$=\frac{K_{дв}}{T_м T_e p^2+T_м p+1}=\frac{3{,}14}{0{,}000115p^2+0{,}0021p+1}$$

де $K_{дв}=\frac{2\pi}{p}=\frac{6{,}28}{2}=3{,}14.$

Передавальна функція перетворювача:

$$W_{ПЧ}=\frac{K_{ПЧ}}{T_\mu p+1}=\frac{2{,}5}{0{,}01p+1}.$$

де $K_{ПЧ}=f_н/I_з=50/20=2{,}5\ Гц/мА$.

Далі налаштовуємо контролер швидкості.

3.1.2 Створення контуру САК швидкістю

Створення контуру САК швидкістю проводимо послідовною корекцією з налаштуванням на модульний оптимум.

Тахогенератор типу ТП-50-100-1 виконує функцію датчика швидкості. Паспортні дані ТП-50-100-1 див. у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Паспортні дані ТП-50-100-1

$n_{ном}, об/хв$	$U_{ном}, В$	S, мВ/ (об/хв)	$R_{ном}, кОм$	$J_{тг}, 10^{-7}$ $кг/м^2$	$M_{тг}, 10^{-4}$ $Н \cdot м$
1500	220	100	10	360	270

Коефіцієнт посилення тахогенератора:

$$K_{тг}=\frac{U_{н\,тг}}{\omega_{н\,тг}}=\frac{220В}{157\ с^{-1}}=1{,}4\ \frac{В\cdot с}{рад}.$$

Передавальна функція ПЧ-АД без контролера і датчика швидкості:

$$W_o(p)=W_{ПЧ}(p)\cdot W_{дв}(p); \qquad (3.2)$$

$$W_o(p) = \frac{K_{ПЧ} \cdot K_{дв}}{(T_\mu p + 1) \cdot (T_м T_е p^2 + T_м p + 1)}. \quad (3.3)$$

При проектуванні регулятора швидкості орієнтуються на оптимальну форму передавальної функції розімкненої системи, де шляхом відповідної компенсації повністю усуваються значні сталі часу об'єкта управління, що фактично виводить їх із динамічного розрахунку контуру. Подібним чином нейтралізується вплив підсилювальних коефіцієнтів, а для гарантованого зведення до нуля статичної похибки в структуру вводиться інтегруюча ланка з мінімальною сталою часу. У підсумку початковий розімкнений контур трансформується в еквівалентну систему з узагальненим коефіцієнтом підсилення $1/K_{тг}$, яка відрізняється астатизмом першого порядку та високою швидкодією, що забезпечується малими значеннями решти нескомпенсованих часових параметрів, які визначають динаміку регулювання.

Потрібна передавальна функція системи зі зворотним зв'язком за швидкістю при налаштуванні на модульний оптимум:

$$W_{р\ баж}(p) = W_{рш}(p) \cdot W_o(p) = \frac{1 / K_{тг}}{2T_\mu p(T_\mu p + 1)}. \quad (3.4)$$

Передавальна функція контролера:

$$W_{рш}(p) = \frac{W_{р\ баж}(p)}{W_o(p)} = \frac{1 / K_{тг}}{2T_\mu p(T_\mu p + 1)} \Bigg/ \frac{K_{ПЧ} \cdot K_Д}{(T_\mu p + 1) \cdot (T_м T_е p^2 + T_м p + 1)} =$$

$$= \frac{(T_\mu p + 1) \cdot (T_м T_е p^2 + T_м p + 1)}{K_{тг} 2T_\mu p(T_\mu p + 1) \cdot K_{ПЧ} \cdot K_{дв}} = \frac{(T_м T_е p^2 + T_м p + 1)}{2T_\mu p \cdot K_{ПЧ} \cdot K_{дв} \cdot K_{тг}}.$$

Отже передавальна функція представлена ПІД-контролером.

Коефіцієнти ПІД-контролера швидкості:

$$K_П = \frac{T_м}{2 \cdot K_{ПЧ} \cdot K_{дв} \cdot K_{тг}} = \frac{0,0021}{2 \cdot 2,5 \cdot 3,14 \cdot 1,4} = 9,55 \cdot 10^{-5}.$$

$$K_I = \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{ПЧ} \cdot K_{дв} \cdot K_{тг}} = \frac{1}{2 \cdot 0,01 \cdot 2,5 \cdot 3,14 \cdot 1,4} = 5,68.$$

$$K_Д = \frac{T_\mu \cdot T_e}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{ПЧ} \cdot K_{дв} \cdot K_{тг}} = \frac{0,008 \cdot 0,0547}{2 \cdot 0,01 \cdot 2,5 \cdot 3,14 \cdot 1,4} = 0,00249.$$

Отже:

$$W_{рш}(p) = 9,55 \cdot 10^{-5} + \frac{5,68}{p} + 0,00249\,p.$$

Перевіримо регулятор шляхом симулювання системи зі зворотнім зв'язком за швидкістю в MATLAB/Simulink. На рис. 3.3 показується відповідна одноконтурна модель регулювання швидкості обертального механізму бурового верстату з ПІД-контролером.

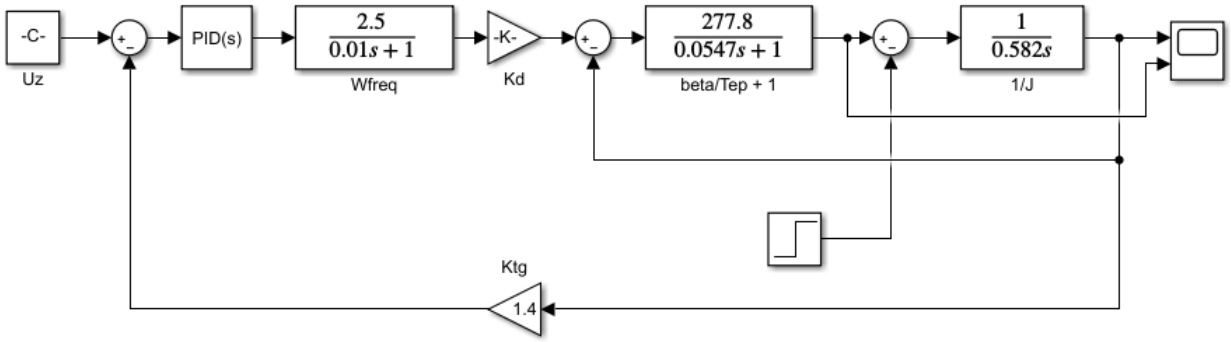

Рисунок 3.3 - Модель системи керування швидкістю електроприводу обертального механізму бурового верстата

Результати симуляцій представлені на рис. 3.4. Аналіз наведених часових діаграм свідчить про те, що впровадження ПІД-контролера в контур керування дає змогу досягти високої швидкодії системи, скорочуючи тривалість перехідного процесу до величини меншої за одну секунду, причому динаміка розгону характеризується відсутністю коливальних явищ та перерегулювання, однак такий режим супроводжується істотним зростанням пускового обертального моменту, що слід враховувати при виборі механічних компонентів приводу. Використання замкненої системи електропривода з каналом зворотного зв'язку за кутовою швидкістю забезпечує стабілізацію частоти обертання бурового долота на заданому рівні навіть за умов змінного статичного навантаження, що моделює зміну твердості породи, при цьому в порівнянні з розімкненою структурою спостерігається суттєве зменшення

перерегулювання за швидкістю під час пуску та зниження амплітуди моментного кидка, тоді як загальний час виходу на усталений режим залишається незмінним.

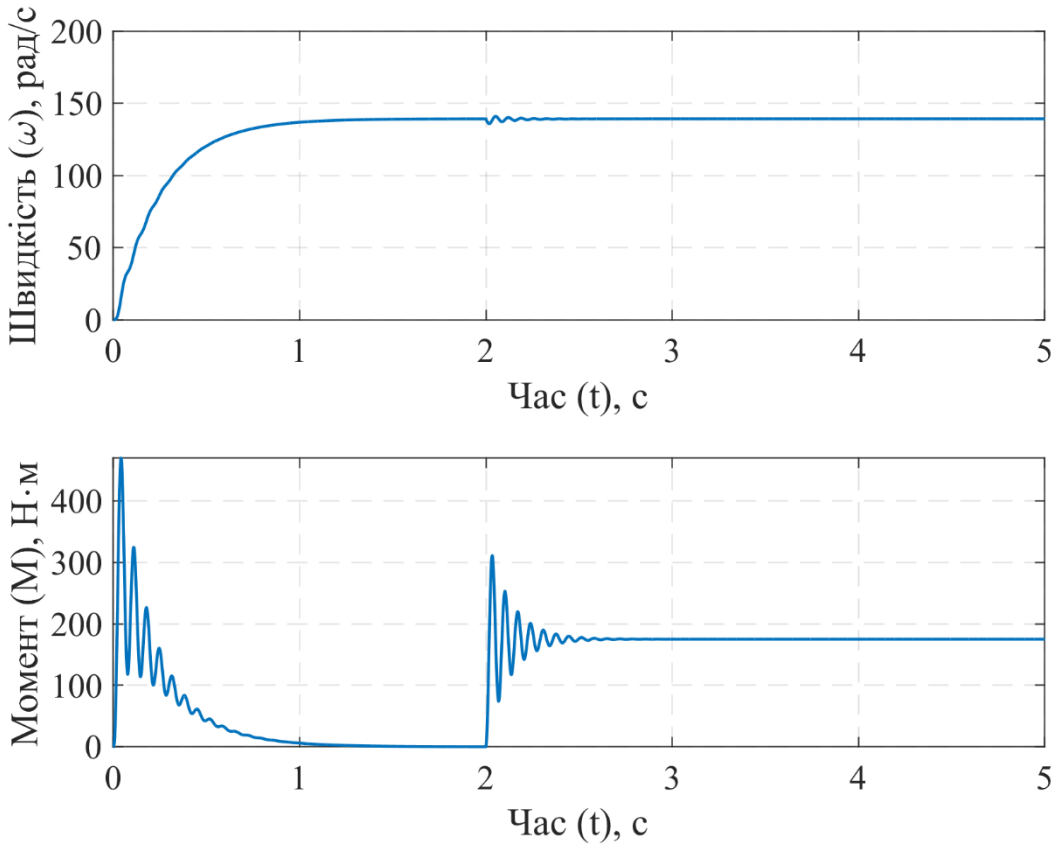

Рисунок 3.4 – Динаміка за швидкістю і моментом в системі зі зворотнім зв’язком

Сукупність отриманих результатів симуляції підтверджує технічну доцільність застосування частотно-регульованого асинхронного електропривода в складі обертального механізму бурової установки СБШ-250МНА, оскільки така система поєднує високі динамічні показники зі здатністю підтримувати технологічну швидкість буріння за змінних геологічних умов.

3.2 Вибір перетворювача частоти для механізму обертання бурового верстата

Електропривод механізму обертання за системою ПЧ-АД наведений на рис. 3.5.

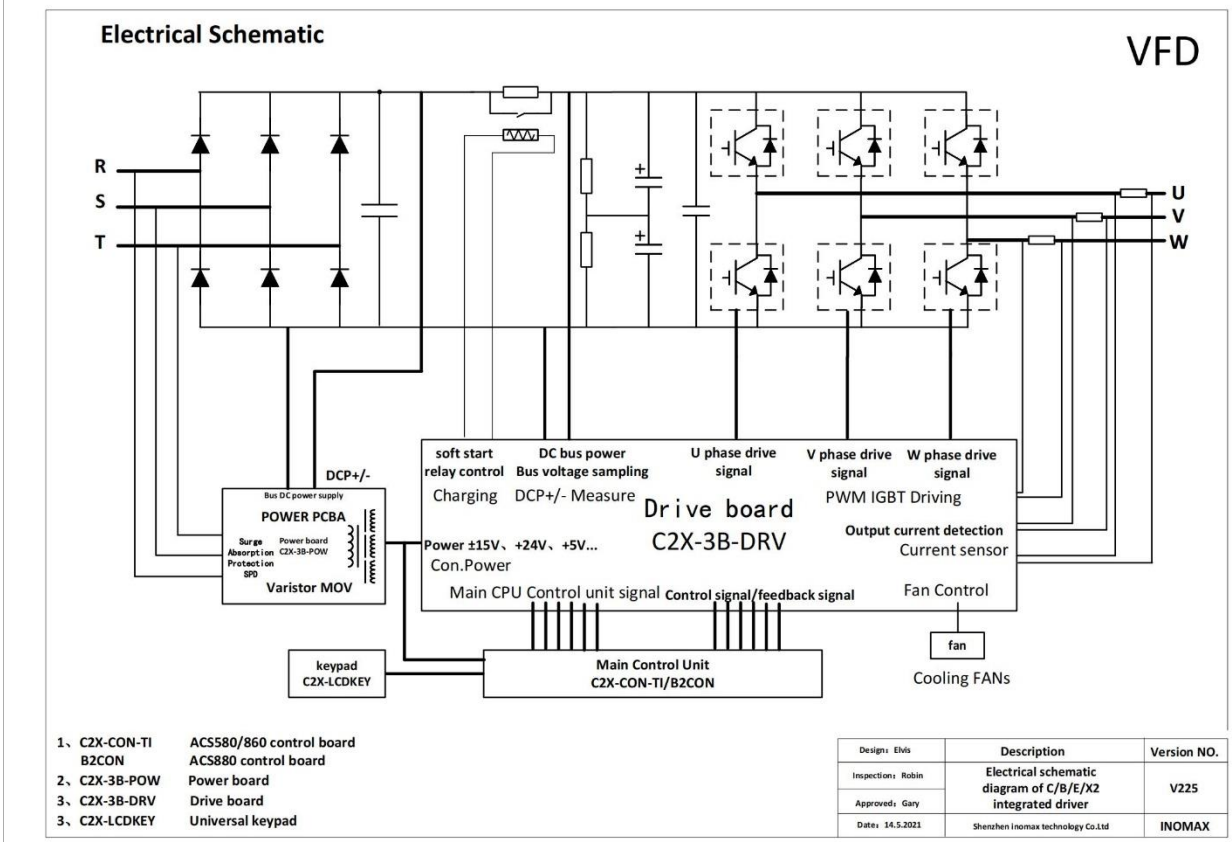

Рисунок 3.5 – Схема електроприводу за системою ПЧ-АД з ABB ACS580-01-169A-4 [14]

Вибір ПЧ робиться згідно умов:

$$I_{вихПЧ} \geq I_{н}; \tag{3.5}$$

$$U_{вихПЧ} \geq U_{н}, \tag{3.6}$$

Умовам (3.5) і (3.6) задовольняє ПЧ загального призначення ABB ACS580-01-169A-4. Номінальний струм ПЧ (169 А) перевищує робочий струм двигуна М3ВР 250SMC 4 (163 А), що забезпечує надійну роботу без перевантаження силових ключів.

Основою функціональності ABB ACS580-01-169A-4 є вбудована стандартна програма керування, яка підтримує як скалярний режим керування $U/f = const$, так і бездатчиковий векторний режим для забезпечення високої точності регулювання моменту та швидкості навіть у складних умовах експлуатації.

Для спрощення налаштування та оптимізації енергоспоживання в перетворювач інтегровано функцію енергетичного оптимізатора, яка автоматично адаптує магнітний потік двигуна до поточного навантаження, що дозволяє знизити загальне споживання енергії до 20% та зменшити акустичний шум під час роботи на частотах нижче номінальної.

ПЧ має вбудований ПІД-регулятор, який дає змогу безпосередньо керувати технологічними параметрами буріння без залучення зовнішнього контролера. Для захисту механічної частини приводу реалізовано функцію усунення механічних резонансів шляхом програмного пропуску критичних частот обертання, а також налаштовувані обмежувачі моменту та струму, що запобігають аварійним зупинкам через тимчасові перевантаження.

Перетворювач підтримує широкий спектр спеціальних режимів запуску та роботи, зокрема функцію «летючого старту» для підхоплення двигуна, що обертається, попереднє та післядужне намагнічування для гарантованого пуску під навантаженням та утримання механізму після зупинки, а також режим відновлення роботи при короткочасних провалах напруги живлення за рахунок кінетичної енергії обертів.

Наявність вбудованого гальмівного переривача дозволяє реалізувати рекуперацію енергії при гальмуванні механізму.

Параметри перетворювача наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Паспортні дані перетворювача ABB ACS580-01-169A-4

Параметр	Значення
$U_{ном}, В$	400
$P_{ном}, кВт$	90
$I_{ном}, А$	169
$I_d, А$	161

Намічаємо струмообмежувальний реактор згідно умови:

$$I_{тор\ ном} \geq I_н. \qquad (3.7)$$

Беремо реактор РТСТ-200 з паспортними даними див. табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Паспортні дані струмообмежуючого реактора

Параметр	Значення
$I_{ном}, А$	200
$L, Гн$	$0{,}763 \cdot 10^{-3}$
$R, Ом$	0,0708

На рис. 3.6 показано схему підключення електроприводу обертального механізму із системами захисту електродвигуна і САК.

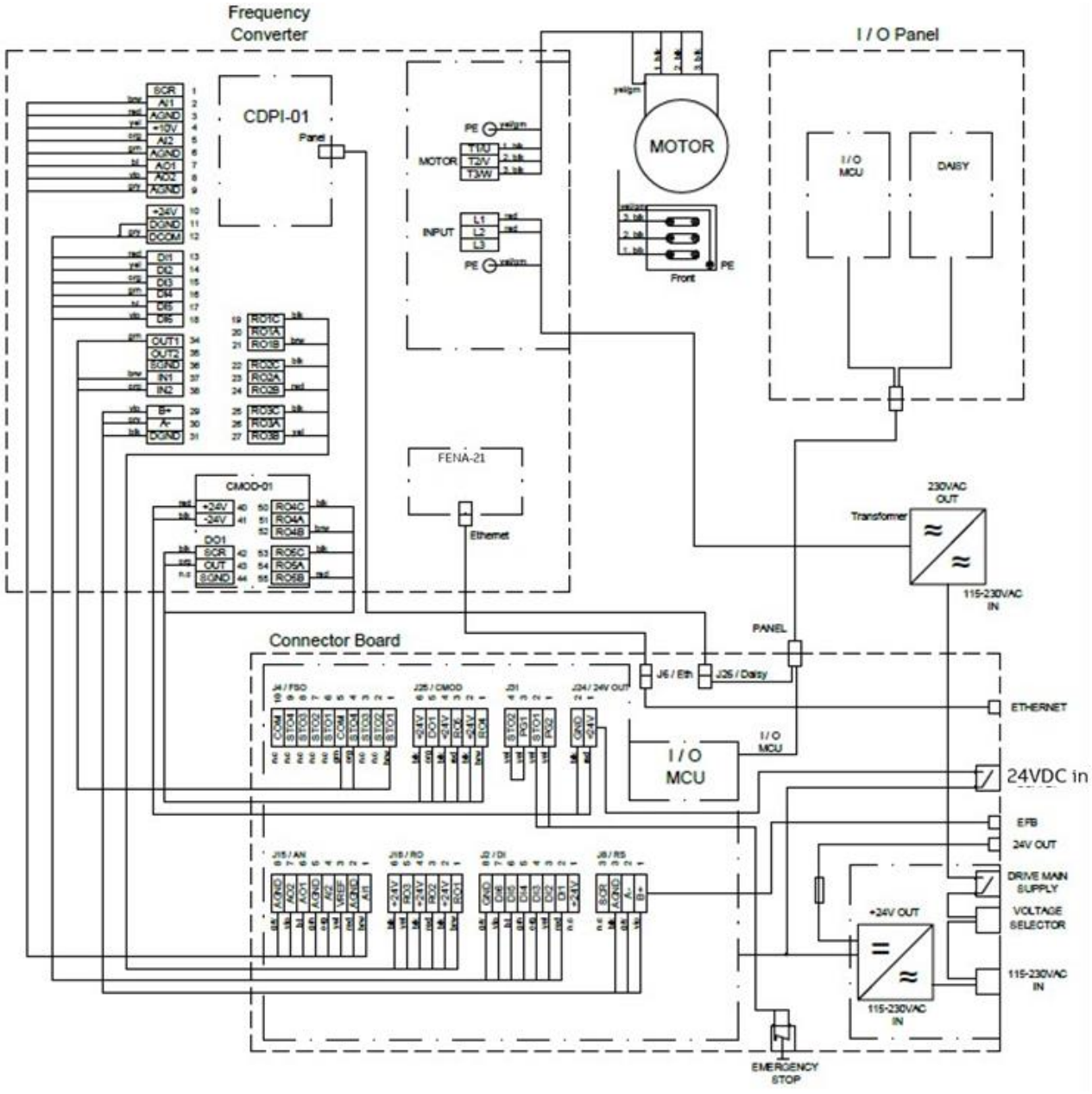

Рисунок 3.6 – Схема підключення ПЧ ABB ACS580-01-169A-4 до АД механізму обертання [15]

Основні елементи ACS580-01-169A-4:

1. Вхідне трифазне живлення (L1, L2, L3) - підключається до клем U1, V1, W1. Напруга: 380-480 В змінного струму. Частота: 50/60 Гц.

2. Діодний або керований випрямляч.

3. Проміжне коло постійного струму (DC Link) з напругою постійного струму 540-650 В. Підключення через клеми: UDC+ (позитив), UDC- (негатив).

4. Конденсатори фільтрації (C1-1...C1-x)

5. Інвертор на IGBT транзисторах. Підключення через клеми: T1/U, T2/V, T3/W (підключення двигуна).

6. Гальмівний переривач (Brake Chopper). Клеми: R+ та R- для підключення гальмівного резистора.

EMC фільтр - вбудований фільтр електромагнітної сумісності класу C2.

Для забезпечення надійного функціонування електропривода система захисту від міжфазних коротких замикань реалізується за двома реле максимального струму, що не лише локалізує коротке замикання, але й ефективно фільтрує та обмежує вплив значних пускових кидків струму на обмотки двигуна, запобігаючи їхньому термічному пошкодженню. Для тривалих режимів експлуатації є захист від перегріву, спричиненого тривалим перевищенням номінального навантаження, що зазвичай реалізується через вбудовані в автоматичні вимикачі теплові розчеплювачі, які спрацьовують із витримкою часу, пропорційною до величини перевантаження.

3.3 Енергозбереження електромеханічного обладнання бурового верстата

Енергоефективність бурового верстата при впровадженні регульованого електропривода може бути суттєво підвищена за рахунок комплексу взаємопов'язаних технічних рішень, серед яких першочергове значення має обґрунтований вибір потужності двигуна для нерегульованих систем, оскільки заниження цього параметра неминуче призводить до передчасного виходу обладнання з ладу, а завищення спричиняє роботу з низьким коефіцієнтом

корисної дії та підвищеними втратами енергії, особливо в асинхронних машинах при неповному завантаженні.

Додатковий резерв економії закладено у переході на енергозберігаючі серії електродвигунів, де застосування вдосконалених конструктивних рішень та збільшення маси активних матеріалів дозволяє підвищити загальний ККД приблизно на п'ять відсоткових пунктів без зміни зовнішніх габаритів. Важливим організаційно-технічним заходом є також мінімізація кількості проміжних механічних ланок у кінематичному ланцюгу, оскільки виключення варіаторів, муфт чи додаткових редукторів прямо впливає на підсумкову ефективність системи, адже загальний коефіцієнт корисної дії визначається добутком ККД кожного окремого елемента передачі. До цього ж напрямку належить оптимізація режимів експлуатації, зокрема застосування синхронних компенсаторів для корекції коефіцієнта потужності та впровадження систем частотного регулювання, які дають змогу підтримувати високі енергетичні показники двигуна при змінному навантаженні шляхом адаптації частоти обертання до поточних технологічних потреб.

Найбільш перспективним із погляду економічної доцільності є вибір сучасних способів керування на базі напівпровідникової техніки, де детальний аналіз технологічного процесу дозволяє визначити оптимальні межі регулювання та обрати перетворювач частоти або регулятор напруги, що забезпечує мінімальну вартість впровадження при максимальній точності підтримки швидкості у широкому діапазоні. Саме стрімкий розвиток силової електроніки та вдосконалення алгоритмів частотного керування зумовили зростання частки асинхронних двигунів у промисловості порівняно з машинами постійного струму, оскільки сучасні перетворювачі частоти забезпечують найвищі показники енергоефективності та динамічної точності серед усіх відомих методів регулювання електроприводів змінного струму.

Висновки за розділом 3

У результаті виконання розділу розроблено САК швидкістю електропривода обертального механізму бурової установки СБШ-250МНА на

базі частотно-регульованого асинхронного двигуна із застосуванням лінеаризованих математичних моделей перетворювача частоти та асинхронної машини. Прорахунок контролера швидкості здійснено методом послідовної корекції з налаштуванням на модульний оптимум, в результаті чого сформовано структуру ПІД-регулятора. Проведені симуляції в MATLAB/Simulink підтвердило працездатність запропонованої САК зі зворотним зв'язком за швидкістю: тривалість перехідного процесу не перевищує однієї секунди, відсутні коливальні процеси та перерегулювання за швидкістю, а замкнена структура забезпечує стабілізацію частоти обертання долота навіть за умов змінного статичного навантаження, що моделює неоднорідність гірських порід, при одночасному зниженні амплітуди пускового кидка моменту. Для практичної реалізації системи обґрунтовано вибір перетворювача частоти ABB ACS580-01-169A-4. Проаналізовані напрямки підвищення енергоефективності електромеханічного обладнання бурового верстату.

Висновки

1. У роботі проаналізовано технологію відкритого видобутку залізної руди на Першотравневому кар'єрі ПрАТ «ПІВНГЗК» та визначено роль бурового верстата СБШ-250МНА у формуванні вибухових свердловин. Дослідження умов експлуатації, що характеризуються високою динамічною нерівномірністю навантажень та зміною міцності порід у діапазоні 6–18 одиниць за Протодьяконовим, підтвердило необхідність модернізації електропривода обертального механізму для забезпечення стабільної швидкості обертання долота та підвищення продуктивності буріння.

2. Обґрунтовано переваги переходу від застарілої системи ТП-Д до сучасного ПЧ-АД. Встановлено, що заміна колекторних машин на асинхронні з частотним керуванням дозволяє усунути недоліки, пов'язані з необхідністю постійного обслуговування щітково-колекторного вузла, суттєво зменшити масогабаритні показники обладнання та розширити динамічні й перевантажувальні можливості приводу в умовах кар'єрної експлуатації.

3. Виконано розрахунок потужності та обертового моменту двигуна обертального механізму з урахуванням міцнісних характеристик залізистих кварцитів, що дало змогу обґрунтовано обрати трифазний асинхронний двигун ABB M3BP 250SMC 4 потужністю 90 кВт із номінальним струмом 163 А та частотою обертання 1478 об/хв. Прорахунок природних статичних характеристик на основі Т-подібної схеми заміщення виявив нелінійний характер залежностей моменту та струму від ковзання, що дозволило виокремити робочу зону з від'ємною жорсткістю та зону підвищеного ковзання, важливу для оцінки перевантажувальної здатності приводу.

4. Досліджено динамічні властивості електропривода в середовищі MATLAB/Simulink із застосуванням векторної математичної моделі асинхронної машини в еквівалентній двофазній системі координат. Встановлено, що впровадження частотного керування в діапазоні 10…60 Гц забезпечує формування сімейства штучних механічних та електромеханічних характеристик для плавного регулювання швидкості, однак зниження частоти

нижче 40 Гц супроводжується збільшенням тривалості перехідного процесу через магнітне перенасичення та зростання втрат у сталі, що потребує врахування при налаштуванні системи захисту.

5. Розроблено САК швидкістю електропривода на базі ПІД-регулятора, синтезованого методом послідовної корекції з налаштуванням на модульний оптимум із використанням тахогенератора ТП-50-100-1 як датчика зворотного зв'язку. Симуляції підтвердили, що запропонована САК забезпечує тривалість перехідного процесу менше однієї секунди без коливальних явищ та перерегулювання за швидкістю, а замкнена структура гарантує стабілізацію частоти обертання долота навіть за умов змінного статичного навантаження.

6. Для практичної реалізації системи обґрунтовано вибір універсального перетворювача частоти ABB ACS580-01-169A-4, що підтримує як скалярне, так і бездатчикове векторне керування з вбудованим ПІД-регулятором, функцією енергетичного оптимізатора (зниження енергоспоживання до 20%) та засобами усунення механічних резонансів.

Список використаних джерел

1. Висновок № 7-03/12-20413/10-17 від 28.09.2017 державної екологічної експертизи матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище «Відпрацювання Першотравневого родовища ПрАТ «ПІВНГЗК» відкритим способом на період до 2020 року».
2. Відкриті гірничі роботи: Ч. І. Процеси відкритих гірничих робіт [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво»/ О.О.Фролов, Т.В.Косенко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 151 с.
3. Бондаренко А.О. Гірничі машини для відкритих гірничих робіт : навч. посіб. Д.: НГУ, 2017. 123 с.
4. Станок буровий шарошечний СБШ-250. URL: http://www.plasma.com.ua/mining_equipment/drilling_rigs/product7.html (Дата звернення: 01.06.2026).
5. Собко Б.Ю., Ложніков О.В., Чебанов М.О. Буропідривні роботи на кар'єрах: навч. посіб. Дніпро: НТУ «ДП», 2025. 213 с.
6. Дриженко А.Ю. Відкриті гірничі роботи: підруч. Дніпро: ДВНЗ «НГУ», 2014. 590 с.
7. Гірничі машини відкритих робіт. Бурові верстати. Бурові верстати шарошкового буріння. URL: https://studfile.net/preview/12418770/page:3/ (Дата звернення: 02.06.2026).
8. Основи електропривода виробничих машин та комплексів: навч. посіб. / В.Е. Воскобойник, В.А. Бородай, Р.О. Боровик, О.Ю. Нестерова. Дніпро :Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2021. 254 с.
9. ABB Low voltage Process performance motors 400 V 50 Hz, 460V 60 Hz Catalog. 151 p. URL: https://www.irbis.ua/storage/downloadpdf/abb/motor_abb2.pdf (Дата звернення: 03.06.2026).
10. Теорія електропривода: підручник / М.Г. Попович, М.Г Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. Київ: Вища школа, 1993. 494 с.

11. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. 2-е вид. перероб. і доп. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2011. 540 с.

12. Чорний О.П. Моделювання електромеханічних систем / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін. Кременчук: КНУ ім. М. Остроградського, 2001. 410 с.

13. Спеціальні методи дослідження електромеханічних систем: Навчальний посібник / Щокін В.П., Толмачов С.Т., Федосов Б.Т., Щокіна О.В. Кривий Ріг, 2008.

14. Inomax stock ac drive acs580 ACS580-C27-025A-3B. URL: https://www.inomaxtechnology.com/product/acs800-04-0016-7/ (Дата звернення: 08.06.2026).

15. ABB ACS580 Manual. URL: https://www.manualslib.com/guide/3764713/abb-acs580-manual.html (Дата звернення: 08.06.2026).