

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП -09.00.00.000 ПЗ

група АКП -21-1

Богдан Димашок

2025 рік

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Димашок Богдан Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518.52:22.24.054.33

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Дослідження впливу довжини свердловини на

(назва роботи)

ефективність АСК навантаженням двигуна електробура

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

к.т.н. О. В. Кучмистенко
(науковий ступінь, підпис) (дата) (ініціали та прізвище)
вчене звання)

Рецензент

к.т.н., доцент
(науковий ступінь, підпис) (дата) (ініціали та прізвище)
вчене звання)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-21-1 Б. А. Димашок
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

к.т.н., доцент М. І. Когусяк
(науковий ступінь, підпис) (дата) (ініціали та прізвище)
вчене звання)

Допущено до захисту Завідуючий кафедри

к.т.н., доцент А. І. Лагойда
(науковий ступінь, підпис) (дата) (ініціали та прізвище)
вчене звання)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І. Лагойда.

« » 20 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Димашку Богдану Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Дослідження впливу довжини свердловини на ефективність АСК навантаженням двигуна електробура.**

керівник роботи Когутяк Мирослав Іванович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломої практики, технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технології буріння свердловин електробурами.

2. Дослідження характеристик електробурів. 3. Оцінка стійкості системи

автоматичного регулювання АМС-2. 4. Дослідження взаємозв'язку довжини свердловини та САК електробура. Висновки. Перелік використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. БР.АКП-09.00.00.001 – Основні характеристики електробура

2. БР.АКП-09.00.00.002 – Структурна схема системи автоматичного керування

АМС-2. 3. БР.АКП-09.00.00.003 — Перетворення структурної схеми системи

автоматичного керування АМС-2. 4. БР.АКП-09.00.00.004 – Оцінка стійкості

системи автоматичного керування АМС-2. 5. БР.АКП- 09.00.00.005 – Перехідні

характеристики системи автоматичного керування АМС-2.

6. БР.АКП-09.00.00.006 – Оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Технологічний аналіз процесу буріння свердловин електробурами	13.05.2025	
2	Комплексне дослідження характеристик електробурів	20.05.2025	
3	3 Оцінка стійкості системи автоматичного регулювання АМС-2	30.05.2025	
4	Дослідження взаємозв'язку довжини свердловини та сак електробура	05.06.2025	
5	Оформлення бакалаврської роботи	10.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Б. А. Димашок _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

М. І. Когутяк _____
(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота містить: 64 сторінки, 29 рисунків, 2 таблиці, 9 джерел.

Тема: «Дослідження впливу довжини свердловини на ефективність АСК навантаженням двигуна електробура».

Мета роботи – дослідити вплив довжини свердловини на показники якості автоматичної системи керування навантаженням двигуна електробура.

Об'єкт дослідження — бурова свердловина.

Предмет дослідження — процес автоматичного регулювання навантаження на двигун електробура.

Результати роботи: досліджено вплив довжини свердловини на показники якості системи автоматичного керування навантаженням двигуна електробура.

Було проведено дослідження стійкості автоматичної системи АМС-2, оскільки стійкість є дуже важливою характеристикою якості автоматичної системи.

Показники якості системи оцінювались за перехідними характеристиками. Дослідження проведені в системі Matlab з допомогою пакету Simulink.

Також в роботі приділено увагу питанням оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід. Приведено структуру формування потужності на долоті та фазі-проект системи контролю твердості порід на основі інформації про питомі енерговитрати при бурінні свердловин електробуром.

Ключові слова: буріння, електробур, осьове навантаження, швидкість обертання долота, система автоматичного керування, стійкість системи,

ANNOTATION

Bachelor's thesis contains: 64 pages, 29 figures, 2 tables, 9 sources.

Topic: "Study of the influence of the well length on the efficiency of the ASK by the load of the electric drill engine".

The purpose of the work is to study the influence of the well length on the quality indicators of the automatic load control system of the electric drill engine.

The object of the study is a drilled well.

The subject of the study is the process of automatic load control on the electric drill engine.

Results of the work: the influence of the well length on the quality indicators of the automatic load control system of the electric drill engine was studied.

The stability of the automatic system AMS-2 was studied, since stability is a very important quality characteristic of the automatic system.

The quality indicators of the system were evaluated by transient characteristics. The studies were conducted in the Matlab system using the Simulink package.

The work also paid attention to the issues of assessing the physical and mechanical properties of rocks. The structure of power generation on the bit and the phase design of the rock hardness control system based on information on specific energy consumption when drilling wells with an electric drill are presented.

Keywords: drilling, electric drill, axial load, bit rotation speed, automatic control system, system stability,

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ	9
1.1 Режими буріння свердловин електробурами	9
1.2 Режим живлення електробура	11
1.3 Застосування автоматичного регулятора подачі долота.....	12
1.4 Буріння електробуром із застосуванням газоподібних агентів для виносу розбуреної породи	13
Висновки до розділу.....	15
2 КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОБУРІВ	17
2.1 Діаметр свердловини і електробура	17
2.2 Робота електробура в буровому розчині	18
2.3 Температура навколишнього середовища	19
2.4 Осьові навантаження, вібрації, удари	21
2.5 Вибір оптимальних характеристик електробура	22
2.6 Регулювання навантаження на породоруйнівний інструмент	24
2.7 Характеристики електробурів.....	25
2.7.1 Швидкість обертання долота і обертаючий момент	26
2.7.2 Характеристики холостого ходу	29
2.7.3 Робочі і теплові характеристики електробура	31
Висновки до розділу	32

					БР.АКП-09.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Димашок Б. А.			Дослідження впливу довжини свердловини на ефективність АСК навантаженням двигуна електробура	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Когутяк М. І.						
Реценз.								
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.				АКП-21-1, ІФНТУНГ		
Затверд.		Лагойда А. І.						

3 ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ АМС-2	33
3.1 Система автоматичного керування АМС-2	33
3.2 Перетворення структурної схеми системи автоматичного керування АМС-2.....	34
3.3 Функції передачі окремих ланок системи автоматичного керування АМС-2	37
3.4 Дослідження стійкості розімкнутої системи автоматичної стабілізації ваги інструмента	40
3.5 Дослідження стійкості замкнутої системи автоматичної стабілізації ваги інструмента	42
3.6 Дослідження стійкості розімкнутої системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура	44
3.7 Дослідження стійкості замкнутої системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура	46
Висновки до розділу	49
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ДОВЖИНИ СВЕРДЛОВИНИ ТА САК ЕЛЕКТРОБУРА	50
4.1. Вплив довжини свердловини на систему автоматичного керування навантаженням двигуна електробура	50
4.2. Оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід в режимі on-line з врахуванням невизначеності процесу буріння	55
Висновки до розділу	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	64
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА	

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСК – автоматична система керування

АСР – автоматична система регулювання

АФЧХ – амплітудна фазо-частотна характеристика

АМС – автоматична система регулювання “автомат маси-струму”

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

ОК – об’єкт керування

УБР – управління бурових робіт

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Техніка і технологія буріння нафтових і газових свердловин розвивається, головним чином, на основі застосування вибійних двигунів, що обумовлюють високопродуктивний процес буріння і значний ступінь автоматизації процесу проходки вертикальних і похило-скерованих свердловин. Застосування в якості вибійного агрегату електродвигуна, з'єднаного з долотом, пропонувалося багатьма винахідниками в різних країнах світу з давніх часів [1÷5].

Устаткування бурової звичайне. Електробур з долотом опускається в свердловину на бурильних трубах, через які прокачується промивна рідина. Електроенергія до нього підводиться по кабелі, вмонтованому в бурильні труби. Процес буріння здійснюється із застосуванням автоматичного регулятора подачі долота, з'єднаного з проміжним валом лебідки ланцюговою передачею.

Конструкція сучасного електробура складається з двигуна і пригвинченого до нього на конічній різьбі шпинделя. Для буріння похило-скерованих свердловин застосовують механізми викривлення МВ, за допомогою яких у місці приєднання шпинделя до двигуна електробур викривляється на 1, 1,5 і 2°. Механізми викривлення у вигляді окремого вузла монтують між двигуном і шпинделем.

Для контролю за траєкторією свердловини застосовується телеметрична система СТЕ, яка виготовляється в Україні Харківським об'єднанням "Потенціал". Вона дає інформацію про кут нахилу свердловини, азимут і положення відхилювача із врахуванням кута закручування колони від дії реактивного моменту електробура [2-4].

В даний час актуальним є підвищення ефективності буріння електробуром і надійності його в роботі, зниження вартості проходки, а також розширення області застосування електробурів, особливо там, де це найбільш економічно вигідно: кероване з поверхні буріння похилих свердловин, буріння глибоких і опорно-технологічних свердловин, з алмазними долотами, із продувкою вибою газом і промивкою рідиною.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ЕЛЕКТРОБУРАМИ

1.1 Режими буріння свердловин електробурами

Режими буріння повинні бути складені на основі даних, отриманих при бурінні опорно-технологічних та інших раніше пробурених на даній площі свердловин. Крім відомостей і рекомендацій, передбачених “Єдиними технічними правилами на ведення робіт при бурінні свердловин” у геолого-технічному наряді повинні бути зазначені типи електробурів для кожного інтервалу буріння, а також режим роботи електробура: сила струму, потужність, величини напруг на вихідних затискачах трансформатора чи дизель-електричної установки, а також відповідні цим напругам величини струмів холостого ходу.

Електробур необхідно включати після встановлення циркуляції розчину, не спускаючи його до вибою. До вибою треба підходити плавно. Потім приробити долото при осьовому навантаженні 20–50 кН протягом 2–3 хв і плавно довести осьове навантаження на долото до оптимального протягом 5–10 хв [5].

Рекомендується встановлювати і контролювати режим роботи долота по ватметру й індикатору ваги. По амперметру контролюється лише гранично допустиме значення повного струму, що споживається електробуром. Використовувати амперметр для встановлення режиму буріння не рекомендується, тому що повний струм не відбиває активну потужність на валі електробура [3].

У процесі буріння фактичний коефіцієнт використання потужності визначається як відношення фактичної потужності на долоті N_{δ} до номінальної потужності двигуна електробура $N_{ном}$

$$K = \frac{N_{\delta}}{N_{ном}}. \quad (1.1)$$

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рекомендується бурити при коефіцієнті K , близькому до одиниці, за умови, що величина осьового навантаження на долото не перевищує допустиме значення, а контрольне зниження осьового навантаження приводить до зменшення механічної швидкості буріння.

В геологічних умовах, що обумовлюють зависання колони бурильних труб, буріння електробуром рекомендується вести з одночасним обертанням колони зі швидкістю 5–30 об/хв.

Для кращого відпрацювання шарошечних доліт рекомендується знижувати осьове навантаження в міру збільшення люфту опори. Момент часу, коли необхідно знижувати осьове навантаження, повинен визначатись по різкому збільшенню потужності, що фіксується бурильником по ватметру.

У зв'язку з невеликими тисками в насосній лінії при електробурінні рекомендується в м'яких і середніх породах використовувати тиск насосів для створення гідромоніторного ефекту при бурінні гідромоніторними шарошечними і лопастними долотами, а також алмазними долотами, що створюють великі перепади тиску в процесі буріння [3,4].

Навантаження на долото повинно створюватися в основному вагою ОБТ і мати величину, що забезпечує реалізацію режиму буріння, зазначеного в геолого-технічному наряді. Для забезпечення вертикальності свердловини рекомендується наступне компонування низу бурильної колони: долото, наддолотний розширювач, електробур, контактор (чи ПКІ), центратор і ОБТ.

При бурінні варто контролювати діаметр розширювача і центратора: діаметр розширювача не повинен перевищувати діаметр долота, а діаметр центратора повинен бути рівний чи на 1–2 мм менше діаметра розширювача. Знос розширювача і центраторів допускається не більше ніж на 6 мм по діаметрі. Щоб уникнути викривлення свердловин, рекомендується обертати колону зі швидкістю 5–30 об/хв або періодично повертати.

Доцільність застосування алмазних доліт у різних породах оцінюється по величинах механічної швидкості, проходки і зносу шарошечних доліт у

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідності із спеціальними інструкціями. Для буріння алмазними долотами в м'яких і середньої твердості породах рекомендується застосовувати електробури з підвищеною швидкістю обертання. Режим буріння і межа осьового навантаження уточнюються не тільки по величині механічної швидкості, але і по величині проходки.

1.2 Режим живлення електробура

При бурінні з промивкою буровим розчином чи водою необхідно встановлювати такий режим живлення двигуна, при якому електробур міг би розвивати найбільший обертаючий момент [2]

Напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора $U_{тр}$ при включеному електробурі, що працює на холостому ході, рекомендується обчислювати за формулою

$$U_{тр} = 1,1(U_{ном} + 0,49I_{ном}L), \quad (1.2)$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга електродвигуна в В; $I_{ном}$ – номінальний струм електродвигуна в А; L – глибина вибою свердловини в км.

По отриманій величині напруги вибирають найближчу ступінь напруги трансформатора.

Для часткової компенсації втрати напруги при перевантаженнях доцільно заздалегідь подавати на затискачі електробура підвищену напругу, особливо при бурінні нижніх інтервалів глибоких свердловин.

Якщо при роботі з навантаженням струм двигуна перевищує номінальне значення більше ніж на 10 %, то осьове навантаження необхідно знизити.

Під час буріння можуть відбуватися короточасні перевантаження електробура, викликані невідповідною швидкістю подачі долота або його заклинюванням. Ці перевантаження ліквідуються захистом, що спрацьовує через визначений час після початку перевантаження, відключаючи електробур. При цьому електробур варто підняти над вибоєм і повторно включити.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При відключенні електробура в результаті заклинювання долота бурильну колону необхідно підняти над вибоєм, промити свердловину, провести розходжування колони і лише після цього запустити двигун.

Якщо під час роботи електробур відключився максимальним захистом, то повторне включення його дозволяється один раз за умови, що опір ізоляції системи струмопідвід-електробур знаходиться в допустимих межах. При повторному вимиканні максимального захисту необхідно підняти бурильну колону для усунення ушкодження.

1.3 Застосування автоматичного регулятора подачі долота

При електробурінні рекомендується застосовувати автоматичний регулятор подачі долота АМС-2, що здійснює подачу:

- 1) по активній складовій струму електробура;
- 2) по осьовому навантаженню на долото;
- 3) по активній складовій струму й осьовому навантаженню на долото.

В режимі буріння по активній складовій струму й осьовому навантаженню на долото можна встановлювати два заданих значення уставки – активного струму електробура $I \cdot \cos \varphi$ і осьового навантаження на долото G_d . Однак при цьому завжди буде підтримуватися тільки один з параметрів, близький до заданого: у неенергоємних породах – G_d , а в більш енергоємних – $I \cdot \cos \varphi$.

При зміні умов буріння переналаштування роботи автомата з режиму підтримки заданого значення активної складової струму $I \cdot \cos \varphi$ на режим підтримки навантаження на долото G_d відбувається автоматично.

Автоматична подача долота по активній складовій струму рекомендується при бурінні: з найбільш повним використанням потужності електробура; у свердловинах, де відбувається зависання бурильної колони; моментоемних порід на великих глибинах.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автоматична подача долота по осьовому навантаженню рекомендується в неенергоємних породах, коли буріння ведеться при високих осьових навантаженнях.

1.4 Буріння електробуром із застосуванням газоподібних агентів для виносу розбуреної породи

Одним із перспективних напрямів удосконалення технології буріння є застосування електробурів у поєднанні з газоподібними агентами, які використовуються для ефективного виносу розбуреної породи з вибою свердловини. Такий підхід особливо актуальний у складних геологічних умовах або при спорудженні свердловин малого діаметра, де використання традиційних промивальних рідин є утрудненим або економічно недоцільним [3].

Газоподібними агентами зазвичай виступають стиснене повітря, природний газ, азот або їхні суміші. Вони подаються до вибою свердловини через внутрішній канал електробура, захоплюють тверді частинки розбуреної породи та транспортують їх на поверхню через кільцевий простір. Такий спосіб забезпечує ефективне очищення вибою, знижує ризик закупорки свердловини та сприяє стабілізації бурового процесу.

Використання газоподібних агентів має низку переваг:

- зменшення навантаження на стінки свердловини та підвищення стійкості порід;
- зниження витрат на підготовку та транспортування бурових розчинів;
- зменшення впливу на навколишнє середовище;
- можливість буріння в умовах низьких температур (де рідини можуть замерзати);
- поліпшення умов роботи при горизонтальному та похило-спрямованому бурінні.

Однак застосування такого методу вимагає ретельного розрахунку параметрів тиску, витрати газу, теплообміну та контролю за швидкістю виносу

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шламу, оскільки неефективна аерація може призвести до осідання породи, утворення шламоносів чи аварійних ситуацій.

При застосуванні газоподібних агентів знижується тиск у свердловині; покращується очищення вибою; відсутня глиниста кірка на стінках свердловини; різко знижується в'язкість і вміст твердих часток у продувному агенті; зразки породи у вигляді незабрудненого шламу виносяться повітрям на поверхню у дуже короткий час; досить точно відбиваються водопроявляючі нафтоносні і газоносні горизонти; не відбувається закупорка продуктивного пласту.

У табл. 2.1 наведено порівняння основних характеристик буріння з використанням газоподібних і рідинних агентів.

Таблиця 2.1 – Порівняння основних характеристик буріння з використанням газоподібних і рідинних агентів [4]

Параметр	Газоподібний агент	рідинний буровий розчин
В'язкість	Низька	Висока
Швидкість виносу шламу	Вища на малих діаметрах	Краща для великих свердловин
Вплив на навколишнє середовище	Мінімальний	Складний, утилізація шламу
Температурна стійкість	Висока	Залежить від складу

На рис. 2.1 наведена принципова схема буріння електробуром із використанням повітря. Вона включає в себе: свердловину (у розрізі); електробур із електроприводом; подачу повітря через внутрішній канал; вибій свердловини з розбуреною породою; винос шламу вгору кільцевим простором.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

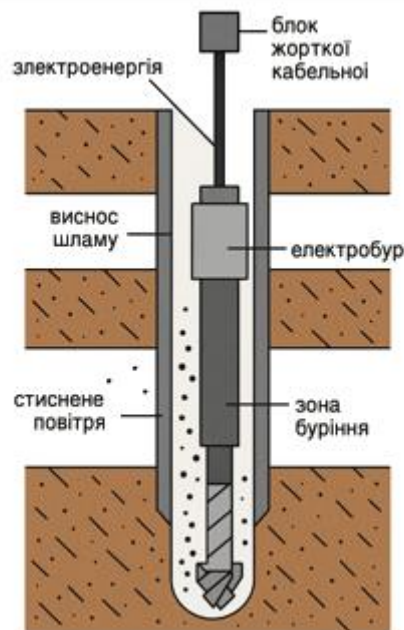


Рисунок 2.1 – Принципова схема буріння електробуром із використанням повітря [5]

Застосування електробурів у поєднанні з газоподібними агентами для виносу розбуреної породи є інноваційним підходом, що відкриває нові можливості в галузі буріння свердловин. Така технологія дозволяє підвищити ефективність процесу за рахунок зменшення гідродинамічного опору, покращення умов виносу шламу та зниження екологічного навантаження. Важливою перевагою є можливість використання в умовах, де застосування традиційного бурового розчину є складним або економічно недоцільним.

Разом із тим, буріння з використанням повітря або інших газів потребує точного контролю параметрів, зокрема тиску, витрати та теплових режимів, що визначає необхідність впровадження автоматизованих систем керування та моніторингу.

Висновки до розділу

У результаті проведеного технологічного аналізу процесу буріння свердловин електробурами було встановлено, що даний метод є перспективним

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напрямом розвитку бурової техніки, особливо в умовах, які потребують високої точності, екологічної безпеки та енергоефективності. Таким чином, буріння електробуром із використанням газоподібних агентів є сучасною технологією, яка поєднує високу ефективність, екологічну безпеку та можливість застосування в складних умовах, що робить її актуальною для подальшого розвитку бурових робіт.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОБУРІВ

Комплексне дослідження характеристик електробурів є важливим етапом у вдосконаленні процесів буріння, підборі оптимального обладнання та забезпеченні ефективності бурових робіт у різних геологічних умовах. Умови роботи електробура визначили унікальну конструкцію його двигуна і шпинделя. Ці умови характеризуються [2-5]:

- невеликим діаметром свердловини;
- роботою в потоці промивної рідини – бурового розчину – під високим гідростатичним тиском;
- високою температурою навколишнього середовища;
- передачею через електробур на долото значної частини ваги колони бурильних труб;
- сильними вібраціями з відповідною динамікою осьового навантаження;
- великими значеннями обертаючого моменту і потужності з частими перевантаженнями і піками навантаження при значному віддаленні джерела живлення від двигуна.

Розглянемо вплив кожного із зазначених факторів на конструкцію електробура.

2.1 Діаметр свердловини і електробура

Заглибний двигун електробура, з'єднаний з долотом, є одним із раціональних видів приводів бурового інструменту.

В залежності від конкретних геологічних умов, глибини і конструкції свердловини застосовують різні долота і вибійні машини. Діаметр долота і технологія буріння з використанням вибійного приводу визначають габарити електробура і специфічні умови його роботи.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні електробури [4] виготовляють діаметром 290, 240, 215, 190, 164 і 127 мм. Невеликий зовнішній діаметр електробура обумовлює велику його довжину, що перевищує діаметр у 30–50 разів.

2.2 Робота електробура в буровому розчині

Електробур у процесі роботи піддається дії тиску промивної рідини, що заповнює свердловину. Так, при глибині 5000 м і питомій вазі бурового розчину 23 кН/м^3 електробур витримує зовнішній гідростатичний тиск 113 МПа. Високий гідростатичний тиск обумовив необхідність герметизації електробура, заповнення його порожнини маслом і застосування системи компенсаторів, що дає можливість маслу при змінах температури розширюватися, стискуватися і за допомогою пружин створювати всередині електробура надлишковий щодо зовнішнього тиск.

Необхідність подачі промивної рідини до долота для виносу розбуреної породи у висхідному потоці обумовила створення в центральній частині електробура спеціального каналу. При прямій промивці рідина, пройшовши через бурильні труби і канал в електробурі до долота, захоплює із собою розбурену породу й омиває зовнішню поверхню електробура. При електробурінні можлива і зворотня промивка свердловини. В обох випадках, омиваючи зовнішню поверхню статора і поверхню центрального каналу, рідина охолоджує двигун електробура. Інтенсивне охолодження поверхні електробура дає можливість в одиниці довжини його зосередити відносно велику потужність.

Конструкція електробура повинна забезпечувати невеликий опір проходженню бурового розчину, незначний знос деталей і запобігти можливості осідання в електробурі часток розбуреної породи. Вплив хімічних реагентів, морської води і пластових вод призводить до корозії деталей електробура, тому необхідно застосовувати антикорозійні покриття поверхонь труб, компенсаторів і деяких інших деталей. Крім того, наявність у розчині різних хімічних реагентів

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

обумовлює особливі вимоги до струмопідводу електробура, оскільки поверхня контактних з'єднань систематично обливається розчином у процесі спуско-підйомних операцій.

2.3 Температура навколишнього середовища

Потужність двигуна на одиницю довжини електробура залежить від ступеня використання активних матеріалів (мідь, сталь магнітопроводу). Найкраще їх використання, що характеризується підвищеними значеннями лінійного струмового навантаження і магнітної індукції, супроводжується підвищеними втратами в одиниці об'єму міді обмотки статора і магнітопроводу двигуна. У цих умовах електробури повинні мати досконалу систему охолодження, що здійснюється промивною рідиною і забезпечує інтенсивний відвід тепла в навколишнє середовище. Однак висока температура навколишнього середовища і відносно низька допустима температура нагрівання ізоляції обумовлюють невеликий перепад температур між обмоткою і зовнішньою поверхнею корпусу статора, що обмежує зняття тепла з одиниці зовнішньої поверхні електробура [4].

Нагрівання обмотки

$$\theta = \theta_{nc} + \tau, \quad (2.1)$$

де θ – температура нагрівання обмотки; θ_{nc} – температура навколишнього середовища; τ – перепад температури між обмоткою і навколишнім середовищем.

Допустима температура обмотки обумовлюється теплостійкістю ізоляції. Для скломіканітової ізоляції обмотки електробура, заповненого трансформаторним маслом, ця температура складає $+150^{\circ}$ С. Температура навколишнього середовища зв'язана з глибиною, геотермічним градієнтом і тепловим станом свердловини.

При бурінні глибоких свердловин з виносом розбуреної породи промивною рідиною різко порушується природна температура гірських порід у свердловині.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нижні шари порід охолоджуються промивною рідиною, верхні нагріваються рідиною, що сприйняла тепло нижньої частини свердловини. При цьому вплив промивної рідини на температуру в свердловині залежить від глибини свердловини, розподілу уздовж її стовбура геотермічного градієнту, режиму промивки, часу після закінчення промивки до моменту вимірювання температури й інших факторів.

При бурінні глибоких свердловин у районах з високим геотермічним градієнтом варто враховувати обставини, внаслідок яких нагрів двигуна електробура досягає сталої температури тільки тоді, коли вибійна температура циркулюючого бурового розчину ($\theta_{зцм}$) знизиться до мінімального значення. Ці обставини наступні:

1) після спуску бурильної колони протягом 15–25 хв проводять промивку і потім пророблення ділянки свердловини, пройденого попереднім долотом; при проробленні двигун працює в режимі, близькому до режиму холостого ходу;

2) для приробляння долота при електробурінні навантаження на нього передається поступово, отже двигун завантажується також поступово;

3) нове долото вимагає меншого обертаючого моменту на 1 кН осьового навантаження, чим зношене;

4) обмотка двигуна електробура при номінальній потужності нагрівається до сталої температури тільки через 12–18 хв.

У зв'язку з перерахованим вище варто вважати, що обмотка двигуна до сталої температури може нагріватися через 42–63 хв після початку циркуляції бурового розчину. Цей час приблизно збігається з часом, протягом якого температура циркулюючої рідини знижується до мінімального значення $\theta_{зцм}$. Крім того, варто враховувати, що ізоляція класу ВС, що застосовується в двигунах електробурів, допускає короткочасний перегрів до 170° С.

Таким чином, можна прийняти температуру навколишнього середовища електробура, рівну температурі циркулюючого бурового розчину після спаду до мінімального значення $\theta_{зцм}$.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Осьові навантаження, вібрації, удари

Руйнування вибою свердловин здійснюється за допомогою обертання породоруйнівного інструменту, що знаходиться під дією осьового навантаження. Для ефективного руйнування гірської породи шарошечними, алмазними і лопастними долотами задаються різні осьові навантаження.

При бурінні електробуром осьове навантаження на долото створюється вагою електробура G_e і вагою нижньої частини колони бурильних труб $G_{тр}$, що знаходиться в стиснутому стані. Гідравлічне навантаження на долото при цьому практично відсутнє.

Необхідно відзначити, що покази осьового навантаження по індикатору ваги, датчик якого встановлений на нерухомому кінці талевого каната, у значній мірі усереднені, оскільки талева система, вишка і колона бурильних труб, що третяся об стінки свердловини, демпфірують фактичні значення осьових навантажень на долото.

Фактично осьові навантаження на долото значно коливаються, що обумовлено, з одного боку, нерівномірною подачею долота з поверхні, а з іншого боку, взаємодією долота з вибоєм, у результаті чого утворюються вібрації бурильної колони і коливання осьових навантажень, що розповсюджуються від долота вгору по колоні.

Нерівномірність подачі долота обумовлюється ручною його подачею шляхом періодичного відпускання гальма лебідки, а також зависаннями і зривами бурильної колони. Останнє може бути і при подачі долота за допомогою автоматичного регулятора.

Так, наприклад, при коливаннях осьових навантажень по індикатору ваги від 290 до 310 кН обертаючий момент у деяких випадках може бути в межах 930–2420 Н · м, а дійсні осьові навантаження при цьому можуть змінюватися від 169 до 440 кН [4]. Таким чином, при незначних коливаннях показів індикатора ваги

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дійсне осьове навантаження на долото може змінюватися в значних межах, іноді перевищуючи допустимі значення на долото.

Звідси, з одного боку, виникає вимога до здійснення плавної подачі долота, у зв'язку з чим виключаються перевантаження електробура і долота, заклинювання опори долота і підвищується тривалість його роботи, а отже, і продуктивність.

З іншого боку, виникає необхідність у підвищенні міцності електробура, зокрема підшипників шпинделя, і перевантажувальної здатності двигуна електробура.

2.5 Вибір оптимальних характеристик електробура

Питання про величини потужності, обертаючого моменту і швидкості обертання, необхідних для ефективної роботи долота, завжди було одним з основних при бурінні глибоких свердловин. На початку розвитку електробуріння параметри електробура були визначені орієнтовно, виходячи з досвіду роторного і турбінного буріння.

У перший період створення електробурів не було вичерпних даних для встановлення найбільш раціональних характеристик електробурів. Спочатку були створені електробури діаметром 250 мм і потужністю 150 кВт при швидкості обертання 600 об/хв, потім електробури діаметром 215 мм і потужністю 100 кВт при швидкості обертання 750 об/хв і електробури діаметром 170 мм і потужністю 65 кВт при швидкості обертання 750 об/хв.

У перший період розвитку електробуріння досягалися відносно високі показники, однак надалі в міру загального розвитку техніки бурових робіт ці електробури не забезпечували ефективні режими, оскільки параметри їх не відповідали сучасним вимогам технології буріння.

Удосконалення електробурів було спрямовано головним чином на підвищення їхньої надійності. Характеристики ж їх залишалися без зміни. При використанні приведених вище електробурів на родовищах, складених моментоемними породами, тільки в окремих випадках осьове навантаження можна було доводити до 200 кН. Подальше підвищення осьових навантажень

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводило до перекидання двигуна електробура, що можна пояснити недостатньою перевантажувальною здатністю двигуна і піковим характером моменту опору на долоті. Цей недолік особливо явно виявлявся при бурінні на великій глибині, коли перевантажувальна здатність двигуна знижувалася додатково за рахунок зменшення напруги в струмопідводі при струмі, що відповідає M_{\max} . При регулюванні швидкості обертання долота шляхом зменшення частоти струму перевантажувальна здатність знижувалася ще більше. Таким чином, двигуни з невеликим обертаючим моментом непридатні для буріння при високих осьових навантаженнях, тим більше при зниженні частоти струму [5,6].

Ефективність буріння залежить від властивостей породи, конструкції долота (кількість і форма зубів, розподіл їх по поверхні шарошки, конструкція, число і розташування шарошок, міцність і зносостійкість зубів і опор, конструкція елементів, що ріжуть, та ін.), інтенсивності очищення вибою і способу виносу розбуреної породи, осьового навантаження на долото і його швидкості обертання.

Згідно з цими дослідженнями механічна швидкість буріння при підвищенні осьового навантаження зростає, причому при реальних допустимих на долото навантаженнях з підвищенням механічної швидкості зростає і проходка на долото. Збільшення механічної швидкості буріння з підвищенням осьового навантаження характерно тільки для буріння з твердою характеристикою двигуна, яким є електробур.

Досвід і дослідження параметрів режимів буріння показали, що доцільна швидкість обертання трьохперих і шарошечних доліт у верхніх інтервалах складає не більше 700 об/хв. У деяких верхніх і більшості нижніх інтервалів свердловин доцільна швидкість обертання долота знаходиться в межах 70–300 об/хв. Для алмазних доліт доцільна швидкість обертання для більшості гірських порід складає 700 об/хв і більше.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.6 Регулювання навантаження на породоруйнівний інструмент

Головним завданням системи автоматичного керування процесом буріння свердловин електробурами є регулювання навантаження на породоруйнівний інструмент і пошук оптимального режиму роботи. Прикладом є свердловина РГ 801-Д, що була пробурена в Долинському УБР ВАТ “Укрнафта” (рис. 2.1).

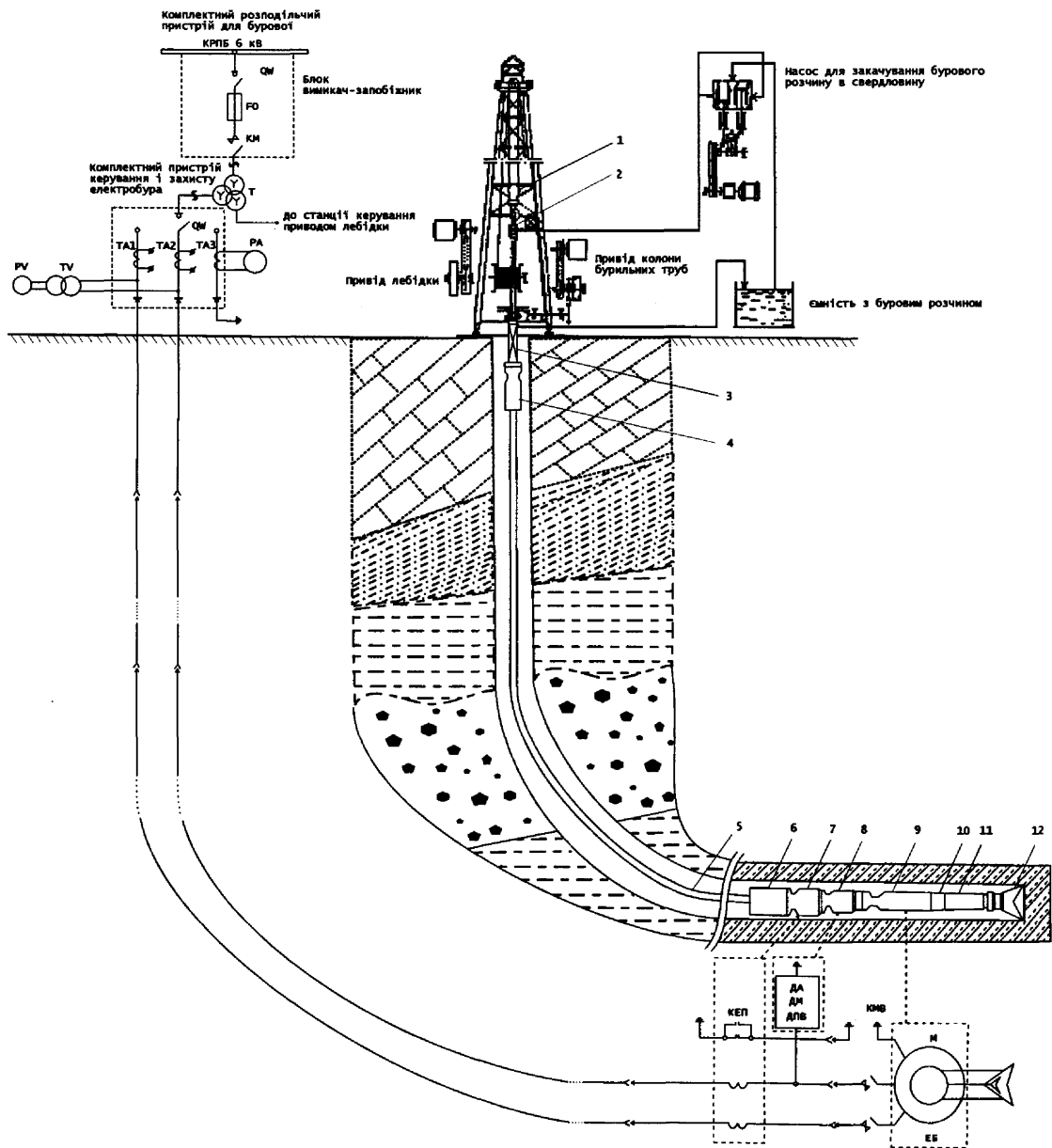


Рисунок 2.2 – Система контролю і керування процесом буріння свердловин електробуром (свердловина РГ 801-Д)

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Регулювання навантаження на породоруйнівний інструмент здійснюється за допомогою автоматичних регуляторів подачі долота типів АМС-1, АМС-2 (“автомат маси-струму”) та інших, які стабілізують зусилля подачі і струм навантаження двигуна. Контроль зусилля подачі здійснюється за допомогою індикаторів ваги і давачів струму. При бурінні вертикальних свердловин глибиною до 2000–5000 м покази наземного індикатора ваги досить точно відповідають осьовому навантаженню на породоруйнівний інструмент. Проте ця відповідність порушується при бурінні похило-скерованих і горизонтально розгалужених свердловин за рахунок великих втрат на тертя колони бурильних труб в свердловині.

Оскільки навантаження на долото, визначене на поверхні, не відповідає дійсному значенню навантаження, то в таких умовах навантаження на породоруйнівний інструмент може бути досить точно визначено непрямым методом – за потужністю, яка споживається двигуном електробура, або за крутним моментом на його валі [4, 5].

Використання такого давача приводить до створення такої структури системи автоматичного керування, в якій дуже важливою ланкою є колона бурильних труб із струмопідводом. Особливістю цієї ланки є те, що вона має змінні параметри, які залежать від довжини свердловини. Тому актуальною задачею є дослідження впливу довжини свердловини на показники якості системи автоматичного регулювання потужності на валі електробура.

2.7 Характеристики електробурів

Основними характеристиками електробурів є наступні[2,4] :

- 1) величина обертаючого моменту, що розвивається електробуром на вихідному кінці валу;
- 2) швидкість обертання вихідного кінця валу при тих чи інших значеннях обертаючого моменту;

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 3) величина осьового навантаження, яку допускається передавати на долото через корпус електробура й осьові підшипники шпинделя;
- 4) перевантажувальна здатність, тобто відношення максимального моменту до номінального;
- 5) температура навколишнього середовища, в якій допускається робота електробура при тому чи іншому його завантаженні;
- 6) кількість бурового розчину (повітря), яку необхідно прокачувати через електробур для його охолодження;
- 7) величина гідравлічних втрат у проточному каналі електробура;
- 8) кут викривлення механізму викривлення і співвідношення довжини електробура і відстані від торця долота до місця згину корпусів.

Крім того, величини напруги і струму, $\cos \phi$, вага і довжина електробура, опір ізоляції обмотки і ряд інших даних також є характеристиками електробура.

2.7.1 Швидкість обертання долота й обертаючий момент

Швидкість обертання валу електробура

$$n = n_{ос} \frac{1}{i}, \quad (2.1)$$

де $n_{дв}$ — швидкість обертання валу двигуна; i — передавальне число редуктора.

Обертаючий момент, що розвивається на валу електробура

$$M = M_{ос} i \eta_{ш} \eta_p, \quad (2.2)$$

де $M_{дв}$ — обертаючий момент, що розвивається на валу двигуна; $\eta_{ш}$ — коефіцієнт корисної дії шпинделя; η_p — коефіцієнт корисної дії редуктора.

Швидкість обертання валу двигуна обумовлюється швидкістю обертання магнітного поля його статора. Магнітне поле статора двигуна електробура обертається зі швидкістю

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \quad (2.3)$$

де f — частота струму; p — число пар полюсів.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Швидкість обертання ротора двигуна

$$n = n_1(1 - S). \quad (2.4)$$

Тут S — ковзання ротора відносно поля статора.

У двигунах електробурів величина S при номінальному навантаженні складає 8–12%. При збільшенні чи зменшенні навантаження на валу двигуна ковзання S також змінюється. Зміна ковзання для різних двигунів трохи відрізняється по величині, але закономірність зберігається для всіх двигунів електробурів.

Як відомо [5], залежність обертаючого моменту асинхронного двигуна електробура від ковзання, напруги на затискачах і інших параметрів може бути виражена формулою

$$M_{\text{дв}} = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{R'_2}{S}}{2\pi \left[\left(R_1 + C_1 \frac{R'_2}{S} \right)^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2 \right] \cdot 9,81}, \quad (2.5)$$

де $M_{\text{дв}}$ — обертаючий момент на валу двигуна в Н · м; m_1 — число фаз обмотки статора; U_1 — напруга на затискачах двигуна в В; R'_2 — приведений опір ротора в Ом; R_1 — опір фази обмотки статора в Ом; x_1 — індуктивний опір обмотки статора в Ом; x'_2 — приведений індуктивний опір ротора в Ом;

$$C_1 = 1 + \frac{z_1}{z_m} = \frac{U_1}{-E_{1(s=0)}}.$$

Тут $E_{1(s=0)}$ — електрорушійна сила на намагнічувальному контурі машини при синхронному ході. При $S = 1$, тобто в початковий момент пуску, значення пускового моменту можна визначити по формулі:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{m_1 p U_1^2 R'_2}{2\pi \left[\left(R_1 + C_1 \frac{R'_2}{S} \right)^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2 \right] \cdot 9,81}. \quad (2.6)$$

Типова крива зміни обертаючого моменту двигуна електробура в залежності від ковзання при незмінній напрузі на затискачах двигуна приведена на рис. 2.3.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

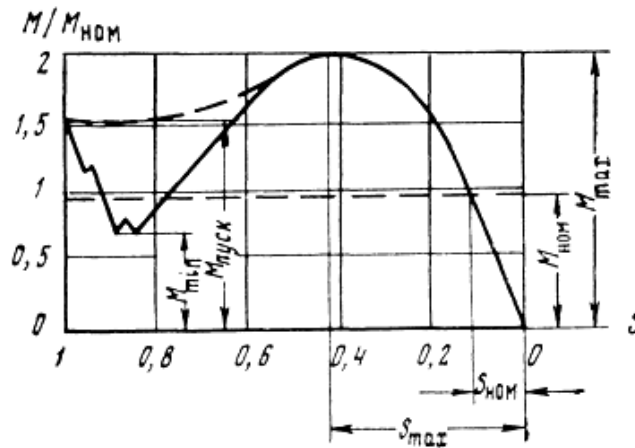


Рисунок 2.3 – Зміна кратності обертаючого моменту двигуна електробура в залежності від величини ковзання [5]

При пуску двигун розвиває обертаючий момент $M_{\text{пуск}}$ (при $n = 0$), що змінюється при розгоні по кривій до деякого значення $M_{\text{мін}}$. В міру набору швидкості обертаючий момент досягає максимального значення $M_{\text{мах}}$ і потім знижується доти, поки не стане рівним моменту опору на валу. Двигун розраховується звичайно для роботи при $M_{\text{ном}}$, що відповідає номінальній потужності двигуна, зазначеній в його паспортних даних.

При тривалій роботі двигуна на номінальній потужності, як правило, нагрів обмотки статора близький до граничного, що допускається для ізоляції яка застосовується.

При порушенні рівноваги моменту опору на валу й обертаючого моменту, що розвивається двигуном, внаслідок збільшення моменту опору двигун розів'є обертаючий момент при певному незначному зниженні швидкості обертання і наступить інший рівноважний стан при більшій потужності, що розвивається двигуном.

З огляду на викладене, при роботі електробура на великих глибинах необхідно підтримувати на затискачах двигуна трохи підвищену напругу (на 5–10 %). Це використовується головним чином для компенсації втрати напруги при короткочасних перевантаженнях, коли внаслідок збільшення струму зростає

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

втрата напруги в струмопідводі і зменшується напруга на затискачах машини [1, 2, 3].

Необхідна напруга з урахуванням її падіння в струмопідводі встановлюється за допомогою спеціального перемикача, змонтованого на кришці силового трансформатора, що живить електробур.

2.7.2 Характеристики холостого ходу

У зв'язку з тим що магнітна система двигунів електробурів близька до насичення, підвищення напруги на затискачах двигуна понад номінальну веде до швидкого зростання струму холостого ходу двигуна електробура. На рис. 2.4 приведені характеристики холостого ходу двигуна електробура E215. З рисунка видно, що при номінальній напрузі на затискачах двигуна (1650 В) струм холостого ходу складає 110 А. Величина струму холостого ходу двигуна електробура з приєднаним до нього маслonaповненим шпинделем незначно відрізняється від величини струму холостого ходу двигуна електробура без приєднаного шпинделя.

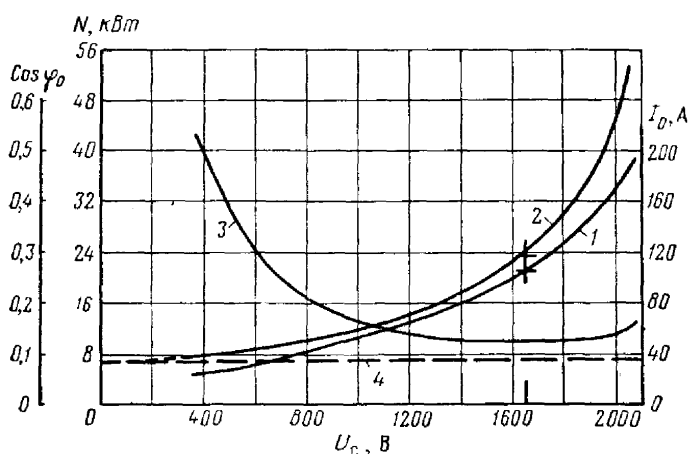


Рисунок 2.4 – Характеристики холостого ходу двигуна електробура E215:
 1 — залежність струму холостого ходу двигуна від величини напруги на його затискачах; 2 — залежність суми втрат у магнітопроводі і механічних втрат від величини напруги на затискачах двигуна; 3 — залежність $\cos \varphi_0$ від напруги на затискачах двигуна; 4 — лінія механічних втрат [5]

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Тому що втрати потужності при холостому обертанні маслonaповненого шпинделя (в нагрітому стані) незначні, практично струм холостого ходу електробура можна приймати рівним струму холостого ходу двигуна.

Незначне підвищення напруги на затискачах двигуна веде до швидкого зростання струму холостого ходу. Так, збільшення напруги на затискачах двигуна (рис. 2.4) з 1650 до 1750 В веде до підвищення струму холостого ходу з 110 до 118 А. Збільшення струму холостого ходу двигунів електробурів спостерігається при холостій роботі електробурів на великих глибинах, тому що звичайно для компенсації підвищеної втрати напруги при пусках і перевантаженнях встановлюють трохи підвищену напругу.

Характеристики холостого ходу знімаються звичайно при температурі обмотки двигуна 32–36° С (ця температура встановлюється в режимі холостого ходу двигуна). Характеристики холостого ходу при температурі 75° С, прийняті ДСТ, чи при температурі 130° С, що відповідає номінально-му режиму двигуна, трохи відрізняються від приведених характеристик. Це пояснюється головним чином збільшенням опору обмоток і зниженням в'язкості масла, що наповнює двигун. Втрати в обмотках зростають, втрати на тертя в маслі зменшуються.

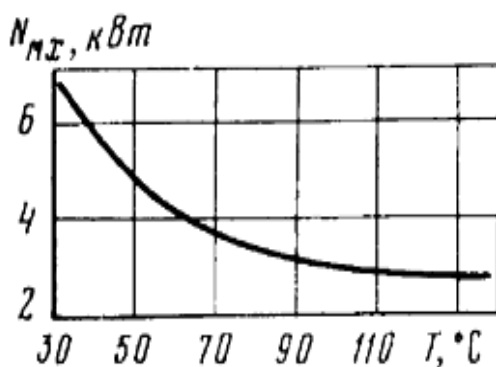


Рисунок 2.5 – Залежність механічних втрат $N_{мх}$ двигуна електробура E215 від температури нагріву (двигун наповнений транс-форматорним маслом) [5]

Характерна зміна втрат на тертя в двигуні електробура, наповненому трансформаторним маслом, в залежності від нагрівання приведена на рисунку 3.3 для двигуна електробура E215.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При заповненні двигунів більш в'язким маслом механічні втрати збільшуються, при цьому ступінь зниження втрат при нагріванні буде залежати від властивостей масла.

2.7.3 Теплові характеристики електрорура

Розглянемо теплові особливості електрорури для того, щоб відповідно до конкретних теплових умов свердловини в кожному окремому випадку оцінювати допустиме завантаження двигуна і при потребі форсувати режим буріння, використовуючи теплові резерви двигунів. Визначимо, як впливає кількість бурового розчину на температуру нагрівання двигуна при номінальному його навантаженні.

На рис. 2.8 приведена крива залежності перегріву обмотки двигуна електрорура E215 при номінальному навантаженні від кількості прокачуваної охолоджувальної води. З рисунка видно, що збільшення кількості прокачуваної води понад 8–10 л/с практично не приводить до помітного поліпшення охолодження двигунів. Зі зменшенням продуктивності насосів до 2 л/с нагрівання обмотки підвищується незначно і може допускатися тривалий час без помітної шкоди для роботи двигуна.

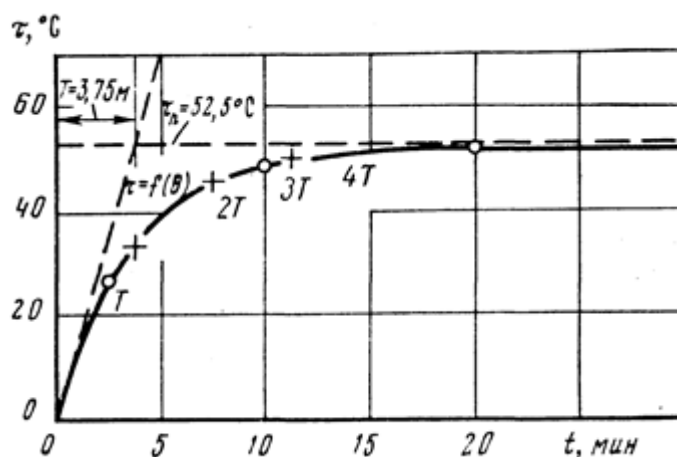


Рисунок 2.8 – Крива нагрівання обмотки статора двигуна електрорура E215 при номіналь-ному навантаженні [4]

По приведеній кривій і температурі навколишнього бурового розчину $\theta_{\text{зцм}}$ можна встановити допустимий струм навантаження двигуна, при якому обмотка не буде нагріватися вище допустимої температури

Наприклад, якщо двигун електробура Е215 охолоджується буровим розчином, що має температуру $\theta_{\text{зцм}} = +40^{\circ}\text{C}$, то допустимий перегрів обмотки буде складати $\tau = 130 - 40 = 90^{\circ}\text{C}$.

Для практичних цілей дуже важливо знати, за який час при номінальному навантаженні температура обмотки двигуна нагрівається і досягає сталого значення.

Висновки до розділу

В даному розділі розглянуто основні технічні характеристики електробура. Проаналізовано такі важливі показники як зміна кратності обертаючого моменту двигуна електробура в залежності від величини ковзання, залежність механічних втрат двигуна електробура від температури нагріву, детально розглянуто робочі і теплові характеристики електробура. Зокрема проаналізовано криву нагрівання обмотки статора двигуна електробура Е215 і визначено, що постійна часу нагрівання цього двигуна $T = 3,75$ хв, практично усталене значення перегріву обмотки при номінальному навантаженні настає через $t = 4T = 4 \cdot 3,75 = 15$ хв. Також розглянуті характеристики холостого ходу двигуна електробура та вплив на них температури навколишнього середовища, в якому працює електробур.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ АМС-2

Здатність системи нормально функціонувати виявляється на основі однієї із основних динамічних характеристик системи керування – її стійкості (або нестійкості) [1,2,3]. Для виконання різноманітних практичних задач керування система повинна бути стійкою. Стійкість – це властивість системи повертатись в початковий або близький до нього установлений режим після виходу із нього в результаті якого-небудь впливу. Нестійка робота може виникнути в будь-якій системі автоматичного керування із зворотнім зв'язком, в цьому випадку система не може виконувати задачі керування. Нестійка система не повертається до стану рівноваги із якого вона вийшла, а безперервно віддаляється від нього.

Автоматичні системи є замкнутими системами, в яких вихідна величина через основний зворотній зв'язок подається на вхід системи де порівнюється із заданим впливом. Система, що нормально функціонує, бажає зменшити різницю між значеннями задаючого впливу і керуючої величини. Але інколи виходить так, що ця різниця буде не зменшуватись, а зростати з плином часу, тобто система буде нестійкою. Характерно, що нестійкою може бути система, яка складається тільки зі стійких елементів [3].

3.1 Система автоматичного керування АМС-2

Стійкість системи є дуже важливою характеристикою якості автоматичної системи керування режимами роботи електробурів при бурінні свердловин на нафту і газ [1,2,3]. Для аналізу стійкості системи треба визначити функцію передачі замкнутої системи, користуючись її алгоритмічною структурою і передавальними функціями ланок.

Визначення загальної функції передачі базується на еквівалентних перетвореннях алгоритмічної структурної схеми.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

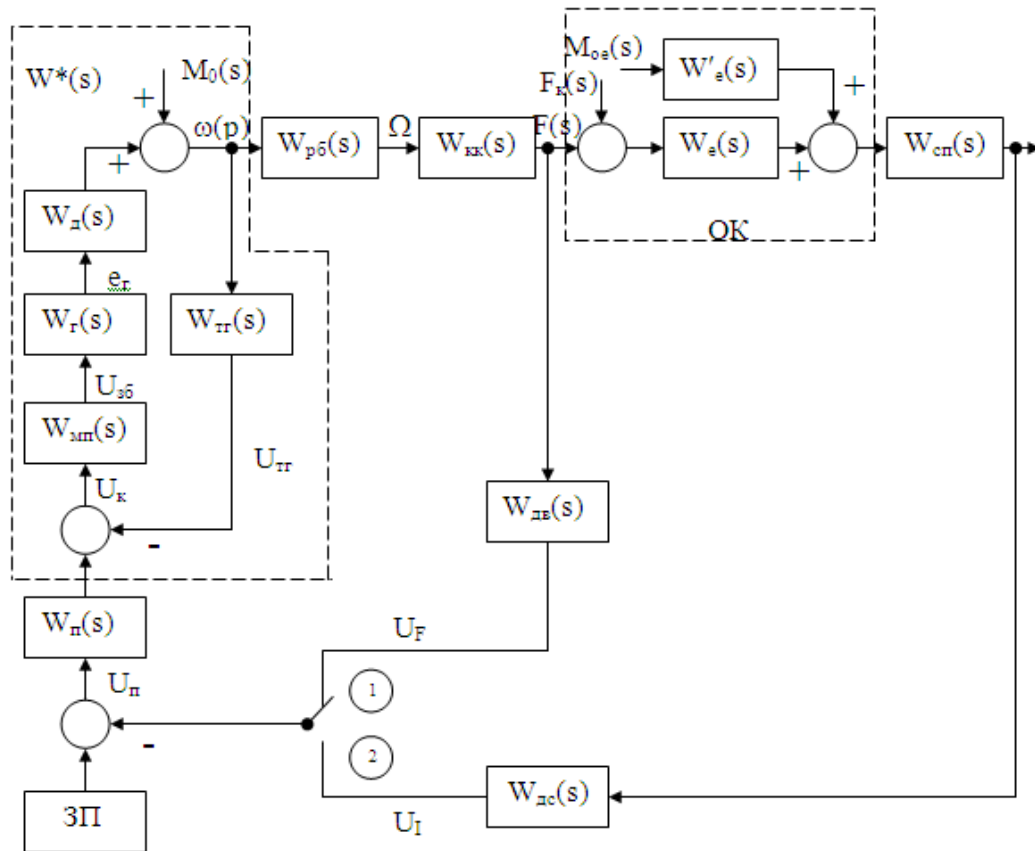


Рисунок 3.1 – Алгоритмічна структура системи автоматичного керування АМС-2

3.2 Перетворення структурної схеми системи автоматичного керування АМС-2

Ланки $W_{mn}(s)$, $W_r(s)$, $W_d(s)$ з'єднані послідовно і охоплені від'ємним зворотнім зв'язком. Тому еквівалентна функція передачі буде мати такий вигляд [3]:

$$W^*(s) = \frac{W_{mn}(s) \cdot W_e(s) \cdot W_\delta(s)}{1 + W_{mn}(s) \cdot W_e(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{m2}(s)}$$

Структурна схема системи керування перетворюється до такого виду:

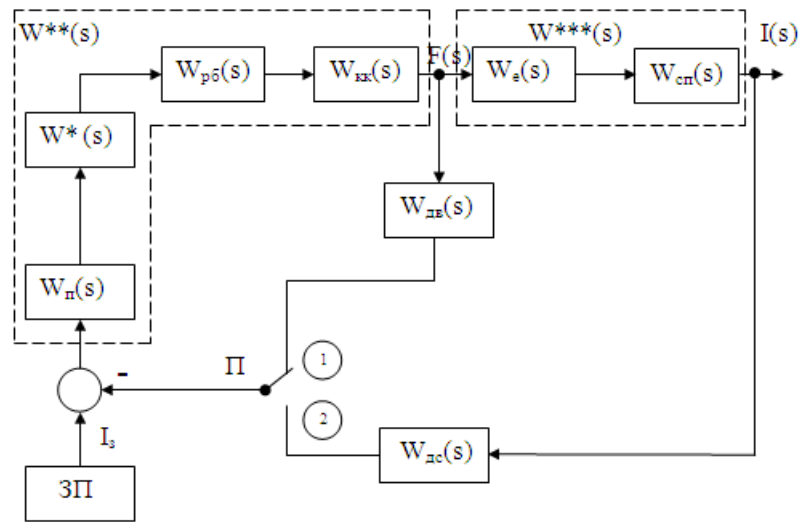


Рисунок 3.2 – 1-ий етап перетворення структурної схеми, що наведена на рис. 3.1

Ланки $W_n(s)$, $W^*(s)$, $W_{pоб}(s)$, $W_{кк}(s)$ з'єднані послідовно і тому еквівалентна функція передачі має такий вигляд:

$$W^{**}(s) = W_n(s) \cdot W^*(s) \cdot W_{pоб}(s) \cdot W_{кк}(s);$$

Ланки $W_e(s)$ і $W_{сп}(s)$ також з'єднані послідовно і тому :

$$W^{***}(s) = W_e(s) \cdot W_{сп}(s).$$

Це дає можливість структурну схему системи зобразити у такому вигляді:

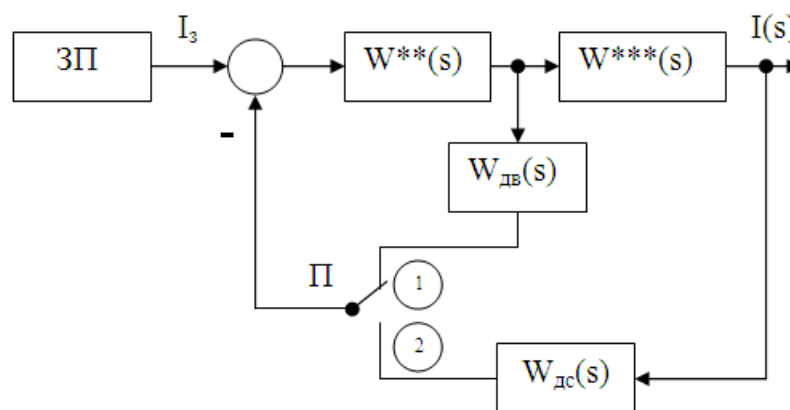


Рисунок 3.3 – 2-ий етап перетворення структурної схеми

У зв'язку з тим, що система автоматичного керування може працювати або в режимі стабілізації ваги інструменту (перемикач П в положенні 1), або в режимі

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабілізації струму електродвигуна електробура (перемикач П в положенні 2), то розглянемо ці структурні схеми окремо. Для системи стабілізації ваги інструменту структурна схема має вигляд, що зображений на рис. 3.4.

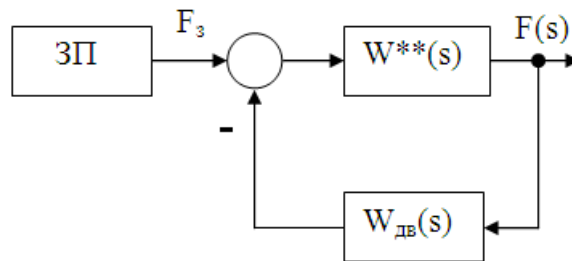


Рисунок 3.4 – Спрощена алгоритмічна структура системи автоматичної стабілізації ваги інструмента [3]

Функція передачі розімкнutoї системи автоматичної стабілізації ваги інструмента дорівнює:

$$W_{pF}(s) = W^{**}(s); \quad (3.1)$$

Функція передачі замкнутої системи, що зображена на рис. 3.4, дорівнює:

$$W_{зF}(s) = \frac{W^{**}(s)}{1 + W^{**}(s) \cdot W_{дв}(s)}. \quad (3.2)$$

Для системи стабілізації струму навантаження двигуна електробура алгоритмічна структура зображена на рис. 3.5.

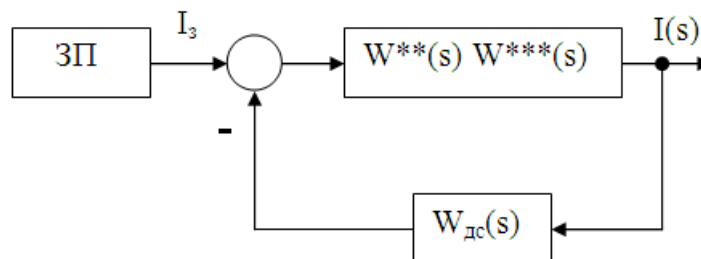


Рисунок 3.5 – Спрощена алгоритмічна структура системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура

Функція передачі розімкненої системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура дорівнює [2]:

$$W_{pI}(s) = W^{**}(s) \cdot W^{***}(s); \quad (3.3)$$

Функція передачі замкнутої системи, що зображена на рис. 3.5, має такий вигляд:

$$W_{zI}(s) = \frac{W^{**}(s) \cdot W^{***}(s)}{1 + W^{**}(s) \cdot W^{***}(s) \cdot W_{\delta c}(s)}. \quad (3.4)$$

Дослідимо на стійкість систему автоматичної стабілізації ваги інструмента.

Для цього підставимо значення $W^*(s)$, $W^{**}(s)$, $W^{***}(s)$ в формули (4.1), (3.2). Остаточно отримаємо:

$$W_{pF}(s) = \frac{W_{mn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_n(s) \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{\kappa\kappa}(s)}{1 + W_{mn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s)}; \quad (3.5)$$

Тепер в рівняння (3.5) підставимо конкретні значення функцій передачі окремих ланок й отрясаємо:

$$\begin{aligned} W_{zF}(s) &= \frac{W_n(s) \cdot \frac{W_{mn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s)}{1 + W_{mn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s)} \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{\kappa\kappa}(s)}{1 + W_n(s) \cdot \frac{W_{mn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s)}{1 + W_{mn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s)} \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{\kappa\kappa}(s) \cdot W_{\delta\delta}(s)} = \\ &= \frac{W_n(s) \cdot W_{mn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{\kappa\kappa}(s)}{1 + W_{mn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s) + W_n(s) \cdot W_{mn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{\kappa\kappa}(s) \cdot W_{\delta\delta}(s)}; \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.3 Функції передачі окремих ланок системи автоматичного керування АМС-2

Параметри елементів системи автоматичного керування АМС-2 вибираємо для свердловини РГ 801-Д в умовах Долинського УБР ВАТ “Укрнафта”.

Струмопідвід

$$W_{cn}(s) = K_{cn} = 1, \quad (3.7)$$

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

електробур

$$W_e(s) = \frac{K_e}{T_e s + 1} = \frac{12.5}{0.86 \cdot s + 1}, \quad (3.8)$$

система “колона бурильних труб-канат”

$$W_{\kappa\kappa}(s) = \frac{K_{\kappa\kappa}}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1} = \frac{13020.83}{0.64 \cdot s^2 + 1.4 \cdot s + 1}, \quad (3.9)$$

редуктор з барабаном лебідки

$$W_{p\delta}(s) = K_{p\delta} = 0.00386, \quad (3.10)$$

електричний двигун системи Г-Д

$$W_\delta(s) = \frac{K_\delta}{T_\delta^2 s^2 + T_\delta s + 1} = \frac{0.3}{0.09 \cdot s^2 + 0.74 \cdot s + 1}, \quad (3.11)$$

електричний генератор системи Г-Д

$$W_z(s) = \frac{K_z}{T_z s + 1} = \frac{0.5}{0.004 \cdot s + 1}, \quad (3.12)$$

магнітний підсилювач

$$W_{mn}(s) = \frac{K_{mn}}{T_{mn} s + 1} = \frac{22}{0.4 \cdot s + 1}, \quad (3.13)$$

напівпровідниковий підсилювач з форсуючою ланкою

$$W_n(s) = K_n = 1, \quad (3.14)$$

давач активного струму двигуна електробура

$$W_{\delta c}(s) = \frac{K_{\delta c}}{T_{\delta c} s + 1} = \frac{0.0005}{0.02 \cdot s + 1}, \quad (3.15)$$

давач ваги (маси) інструменту

$$W_{\delta g}(s) = K_{\delta g} = 0.5, \quad (3.16)$$

тахогенератор

$$W_{mz}(s) = K_{mz} = 0.4. \quad (3.17)$$

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зведемо параметри ланок системи автоматичного керування АМС-2 в
табл.3.1.

Таблиця 3.1 - Параметри елементів системи стабілізації ваги інструмента і струму навантаження двигуна електробура Е215, $l=2500$ м

Назва елемента	Передавальний коефіцієнт		Стала часу
	Величина	Розмірність	
Напівпровідниковий підсилювач з форсуючою ланкою	$K_{п}=1$	В/В	$T_{п}=0$
Магнітний підсилювач	$K_{мп}=22$	В/В	$T_{мп}=0.4$
Редуктор з барабаном лебідки	$K_{р-б}=0.00386$	1/с/1/с	$T_{р-б}=0$
Система “колона бурильних труб-канат”	$K_{к-к}=13020.83$	кН/1/с	$T=0.64$ $\xi=1.09$
Струмопідвід	$K_{сп}=1$	кВт/кВт	$T_{сп}=0$
Тахогенератор	$K_{тг}=0.4$	В/1/с	$T_{тг}=0$
Електробур	$K_{е}=12.5$	кВт/кН	$T_{е}=0.86$
Електричний двигун системи Г-Д	$K_{д}=0.3$	1/с/В	$T_{д1}=0.09$ $T_{д2}=0.74$
Електричний генератор системи Г-Д	$K_{г}=0.5$	1/с/В	$T_{г}=0.004$
Давач активного струму двигуна електробура	$K_{дс}=0.0005$	В/А	$T_{дс}=0.02$
Давач ваги (маси) інструмента	$K_{дв}=0.5$	В/кН	$T_{дв}=0$

Отож, підставивши значення функцій передачі окремих ланок в рівняння (3.5) будемо мати [3]:

$$\begin{aligned}
 W_{pF}(s) &= \frac{22}{0.4s+1} \frac{0.5}{0.004s+1} \frac{0.3 \cdot 0.00386}{0.09s^2+0.74s+1} \frac{13020.83}{0.64s^2+1.4s+1} = \\
 &= \frac{165.859}{1 + \frac{22}{0.4s+1} \frac{0.5}{0.004s+1} \frac{0.3}{0.09s^2+0.74s+1} \cdot 0.4} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.4s+1)(0.004s+1)(0.09s^2+0.74s+1)(0.64s^2+1.4s+1)} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.4s+1)(0.004s+1)(0.09s^2+0.74s+1)+1.32} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.64s^2+1.4s+1)[(0.4s+1)(0.004s+1)(0.09s^2+0.74s+1)+1.32]} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.64s^2+1.4s+1)[(0.00036s^3+0.00296s^2+0.004s+0.09s^2+0.74s+1)(0.4s+1)+1.32]} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.64s^2+1.4s+1)[(0.00036s^3+0.093s^2+0.744s+1)(0.4s+1)+1.32]} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.64s^2+1.4s+1)[(0.000144s^4+0.0372s^3+0.298s^2+0.4s+0.00036s^3+0.093s^2+0.744s+1)+1.32]} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.64s^2+1.4s+1)(0.000144s^4+0.0376s^3+0.391s^2+1.144s+2.32)} = \\
 &= \frac{165.859}{0.000092s^6+0.024s^5+0.25s^4+0.732s^3+1.48s^2+0.0002s^5+0.053s^4+0.55s^3+1.6s^2+3.25s+0.000144s^4+} \\
 &+ 0.0376s^3+0.391s^2+1.144s+2.32} = \\
 &= \frac{165.859}{0.000092s^6+0.0242s^5+0.3s^4+1.32s^3+3.47s^2+4.39s+2.32};
 \end{aligned}$$

3.4 Дослідження стійкості розімкнутої системи автоматичної стабілізації ваги інструмента [2]

Згідно критерію Найквіста–Михайлова будемо мати:

$$s = j\omega,$$

$$\begin{aligned}
 W_{pF}(s) &= \frac{165.859}{0.000092(j\omega)^6+0.0242(j\omega)^5+0.3(j\omega)^4+1.32(j\omega)^3+3.47(j\omega)^2+4.39j\omega+2.32} = \\
 &= \frac{165.859}{-0.000092\omega^6+0.0242j\omega^5+0.3\omega^4-1.32j\omega^3-3.47\omega^2+4.39j\omega+2.32};
 \end{aligned}$$

Домножимо вираз в знаменнику на спряжений:

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$$W_{sF}(j\omega) = \frac{165.859}{(-0.000092\omega^6 + 0.3\omega^4 - 3.47\omega^2 + 2.32) + j(0.0242\omega^5 - 1.32\omega^3 + 4.39\omega)} \times$$

$$\times \frac{(-0.000092\omega^6 + 0.3\omega^4 - 3.47\omega^2 + 2.32) - j(0.0242\omega^5 - 1.32\omega^3 + 4.39\omega)}{(-0.000092\omega^6 + 0.3\omega^4 - 3.47\omega^2 + 2.32) - j(0.0242\omega^5 - 1.32\omega^3 + 4.39\omega)} =$$

$$= \frac{165.859[(-0.000092\omega^6 + 0.3\omega^4 - 3.47\omega^2 + 2.32) - j(0.0242\omega^5 - 1.32\omega^3 + 4.39\omega)]}{(-0.000092\omega^6 + 0.3\omega^4 - 3.47\omega^2 + 2.32)^2 + (0.0242\omega^5 - 1.32\omega^3 + 4.39\omega)^2},$$

Виділимо дійсну і уявну частини у формулі передавальної функції розімкнутої системи:

$$\text{Re}(\omega) = \frac{165.859(-0.000092\omega^6 + 0.3\omega^4 - 3.47\omega^2 + 2.32)}{(-0.000092\omega^6 + 0.3\omega^4 - 3.47\omega^2 + 2.32)^2 + (0.0242\omega^5 - 1.32\omega^3 + 4.39\omega)^2},$$

$$\text{Im}(\omega) = -\frac{165.859(0.0242\omega^5 - 1.32\omega^3 + 4.39\omega)}{(-0.000092\omega^6 + 0.3\omega^4 - 3.47\omega^2 + 2.32)^2 + (0.0242\omega^5 - 1.32\omega^3 + 4.39\omega)^2}.$$

Тепер побудуємо АФЧХ розімкнутої системи:

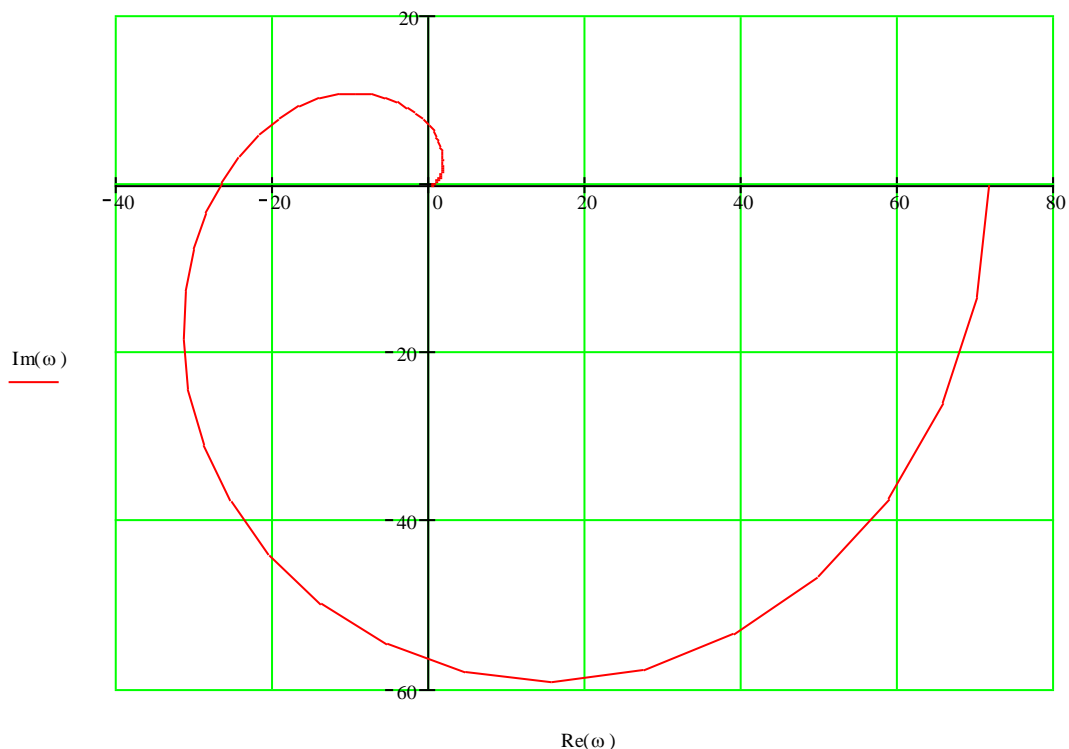


Рисунок 3.6 – АФЧХ розімкнутої системи автоматичної стабілізації ваги інструмента

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Оскільки АФЧХ охоплює точку $\{-1, j_0\}$, то можна зробити висновок про те, що розімкнута система автоматичної стабілізації ваги інструмента є нестійка [2,3].

3.5 Дослідження стійкості замкнутої системи автоматичної стабілізації ваги інструмента

Тепер дослідимо на стійкість замкнуту систему автоматичної стабілізації ваги інструмента, підставивши конкретні значення функцій передачі окремих ланок в рівняння (3.6).

$$\begin{aligned}
 W_{зФ}(s) &= \frac{\frac{22}{0.4s+1} \cdot \frac{0.5}{0.004s+1} \cdot \frac{0.3 \cdot 0.00386}{0.09s^2+0.74s+1} \cdot \frac{13020.83}{0.64s^2+1.4s+1}}{1 + \frac{22}{0.4s+1} \cdot \frac{0.5}{0.004s+1} \cdot \frac{0.3 \cdot 0.4}{0.09s^2+0.74s+1} + \frac{22}{0.4s+1} \cdot \frac{0.5}{0.004s+1} \cdot \frac{0.3 \cdot 0.00386}{0.09s^2+0.74s+1} \cdot \frac{13020.83 \cdot 0.5}{0.64s^2+1.4s+1}} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.4p+1)(0.004s+1)(0.09s^2+0.74s+1)(0.64s^2+1.4s+1)} = \\
 &= \frac{1.32 \cdot (0.64s^2+1.4s+1) + 82.93}{(0.4s+1)(0.004s+1)(0.09s^2+0.74s+1)(0.64s^2+1.4s+1)} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.4s+1)(0.004s+1)(0.09s^2+0.74s+1)(0.64s^2+1.4s+1) + 1.32 \cdot (0.64s^2+1.4s+1) + 82.93} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.00036s^3 + 0.00296s^2 + 0.004s + 0.09s^2 + 0.74s + 1)(0.4s+1)(0.64s^2+1.4s+1) + 1.32 \cdot (0.64s^2+1.4s+1) + 82.93} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.00036s^3 + 0.093s^2 + 0.744s + 1)(0.4s+1)(0.64s^2+1.4s+1) + 1.32 \cdot (0.64s^2+1.4s+1) + 82.93} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.000144s^4 + 0.0372s^3 + 0.298s^2 + 0.4s + 0.00036s^3 + 0.093s^2 + 0.744s + 1)(0.64s^2+1.4s+1) + 1.32 \cdot (0.64s^2+1.4s+1) + 82.93} = \\
 &= \frac{165.859}{(0.000144s^4 + 0.0376s^3 + 0.391s^2 + 1.144s + 1)(0.64s^2+1.4s+1) + 1.32 \cdot (0.64s^2+1.4s+1) + 82.93} = \\
 &= \frac{165.859}{0.000092s^6 + 0.024s^5 + 0.25s^4 + 0.732s^3 + 1.48s^2 + 0.0002s^5 + 0.05s^4 + 0.55s^3 + 1.6s^2 + 3.25s + 0.000144s^4 + 0.0376s^3 + 0.391s^2 + 1.144s + 2.32 + 82.93} = \\
 &= \frac{165.859}{0.000092s^6 + 0.0242s^5 + 0.3s^4 + 1.32s^3 + 3.47s^2 + 4.39s + 85.25};
 \end{aligned}$$

Згідно критерію Михайлова, будемо мати:

$$F(s) = 0.000092s^6 + 0.0242s^5 + 0.3s^4 + 1.32s^3 + 3.47s^2 + 4.39s + 85.25;$$

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Зробимо заміну:

$$s = j\omega,$$

$$F(j\omega) = 0.000092(j\omega)^6 + 0.0242(j\omega)^5 + 0.3(j\omega)^4 + 1.32(j\omega)^3 + 3.47(j\omega)^2 + 4.39j\omega + 85.25 = \\ = -0.000092\omega^6 + 0.0242j\omega^5 + 0.3\omega^4 - 1.32j\omega^3 - 3.47\omega^2 + 4.39j\omega + 85.25;$$

Виділимо дійсну і уявну частини у попередньому рівнянні:

$$P(\omega) = -0.000092s^6 + 0.3s^4 - 3.47s^2 + 85.25,$$

$$Q(\omega) = 0.0242s^5 - 1.32s^3 + 4.39s.$$

Побудуємо годограф Михайлова для визначення стійкості замкнутої системи:

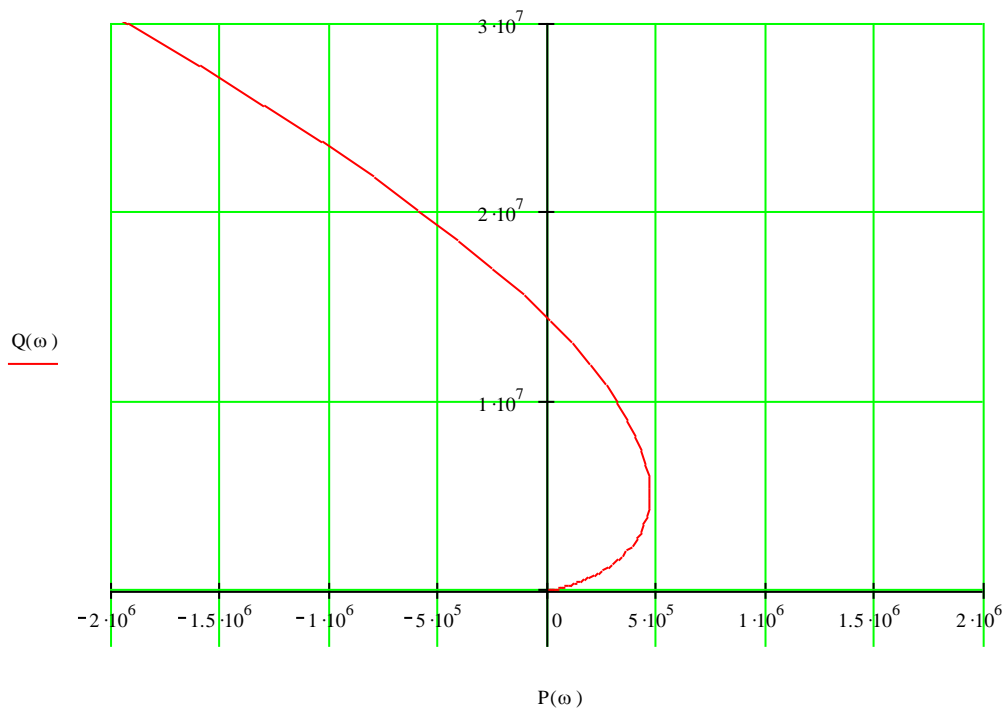


Рисунок 3.7 – Годограф Михайлова для замкнутої системи автоматичної стабілізації ваги інструмента

Оскільки годограф Михайлова іде в нескінченність у другому квадранті, а характеристичне рівняння – шостого порядку, то можна зробити висновок про те, що замкнута система автоматичної стабілізації ваги інструмента є нестійкою [2].

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.6 Дослідження стійкості розімкнутої системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура

Тепер розглянемо функцію передачі системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура. Для цього підставимо значення $W^*(s)$, $W^{**}(s)$, $W^{***}(s)$ в формули (4.3), (4.4). Остаточоно отримаємо:

$$W_{pl}(s) = \frac{W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_n(s) \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{kk}(s) \cdot W_e(s) \cdot W_{cn}(s)}{1 + W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s)}; \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} W_{zl}(p) &= \frac{W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_n(s) \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{kk}(s) \cdot W_e(s) \cdot W_{cn}(s)}{1 + W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s)} = \\ &= \frac{W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_n(s) \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{kk}(s) \cdot W_e(s) \cdot W_{cn}(s) \cdot W_{\delta c}(s)}{1 + \frac{W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s)}{1 + W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(p)}} = \\ &= \frac{W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_n(s) \cdot W_{p\delta}(p) \cdot W_{kk}(s) \cdot W_e(s) \cdot W_{cn}(p)}{1 + W_{mi}(s) \cdot W_z(p) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s)} = \\ &= \frac{1 + W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s) + W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_n(s) \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{kk}(s) \cdot W_e(s) \cdot W_{cn}(s) \cdot W_{\delta c}(s)}{1 + W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s)} = \\ &= \frac{W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_n(p) \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{kk}(s) \cdot W_e(s) \cdot W_{cn}(s)}{1 + W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_{mz}(s) + W_{mi}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_\delta(s) \cdot W_n(s) \cdot W_{p\delta}(s) \cdot W_{kk}(s) \cdot W_e(s) \cdot W_{cn}(s) \cdot W_{\delta c}(s)}; \end{aligned} \quad (3.19)$$

Тепер в рівняння (3.18) підставимо конкретні значення функцій передачі окремих ланок.

$$\begin{aligned} W_{pl}(s) &= \frac{22}{0.4s+1} \cdot \frac{0.5}{0.004s+1} \cdot \frac{0.3}{0.09s^2+0.74s+1} \cdot 1 \cdot 0.00386 \cdot \frac{13020.83}{0.64s^2+1.4s+1} \cdot \frac{12.5}{0.86s+1} \cdot 1 = \\ &= \frac{2073.24}{1 + \frac{22}{0.4s+1} \cdot \frac{0.5}{0.004s+1} \cdot \frac{0.3}{0.09s^2+0.74s+1} \cdot 0.4} = \\ &= \frac{(0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1) \cdot (0.64s^2+1.4s+1) \cdot (0.86s+1)}{1.32 + (0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1)} = \\ &= \frac{2073.24}{(0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1)} = \\ &= \frac{2073.24}{(0.64s^2+1.4s+1) \cdot (0.86s+1) \cdot [1.32 + (0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1)]} = \\ &= \frac{2073.24}{(0.64s^2+1.4s+1) \cdot (0.86s+1) \cdot (0.00144s^4 + 0.0482s^3 + 0.405s^2 + 1.144s + 2.32)} = \\ &= \frac{2073.24}{0.000792s^7 + 0.0291s^6 + 0.313s^5 + 1.476s^4 + 4.33s^3 + 7.28s^2 + 6.38s + 2.32}; \end{aligned}$$

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Згідно критерію Найквіста–Михайлова будемо мати:

$$p = j\omega,$$

$$W_{pl}(j\omega) = \frac{207324}{0.000792(j\omega)^7 + 0.0291(j\omega)^6 + 0.313(j\omega)^5 + 1.476(j\omega)^4 + 4.33(j\omega)^3 + 7.28(j\omega)^2 + 6.38j\omega + 2.32} =$$

$$= \frac{207324}{-0.000792j\omega^7 - 0.0291\omega^6 + 0.313j\omega^5 + 1.476\omega^4 - 4.33j\omega^3 - 7.28\omega^2 + 6.32j\omega + 2.32};$$

Домножимо вираз в знаменнику на спряжений:

$$W_{pl}(j\omega) = \frac{2073.24}{(-0.0291\omega^6 + 1.476\omega^4 - 7.28\omega^2 + 2.32) + j \cdot (-0.000792\omega^7 + 0.313\omega^5 - 4.33\omega^3 + 6.38\omega)} \times$$

$$\times \frac{(-0.0291\omega^6 + 1.476\omega^4 - 7.28\omega^2 + 2.32) - j \cdot (-0.000792\omega^7 + 0.313\omega^5 - 4.33\omega^3 + 6.38\omega)}{(-0.0291\omega^6 + 1.476\omega^4 - 7.28\omega^2 + 2.32) - j \cdot (-0.000792\omega^7 + 0.313\omega^5 - 4.33\omega^3 + 6.38\omega)} =$$

$$= \frac{2073.24 \cdot (-0.0291\omega^6 + 1.476\omega^4 - 7.28\omega^2 + 2.32) - 2073.24 \cdot j \cdot (-0.000792\omega^7 + 0.313\omega^5 - 4.33\omega^3 + 6.38\omega)}{(-0.0291\omega^6 + 1.476\omega^4 - 7.28\omega^2 + 2.32)^2 + (-0.000792\omega^7 + 0.313\omega^5 - 4.33\omega^3 + 6.38\omega)^2}$$

Виділимо дійсну і уявну частини у формулі функцій передачі розімкнutoї системи:

$$\operatorname{Re}(\omega) = \frac{2073.24 \cdot (-0.0291\omega^6 + 1.476\omega^4 - 7.28\omega^2 + 2.32)}{(-0.0291\omega^6 + 1.476\omega^4 - 7.28\omega^2 + 2.32)^2 + (-0.000792\omega^7 + 0.313\omega^5 - 4.33\omega^3 + 6.38\omega)^2},$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = -\frac{2073.24 \cdot (-0.000792\omega^7 + 0.313\omega^5 - 4.33\omega^3 + 6.38\omega)}{(-0.0291\omega^6 + 1.476\omega^4 - 7.28\omega^2 + 2.32)^2 + (-0.000792\omega^7 + 0.313\omega^5 - 4.33\omega^3 + 6.38\omega)^2}.$$

Тепер побудуємо АФЧХ розімкнutoї системи:

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

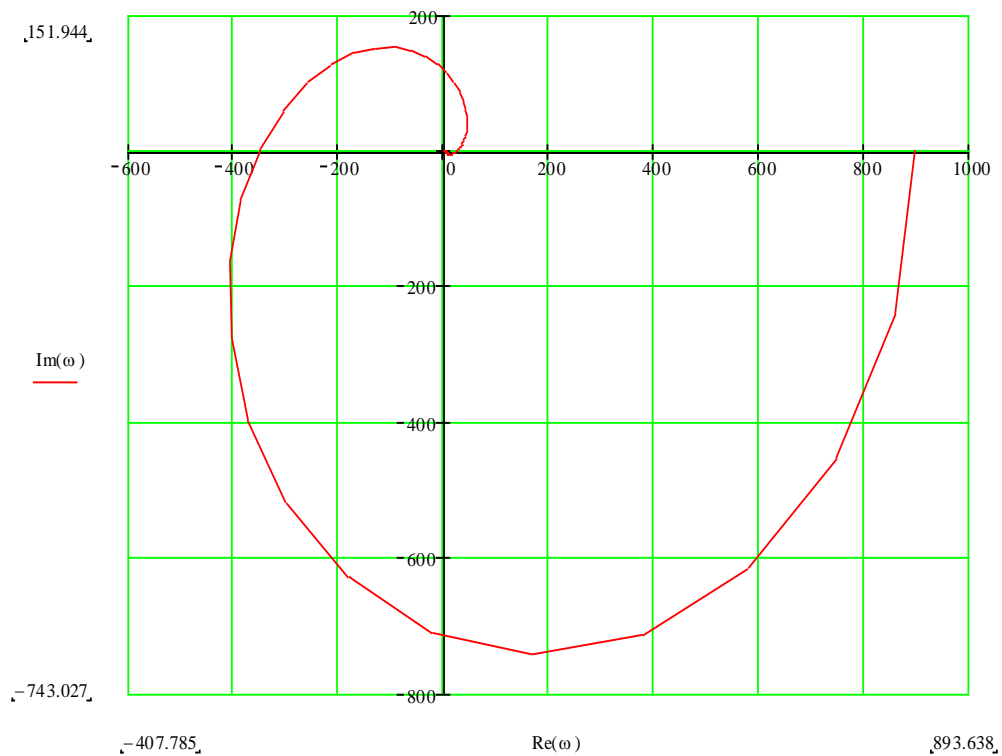


Рисунок 3.8 – АФЧХ розімкнутої системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура

Оскільки АФЧХ охоплює точку $\{-1, j_0\}$, то можна зробити висновок про те, що розімкнута система автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура є нестійка [8, 9].

3.7 Дослідження стійкості замкнутої системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура

Тепер дослідимо на стійкість замкнуту систему автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура, підставивши конкретні значення функцій передачі окремих ланок в рівняння (3.19).

$$\begin{aligned}
W_{pl}(s) &= \frac{\frac{22}{0.4s+1} \frac{0.5}{0.004s+1} \frac{0.3 \cdot 0.00386}{0.09s^2+0.74s+1} \frac{13020.83}{0.64s^2+1.4s+1} \frac{12.5}{0.86s+1}}{1 + \frac{22}{0.4s+1} \frac{0.5}{0.004s+1} \frac{0.3 \cdot 0.4}{0.09s^2+0.74s+1} + \frac{22}{0.4s+1} \frac{0.5}{0.004s+1} \frac{0.3 \cdot 0.00386}{0.09s^2+0.74s+1}} \times \\
&= \frac{\frac{13020.83}{0.64s^2+1.4s+1} \frac{12.5}{0.86s+1} \frac{0.0005}{0.02s+1}}{2073.24} = \\
&= \frac{(0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1) \cdot (0.64s^2+1.4s+1) \cdot (0.86s+1)}{\frac{1.32+(0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1)}{(0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1)} +} \\
&+ \frac{1.04}{(0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1) \cdot (0.64s^2+1.4s+1) \cdot (0.86s+1) \cdot (0.02s+1)} = \\
&= \frac{2073.24}{\frac{(0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1) \cdot (0.64s^2+1.4s+1) \cdot (0.86s+1)}{1.32 \cdot (0.64s^2+1.4s+1) \cdot (0.86s+1) \cdot (0.02s+1) + (0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1)} \times} \\
&\times \frac{(0.64s^2+1.4s+1) \cdot (0.86s+1) \cdot (0.02s+1) + 1.04}{(0.86s+1) \cdot (0.02s+1)} = \\
&= \frac{2073.24 \cdot (0.02s+1)}{1.32 \cdot (0.64s^2+1.4s+1) \cdot (0.86s+1) \cdot (0.02s+1) + (0.4s+1) \cdot (0.004s+1) \cdot (0.09s^2+0.74s+1)} \times \\
&\times \frac{(0.64s^2+1.4s+1) \cdot (0.86s+1) \cdot (0.02s+1) + 1.04}{2073.24 \cdot (0.02s+1)} = \\
&= \frac{1.32 \cdot (0.55s^3+1.84s+2.56s+1) \cdot (0.02s+1) + (0.00144s^4+0.0482s^3+0.405s^2+1.144s+1)}{\times (0.55s^3+1.84s^2+2.26s+1) \cdot (0.02s+1) + 1.04} \times \\
&= \frac{2073.24 \cdot (0.02s+1)}{(0.015s^4+0.78s^3+2.5s^2+3s+1.32) + (0.00079s^7+0.03s^6+0.313s^5+1.48s^4+3.6s^3+4.8s^2+3.4s+1)} \times \\
&\times (0.02s+1) + 1.04 = \\
&= \frac{2073.24 \cdot (0.02s+1)}{0.000016s^8+0.0014s^7+0.036s^6+0.343s^5+1.57s^4+4.48s^3+7.37s^2+6.42s+3.36};
\end{aligned}$$

Згідно критерію Михайлова, будемо мати:

$$F(s) = 0.000016s^8 + 0.0014s^7 + 0.036s^6 + 0.343s^5 + 1.57s^4 + 4.48s^3 + 7.37s^2 + 6.42s + 3.36;$$

Зробимо заміну:

$$s = j\omega,$$

$$F(j\omega) = 0.000016(j\omega)^8 + 0.0014(j\omega)^7 + 0.03(j\omega)^6 + 0.343(j\omega)^5 + 1.57(j\omega)^4 + 4.48(j\omega)^3 + 7.37(j\omega)^2 + 6.42j\omega + 3.36;$$

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

$$F(j\omega) = 0.000016\omega^8 - 0.0014j\omega^7 - 0.03\omega^6 + 0.343j\omega^5 + 1.57\omega^4 - 4.48j\omega^3 - 7.37\omega^2 + 6.42j\omega + 3.36;$$

Виділимо дійсну і уявну частини у попередньому рівнянні:

$$P(\omega) = 0.000016\omega^8 - 0.03\omega^6 + 1.57\omega^4 - 7.37\omega^2 + 3.36,$$

$$Q(\omega) = -0.0014\omega^7 + 0.343\omega^5 - 4.48\omega^3 + 6.42\omega.$$

Побудуємо годограф Михайлова для визначення стійкості замкнутої системи:

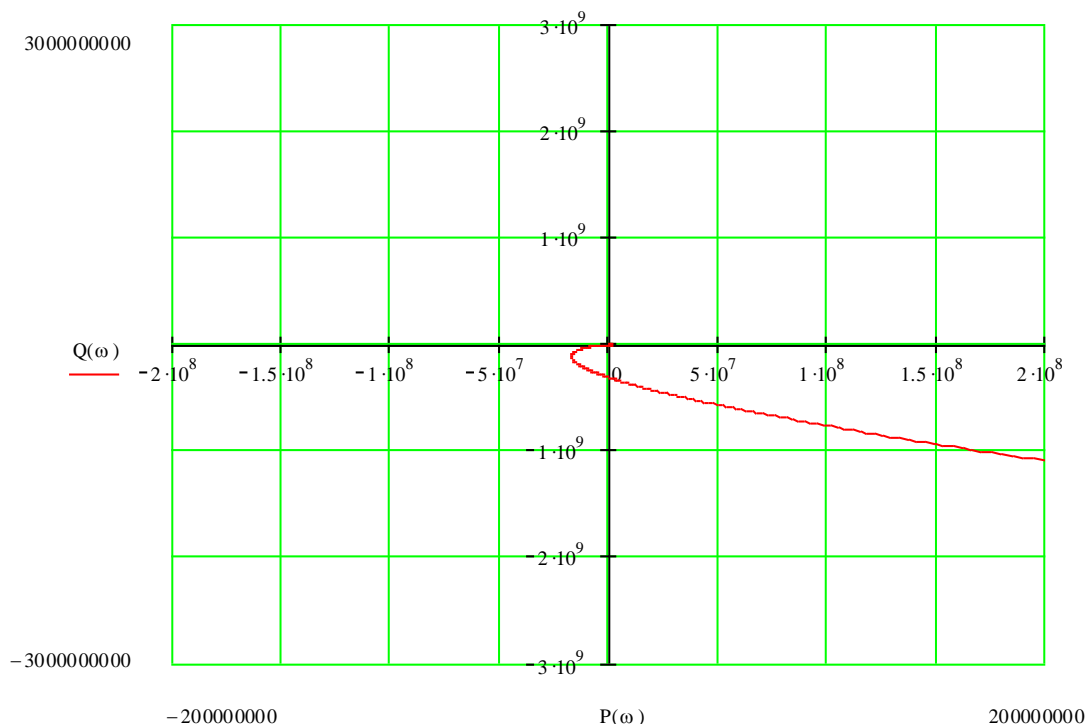


Рисунок 3.9 – Годограф Михайлова для замкнутої системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура

Рисунок 3.9 дає відповідь на питання, в якому квадранті годограф Михайлова іде в нескінченність, але із рисунка не видно скільки квадрантів проходить годограф. Для того, щоб прослідкувати скільки квадрантів проходить годограф Михайлова, побудуємо графік в іншому масштабі:

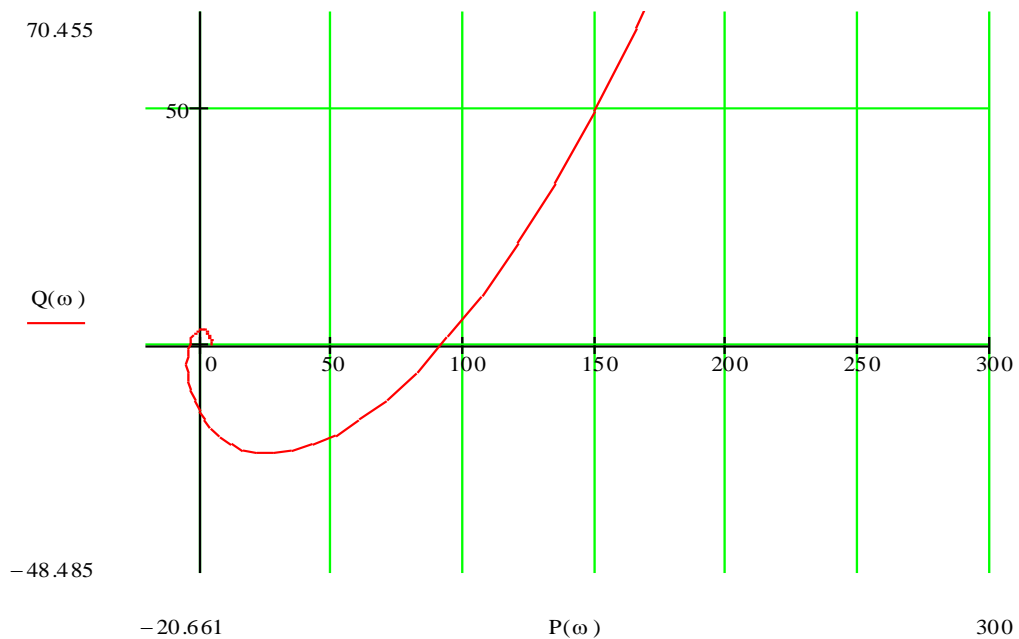


Рисунок 3.10 – Годограф Михайлова для замкнутої системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура

Оскільки годограф Михайлова послідовно проходить сім квадрантів проти руху годинникової стрілки і у восьмому квадранті іде в нескінченність, а характеристичне рівняння також восьмого порядку, то можна зробити висновок про те, що замкнута система автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура є стійкою [3].

Висновки до розділу

Проаналізовано стійкість автоматичної системи керування АМС-2. Стійкість розімкнутої системи досліджувалась на основі критерію Найквіста-Михайлова, а стійкість замкнутої системи – на основі графоаналітичного критерію Михайлова. На основі проведених досліджень зроблено висновок про стійкість замкнутої системи автоматичної стабілізації струму навантаження електродвигуна електробура.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ДОВЖИНИ СВЕРДЛОВИНИ ТА САК ЕЛЕКТРОБУРА

4.1 Вплив довжини свердловини на систему автоматичного керування навантаженням двигуна електробура

Зі зростанням глибини буріння істотно змінюються динамічні та навантажувальні характеристики роботи електробура. Збільшення довжини свердловини спричиняє зростання опору виносу шламу, збільшення гідродинамічного тиску, тертя інструмента об стінки, а також погіршення умов тепловідведення, що в сукупності впливає на навантаження електродвигуна та ефективність роботи системи автоматичного керування (САК). Система автоматичного керування навантаженням двигуна електробура складається із окремих елементів – ланок. Дослідимо як впливає довжина свердловини на кожен з цих ланок [2,4,5,6].

Магнітний підсилювач являє собою інерційну ланку I-го порядку. Його вхідною величиною є напруга, підсилена напівпровідниковим підсилювачем $U_{\text{п}}$, а вихідною – напруга $U_{\text{зб}}$. Параметри магнітного підсилювача не залежать від довжини свердловини, а тому залишаються незмінними.

Електричний генератор також представляє собою інерційну ланку I-го порядку. Параметри його не залежать від довжини свердловини.

Електричний двигун в системі представлений інерційною ланкою II-го порядку. Його параметри залишаються незмінними при збільшенні довжини свердловини.

Редуктор з барабаном лебідки являє собою безінерційну ланку, а його передавальний коефіцієнт не залежить від довжини свердловини.

Система “колона бурильних труб-канат” представляє собою інерційну ланку II-го порядку. При збільшенні довжини свердловини довжина колони

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

бурильних труб також зростає. Тому параметри цієї ланки постійно змінюються в процесі буріння.

Електробур є інерційною ланкою 1-го порядку. Його параметри не залежать від довжини свердловини і залишаються незмінними.

Струмопідвід в системі представлений безінерційною ланкою. Із збільшенням довжини свердловини зростає довжина кабелю, по якому підводиться струм до електробура. Тому передавальний коефіцієнт струмопідводу буде змінюватись із довжиною.

Тахогенератор є безінерційною ланкою, параметри якої не залежать від довжини свердловини.

Давач ваги (маси) інструменту також є безінерційною ланкою і параметри давача не залежать від довжини свердловини. Давач активного струму двигуна електробура представляє собою інерційну ланку I-го порядку. Параметри давача активного струму залишаються незмінними із збільшенням довжини свердловини.

Отже, можна зробити висновок, що довжина свердловини впливає на дві ланки системи автоматичного керування навантаженням двигуна електробура [4,6]:

- 1) струмопідвід;
- 2) система “колона бурильних труб-канат”.

Розглянемо детальніше вплив довжини свердловини на ці дві ланки системи.

На першій стадії розвитку електробуріння подача електроенергії до вибійного трифазного електродвигуна здійснювалася по кабельній лінії передач, що складає з відрізків трьохжильного шлангового кабелю з кінцевими кабельними муфтами, що з'єднуються між собою при згвинчуванні бурильних труб. Струмопідвід у своєму розвитку перетерпів ряд змін, що полягають головним чином у зміні розмірів контактних з'єднань, технології їхнього виготовлення і кріплення в бурильних трубах.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Зовнішній діаметр першої конструкції контактної з'єднання струмопідводу до електробура ЕБР-12 складав 80 мм. Елементи струмопідводу працювали у відносно легких умовах, тому що через них передавалася потужність 70 кВт при напрузі 700 В і силі струму 87 А, у той час як у сучасних електробурих установках передається потужність до 300 кВт при напрузі до 2000 В і силі струму до 160 А.

Внаслідок розміщення кабелю усередині бурових труб зменшується сечення для проходження бурового розчину, особливо в місцях кріплення кабельних секцій у бурових замках, були розроблені гладкопрохідні труби з висадженими назовні кінцями, зменшені зовнішні діаметри кабелю до 43 мм і контактних з'єднань до 65 мм.

Однак гідравлічні втрати в бурових трубах із трьохпровідним струмопідводом залишалися досить високими. Для зниження гідравлічних втрат була розроблена система живлення електробура «два проводи-бурові труби», при якій живлення трифазного двигуна електробура здійснюється по двохпровідній кабельній лінії і бурових трубах.

Двохпровідні кабельні секції з'єднуються двохоконтактними кабельними муфтами діаметром 50 мм. Кабель овального перерізу, зовнішні розміри його 35×15 мм. Третій провід, необхідний для живлення трифазного двигуна утворюють бурові труби при згвинчуванні замкових з'єднань. Цей провід з'єднаний із «землею» за допомогою спеціального заземлення, приєднаного до бурових труб через струмоприймач, а також шляхом безпосереднього зіткнення зі стінками свердловини і буровим розчином.

При перевантаженнях електробура у зв'язку з підвищенням сили струму в довгій лінії передачі, яку являє собою струмопідвід, відповідно збільшується падіння напруги. При цьому знижується напруга на затискачах двигуна і в квадратичній залежності зменшується величина обертового моменту. З метою деякої компенсації падіння напруги при бурінні нижніх інтервалів глибоких свердловин доцільно подавати на затискачі електробура раніше підвищену

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напругу – $1,1 U_n$. Більше підвищення напруги не рекомендовано через значне зростання струму холостого ходу та втрат в міді статора і магнітопроводі. В зв'язку з цим необхідно регулювати напругу на затискачах двигуна електробура в процесі буріння таким чином, щоб при підвищенні навантаження чи зниженні напруги в сітці, напруга, що підводиться з поверхні, автоматично підвищувалась до такого рівня, щоб на затискачах електробура зберігалось номінальне значення напруги.

Змоделюємо систему автоматичного керування навантаженням двигуна електробура в системі MatLAB, скориставшись пакетом Simulink [9].

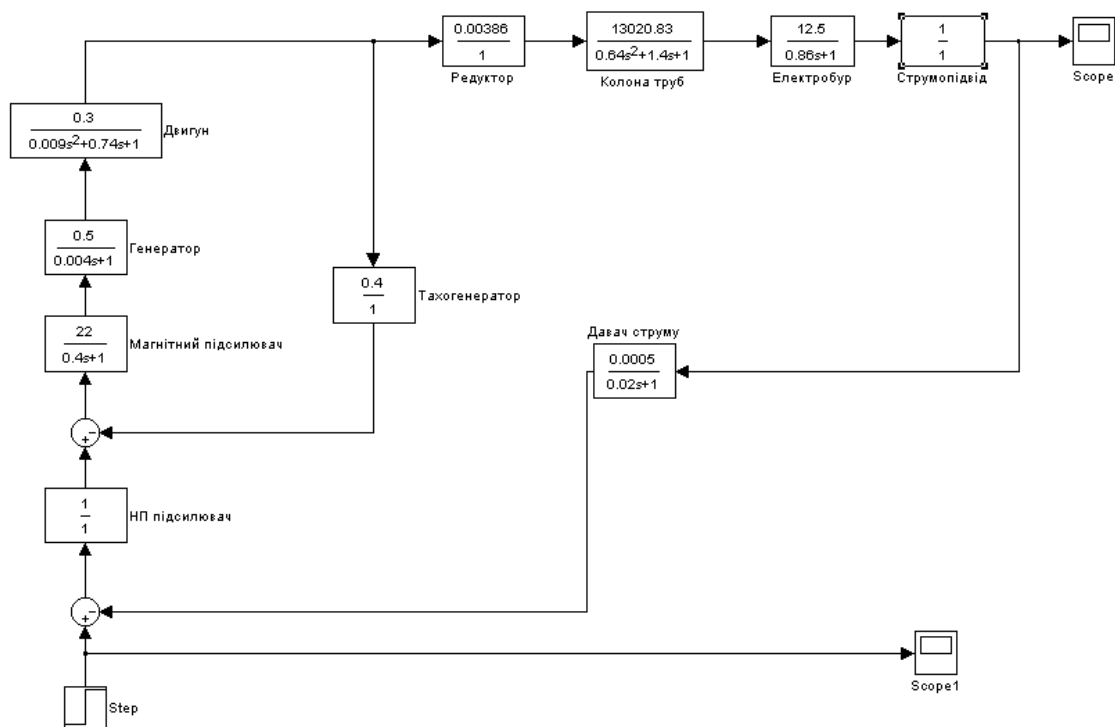


Рисунок 4.1 – Система автоматичного керування навантаженням двигуна електробура

Перехідна характеристика системи при довжині свердловини при $l=500$ м приведена на рис. 4.2. Відносне перерегулювання системи становить 15 %, час регулювання складає 10 с.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

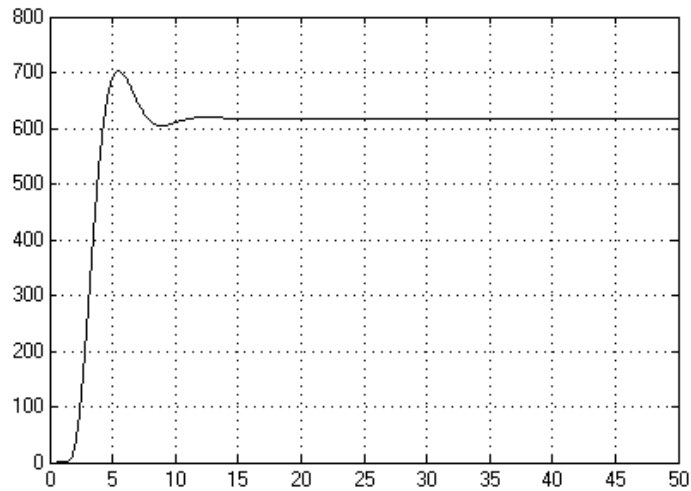


Рисунок 4.2 – Перехідна характеристика системи автоматичного керування навантаженням двигуна електробура при довжині свердловини $l=500$ м

Звичайно при зростанні довжини свердловини, довжина струмопідводу буде також зростати, а його передавальний коефіцієнт буде зменшуватись.

При збільшенні довжини свердловини довжина колони бурильних труб буде зростати, а її передавальний коефіцієнт та сталі часу також зростатимуть.

Тому дослідимо, як поведе себе система автоматичного керування навантаженням двигуна електробура, при зміні параметрів системи із довжиною.

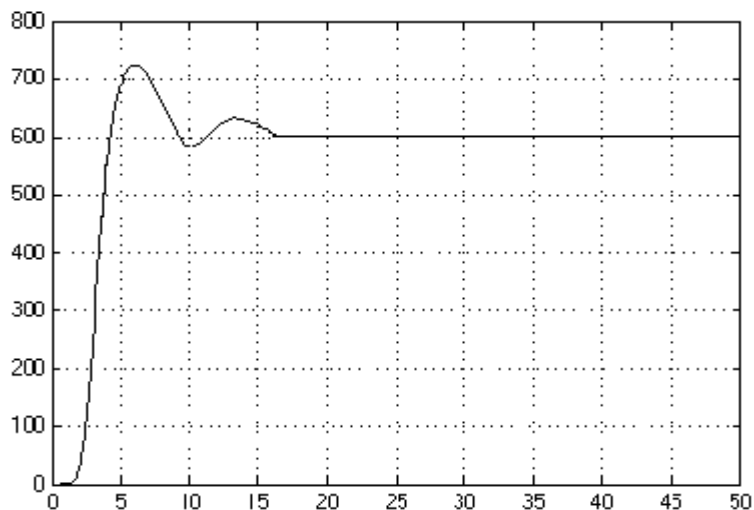


Рисунок 4.3 – Перехідна характеристика системи автоматичного керування навантаженням двигуна електробура при довжині свердловини $l=1500$ м

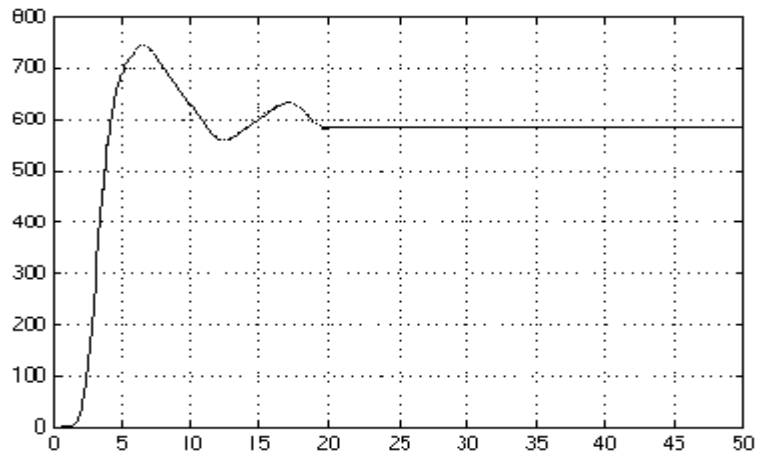


Рисунок 4.4 – Перехідна характеристика системи автоматичного керування навантаженням двигуна електробура при довжині свердловини $l=2500$ м

Отже, можемо зробити висновок, що із зростанням довжини свердловини незначно зростає кількість коливань, перерегулювання та час коливань.

На основі проведених досліджень можна зробити висновок про те, що при збільшенні довжини свердловини показники якості системи автоматичного керування навантаженням двигуна електробура не погіршуються.

Це пояснюється тим, що осьові навантаження на долото визначаються за активним струмом двигуна електробура, а тертя колони бурильних труб в свердловині та збільшення її довжини не впливає на визначення осьових навантажень.

Тому використання непрямого методу вимірювання навантаження на породоруйнівний інструмент є досить ефективним при бурінні похило-скерованих і горизонтально розгалужених свердловин.

4.2 Оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід в режимі on-line з врахуванням невизначеності процесу буріння

Породоруйнівний інструмент, що використовується в технологічному процесі поглиблення свердловини і впливає на його ефективність, одночасно є

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

джерелом інформації не тільки про сам процес, але і про середовище, в якому цей процес відбувається.

Властивості середовища, тобто гірських порід і промивного агенту, можна розглядати як анізотропні, характеристики яких вар'юються у вузькому діапазоні. Це дає можливість, використовуючи модель взаємодії долота з породою вибою, і системою спостереження за процесом поглиблення свердловини, отримати інформацію про такий параметр гірських порід як їх твердість.

Модель процесу руйнування породи на вибої свердловини можна представити у такому вигляді (рис. 4.5).

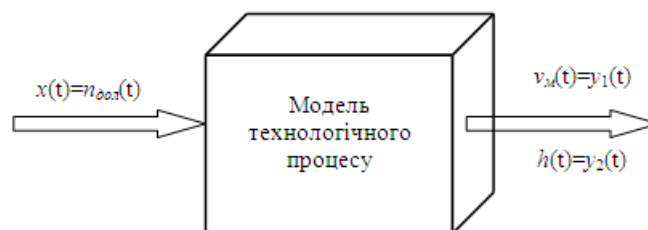


Рисунок 4.5 – Модель процесу руйнування породи на вибої свердловини

$n_{дол}(t)$ – потужність на долоті; $v_m(t)$ – механічна швидкість проходки;

$h(t)$ – проходка

Якщо відома математична модель цього процесу, то похибка оцінювання його параметрів може бути визначена на основі структури, яка зображена на рис. 4.6.

Похибка оцінювання $z(t)$ дорівнює

$$z(t) = y_o(t) - y(t), \quad (4.1)$$

де $y_o(t), y(t)$ – дійсне і оцінене значення контрольованої величини.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56



Рисунок 4.6 – Структура, яка ґрунтується на визначенні похибки оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід

Принцип процесу оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід здійснюється згідно структури, яка зображена на рис. 4.7.

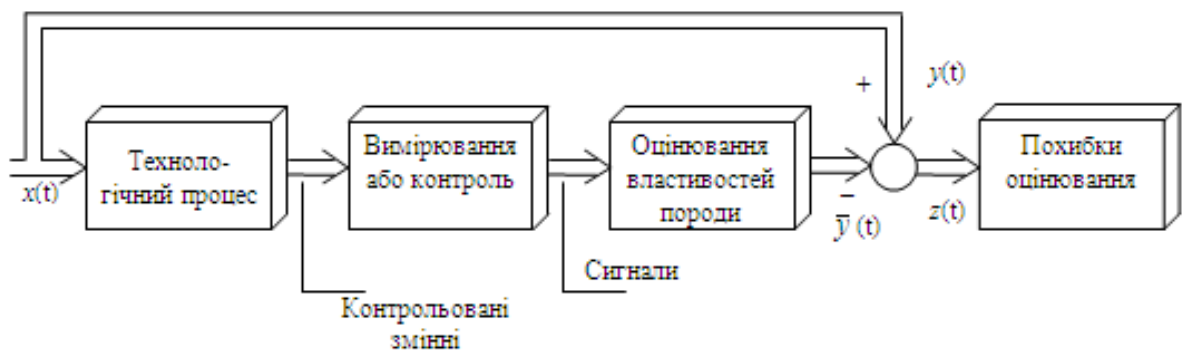


Рисунок 4.7 – Структура процесу оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід

Найбільш точне оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід в процесі буріння може бути здійснено при бурінні свердловин електробурами, коли потік енергії до двигуна є носієм інформації про процеси, що відбуваються на вибої свердловини.

Представимо структурну схему формування потужності на валі електробура (рис. 4.8):

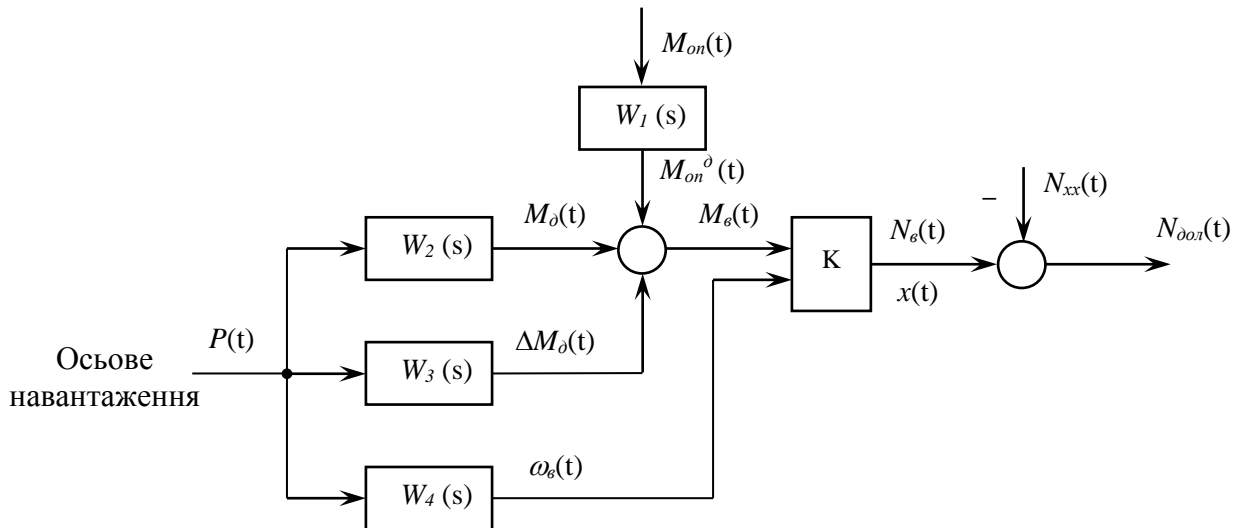


Рисунок 4.8 – Структурна схема формування потужності на валі двигуна електробура:

- $P(t)$ – осьове навантаження на долото; }
 $M_{on}(t)$ – момент статичного опору на долоті; } стаціонарні
 $N_g(t)$ – механічна потужність на валі електродвигуна; } випадкові процеси
 $M_g(t)$ – момент на валі електродвигуна;

$$W_1(s) = \frac{M_{on}^o(s)}{M_{on}(s)}; \quad (4.2)$$

$$W_2(s) = \frac{M_o(s)}{P(s)}; \quad (4.3)$$

$$W_3(s) = \frac{\Delta M_o(s)}{P(s)}; \quad (4.4)$$

$$W_4(s) = \frac{\omega_e(s)}{P(s)}; \quad (4.5)$$

де $M_{on}(s)$, $M_{on}^o(s)$, $P(s)$, $\omega_e(s)$ – зображення за Лапласом відповідно до моменту статичного опору $M_{on}(t)$ на долоті, моменту електродвигуна $M_{on}^o(t)$, запасів зміни осьового навантаження на долото $P(t)$ і кутової швидкості обертання $\omega_e(t)$ вала електродвигуна;

$M_o(s)$ – зображення за Лапласом динамічного моменту на валі електродвигуна рівного:

$$M_{\rho}(t) = I \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.6)$$

де I – сумарний момент інерції долота і шпинделя приведені до валу електродвигуна електробура;

$\Delta M_{\rho}(s)$ – зображення за Лапласом складової динамічного моменту на валі двигуна, що залежить від кута повороту α :

$$\Delta M_{\rho}(s) = \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dI}{d\alpha}. \quad (4.7)$$

Враховуючи рівняння зв'язку моменту на валі $M_e(t)$ з потужністю $N_e(t)$ на валі двигуна електробура:

$$N_e(t) = \omega_e(t)M_e(t), \quad (4.8)$$

а також формули (4.6) і (4.7), одержимо, використовуючи рівняння Д'Аламбера, вираз для потужності на валі двигуна електробура:

$$N_e(t) = \omega_e(t) \left[M_{on}(t) + I \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dI}{d\alpha} \right], \quad (4.9)$$

який відповідає структурі формування потужності на валі двигуна електробура, яка зображена на рис. 4.9.

Якщо знехтувати зміною радіуса долота в міру його зношення, то тоді:

$$\Delta M_{\rho}(t) = 0 \text{ і } W_3(s) = 0, \quad (4.10)$$

і отже структура, зображена на рис. 6.4, може бути спрощена.

Потужність $N_{\rho_{ол}}(t)$, що затрачається на обертання долота, витрачається не тільки на руйнування породи вибою, але і на руйнування стінок свердловини, подолання сил тертя об вибій і стінки свердловини. Тому треба враховувати ККД передачі енергії від долота до гірської породи. Він для шарошкових доліт дорівнює $ККД_{Ш} \approx 0,1 \div 0,15$; для алмазних доліт $ККД_{А} \approx 0,01 \div 0,02$.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

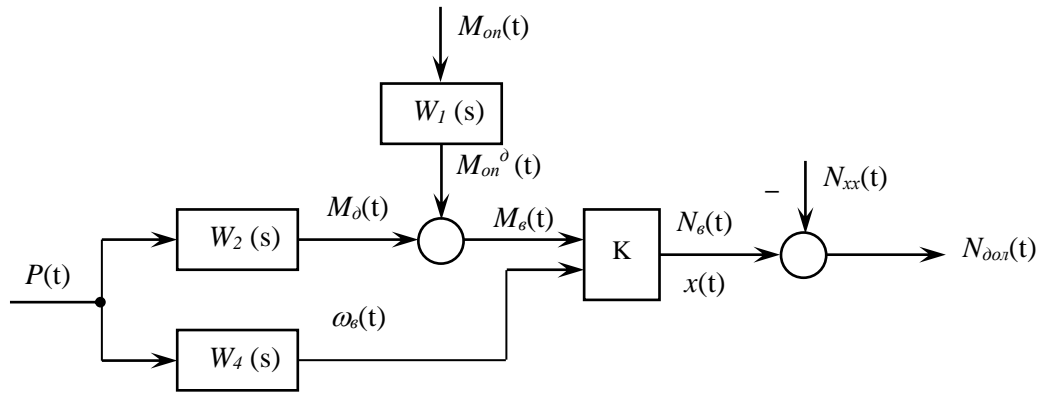


Рисунок 4.9 – Структурна схема формування потужності на долоті при бурінні свердловин електробуром: $N_{xx}(t)$ – втрати потужності на тертя в підшипниках,

шпинделі та ін.; $N_{dol}(t) = \frac{dA}{dt} = Ap$ – механічна потужність, яка підводиться до

долота, Дж/с; A – робота, яка витрачається на зношення долота, Дж; s – оператор

перетворення Лапласа $s = \frac{d}{dt}$

Відзначимо, що найбільш інформативним параметром, який має кореляційний зв'язок з твердістю породи, є питомі витрати енергії на поглиблення свердловини. Вони зв'язані з параметрами режиму буріння і долота такою формулою

$$w = \frac{\eta \frac{Mn}{975} + Fv}{cvd^2(1 + kvd^2Q^{-1})} \left[\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^3} \right], \quad (4.11)$$

де η – коефіцієнт корисної дії породоруйнівного інструменту;

M – момент на долоті;

n – швидкість обертання долота;

F – осьове навантаження на долото;

v – механічна швидкість проходки;

c – константа, яка дорівнює 0,1;

d – діаметр долота;

k – коефіцієнт, який залежить від властивостей бурового розчину;

Q – витрата бурового розчину.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З виразу видно, що коефіцієнт твердості w є комплексним показником, який враховує властивості породи, параметри режиму буріння F, n, Q , діаметр долота d , механічну швидкість проходки V , момент на долоті M , а також властивості бурового розчину і особливості його подачі на вибір свердловини.

Одразу ж можна відмітити, що питомі енерговитрати (ПЕВ) є одним із важливих техніко-економічних показників процесу поглиблення свердловин на нафту і газ. Він використовується для оцінки фізико-механічних властивостей гірських порід, технічного стану інструменту, а також як критерій оптимальності процесу буріння. Його контроль дозволяє оперативно здійснювати керування технологічним процесом буріння і прогнозувати кінцевий результат.

В залежності від потужності двигунів приводу бурової лебідки і роторного стола, або електробура ПЕВ можуть змінюватись в діапазоні від $B=10\div 15$ кВт·год/м до $B=100$ кВт·год/м і більше.

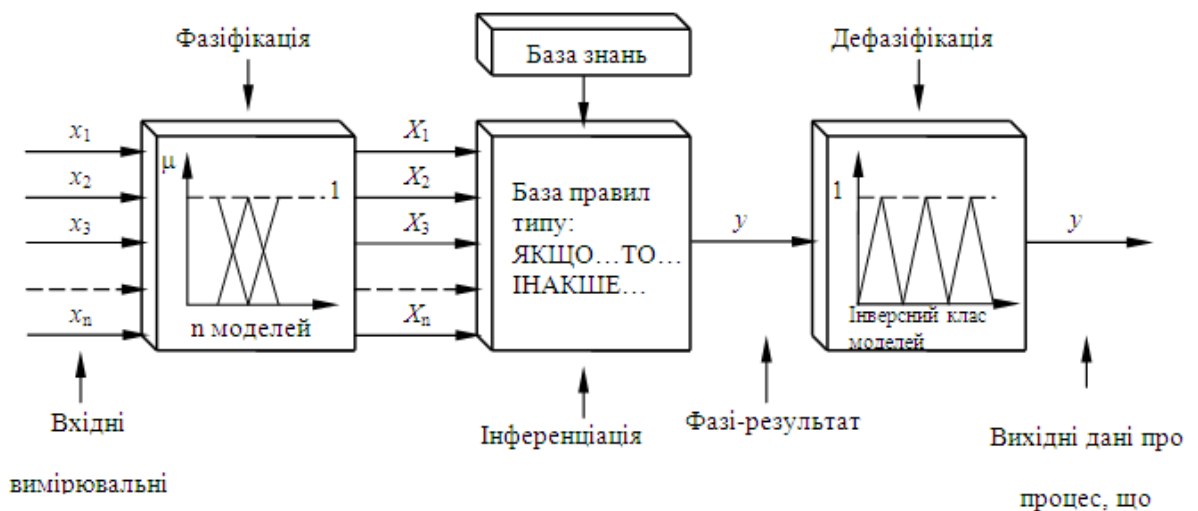


Рисунок 4.10 – Фазі-проект системи контролю [7]

Враховуючи певну невизначеність інформації і її нечіткість, використані методи логічної обробки інформації на базі нечіткої логіки. Розроблено фазі-проект системи контролю, основними складовими якого є процедури фазифікації, інференціювання і дефазифікації (рис. 4.9).

Перша частина (блок фазифікації) призначена для того, щоб з чітких величин вектора контрольованих параметрів $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ отримати нечіткі діапазони. Наприклад, осьове навантаження на долото: невелике, середнє, велике.

В другому блоці здійснюється інференціяція (логічна обробка) за допомогою правил, що мають таку структуру: ЯКЩО...ТО...ІНАКШЕ...

Правила містять знання експертів про те, що треба робити, якщо стала справедливою одна з властивостей, сформульована при фазифікації.

Даними для дефазифікації є нечіткі дані, що поступають після інференціяції і цифрові та аналогові сигнали. Задачі дефазифікації зворотні задачам фазифікації, але перетворити нечіткий результат логічної обробки в аналоговий сигнал досить складно. Система контролю такого типу дозволяє використовувати не тільки вимірювальну інформацію на основі класичного спостерігача, але і досвід експертів у вигляді бази знань.

Це підвищує ефективність і вірогідність оцінки твердості порід в процесі поглиблення свердловини.

Висновки до розділу

В даному розділі досліджено вплив довжини свердловини на умови роботи електробура. Побудована точна кругова діаграма електродвигуна електробура Е215 та розраховано втрати механічної потужності двигуна на глибині 5000 м, які становлять 5,35 %. Також проаналізовано вплив довжини свердловини на систему керування навантаженням двигуна електробура. Довжина свердловини не призводить до значного погіршення якісних показників.

Досліджено нечітке спостереження та оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід при бурінні свердловин електробурами. Приведено структуру формування потужності на долоті та фазі-проект системи контролю твердості порід на основі інформації про питомі енерговитрати при бурінні свердловин електробуром.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі проведено технологічний аналіз процесу буріння свердловин електробурами було встановлено, що даний метод є перспективним напрямом розвитку бурової техніки, особливо в умовах, які потребують високої точності, екологічної безпеки та енергоефективності.

Було проведено дослідження стійкості автоматичної системи АМС-2, оскільки стійкість є дуже важливою характеристикою якості автоматичної системи. Показники якості системи оцінювались за перехідними характеристиками проведені в системі Matlab з допомогою пакету Simulink.

Досліджено вплив довжини свердловини на умови роботи електробура. Побудована точна кругова діаграма електродвигуна електробура E215 та розраховано втрати механічної потужності двигуна на глибині 5000 м, які становлять 5,35 %. Також проаналізовано вплив довжини свердловини на систему керування навантаженням двигуна електробура. Довжина свердловини не призводить до значного погіршення якісних показників.

Досліджено нечітке спостереження та оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід при бурінні свердловин електробурами. Приведено структуру формування потужності на долоті та фазі-проект системи контролю твердості порід на основі інформації про питомі енерговитрати при бурінні свердловин електробуром.

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбійчук М.І., Чигур Л.Я. Теорія автоматичного керування. Нелінійні системи. Лабораторний практикум, ІФНТУНГ, 2024. – 84 с.
2. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи. [Текст]: лаб. практикум / М. І. Горбійчук, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 64 с.
3. Горбійчук М.І. Автоматизація технологічних процесів та виробництв [Текст] : метод. вказ. для викон. курс. проект. / М. І. Горбійчук, В. С. Борин, М. І. Когутяк. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 40 с.
4. Бунчак З. Електробур. Парадокси і реальність / З.Бунчак, О.Дудар, О.Кекот, О.Турянський. – Електроінформ, № 4. – 2003. – С. 8-11.
5. Діхтяренко К.В. Перспектива відродження електробуріння / К.В.Діхтяренко, В.П.Червінський // Нафта і газ України: матеріали 9-ої міжнар. наук.-практич. конф. «Нафта і газ України – 2013», м. Яремча, 4-6 вересня 2013 р. – Л.: «Центр Європи», 2013. – С.59-60.
6. Семенцова А. О. Аналіз методів і засобів автоматизованого контролю енергетичних показників занурного електроприводу, що використовується при бурінні свердловин / А. О. Семенцова, О. В. Фадєєва // Академічний вісник – 2004. – №13. – с.108-109.
7. Головата Ю.Б. Аналіз впливу продуктивності бурових насосів на ефективність процесу поглиблення свердловин електробурами / Ю.Б.Головата. Д.М. Зварич, Г.Н.Семенов // Нафтогазова енергетика, № 2(26). 2016 р. – С.7-19.
8. Чигур І. І. Інформаційні технології та системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень: [навч. посібн.] / І. І. Чигур, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. – 107 с.
9. MATLAB. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide. – MathWorks, 2023. – [електр. ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/>

					БР.АКП–09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: “Дослідження впливу довжини свердловини на ефективність АСК навантаженням двигуна електробура” містить пояснювальну записку на 65 аркушах друкованого тексту, графічного матеріалу 6 аркушів формату А4.

Обсяг пояснювальної записки 65 сторінок.

Перелік креслень графічної частини:

1. БР.АКП-09.00.00.001 – Основні характеристики електробура
2. БР.АКП-09.00.00.002 – Структурна схема системи автоматичного керування АМС-2
3. БР.АКП-09.00.00.003 – Перетворення структурної схеми системи автоматичного керування АМС-2
4. БР.АКП-09.00.00.004 – Оцінка стійкості системи автоматичного керування АМС-2
5. БР.АКП-09.00.00.005 – Перехідні характеристики системи автоматичного керування АМС-2
6. БР.АКП-09.00.00.006 – Оцінювання фізико-механічних властивостей гірських порід