

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження та модернізація електроприводу установки
для буріння електробурами нафтогазових свердловин

Виконав: студент 6 курсу, групи 601-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Ярошенко Ю.С.

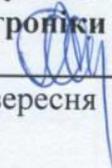
Керівник Єрмілова Н.В.

Рецензент Дрючко О.Г.

Полтава - 2023 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматки,
електроніки та телекомунікацій

О.В. Шефер
«04» вересня 2023 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРУ СТУДЕНТУ
Ярошенко Юрію Сергійовичу

1. Тема роботи «Дослідження та модернізація електроприводу установки для буріння електробурами нафтогазових свердловин»
керівник роботи Єрмілова Наталя Василівна, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від «04» 09 2023 року № 986-фа
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 14.12.2023 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на електробур типу 3215. Вага електробура 3,53 кг. Кут нахилу свердловини (90±10)°. Потрібна частота обертання двигуна 600 об/хв. Розробити САК з часом регулювання не більше 1,5 с., перерегулюванням у межах 45%, коливальністю не більше 2.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Особливості технології буріння та конструкції електробура. Постановка задач на кваліфікаційну роботу магістра. Розрахунок навантажень приводу електробура. Вибір та перевірка вибору двигуна. Модернізація схеми керування електроприводом. Розрахунок та вибір елементів схеми. Дослідження якості та стійкості системи автоматичного керування. Дослідження режимів роботи приводу електробура.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
 - 1) загальний вигляд установки для буріння електробуром;
 - 2) конструкція електробура з маслonaповненим шпинделем;
 - 3) функціональна схема електроприводу;
 - 4) принципова схема електроприводу;
 - 5) структурна схема САК приводу електробура;
 - 6) плакати дослідження якості та стійкості системи;
 - 7) графіки досліджень характеристик;
 - 8) графіки досліджень етапів роботи приводу електробура.

б. Дата видачі завдання 04.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Особливості технології буріння та конструкції електробура. Постановка задач на магістерську роботу	11.10.23		10%	Пл.1
2	Розрахунок навантажень приводу електробура. Вибір та перевірка вибору двигуна	18.10.23	I	30%	Пл.2
3	Модернізація схеми керування електроприводом	14.11.23		50%	Пл.3,4
4	Розрахунок та вибір елементів модернізованої схеми	21.11.23	II	60%	Пл.5
5	Дослідження якості та стійкості системи автоматичного керування	28.11.23		80%	Пл.6
6	Дослідження режимів роботи приводу електробура	06.12.23		90%	Пл.7
7	Оформлення пояснювальної записки	13.12.23	III	100%	Пл.8

Студент


(підпис)

Ярошенко Ю.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Єрмілова Н.В.
(прізвище та ініціали)

Зміст

ВСТУП.....	5
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	7
1.1 Особливості технології буріння електробуром.....	7
1.2 Опис принципу дії бурової установки.....	7
1.3 Особливості конструкції електробура.....	9
1.4 Методи регулювання швидкості обертання електробурів.....	14
1.5 Висновки до розділу.....	18
2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	20
2.1. Розрахунок навантажень.....	20
2.1.1 Розрахунок потужності та вибір двигуна електробура.....	20
2.1.2 Перевірка двигуна електробура на перевантажувальну здатність, можливість запуску і нагрів	23
2.2 Розроблення функціональної схеми привода електробура.....	25
2.2.1 Основні функціональні блоки електроприводу	25
2.2.2 Склад і принцип роботи електроприводу	28
2.3 Модернізація принципової схеми привода електробура.....	30
2.3.1 Модернізація принципової схеми системи регулювання	30
2.3.2 Розрахунок керованого випрямляча.....	31
2.3.3 Розрахунок автономного інвертора напруги.....	38
3 МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОБУРА	44
3.1 Вибір системи автоматичного керування.....	44
3.2 Розрахунок параметрів САК	47
3.3 Оцінка стійкості модернізованої схеми керування	52
3.4 Оцінка якості роботи модернізованої схеми керування	55

4	ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	59
4.1	Циклічність роботи електробура	59
4.2	Розрахунок параметрів роботи приводу електробура	60
4.2.1	Розрахунок швидкостей двигуна	60
4.2.2	Розрахунок приведених до валу двигуна статичних моментів опору.....	61
4.2.3	Розрахунок статичних механічних характеристик двигуна	63
4.3	Розрахунок перехідних процесів.....	66
4.3.1	Етап розгону двигуна електробура	68
4.3.2	Етап збільшення швидкості системи.....	70
4.3.3	Етап зниження швидкості системи.....	72
4.3.4	Етап гальмування і повної зупинки двигуна електробура....	74
	ВИСНОВКИ.....	77
	ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....	79
	ДОДАТКИ.....	81

ВСТУП

Нафтогазова промисловість України має цікаву та багатогранну історію свого розвитку, яка є невід'ємною частиною історії становлення та розбудови паливно-енергетичного комплексу України. Однак технологічна сторона процесу розвитку цієї галузі ще далека від оптимальної. Так як і раніше, контрольованість технологічних процесів залишається на досить низькому рівні.

Але час не стоїть на місці і особливо бурхливого розвитку набирають сучасні системи автоматизації виробництва. Можливості нової техніки дозволяють використовувати її в складних технологічних процесах, які потребують високої точності управління і контролю всього процесу.

Буріння – це комплекс повторюваних технологічних операцій. Зокрема - це опускання бурових труб з бурильним інструментом (долотом) в свердловину, руйнування самих порід долотом (власне процес буріння), промивка свердловин, нарощування бурильної колони при заглибленні та інші. Для виконання цих операцій використовується ще цілий комплекс операцій і механізмів, без яких буріння було б не можливе [1]. Це – насоси, ротор, основні і допоміжні лебідки та інші. Всі механізми бурової живляться від силового приводу, який вибирається в залежності від виду буріння, місця де воно проводиться, механізмів які використовуються та ін.

Привід основних механізмів бурової установки може бути автономним – незалежним від енергосистеми (дизельний, дизель-електричний, газо-турбоелектричний) і неавтономним – з живленням від промислових електричних мереж (електричний на змінному і постійному струмі).

В Україні близько третини бурових установок мають електричний привод основних механізмів, причому ці установки забезпечують

виконання близько 70% всього об'єму бурових робіт. Відомо, що продуктивність бурових установок з електроприводом на 25-30% більше продуктивності аналогічних бурових установок з дизельним приводом, це пояснюється значно більшою надійністю і довговічністю, а також значно кращими характеристиками електроприводу (більш високий ККД і перевантажувальна здатність), простотою кінематичних схем, меншою вартістю експлуатації.

Існує 3 основних способи буріння: роторне, турбінне і буріння електробурами [2].

При бурінні електробуром долото обертається за допомогою маслонаповненого забійного електродвигуна змінного струму, який має малий діаметр і значну довжину. Сам електробур опускається в свердловину на бурильних трубах. Зараз електробуром буриться близько 1,5% від загального об'єму буріння в Україні, але воно вважається **актуальним** і перспективним видом буріння в майбутньому завдяки можливості широкої автоматизації процесу. Розроблений регульований електропривод дозволяє збільшити швидкість буріння до 20%, а також дає можливість проводити буріння під певним кутом, що збільшує ККД розроблення пласту, тобто дозволяє видобути максимально можливу кількість нафти або газу.

Об'єктом дослідження є процес буріння, що здійснюється за допомогою привода електробура. **Предметом дослідження** є привод установки для буріння електробурами нафтогазових свердловин.

Метою даної магістерської роботи являється модернізація електроприводу установки для підвищення ефективності та надійності її роботи. При цьому необхідний перехід на нові системи керування приводом електробура, на нову елементну базу з блочним розташуванням, що суттєво полегшить роботу обслуговуючого персоналу.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Особливості технології буріння електробуром

Розглянемо принципові особливості електробуріння: двигун електробура отримує живлення від бурового трансформатора по кабелю, який знаходиться всередині бурильної колони. Електроенергія подається з мінімальними втратами внаслідок використання високої напруги, при цьому на потужність електробура майже не впливають кількість і властивості бурового розчину через конструктивне виконання електробура. Завдяки цьому характеристики електробура майже незмінні під час всього часу його роботи [3].

Кількість прокачаного бурового розчину при електробурінні визначається умовами нормального очищення вибою незалежно від потужності, що розвивається електробуром. Зміна моменту опору на долоті миттєво відбивається на зміні величини струму і потужності, це дає можливість спостерігати за навантаженням на долото, визначати характер його роботи, ступінь зношування і попереджати аварії з долотом. Зміна струму і потужності, що відбувається при зміні навантаження на долоті, дають можливість автоматизувати процес буріння при максимальному використанні потужності, яка споживається електробуром.

Ще одним плюсом унікальної конструкції електробура і відсутності обертання бурильної колони в процесі буріння похилих свердловин – є можливість здійснювати контроль за кутом нахилу і азимутом, а також встановлювати механізм повороту в потрібному напрямку і коригувати його положення в процесі буріння.

1.2 Опис принципу дії бурової установки

Долото 1 з електробуром 2 опускається в свердловину на бурових трубах 3 (рис. 1.1). В середині кожної труби вмонтована кабельна секція, що складається із відрізків кабелю 4, контактної стержня і

муфти. Муфта і стержень закріплені в замковому з'єднанні 5. До квадратної труби 13 зверху прикріплюється вертлюг, що підвішений на гаку 11. Вертлюг забезпечує вільне обертання бурової колони з одночасним підводом промивної рідини до колони бурильних труб. Також він за допомогою натягу канату підтримує вагу бурильної колони. Рідина до вертлюга надходить з нагнітальної лінії для подачі бурового розчину 15 по буровому шлангу 14.

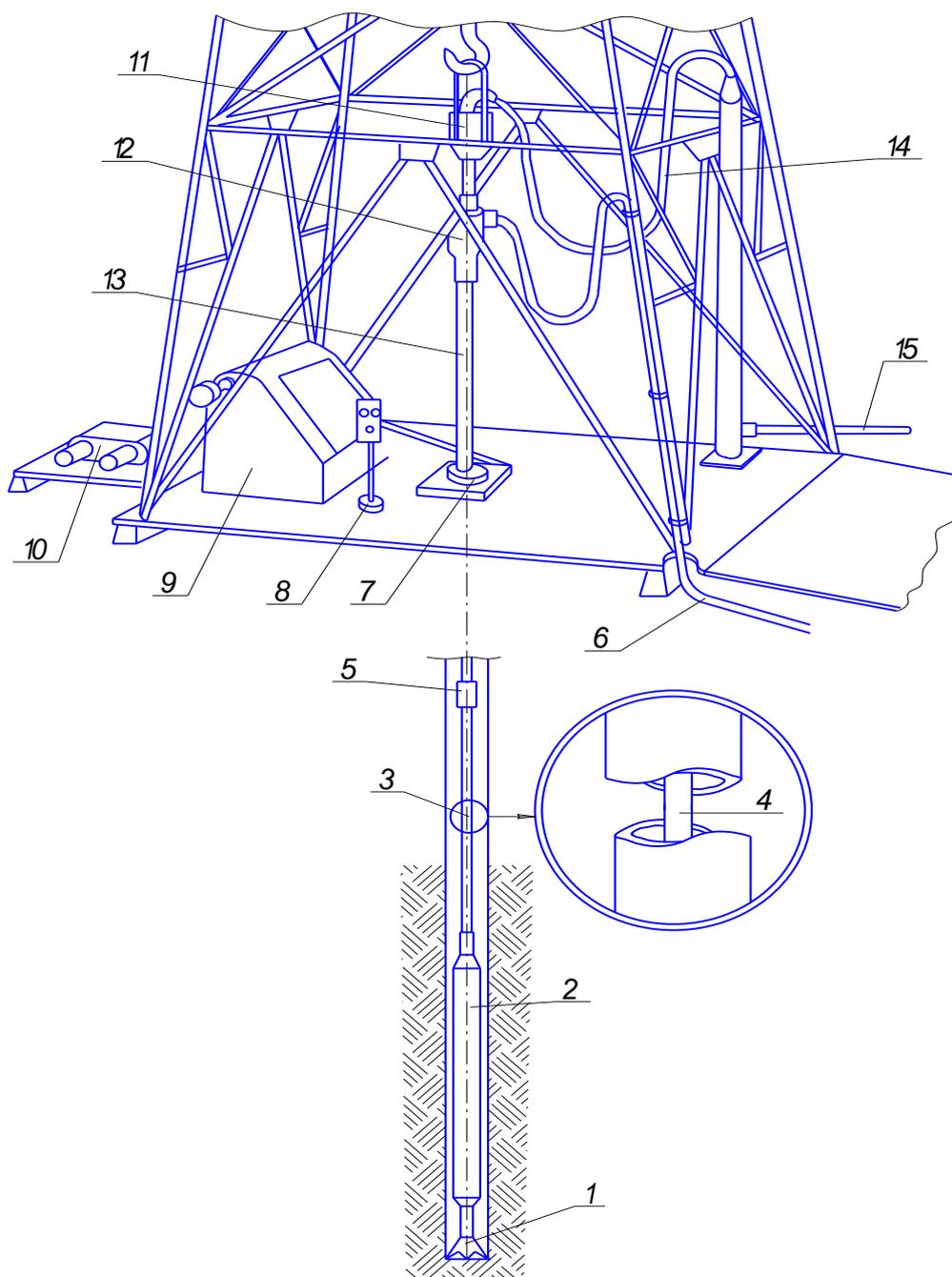


Рисунок 1.1 - Схема установки для буріння електробуром

Підвід електроенергії від джерела живлення (трансформатора) до електробура виконується за допомогою зовнішнього кабелю 6 через струмоприймач 12, кабельну секцію в квадратній трубі 13, і двохжильний шланговий гумовий кабель з гнучкими мідними жилами. В якості третього проводу в системі живлення двигуна електробура використовуються бурові труби. Шланговий кабель виконується із окремих відрізків (секцій), які автоматично з'єднуються в одне ціле при скручуванні бурових труб. Для цього кожен відрізок кабелю має на одному кінці контактний стержень, а на другому – контактну муфту, які встановлені в замкових з'єднаннях бурових труб.

Обертання бурових труб для виконання допоміжних операцій виконується за допомогою ротора 7. Навантаження на долото створюється силою ваги бурових труб. Для подачі долота на забій служить автоматичний регулятор подачі долота 10, який зв'язаний ланцюговою передачею з буровою лебідкою 9. Для управління електробуром служить пульт 8, що встановлений біля робочого місця бурильника.

1.3 Особливості конструкції електробура

Електробур (рис. 1.2) складається з двох основних частин: електродвигуна та шпинделя з п'ятами для передачі навантаження на долото [5]. Вал двигуна з'єднується з валом шпинделя зубчастою з'єднувальною муфтою. В верхній частині електробура є перевідник для захвату його елеватором, а знизу назовні виходить вал шпинделя, на який накручується долото.

Двигун працює в свердловині на великій глибині в середовищі бурового розчину, тиск якого може досягати 40-50 МН/м². Для захисту двигуна електробура від проникнення бурового розчину, який може викликати пробій ізоляції обмоток і передчасне абразивне зношення його вузлів і деталей, застосовують систему масляного захисту.

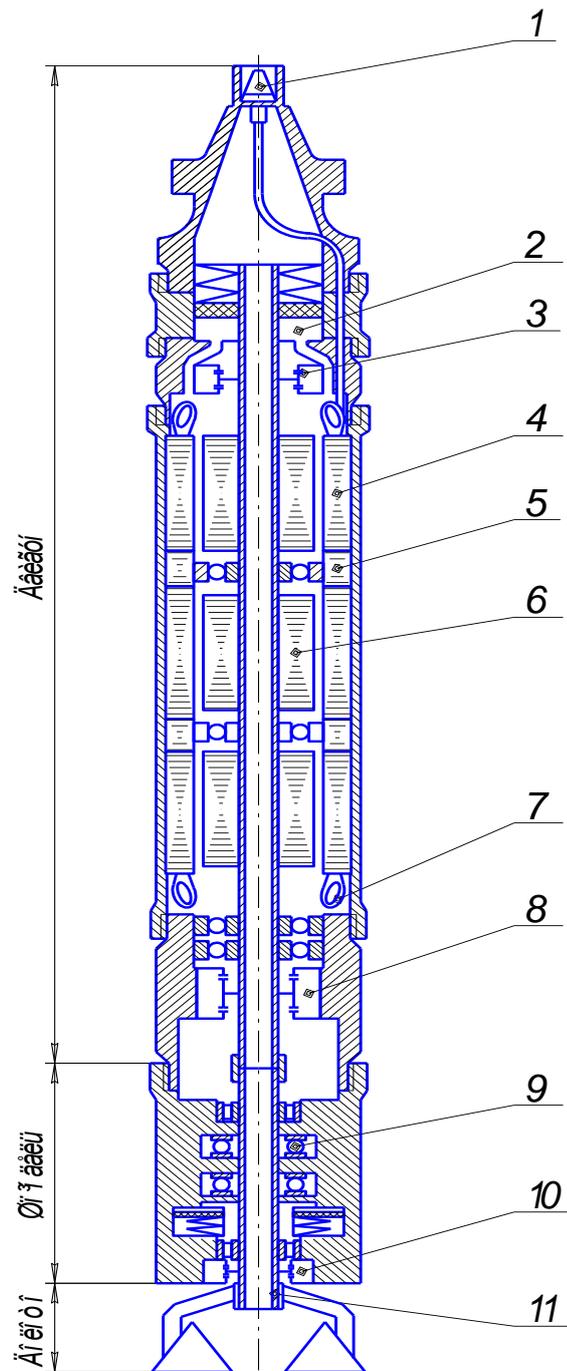


Рис.1.2 - Конструкція електробура з маслозаповненим шпинделем

1-контактний стержень кабельного вводу; 2-лубрикатори двигуна; 3-верхнє ущільнення валу двигуна; 4-пакети магнітопровідної сталі статора; 5-немагнітні пакети статора; 6-пакети магнітопровідної сталі ротора; 7-обмотка статора; 8-нижнє ущільнення валу двигуна; 9-упорний шариковий підшипник шпинделя; 10-ущільнення валу шпинделя; 11-вал шпинделя.

Для масляного захисту внутрішню порожнину двигуна електробура заповнюють трансформаторним маслом, тиск якого перевищує на 0,05-0,25 МН/м² тиск зовнішнього середовища. Герметизація внутрішньої порожнини двигуна електробура забезпечується торцевими ущільнювачами валів, що обертаються, та гумовими кільцями в нерухомих з'єднаннях.

Сучасний серійний двигун електробура є асинхронною машиною високої напруги з короткозамкненим секційним ротором. Статор двигуна розміщується в циліндричних корпусах, з'єднаних між собою конічними різьбами. В корпусі статора запресовані пакети магнітної сталі, які чергуються з немагнітними пакетами. Останні встановлюються для того, щоб запобігати шунтування магнітного потоку через шарикопідшипник і зменшити втрати від вихрових струмів, які виникають в місцях розташування проміжних опор ротора. Обмотка статора розташована в пазах. Її вивідні кінці з'єднані кабелем з контактним стержнем, за допомогою якого двигун підключають до кабелю, що розташований в бурових трубах. Ротор двигуна являє собою полий вал з центральним каналом для проходу бурового розчину. На вал насаджені секції ротора з алюмінієвою „балочною кліткою”, між ними розташовані проміжні підшипники.

Лубрикаторна система, яка служить для створення всередині двигуна збиткового тиску, компенсації витоку масла при нагріванні, звичайно складається із трьох трубок, розташованих в верхній частині двигуна. Дві трубки заповнені трансформаторним маслом і з'єднуються з внутрішньою порожниною двигуна, третя заповнюється більш в'язким маслом, з'єднується з центральною частиною верхнього сальника.

Всередині труби лубрикатора розташований поршень з пружиною, зверху є кришка, а знизу воронка. При заповненні двигуна маслом поршень підіймається і стискає пружину. Верхня частина

поршня з'єднується з навколишнім середовищем. Таким чином, поршень кожного лубрикатора знаходиться під тиском бурового розчину і пружини, тому незалежно від тиску навколишнього середовища всередині двигуна завжди створюється надлишковий тиск, під дією якого масло витікає назовні, перешкоджаючи цим проникненню бурового розчину всередину машини.

На конічну різьбу нижнього з'єднувального корпусу двигуна нагвинчується корпус шпинделя, в якому встановлені радіальні та упорні підшипники. Шпиндель служить для сприйняття і передачі механічних навантажень, а також для передачі обертового моменту від двигуна до долота. Навантаження, яке створюється вагою стисненої частини бурової колони, передається на долото через корпус електробура, п'яту і вал шпинделя. Шпиндель, який має свою лубрикаторну систему, заповняють в'язким маслом. В електробурі є запас масла для нормальної роботи протягом 15-20 годин. За цей проміжок часу для заміни долота електробур підіймають на поверхню і, якщо необхідно, добавляють масло в лубрикатори.

При проектуванні двигунів електробурів намагаються здобути максимальну потужність при найменших габаритних розмірах, які визначаються діаметром долота і технологією буріння. Синхронну частоту обертання двигуна можна визначити, виходячи з максимально допустимої частоти обертання долота, яка по нормах не повинна перевищувати 1000 об/хв. З іншого боку конструктивно важко виготовити занурений двигун промислової частоти з синхронною частотою обертання менше 500 об/хв. Отже, синхронна частота обертання двигуна електробурів може бути 500, 600, 750, або 1000 об/хв. Досвід буріння глибоких свердловин електробуром засвідчує про доцільність зниження частоти обертання валу електробура в поєднанні із збільшенням моменту. Це досягається застосуванням електробура з зубчастим редуктором. В двигунів редукторних

електробурів синхронна частота обертання повинна бути 1500 об/хв.

Якщо при роторному бурінні бажано мати м'яку характеристику і мінімальний момент інерції привідного двигуна для запобігання поламки труб, то при бурінні зануреними двигунами цієї небезпеки немає. З точки зору покращення буріння доцільно, щоб частота обертання долота при стрибках навантаження змінювалася незначно. Подолання стрибків навантаження повинно проходити за рахунок високої перевантажувальної здатності двигуна. Діаметр занурених двигунів невеликий, тому момент інерції їх роторів незначний. Внаслідок цього двигуни електробурів повинні мати жорстку механічну характеристику і достатню кратність максимального моменту.

Особливістю двигунів електробурів є підвищене ковзання в режимі номінального навантаження і значний пусковий момент, що досягає $(1,2-1,7)M_n$. Вибір такої характеристики зумовлений прагненням забезпечити максимально можливий пусковий момент, що супроводжується невеликою кратністю пускового струму. Але досвід експлуатації показав, що незважаючи на зниження напруги при пуску двигуна до $(0,75-0,8)U_n$, час його розгону до номінальної частоти не перевищує 0,2-0,3 сек. Тому для електробурів можна застосовувати двигуни нормального виконання, що мають високий ККД і $\cos \phi$, а не двигуни з підвищеним пусковим моментом і підвищеним ковзанням.

Електробур отримує живлення від джерела 6кВ через комірку розподільного пристрою високої напруги і трансформатор, що знижує напругу до необхідної величини, яка залежить від довжини струмопроводу до двигуна електробура. Тому в трансформаторів, що застосовуються для цього, повинні бути відводи на первинній і вторинній обмотках; необхідну напругу встановлюють за допомогою перемикачів. Обмотка середньої напруги трансформатора призначена для живлення електробура; межі регулювання її напруги повинні

становити 1085-2270 В із зміною потужності від 270 до 560 кВА. Обмотка низької напруги, призначена для живлення двигунів бурової лебідки напругою 525В.

При бурінні глибоких свердловин електробуром, коли час, який затрачається на спуско-підйомні операції, значний, доцільно прагнути до збільшення проходки на долото навіть ціною деякого зниження механічної швидкості буріння. Експериментально встановлено, що зниження частоти обертання долота (і вала електробура) з 680 до 375 об/хв, при глибині буріння 4000м, дало підвищення рейсової швидкості на 40-50%.

1.4 Методи регулювання швидкості обертання електробурів

Основною областю асинхронних двигунів електробурів до недавнього часу являвся нерегульований електропривод. В останні роки, в зв'язку з розробленням і серійним випуском електротехнічною промисловістю тиристорних перетворювачів частоти і напруги, почали створюватись регульовані асинхронні електроприводи з характеристиками, що не поступаються своїми показниками електроприводу постійного струму [6]. Застосування таких електроприводів в силу переваг асинхронних двигунів відображає прогресивну тенденцію розвитку автоматизованих електроприводів.

Зміна частоти обертання електробура можлива шляхом застосування редуктора–вставки, двигуна іншої полюсності, зміною живлячої напруги і частоти.

Пониження швидкості обертання електробура за допомогою редуктора-вставки виконується встановленням його між двигуном і шпинделем. Перевагою даного методу є підвищення моменту на вихідному валу. Недоліками є те, що зміна частоти обертання відбувається ступінчасто, а також складність виготовлення такого редуктора через малий його діаметр.

Регулювання швидкості двигуна зміною числа пар полюсів може бути реалізовано тільки при використанні спеціальних типів двигунів. Особливістю конструкції таких двигунів є статорна обмотка, яка складається із двох однакових секцій (напівобмоток), використовуючи різні схеми з'єднання яких можна змінити число пар полюсів, що несе за собою зміну швидкості обертання магнітного поля, а отже і швидкості обертання двигуна. Недоліками даного способу є ступінчастість зміни швидкості обертання двигуна і відносно невеликий діапазон регулювання, а також складність виготовлення таких двигунів для електробурів через велику їх довжину (більше 10 м), що несе за собою великі втрати в сталі магнітопроводу, а отже зниження ККД.

Регулювання швидкості обертання двигуна зміною напруги, що підводиться до статора двигуна, дозволяє виконувати в статичних і динамічних режимах регулювання його швидкості з відносно хорошими показниками і за допомогою відносно простих схем управління, а також забезпечити економічні режими роботи двигуна. Регулювання напруги на статорі не приводить до зміни швидкості холостого ходу і не впливає на критичне ковзання, але суттєво змінює критичний момент. Зменшення критичного моменту відбувається пропорційно квадрату зниження напруги. Отже, даний метод являється малопридатним для регулювання швидкості обертання двигуна електробура, так як по мірі зменшення напруги різко зменшується критичний момент двигуна і тим самим його перевантажувальна здатність, а діапазон регулювання швидкості дуже малий.

Спосіб регулювання швидкості двигуна за допомогою зміни частоти живлячої напруги широко використовується в даний час. Принцип роботи полягає в тому, що змінюючи частоту напруги живлення двигуна, можна змінювати його швидкість, отримуючи різні штучні характеристики. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання

швидкості в широкому діапазоні, а характеристики, що отримуються при цьому, мають високу жорсткість. Регулювання швидкості частотним методом не супроводжується збільшенням його ковзання, тому втрати потужності невеликі. Для кращого використання й отримання високих енергетичних показників роботи двигуна (коефіцієнтів потужності, корисної дії, і перевантажувальної здатності) одночасно з частотою необхідно змінювати і напругу, що підводиться до нього. Раціональний закон зміни напруги при цьому залежить від характеру моменту навантаження.

При реалізації частотного способу регулювання швидкості двигуна використовується перетворювач частоти, який дозволяє також регулювати і напругу на його статорі. Різні перетворювачі частоти, які знайшли застосування в частотних асинхронних електроприводах, можна розділити на дві групи, що відрізняються структурою і технологічними засобами.

До першої групи відносяться електромашинні обертові перетворювачі (система генератор-двигун), в яких для отримання змінної частоти використовуються звичайні, або спеціальні електричні машини. Застосування перетворювачів частоти дозволяє плавно регулювати швидкість двигуна в широкому діапазоні, однак процес регулювання частоти в електромашинному перетворювачі частоти має суттєві недоліки. Для створення такого перетворювача потрібно чотири електричні машини, які розраховані на повну потужність споживачів, що визначає його велику величину й вартість, особливо при великих потужностях. Подвійне перетворення енергії змінного струму з промисловою частотою в енергію постійного струму і потім знову в енергію змінного струму регульованої частоти – супроводжується втратою енергії в усьому колі, тому система визначається невисоким ККД. Крім того, колекторні машини постійного струму потребують постійного нагляду й догляду при

експлуатації, а їх робота супроводжується шумом. А також, процес зміни частоти в електромашинному перетворювачі частоти інерційний, що пояснюється механічною інерцією електромашинного агрегату. Цей спосіб регулювання вже практично не застосовується і вважається застарілим.

В даний час велике розповсюдження отримали статичні перетворювачі частоти (система перетворювач частоти - двигун), названі так тому, що в них використовуються елементи і пристрої які не мають частин, що рухаються, такі як напівпровідникові прилади, реактори, конденсатори й інше. Розвиток статичних перетворювачів частоти особливо прискорився у зв'язку з масовим випуском тиристорів і силових транзисторів. Застосування статичних перетворювачів частоти дозволило підвищити техніко - економічні показники регульованого частотного електропривода: збільшити його ККД і швидкодію, усунути шум та спростити обслуговування.

Статичні перетворювачі частоти можуть бути без ланки постійного струму, з безпосереднім зв'язком джерела живлення й навантаженням та з проміжною ланкою постійного струму.

Важливою особливістю перетворювачів частоти з ланкою постійного струму є можливість забезпечення плавного регулювання частоти струму на статорі двигуна, як нижче, так і вище напруги джерела живлення.

Частотне управління є найбільш економічним, так як забезпечує регулювання швидкості двигуна без великих втрат потужності в роторному колі, що погіршують ККД електропривода і призводять до необхідності завищення потужності двигуна [18]. Частотне регулювання швидкості може виконуватись плавно в обидва боки від природної характеристики, тобто двигун може мати швидкість як більше так і менше номінальної. При цьому регульовальні характеристики мають високу жорсткість, а двигун зберігає велику

перевантажувальну здатність.

Діапазон регулювання швидкості в розімкнутих системах складає від 5 до 10, а в замкнутих системах його значення може бути й значно більше.

В силу відмічених високих показників частотний спосіб знаходить в даний час найбільше застосування. Більше того, є процеси, коли використання частотного управління асинхронного електропривода є єдино можливим: привід високошвидкісних електрошпінделів, вентиляторів високошвидкісних аеродинамічних труб, а також привід електробурів, який є предметом модернізації в даній роботі.

1.5 Висновки до розділу

В даній магістерській роботі поставлено за мету модернізувати й дослідити привід електробура Э215 для механічного руйнування порід шляхом його удосконалення і переходу на новіші засоби технічного забезпечення, що дозволить збільшити продуктивність буріння при мінімально можливих затратах.

Проаналізувавши роботу електробура, можна зробити висновок, що дана система керування електроприводом відпрацювала свій час і знаходиться далеко позаду сучасних досягнень науки і техніки. Елементи, які застосовуються в системі зараз, замінити практично неможливо, так як випуск їх припинено. Невисокі технічні показники, низька надійність елементної бази приводить до ускладнення при обслуговуванні і ремонті, що в свою чергу тягне за собою довготривалі простої обладнання.

Враховуючи вищеописане, найдоцільніше здійснити перехід на нові системи керування приводом електробура, на нову елементну базу. Зараз серійно випускаються і широко застосовуються швидкодіючі і широкорегулюємі комплектні електроприводи.

Зробивши аналіз всіх їх по таким важливим показникам, як діапазон регулювання, вартість, габаритні розміри та інші, можна зробити висновок, що для плавного регулювання швидкості двигуна електробура найбільш доцільним є застосування сучасного комплектного тиристорного електропривода, які випускаються для різних галузей промисловості і мають ряд переваг над іншими електроприводами.

Блочне розташування елементної бази суттєво полегшує роботу обслуговуючого персоналу і тим самим зменшує час на ремонт, а це, в свою чергу, впливає на продуктивність буріння.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести розрахунок потужності та вибір двигуна електробура;
- проведення експериментальних досліджень параметрів двигуна в залежності від швидкості обертання і моменту навантаження;
- оптимізація процесів розгону, пуску номінального режиму роботи та зупинки двигуна;
- розробка САК з подальшим розрахунком її параметрів;
- провести дослідження якості та стійкості системи, що розроблялась.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок навантажень

2.1.1 Розрахунок потужності та вибір двигуна електробура

Обертний момент на валу двигуна електробура визначається за формулою

$$M_{ДВ} = \frac{M}{\eta_{ш}}, \quad (2.1)$$

де M - обертовий момент на валу електробура, H ;

$\eta_{ш}$ - ККД шпинделя, обирається в межах 0,9-0,96. Приймаємо $\eta_{ш} = 0,95$.

Обертний момент електробура визначаємо за формулою

$$M = M_y \cdot G + M_0, \quad (2.2)$$

де M_y - питомий момент, Hm/kNm , визначається з графіка рис.2.1;

G - осьове навантаження, H ;

M_0 - момент, що затрачається на обертання долота без осьового навантаження, Hm .

Момент, що витрачається на обертання долота без осьового навантаження, визначаємо за формулою

$$M_0 = M_G + M_{б.т}, \quad (2.3)$$

де M_G - обертовий момент, необхідний на подолання гідравлічного опору при обертанні долота, H ;

$M_{б.т}$ - обертовий момент, необхідний на подолання бічного тертя долота об стінки свердловини, H .

Обертний момент, необхідний на подолання бічного тертя долота об стінки свердловини, визначається за формулою наведеною нижче.

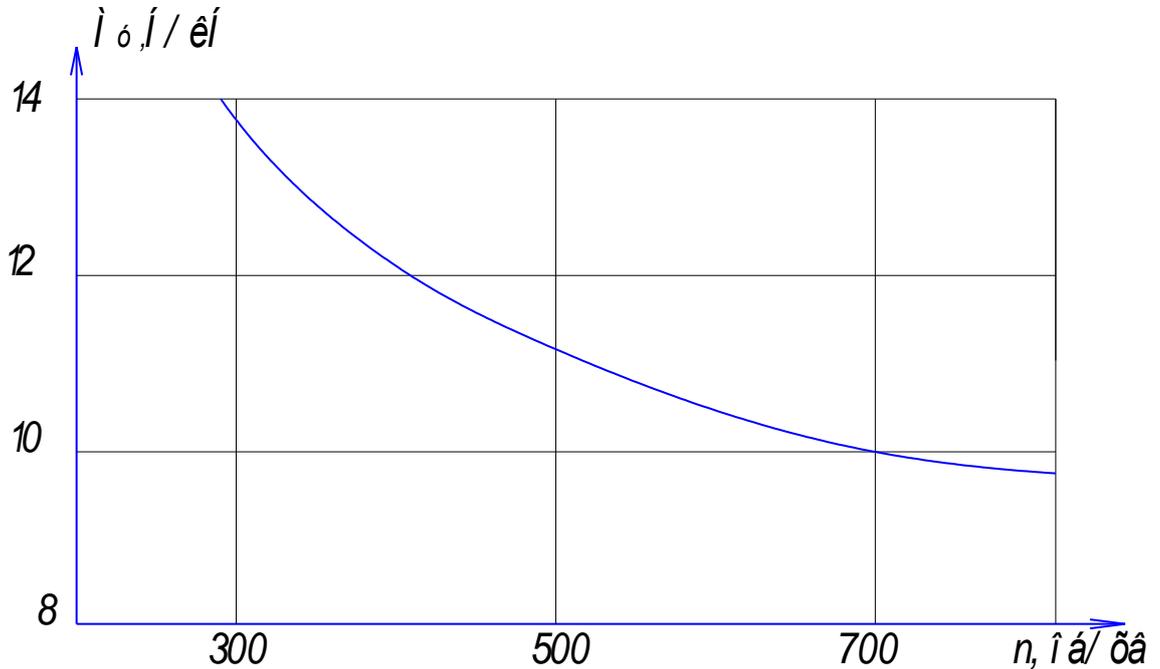


Рисунок 2.1 - Залежність питомого моменту від швидкості обертання долота

$$M_{\acute{o}.m} = k \cdot \frac{Q \cdot \sin \alpha}{2}, \quad (2.4)$$

де k - коефіцієнт, що характеризує величину обертового моменту на долоті при бурінні з боковим зусиллям 1Н; його величину приймають рівною питомому моменту;

Q - вага електробура, кг;

α - кут нахилу свердловини, $\alpha=90^{\circ}$.

$$k = M_y = 11 \text{ Н}\cdot\text{м} / \text{кН}\cdot\text{м}. \quad (2.5)$$

$$M_{\acute{o}.m} = 11 \frac{3,53 \times \sin 90^{\circ}}{2} = 19,42 \text{ (Н}\cdot\text{м)}.$$

$$M_0 = 250 + 19,42 = 269,42 \quad (H \cdot m).$$

$$M = 11 \cdot 196,2 + 269,42 = 2427,62 \quad (H \cdot m).$$

$$M_{дв} = \frac{2427,62}{0,95} = 2555,39 \quad (H \cdot m).$$

Потужність двигуна при обертальному русі визначається за формулою

$$P = M_{дв} \cdot \omega_0, \quad (2.6)$$

де ω_0 - синхронна кутова швидкість обертання двигуна електробура.

Згідно технічних даних електробура Э215 $n_0 = 600$ об/хв, отже

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 600}{30} = 62,8 \quad (с^{-1}). \quad (2.7)$$

$$P = 2555,39 \cdot 62,8 = 160,478 \quad (кВт).$$

Виходячи з умови:

$$P_{необх.} \geq P, \quad (2.8)$$

вибираємо більш досконалий модернізований двигун Э215-8М замість двигуна Э215, який застарілий за конструкцією і економічними показниками.

Параметри двигуна електробура Э215-8М:

- номінальна потужність – 175 кВт;
- напруга живлення – 1550 В;
- номінальний струм – 131 А;
- номінальна частота обертання -680 об/хв;
- обертовий момент
 - номінальний – 2750 Н·м;
 - максимальний – 6500 Н·м;

- момент інерції ротора – $24 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- ККД – 72 %;
- $\cos\varphi$ – 0,69 ;
- коефіцієнт кратності пускового і номінального моментів - 2;
- коефіцієнт кратності пускового і номінального струмів - 7;
- довжина електробура – 13,9 м;
- маса – 2,9 кг.

2.1.2 Перевірка двигуна електробура на перевантажувальну здатність, можливість запуску і нагрів

Перевірку двигуна проводять за умови зниження напруги мережі на 10%. Так, як момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги, то це зниження напруги призводить до зниження моменту на 19%.

Для перевірки двигуна необхідно розрахувати також максимальний статичний момент (момент коли статична потужність на валу більша за номінальну).

Для розрахунку використовуємо формули (2.1) і (2.2), підставляючи максимальне осьове навантаження $G_{max}=350 \text{ кН}$.

$$M_{CT.MAX} = M_y \cdot G_{MAX} + M_0, \quad (2.9)$$

$$M_{CT.MAX} = 11 \cdot 350 + 319,42 = 4169,42 \text{ (Н}\cdot\text{м)}.$$

Отже, перевантажувальній здатність двигун задовольняє, так як виконується умова

$$0,81 \cdot M_{MAX} \geq M_{CT.MAX}, \quad (2.10)$$

$$5265 > 4169,42 \text{ (Н}\cdot\text{м)}.$$

Для перевірки двигуна на можливість запуску при максимальному статичному навантаженні і мінімальній напрузі визначаємо його пусковий момент

$$M_{\text{пуск.}} = k \cdot M_H, \quad (2.11)$$

де k – коефіцієнт кратності пускового і номінального моментів.

$$M_{\text{пуск.}} = 2 \cdot 2750 = 5500 \quad (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

Умові пуску двигун задовольняє, так як виконується умова

$$0,81M_{\text{пуск.}} \geq M_{\text{СТ.МАХ}}. \quad (2.12)$$

Перевірку двигуна на температуру перегріву при пуску двигуна здійснюємо згідно виразу

$$t_{\text{пер.}} = \frac{k_1^2 \cdot \Delta^2}{175} \cdot t_n. \quad (2.13)$$

де Δ – щільність струму, для двигунів середньої потужності, до якої відноситься обраний двигун, приймаємо $\Delta = 8 \text{ А/мм}^2$;

k_1 – коефіцієнт кратності пускового і номінального струмів двигуна, беремо з характеристик двигуна;

t_n – час пуску приводу електробура.

Час пуску приводу до номінальної частоти обертання ω_H , розраховують по формулі

$$t_n = \frac{J_{\text{пр}} \cdot \omega_H}{M_H - M_{\text{СТ.МАХ}}}, \quad (2.14)$$

де $J_{\text{пр}}$ – приведений динамічний момент інерції системи

$$J_{\text{пр}} = (1,1 \div 1,25) \cdot J_{\text{дв}}, \quad (2.15)$$

де $J_{\text{дв}}$ – динамічний момент інерції ротора двигуна, $J_{\text{дв}} = 24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

$$J_{\text{пр}} = 1,1 \cdot 24 = 26,4 \quad (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

$$t_n = \frac{26,4 \cdot 55}{5500 - 4169,42} = 1,091 \quad (\text{с}).$$

Таким чином час пуску двигуна t_n невеликий і складає близько 1с.

$$t_{nep} = \frac{7^2 \cdot 8^2}{175} \cdot 1,091 = 19,53 \text{ } (^{\circ}C).$$

Отже, двигун не перегріється під час пуску так, як допустима температура перегріву для класу ізоляції F – складає $115 \text{ } ^{\circ}C$.

2.2 Розроблення функціональної схеми привода електробура

2.2.1 Основні функціональні блоки електроприводу

Для приводу електробура було вирішено використати стандартний комплектний тиристорний електропривод змінного струму з рекуперативним гальмуванням типу ЕКТ2Р-250/380-200. Так як показники стандартного типового електроприводу не повністю відповідають вимогам приводу, що розробляється, необхідно модернізувати деякі його блоки.

Типова функціональна схема електроприводу приведена на рис.2.2. Вона включає в себе наступні функціональні вузли:

А(П) – силовий автоматичний вимикач (пускач);

АН – автономний інвертор напруги;

ДСВ-А – датчик стану вентилів анодної групи інвертора;

ДС – датчик вхідного струму;

ДН – датчик напруги;

ДЕ – датчик ЕРС;

ДЧ – датчик частоти;

ДЗІ – датчик зриву інвертора;

ЗІ – задатчик інтенсивності;

ЗГ – задаючий генератор;

КР – кільцевий розподільник;

М - двигун;

РС1, РС2 – регулятори струму;

РЧ – регулятор частоти;
 РЕ – регулятор ЕРС;
 СС – вузол силового струмообмеження;
 СУВ – система управління випрямлячем;
 СУІ – система управління інвертором;
 СЗС – система захисту і сигналізації;
 ВГ – вузол гальмування;
 КВ – Керований випрямляч;
 КІ – інвертор ведений мережею;
 ПР – пристрій реверсу;
 ПГ – пристрій управління гальмуванням;
 ПДР – пристрій двохзонного регулювання;
 Ф – силовий LC- фільтр;
 ФІ – формувач імпульсів;
 Ш – шунт.

Умовні позначення параметрів функціональної схеми:

$\pm U_{\text{зад}}$ – сигнал завдання швидкості;
 f^* - сигнал завдання частоти;
 f – сигнал зворотного зв'язку по частоті;
 E – сигнал зворотного зв'язку по ЕРС двигуна;
 i_d – сигнал зворотного зв'язку по струму;
 $I_{\text{обм}}$ – сигнал завдання обмеження струму;
 U - сигнал зворотного зв'язку по напрузі;
 $\pm U_{\text{обм}}$ – сигнал задання обмеження при двохзонному регулюванні;
 $U_{\text{зі}}$ – сигнал задання обмеження напруги і напрямку струму.

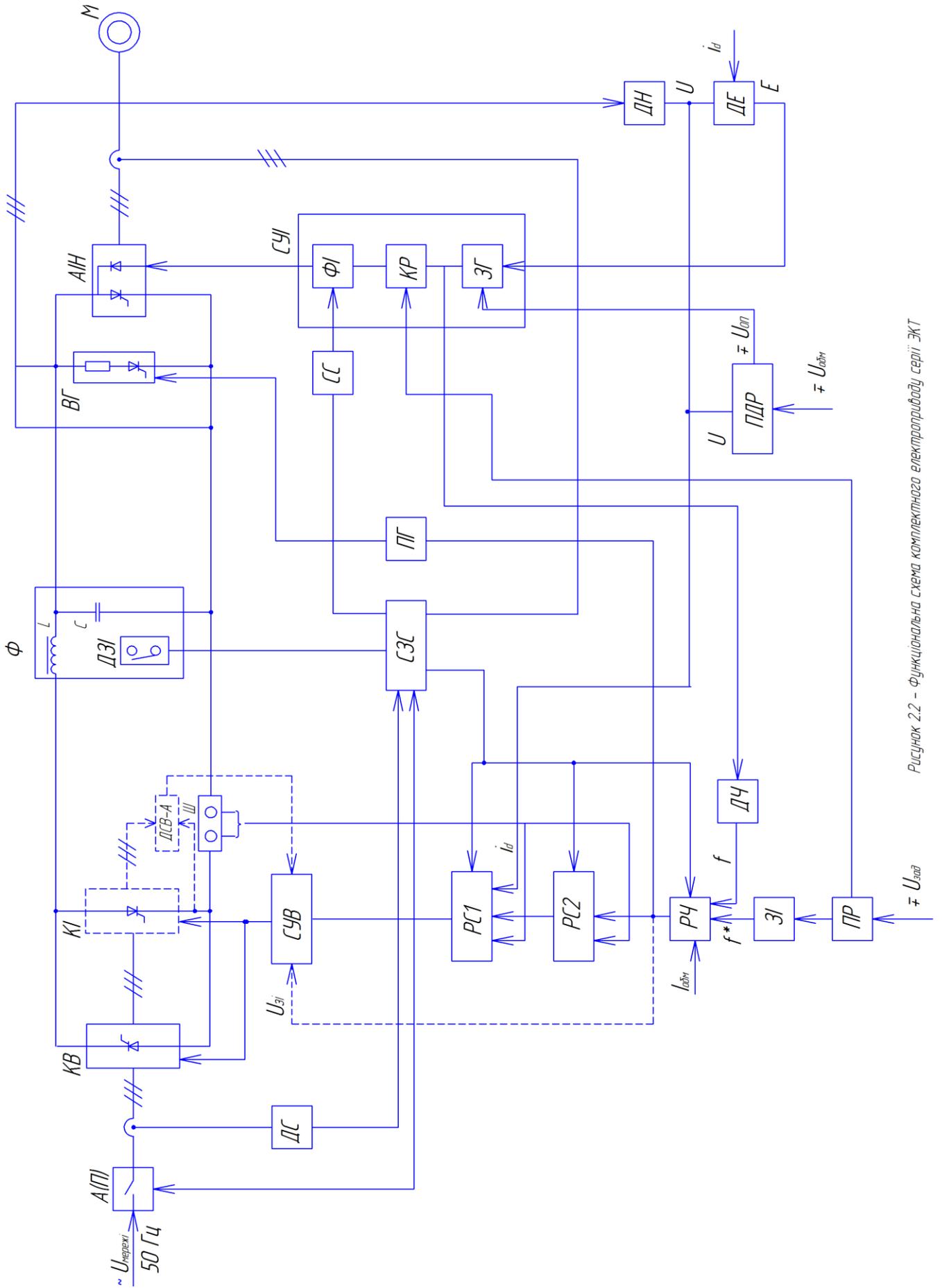


Рисунок 2.2 – Функціональна схема комплексу електроприводу серії ЭКТ

2.2.2 Склад і принцип роботи електроприводу

Електропривод складається з наступних функціональних частин:

- 1) силової частини;
- 2) системи керування випрямлячем (СКВ);
- 3) системи керування інвертором (СУІ);
- 4) системи автоматичного регулювання (САР);
- 5) системи захисту і сигналізації (СЗС).

Взаємодія функціональних частин електропривода показана на рис.2.2.

Силова частина електропривода перетворює змінну напругу промислової частоти в змінну напругу регульованої частоти.

Подача напруги на керований випрямляч здійснюється автоматичним вимикачем (А), управління яким здійснюється за допомогою кнопок "Ввімкнено", та "Вимкнено", а також впливом сигналів захистів. Усі сигнали на вмикання і вимикання вимикача формуються за допомогою плати захисту системи управління.

Силовий керований випрямляч (КВ) із системою фазо-імпульсного керування (СУВ) здійснює амплітудне регулювання величини вихідної напруги. Випрямляч виконаний по трифазній мостовій схемі.

В системах з рекуперативним гальмуванням для рекуперації енергії в мережу використовується другий тиристорний міст (КВ), що ввімкнений зустрічно-паралельно керованому випрямлячу (КВ).

Керування КВ і КІ здійснюється системою СКВ. Процес включення КВ и КІ відбувається по команді сигналу завдання (U_{3i}) із плати регулювання, дозвіл на переключення КВ і КІ з датчиків стану вентилів (ДСВ).

Система керування інвертором (СКІ) здійснює управління частотою вихідної напруги електропривода.

Система автоматичного регулювання (САР) забезпечує плавне регулювання швидкості двигуна, а також їх розгін, гальмування і реверс.

Основні пристрої регулюючої частини електропривода розташовані на платі регулювання (ПР).

Регулююча частина забезпечує:

- 1) формування вхідного сигналу задання керування;
- 2) регулювання темпу зміни задання на частоту, 0,5-60 с;
- 3) зміну вихідної напруги електропривода до номінального значення у функції частоти;
- 4) підтримання вихідної напруги постійною по величині на частотах вище номінальної;
- 5) коректування закону частотного керування електропривода;

$$\frac{E}{f} = const, \quad (2.16)$$

де E - діюче значення ЕРС двигуна;

f - вихідна частота;

- 6) точність підтримання вихідної напруги і частоти;
- 7) усунення можливих автоколивань;
- 8) гальмування електропривода;
- 9) реверс електропривода;
- 10) роботу електропривода від зовнішнього генератора імпульсів.

Підтримання швидкості здійснюється без застосування обертових датчиків швидкості.

З метою забезпечення високої точності частоти і підтримання обертів двигуна передбачена можливість роботи системи автоматичного регулювання (САР) із застосуванням зовнішнього цифрового задаючого генератора.

Система САР виконана двоконтурною по принципу підпорядкованого регулювання. Внутрішнім контуром є контур

регулювання вхідного струму перетворювача, зовнішнім - контур регулювання ЕРС двигуна, або частоти. Система захисту і сигналізації (СЗС) забезпечує вмикання і вимикання електропривода в робочому й аварійних режимах.

2.3 Модернізація принципової схеми привода електробура

2.3.1 Принципова схема системи регулювання

Принципова схема привода електробура приведена на демонстраційному слайді та в додатку.

Плата регулювання складається з таких функціональних вузлів:

- 1) задатчик інтенсивності;
- 2) пристрій реверсу;
- 3) регулятори;
- 4) стабілізатор напруги.

Функціональний вузол задатчика інтенсивності служить для формування однополярного сигналу, що лінійно змінюється та регулюється в діапазоні (0,5–60)с, а також для обмеження сигналу завдання вихідної напруги електропривода.

Функціональний вузол пристрою реверса служить для завдання напрямку чергування фаз вихідної напруги електропривода, для керування зупинкою і інтенсивністю динамічного гальмування двигуна, формування аналогових сигналів зворотного зв'язку по частоті, напрузі, ЕРС і сигналу робочої зони електропривода.

Датчик ЕРС служить для формування-аналогового сигналу E , пропорційного величині ЕРС електродвигуна, що рахується на підсилювачі напруги відповідно до формули

$$E = U - I_d \cdot r_s, \quad (2.17)$$

де U - вихідний сигнал датчика напруги електродвигуна;

I_d - вихідний сигнал датчика струму;

r_s - активний опір статора електродвигуна.

Рівень сигналу U датчика напруги електродвигуна регулюється змінним резистором.

У зв'язку з невідповідністю деяких параметрів типової схеми електроприводу і вимогами електроприводу, що розробляється, вирішено провести модернізацію керованого випрямляча та автономного інвертора напруги.

2.3.2 Розрахунок керованого випрямляча

Розрахунок керованого випрямляча проводимо виходячи з величини потужності розрахованого та обраного двигуна.

Номінальний опір кола статора

$$R_{НОМ} = 0,5 \left(\frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ}} (1 - \eta) \right), \quad (2.18)$$

де $U_{НОМ}$ – номінальна напруга двигуна;

$I_{НОМ}$ – номінальний струм двигуна;

η - ККД двигуна.

$$R_{НОМ} = 0,5 \left(\frac{1550}{131} (1 - 0,69) \right) = 1,834 \text{ Ом.}$$

Визначимо ЕРС двигуна

$$E = U_{\phi}, \quad (2.19)$$

де U_{ϕ} - фазна напруга двигуна, яка визначається за формулою

$$U_{\phi} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} = \frac{1550}{\sqrt{3}} = 894,89 \text{ В.} \quad (2.20)$$

Тоді маємо величину ЕРС

$$E = 894,89 \text{ В.}$$

Величину випрямленої напруги в тиристорному випрямлячі визначимо за формулою

$$U_{do} = \frac{E + 1,1I_{НОМ} \cdot R_{ЯНОМ} + a \cdot \epsilon \cdot \Delta U_{\epsilon}}{\cos \alpha_{min} - a_{\epsilon} \left(\epsilon \cdot \kappa_{мер} \cdot \epsilon_k \% + c_m \Delta P_M \% \right) - d \Delta U_{мер} \%}, \quad (2.21)$$

де E – ЕРС двигуна;

a_{ϵ} – коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення і для трифазної мостової схеми рівний 2;

ΔU_{ϵ} – падіння напруги в тиристорі, рівний 1В;

c_m, d, ϵ – розрахункові коефіцієнти;

$$\epsilon = 0,0025; \quad c_m = 0,0052; \quad d = 0,0043;$$

$\kappa_{мер}$ – коефіцієнт, що враховує індуктивність мережі змінного струму;

$\epsilon_k \%$ – напруга короткого замикання в %;

$\Delta P_M \%$ – втрати у міді трансформатора в %;

$\Delta U_{мер} \%$ – запас на коливання напруги в мережі %;

Для визначення U_{do} попередньо приймаємо такі значення величин

$$\epsilon_k \% = 5\%; \quad \Delta P_M \% = 2\%; \quad \Delta U_{мер} \% = 10\%.$$

Так як вимоги до привода у відношенні швидкодії при відпрацюванні різних збурень за рахунок зміни напруги, що приводиться до двигуна, достатньо високі, то величину α_{min} вибираємо рівною 30° .

Величина $\kappa_{мер}$ визначається відношенням потужності мережі живлення.

Для приводів середньої потужності приймають $\kappa_{мер} = 1,1$.

Підставивши всі значення у формулу (3.3) знайдемо величину U_{do} .

$$U_{do} = \frac{894.89 + 1,1 \cdot 131 \cdot 1,834 + 2 \cdot 0,0025 \cdot 1}{\cos 30^\circ - 2(0,0025 \cdot 1,1 \cdot 5 + 0,0052 \cdot 2) - 0,0043 \cdot 10} = 1496 \text{ В.}$$

Визначимо номінальну фазову напругу вторинної обмотки $U_{2\phi}$

$$U_{2\phi} = \frac{U_{do}}{\kappa_{\phi}}, \quad (2.22)$$

де κ_{ϕ} - коефіцієнт, що для трифазної мостової схеми випрямлення рівний величині 2,34; тоді маємо

$$U_{2\phi} = \frac{1496}{2,34} = 639,31 \text{ В.}$$

Повну потужність трансформатора для роботи електроприводу без урахування комутації визначаємо за формулою

$$S_t = 1,045 \cdot U_{do} I_{ном}, \quad (2.23)$$

$$S_t = 1,045 \cdot 1496 \cdot 131 = 204794,92 \text{ ВА.}$$

Лінійна напруга вторинної обмотки трансформатора

$$U_{2Л} = \sqrt{3} U_{2\phi}, \quad (2.24)$$

$$U_{2Л} = \sqrt{3} \cdot 639,31 = 1107 \text{ В.}$$

Із каталогу вибираємо трансформатор ТМТБ – 560/6 УХЛ4 із наступними параметрами

$$U_{мер} = 1300 \text{ В}, \quad S = 560 \text{ кВА},$$

$$P_0 = 1300 \text{ Вт}, \quad P_{кз} = 3200 \text{ Вт}, \quad U_k \% = 5,2; \quad I_{хх} \% = 16;$$

Коефіцієнт трансформації силового трансформатора визначається

$$\kappa_{mp} = \frac{U_1}{U_2}, \quad (2.25)$$

$$\kappa_{mp} = \frac{6000\sqrt{3}}{1300\sqrt{3}} = 4,615.$$

Номинальний струм первинної обмотки трансформатора визначаємо за формулою

$$I_{1\phi} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{1л}}, \quad (2.26)$$

$$I_{1\phi} = \frac{560000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 53,89 \text{ A.}$$

Фазна напруга первинної обмотки

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}}, \quad (2.27)$$

$$U_{1\phi} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464,1 \text{ B.}$$

Індуктивний опір трансформатора, приведений до вторинної обмотки, визначаємо за формулою

$$X_{mp} = \frac{1,1\% \cdot U_{1\phi}}{I_{1\phi} \cdot \kappa_{mp}^2 \cdot 100}, \quad (2.28)$$

$$X_{mp} = \frac{1,1 \cdot 10 \cdot 3464,1}{53,89 \cdot 4,615^2 \cdot 100} = 0,332 \text{ Ом.}$$

Активний опір трансформатора , приведений до вторинної обмотки

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_m}{m \cdot I_{1\phi}^2 \cdot \kappa_{mp}^2} = \frac{2S/100}{m \cdot I_{1\phi}^2 \cdot \kappa_{mp}^2}, \quad (2.29)$$

де m – кількість фаз;

$$R_{mp} = \frac{2 \cdot 560000}{100 \cdot 3 \cdot 58,89^2 \cdot 4,615^2} = 0,06 \text{ Ом.}$$

Індуктивність розсіювання визначається по напрузі короткого замикання трансформатора, при номінальному значенні струму $I_{2НОМ}$ приведенного до вторинної обмотки

$$X_a = \frac{U_k \% \cdot U_{2НОМ}}{I_{2НОМ} \cdot 100}, \quad (2.30)$$

де $U_{2НОМ}$, $I_{2НОМ}$ – номінальна фазова напруга та струм вторинної обмотки трансформатора.

Тоді
$$X_a = \frac{5,2 \cdot 1300}{131 \cdot 100} = 0,469 \text{ Ом.}$$

Кути комутації струму у випрямлячі визначаємо за формулою

$$\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2 \cdot I_d \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_2}, \quad (2.31)$$

При $U_d = U_{dн}$ $\alpha = 0^0$

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2 \cdot I_d \cdot X_a}{\sqrt{6} \cdot U_2}.$$

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2 \cdot 131 \cdot 0,469}{\sqrt{6} \cdot 1300} = 0,96.$$

$$\gamma = \arccos 0,96 = 16,26^0.$$

При $U_d = 0,5U_{dн}$ $\alpha = 60^0$

$$\gamma = \arccos\left(\cos 60^\circ - \frac{2 \cdot 131 \cdot 0,469}{\sqrt{6} \cdot 1300}\right) - 60^\circ = 2,6^\circ.$$

Знаходимо кут зсуву першої гармоніки для 2-х випадків

$$\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2}, \quad (2.32)$$

При $U_d = U_{dH}$ $\alpha = 0^\circ$

$$\varphi = \frac{16,26^\circ}{2} = 8,13^\circ.$$

При $U_d = 0,5U_{dH}$ $\alpha = 60^\circ$

$$\varphi = 60^\circ + \frac{2,6^\circ}{2} = 61,3^\circ.$$

Розрахуємо коефіцієнт потужності випрямляча:

$$\lambda = \kappa_c \cdot \cos \varphi, \quad (2.33)$$

де κ_c - коефіцієнт спотворення форми кривої змінного струму, що споживається з мережі (коефіцієнт несинусоїдальності) при $L \rightarrow \infty$ для трифазної мостової схеми дорівнює

$$\kappa_c = 3/\pi = 0,955.$$

Тоді згідно формули (2.33) коефіцієнт потужності випрямляча

$$\text{При } U_d = U_{dH} \quad \lambda = 0,955 \cdot \cos 8,13^\circ = 0,945.$$

$$\text{При } U_d = 0,5U_{dH} \quad \lambda = 0,955 \cdot \cos 61,3^\circ = 0,46.$$

Вибір вентилів проводимо по допустимому струму і допустимій оберненій напрузі

$$I_{a.cep} \geq \frac{I_{dH}}{3}, \quad (2.34)$$

$$I_{a.cep} \geq \frac{131}{3} = 43,66 \text{ A}.$$

Допустима обернена напруга

$$U_{об.мах} \geq \frac{\sqrt{6}}{2} U_{2\phi}, \quad (2.35)$$

$$U_{об.мах} \geq \frac{\sqrt{6}}{2} \cdot 639.31 = 783 \text{ В.}$$

Обернену максимальну напругу визначаємо з урахування коливань мережі $\pm 10\%$, а також з урахуванням комутаційних перенапружень. Тому знайдену обернену напругу збільшуємо на 40%

$$U_{об.мах} = 1,4 \cdot 783 = 1096.2 \text{ В.}$$

Із каталогу вибираємо тиристор для силової схеми типу Т133-400-1600 зі наступними даними:

максимально допустимий середній струм у відкритому стані - $I_{асер}=400\text{А}$,
зворотна імпульсна напруга у закритому стані – $U_{зв.мах}=100\dots 1600 \text{ В}$.

Характеристики тиристора Т133 – 400-1600:

$$I_{а.сер.} = 400 \text{ А}; \quad \Delta U_a = 1,75 \text{ В}; \quad U_{зв.мах} = 100\dots 1600 \text{ В};$$

$$U_K = 3,5 \text{ В}; \quad I_K = 200 \text{ мА}; \quad t_{вкл} = 25 \text{ мкс}; \quad t_{викл.} = 160 \text{ мкс}.$$

де $I_{а.сер}$ – максимально допустимий середній струм у відкритому стані, А;

ΔU_a – падіння напруги на тиристорі, В;

$U_{зв.мах}$ – максимально допустима напруга тиристора, В;

$t_{вкл}$ – час вмикання тиристора, мкс;

$t_{викл.}$ – час вимикання тиристора, мкс;

I_K – струм керуючого електрода, А.

Втрати потужності на вентилях розрахуємо за формулою

$$\Delta P_a = m_a \Delta U_a I_{асер}, \quad (2.36)$$

де m_a – кількість тиристорів у випрямлячі (для даної схеми становить 6);
 ΔU_a – падіння напруги на тиристорах;
 $I_{a.сер.}$ – прямий струм тиристора.

$$\Delta P_a = 6 \cdot 1,75 \cdot 400 = 4200 \text{ Вт.}$$

Розраховуємо коефіцієнт корисної дії випрямляча, без урахування споживання енергії СІФК, знайдемо його значення для 2-х випадків: при вихідній напрузі $U_d = U_{dn}$ і $U_d = U_{dn}/2$.

Для цього попередньо знаходимо коефіцієнти завантаження для 2-х випадків

$$\text{а) } \beta = U_d / U_{dn} = U_{dn} / U_{dn} = 1,$$

$$\eta = \frac{\beta^2 \cdot P_{dn}}{\beta^2 \cdot P_{dn} + \beta \cdot P_a + P_o + \beta^2 \cdot P_k}, \quad (2.37)$$

де P_{dn} – номінальна корисна потужність;

P_a – втрати потужності на вентилях;

P_o – втрати у магнітопроводі трансформатора;

P_k – втрати в обмотках трансформатора.

$$\eta = \frac{1^2 \cdot 1550 \cdot 131}{1^2 \cdot 1550 \cdot 131 + 1 \cdot 4200 + 1300 + 1^2 \cdot 3200} = 0,96.$$

$$\text{б) } \beta = U_d / U_{dn} \cdot 2 = 0,5,$$

$$\eta = \frac{0,5^2 \cdot 1550 \cdot 131}{0,5^2 \cdot 1550 \cdot 131 + 0,5 \cdot 4200 + 1300 + 0,5^2 \cdot 3200} = 0,925.$$

2.3.3 Розрахунок автономного інвертора напруги

Знаходимо діюче значення напруги джерела живлення U_d за формулою

$$U_d = \frac{3 \cdot U_\phi}{\sqrt{2}}, \quad (2.38)$$

$$U_d = \frac{3 \cdot 639.31}{\sqrt{2}} = 1356 \text{ В.}$$

При розкладанні в ряд Фур'є напруги мостового інвертора

$$U_{\pi}(wt) = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} U_d \left[\sin \Theta - \frac{1}{5} \sin 5\Theta - \frac{1}{7} \sin 7\Theta + \frac{1}{11} \sin 11\Theta \right], \quad (2.39)$$

маємо діючу лінійну напругу

$$U_{\pi(1)} = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi \sqrt{2}} U_d = \frac{\sqrt{6} \cdot U_d}{\pi} = 0,78 \cdot U_d. \quad (2.40)$$

Фазна діюча напруга

$$U_{\phi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_d}{\pi} = 0,48 \cdot U_d. \quad (2.41)$$

Отже перераховане значення діючого напруги

$$U_d = \frac{U_{\phi}}{0,48}, \quad (2.42)$$

$$U_d = \frac{639,31}{0,48} = 1331,9 \text{ В.}$$

Визначаємо фазне значення струму I_{ϕ} навантаження за формулою

$$I_{\phi} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_0 \cdot \alpha}{3}, \quad (2.43)$$

де I_0 – базисний струм, А

$$I_0 = \frac{U_d}{R_n} = \frac{U_d \cdot I_n}{U_{\phi} \cdot \cos \varphi}, \quad (2.44)$$

де $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності двигуна.

$$I_0 = \frac{1331,9 \cdot 131}{639,31 \cdot 0,69} = 395,53 \text{ A.}$$

A – коефіцієнт (амплітуда основної гармоніки вихідної напруги)

$$A = \sqrt{1 - \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot \frac{1 - a^2}{1 - a + a^2}}, \quad (2.45)$$

де k – коефіцієнт нелінійних викривлень

$$k = \frac{R_H}{\omega \cdot L_H} = \frac{R_H}{Z_H \cdot \sin \varphi} = \frac{R_H}{\sqrt{Z_H^2 - R_H^2}}, \quad (2.46)$$

де ω – кутова швидкість двигуна;

L_H – індуктивність обмоток двигуна.

Z_H – повний опір обмоток двигуна

$$Z_H = \frac{U_\phi}{I_H}, \quad (2.47)$$

Таким чином

$$Z_H = \frac{639,31}{131} = 4,88 \text{ Ом.}$$

Підставимо дані значення в формулу (2.46)

$$k = \frac{1,834}{\sqrt{4,88^2 - 1,834^2}} = 0,406.$$

a – відносна довжина імпульсу вихідної напруги

$$a = e^{-\frac{k\varphi}{3}} \quad (2.48)$$

Тоді

$$a = e^{\frac{0,406 \cdot 3,14}{3}} = 0,654.$$

Підставимо отримані значення у формулу (2.45)

$$A = \sqrt{1 - \frac{3}{2 \cdot 0,406 \cdot 3,14} \cdot \frac{1 - 0,654^2}{1 - 0,654 + 0,654^2}} = 0,36.$$

Знаходимо фазне значення струму

$$I_{\phi} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot 395,53 \cdot 0,36 = 67,12 \text{ А.} \quad (2.49)$$

Дане значення задовольняє нашим потребам так як $I_{\phi} > I_n$.

Діюче значення струму дорівнює

$$I_d = \frac{2}{3} \cdot I_0 \cdot A^2. \quad (2.50)$$

Тоді

$$I_d = \frac{2}{3} \cdot 395,53 \cdot 0,36^2 = 34,17 \text{ А.}$$

Дане значення відповідає умові: $I_d > I_n$.

Вибираємо тиристри для автономного інвертора напруги. Для цього визначимо середній струм тиристора

$$I_{a.c.p.} = I_{\phi} = 67,12 \text{ А.} \quad (2.51)$$

Зворотна напруга тиристора дорівнює

$$U_{зв.м.} = 1,2 \cdot U_d, \quad (2.52)$$

$$U_{зв. м} = 1,2 \cdot 1331,9 = 1598,28 \text{ В.}$$

По даних $I_{a.c.p}$ і $U_{зв.т}$ вибираємо тиристори. Виберемо тиристори Т134-300-1600 з такими параметрами:

$$I_{a.c.p} = 300 \text{ A}; \quad \Delta U_a = 1,5 \text{ B}; \quad U_{зв.мах} = 1600 \text{ B};$$

$$U_m = 3,5 \text{ B}; \quad I_k = 100 \text{ mA}; \quad t_{вкл} = 10 \text{ мкс}; \quad t_{вукл} = 100 \text{ мкс}.$$

Середній струм зворотних діодів знайдемо за формулою

$$I_{a.c.p \delta} = (0,05 \div 0,1) \cdot I_{\phi}, \quad (2.53)$$

$$I_{a.c.p \delta} = 0,1 \cdot 67,12 = 6,712 \text{ A}.$$

Знаходимо зворотну напругу діодів за формулою

$$U_{зв.\delta} = U_{зв.т} = 1,2 \cdot U_d, \quad (2.54)$$

де $U_{зв.т}$ – зворотна напруга тиристора.

U_d – значення діючої напруги розраховане по формулі (2.38).

Тоді

$$U_{зв.\delta} = 1,2 \cdot U_d = 1,2 \cdot 1331,9 = 1598,28 \text{ B}.$$

По даних $I_{a.c.p \delta}$ і $U_{зв.\delta}$ вибираємо діоди з каталогу. Виберемо діоди КД225В з такими параметрами:

$$I_{a.c.p \delta} = 15 \text{ A}; \quad U_{зв.\delta} = 1600 \text{ B}; \quad I_{зв} = 1,5 \text{ mA}; \quad f_{max} = 1 \text{ кГц};$$

де $I_{a.c.p \delta}$ – середній струм діода, А;

$U_{зв.\delta}$ – зворотна напруга діода, В;

$I_{зв}$ – зворотний струм діода, обумовлений постійною зворотною напругою, мА;

f_{max} – максимально допустима частота: найбільша частота підведеної напруги і імпульсів струму, при яких забезпечується надійна робота діода.

Максимальна величина ємності конденсатора при умові зменшення величини напруги не менше ніж на 20%.

$$C_0 = \frac{U_d \cdot T_H}{3 \cdot R_H \cdot 0,2 \cdot U_d} (2 \cdot \ln 2 - 1), \quad (2.55)$$

де T_H – постійна часу навантаження, с.

$$T_H = \frac{L_H}{R_H}, \quad (2.56)$$

де L_H – індуктивність обмоток двигуна,
 $L_H = 0,54 \cdot 10^{-3}$ мГн.

Підставимо дані у формулу

$$T_H = \frac{0,54 \cdot 10^{-3}}{2,138} = 2,52 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Тоді ємність конденсатора дорівнює

$$C_0 = \frac{1331,9 \cdot 2,52 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 2,138 \cdot 0,2 \cdot 1331,9} \cdot (2 \ln 2 - 1) = 0,76 \text{ мкФ.}$$

Вибираємо конденсатори К50-20 з параметрами:

- номінальна напруга $U = 6.3-450$ В,
- номінальна ємність $C = 2$ мкф.

Таким чином модернізовані блоки керованого випрямляча та автономного інвертора напруги дозволяють використовувати стандартний комплектний тиристорний електропривод в схемі живлення двигуна електробура.

3 МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОБУРА

3.1 Вибір системи автоматичного керування

Визначимо принцип автоматичного керування, за яким будемо синтезувати систему. Як відомо, головними принципами автоматичного керування є принцип керування за збуренням та принцип керування за відхиленням.

Принцип керування за збуренням іноді називають компенсаційним.

Сутність цього принципу полягає в тому, що залежно від зміни збурення $f_1(t)$, контрольованого вимірювальним елементом ВЕ, на вхід об'єкта O надходить величина $x_{вх}$, яка повинна діяти на об'єкт таким чином, щоб викликати зміну режиму його роботи, що компенсує дію збурення відносно вихідної (регульованої) величини об'єкта.

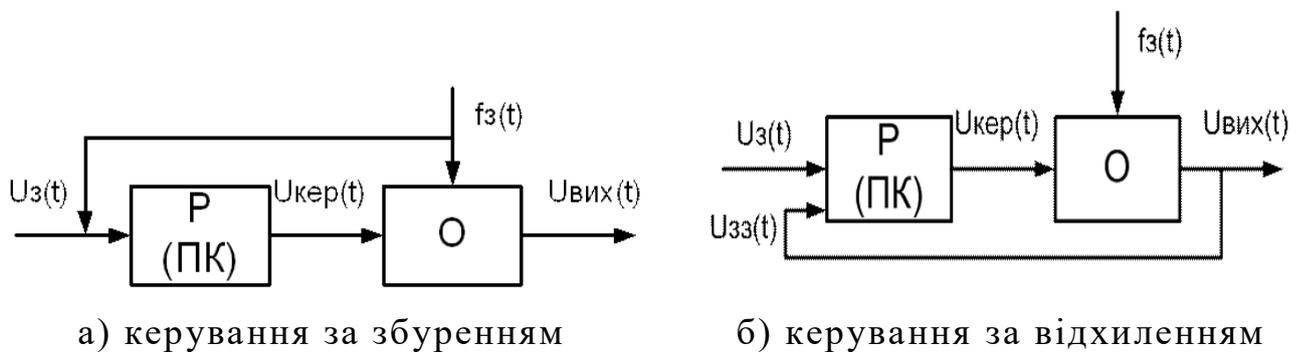


Рисунок 3.1 – Структурні схеми систем автоматичного керування

ПК – пристрій керування (або регулятор), O – об'єкт керування,

$U_z(t)$ – задаючий сигнал, $U_{кер}(t)$ – сигнал керування, $U_{зз}(t)$ – сигнал зворотного зв'язку, $U_{вих}(t)$ – вихідний сигнал, $f_z(t)$ – сигнал збурення

Особливістю принципу керування за збуренням є використання розімкнених (відносно вихідної величини об'єкта) схем керування (рис. 3.1 а). Величина збурення вимірюється і сигнал про її значення подається на вхід керуючого пристрою. Керуючий пристрій аналізує значення сигналу

збурення і виробляє керуючу дію на об'єкт керування. Сигнал цієї дії показано на функціональній схемі у вигляді стрілки $U_{кер}(t)$. Перевагами керування за збуренням є відносна простота та надійність САК при наявності одного (головного) збурення, якщо іншими збуреннями можна знехтувати. До недоліків цього принципу керування слід віднести труднощі контролю збурень та дещо меншу точність. Ці недоліки особливо помітні, коли на об'єкт діє кілька рівноцінних збурень, врахування яких потребує підвищення складності та зменшення надійності САК, а нехтування ними різко знижує точність системи.

Для реалізації принципу керування за відхиленням САК має бути замкнутою (рис. 3.1, б). Основною особливістю і перевагою цього принципу є те, що САК реагує на відхилення дійсного значення регульованої величини від заданого незалежно від причин, які зумовили це відхилення, керуючий сигнал є різницею задаючого сигналу та сигналу зворотного зв'язку. Отже САК, побудована на даному принципі, враховує кінцевий результат всіх причин появи відхилення і тому може мати вищу точність керування.

САК, побудовані на принципі керування за відхиленням, мають більш складні методи їх розрахунку, дослідження та настроювання. В цілому цей принцип керування використовується при потребі дістати високу точність як в статичних, так і в динамічних режимах. На практиці використовуються також системи з комбінованим принципом керування, які мають два канали керування. Один з них діє за принципом керування за збуренням і має розімкнутий контур, а другий – за принципом керування за відхиленням вихідної величини і має замкнутий контур. Основною перевагою комбінованого керування є можливість дістати високу точність при кращих динамічних характеристиках, ніж у відповідній САК, але така система доволі складна.

В САК, що розробляється, реалізовано принцип керування за відхиленням, а координатами керування є струм і ЕРС двигуна електробура. Модернізованій системі автоматичного регулювання швидкості привода електробура відповідає структурна схема, яка приведена на рис.3.2.

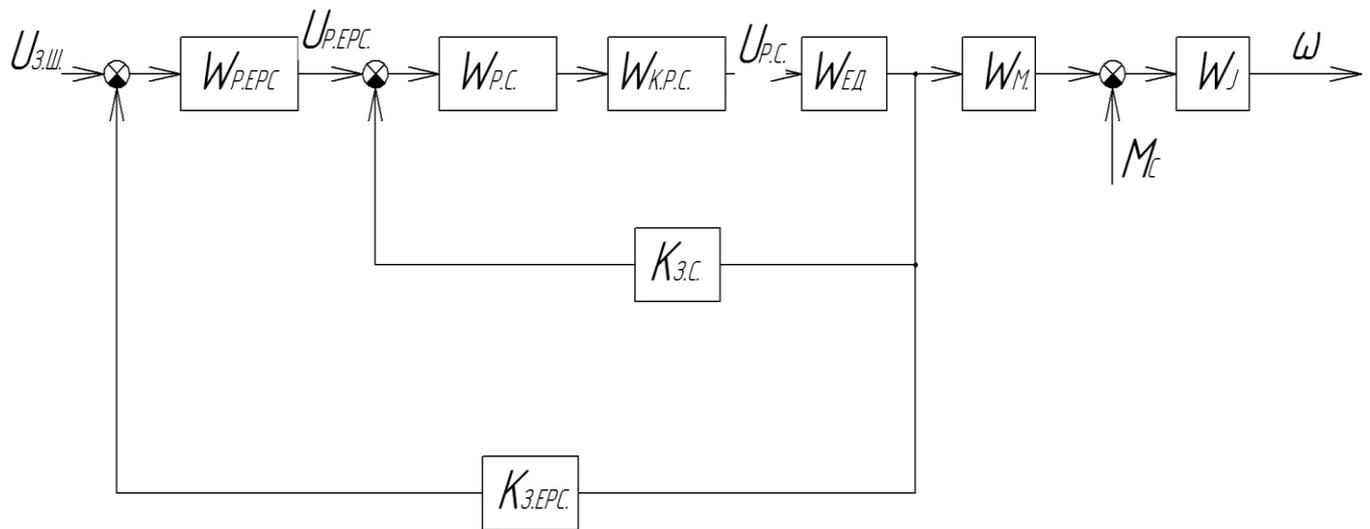


Рисунок 3.2 – Структурна схема САК

Позначенням на структурній схемі САК відповідають:

$U_{з.ш}$ – напруга завдання швидкості;

$W_{р.ерс}$ – передавальна функція регулятора ЕРС;

$U_{р.ерс}$ – напруга на виході регулятора ЕРС;

$W_{р.с}$ – передавальна функція регулятора струму;

$U_{р.с}$ – напруга на виході регулятора струму;

$W_{ед}$ – передавальна функція електродвигуна;

ω – вихідна швидкість обертання двигуна;

$K_{з.с}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку по струму;

$K_{з.ЕРС}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку по ЕРС.

3.2 Розрахунок параметрів САК

Розрахуємо параметри регулятора струму та ЕРС, коефіцієнта зворотного зв'язку по струму і ЕРС та інших параметрів структурної схеми.

Регулятор може мати такі основні закони керування: пропорційний (П – регулятор), інтегральний (І – регулятор), диференціальний (Д – регулятор), а також комбіновані закони керування, що об'єднують позитивні властивості вказаних вище принципів керування. Розглянемо переваги та недоліки різних типів регуляторів.

П – регулятор має найпростіший закон регулювання, до переваг цього регулятора відносяться: простота і надійність, безінерційність і можливість зменшення статичної похибки і тривалості перехідного процесу. Основні недоліки регулятора: принципова неможливість впливу на динамічні похибки і неможливість повної ліквідації статичної похибки. Останнє визначається тим, що при різкому збільшенні коефіцієнта передачі розімкненої системи, яке необхідне для відповідного зменшення статичної помилки, система може стати нестійкою.

І – регулятор дозволяє усунути різні похибки і підвищити динамічну та статичну точність системи. Проте він також має суттєві недоліки. При інтегральному законі регулювання дія регулятора проявляється лише через деякий час, що може привести до виникнення небажаних коливань. Крім того для усунення кількох динамічних складових помилки необхідно ввести відповідну кількість інтегруючих ізодромних ланок, що ускладнює систему.

Д – регулятор має високу швидкодію і дозволяє зменшити швидкісні похибки. Але він не усуває вплив сталих складових помилок і не може повністю усунути швидкісні помилки.

В нашій системі використаємо ПІ-регулятор для контуру регулювання струму щоб зменшити похибку керування і ліквідувати статичну похибку, а для контуру регулювання ЕРС - П-регулятор, щоб зменшити тривалість перехідного процесу і компенсувати швидкісну складову похибки.

Приведений до вала двигуна момент інерції згідно розрахунку за формулою (2.15) рівний

$$J_{np}=26,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Коефіцієнт моменту визначаємо за формулою

$$k_m = \frac{3\sqrt{2} \cdot E_{2p}}{\pi \cdot \omega_0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{M_H}{I_H \cdot k_{mp}}, \quad (3.1)$$

$$k_m = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{2750}{131 \cdot 4,615} = 3,71.$$

Еквівалентну постійну часу визначаємо за формулою

$$T_e = \frac{L_e}{R_e}, \quad (3.2)$$

де L_e - еквівалентна індуктивність статорного ланцюга двигуна;

R_e - еквівалентний опір статорного ланцюга двигуна.

Еквівалентна індуктивність статорного ланцюга визначається за формулою

$$L_e = 2 \cdot (L_{\partial\sigma} + L_{mp}), \quad (3.3)$$

де $L_{\partial\sigma}$ - індуктивність обмоток двигуна, $L_{\partial\sigma}=L_H=0,00054 \text{ Гн}$.

L_{mp} - індуктивність трансформатора, яку визначаємо за формулою

$$L_{mp} = \frac{X_{mp}}{\omega_0}, \quad (3.4)$$

де X_{mp} - індуктивний опір силового трансформатора, приведений до вторинної обмотки, згідно формули (2.28)

$$X_{mp}=0,332 \text{ Гн};$$

ω_0 – кутова частота мережі живлення;

$$\omega_0 = 2\pi f, \quad (3.5)$$

$$\omega_0 = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

Тоді

$$L_{mp} = \frac{0,332}{314} = 0,00105 \text{ Гн}.$$

$$L_e = 2 \cdot (0,00054 + 0,00105) = 0,00318 \text{ Гн}.$$

Еквівалентний опір статорного ланцюга визначаємо за формулою

$$R_e = 2 \cdot (R_{\partial\partial} + R_{mp.np}) \quad , \quad (3.6)$$

де $R_{\partial\partial}$ – активний опір статора електродвигуна, приведений до температури 80°C , визначаємо за формулою

$$R_{\partial\partial} = 1,24R_n, \quad (3.7)$$

де R_n – опір статорної обмотки при 15°C , згідно формули (2.18)

$$R_n = 1,834 \text{ Ом}.$$

Тоді

$$R_{\partial\partial} = 1,24 \cdot 1,834 = 2,27 \text{ Ом}.$$

$R_{mp.np}$ – приведений активний опір трансформатора, визначається за формулою

$$R_{тр.пр} = 1,75 \cdot R_{тр} + \frac{3}{\pi} \cdot X_{тр}, \quad (3.8)$$

де $R_{тр}$ - активний опір силового трансформатора, приведений до вторинної обмотки, згідно формули (2.29)

$$R_{тр} = 0,06 \text{ Ом.}$$

Тоді

$$R_{тр.пр} = 1,75 \cdot 0,06 + \frac{3}{\pi} \cdot 0,332 = 0,422 \text{ Ом.}$$

$$R_e = 2 \cdot (2,27 + 0,422) = 5,384 \text{ Ом.}$$

Тоді еквівалентна постійна часу

$$T_e = \frac{0,00318}{5,384} = 0,0006 \text{ с.}$$

Вибираємо датчик струму виходячи з номінального струму двигуна приводу електробура $I_n = 131 \text{ А}$. Вибираємо датчик типу LT200-S, параметри якого наведено нижче:

- Номінальний вхідний струм $I_{вх.ном} = \pm 200 \text{ А}$;
- Похибка $\pm 0,5\%$ від $I_{ном}$;
- Діапазон перетворення $0 \pm 500 \text{ А}$;
- Вихідний сигнал 5 В ;
- Робоча частота $0 \dots 150 \text{ кГц}$;
- Напруга живлення $\pm 12 \dots 18 \text{ В}$;
- Споживаний струм, 28 мА ;

Знайдемо коефіцієнт передачі

$$K_{д.м.с.} = \frac{U_{\max}}{K_{з.с.} \cdot I_{\max}}, \quad (3.9)$$

де $K_{з.с.}$ – коефіцієнт підсилення вимірювального шунта

$$K_{з.с.} = \frac{U_{нш}}{I_{нш}} = \frac{5}{131} = 0,038. \quad (3.10)$$

Підставимо отримане значення у формулу

$$K_{\text{д.т.с.}} = \frac{5}{0,038 \cdot 200} = 0,66.$$

При стандартному налаштуванні на симетричний оптимум регулятора струму

$$T_{\text{рег.с.}} = 8 \cdot T_{\mu}, \quad (3.11)$$

де T_{μ} - електромеханічна постійна часу, при налаштуванні на симетричний оптимум $T_{\mu}=0,01\text{с}$, отже маємо

$$T_{\text{рег.с.}} = 8 \cdot 0,01 = 0,08 \text{ с},$$

$$k_{\text{р.с.}} = \frac{K_{\text{зс}} \cdot T_{\mu}}{0,4 \mu \cdot K_{\text{д.т.с.}} \cdot R_{\text{я}}}, \quad (3.12)$$

де μ - параметр настройки системи, $\mu=0,25$.

$$k_{\text{р.с.}} = \frac{0,038 \cdot 0,01}{0,4 \cdot 0,25 \cdot 0,66 \cdot 2,058} = 0,27.$$

Датчик ЕРС вибираємо виходячи з номінальної напруги двигуна приводу електробура $U_{\text{н}}=1550 \text{ В}$. Вибираємо датчик ЕРС типу LV100 параметри якого наведено нижче:

- Номінальна вхідна напруга $U_{\text{вх.ном}}=100-2500 \text{ В}$;
- Похибка $\pm 0,7\%$ від $U_{\text{ном}}$;
- Вихідний сигнал 15 В ;
- Робоча частота $0 \dots 3 \text{ кГц}$;
- Напруга живлення $\pm 15 \text{ В}$;

Знайдемо коефіцієнт передачі

$$K_{з.ерс.} = \frac{U_{\max}}{E_H}, \quad (3.13)$$

де E_H – номінальна ЕРС двигуна, яка визначається за формулою з врахуванням параметрів двигуна

$$E_H = U_H - I_H \cdot R_H, \quad (3.14)$$

$$E_H = 1550 - 131 \cdot 1,834 = 1309,75 \text{ В.}$$

$$K_{з.ерс.} = \frac{15}{1309,75} = 0,0114.$$

Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості визначається за формулою

$$K_{рш} = \frac{K_{з.ерс}}{k_{оп} \cdot a_n \cdot a_c \cdot T_\mu}, \quad (3.15)$$

де $k_{оп}$, a_n , a_c – параметри настройки системи, $k_{оп}=1$, $a_n=4$, $a_c=0,064$;

Таким чином маємо значення коефіцієнту підсилення

$$K_{рш} = \frac{0,0114}{1 \cdot 4 \cdot 0,064 \cdot 0,01} = 4,453.$$

3.3 Оцінка стійкості модернізованої схеми керування

Система вважається стійкою, якщо вона повертається до усталеного стану після припинення дії збурення, що визвало вихід її з цього стану.

Для визначення стійкості системи необхідно знайти передавальну функцію замкненої системи.

Дана система складається з двох контурів: контур регулювання струму і контур регулювання ЕРС .

Передавальна функція контуру регулювання струму має вид

$$W_{p.c.}(p) = \frac{K_{p.c.} \cdot \frac{1}{R_e \cdot (T_e \cdot p + 1)} \cdot \frac{1 + T_{pez.} \cdot p}{T_{pez.} \cdot p}}{1 + K_{з.с.} \cdot K_{p.c.} \cdot \frac{1}{R_e \cdot (T_e \cdot p + 1)} \cdot \frac{1 + T_{pez.} \cdot p}{T_{pez.} \cdot p}}. \quad (3.16)$$

Після спрощення виразу отримаємо

$$W_{l(p)} = \frac{K_{p.c.} \cdot (1 + T_{pez.} \cdot p)}{R_e (T_e p + 1) \cdot T_{pez.} \cdot p + K_{p.c.} \cdot K_{з.с.} \cdot (1 + T_{pez.} \cdot p)}. \quad (3.17)$$

Після підстановки значень отримаємо передавальну функцію

$$W_{l(p)} = \frac{0,0216 \cdot p + 0,27}{0,126 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 0,16528p + 0,007938}.$$

Передавальна функція контуру регулювання ЕРС

$$W_{p.EPC}(p) = \frac{K_{P.EPC} \cdot W_{p.c.}(p)}{1 + K_{з.EPC} \cdot K_{P.EPC} \cdot W_{p.c.}(p)}. \quad (3.18)$$

Після підстановки значень отримаємо

$$W_{p.EPC}(p) = \frac{0,01173p + 0,14661}{0,126 \cdot 10^{-3} p^2 + 0,16544p + 0,009968}.$$

Загальна передавальна функція замкненої системи має вид

$$W_{зам.}(p) = W_{p.EPC}(p) \cdot K_M \cdot \frac{1}{J \cdot p}. \quad (3.19)$$

Після підстановки значень отримаємо

$$W_{зам.}(p) = \frac{0,0366p + 0,458}{0,3326 \cdot 10^{-2} p^3 + 4,3676p^2 + 0,0,263155 \cdot p + 2,85}.$$

Характеристичне рівняння має вид

$$0,3326 \cdot 10^{-2} p^3 + 4,3676p^2 + 0,263155p + 2,85 = 0. \quad (3.20)$$

Перевіримо систему на стійкість за критерієм Михайлова.

За цим критерієм система вважається стійкою, якщо годограф Михайлова замкненої системи при зміні частоти $0 < \omega < \infty$ проходить проти годинникової стрілки, починаючи з першого квадранту послідовно n -квадрантів комплексної площини, де n -порядок характеристичного рівняння замкненої системи.

Для побудови годографа Михайлова необхідно виділити дійсну та уявну частину характеристичного рівняння, тобто звести його до вигляду

$$M(\omega) = B(\omega) + jD(\omega). \quad (3.21)$$

Врахувавши, що $p = j\omega$, а відповідно $p^2 = -\omega^2$; $p^3 = -j\omega^3$ і підставивши всі зроблені перетворення у дане характеристичне рівняння, будемо мати

$$M(\omega) = j(0,0263155\omega - 0,3326 \cdot 10^{-2}\omega^3) + 4,3676\omega^2 + 2,85.$$

Будуємо годограф Михайлова $M(\omega) = B(\omega) + jD(\omega)$, змінюючи частоту ω від 0 до ∞ . В результаті було отримано графік (рис. 3.3).

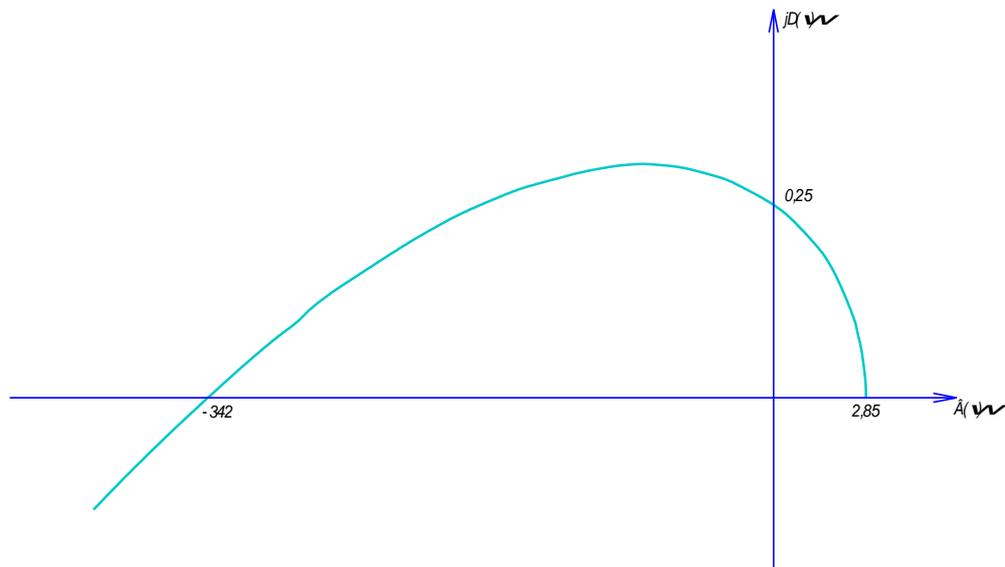


Рисунок 3.3 – Годограф Михайлова

На підставі одержаної характеристики робимо висновок, що система стійка за критерієм Михайлова (маємо рівняння 3 порядку).

3.4 Оцінка якості роботи модернізованої схеми керування

Для моделювання розробленої системи керування електроприводів використовуємо програму MatLAB [15], що є досить універсальною і орієнтована на розрахунок перехідних процесів у неперервних, дискретних, дискретно-неперервних, лінійних і нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних системах. Перехідні процеси можуть бути побудовані як у функції часу, так і у фазовій площині. Модель системи задається у вигляді набору передавальних функцій ланок, крок інтегрування вводиться користувачем. Задавальні та збурювальні дії на системі, що моделюється, можуть бути задані як джерело поліном, або у вигляді гармонічного сигналу. Результат розрахунків виводиться у вигляді графіків, причому можна отримати вихідний сигнал на виході будь-якої ланки модельованої системи.

За допомогою модельованої програми дослідимо реакцію системи на вхідну задавальну дію у вигляді одиничної ступеневої функції $U_3=1$ і збурювальну дію.

Основними показниками якості перехідного процесу є час регулювання, перерегулювання, коливальність, ступінь затухання коливань.

Час регулювання t_p визначає тривалість (швидкодію) перехідного процесу. Приймають, що по закінченні часу t_p відхилення регульованої величини від значення, що встановилось, повинне бути не більше заданої величини ε (як правило $\varepsilon=5\%$).

Перерегулюванням називається максимальне відхилення регульованої величини від усталеного значення, виражене у процентах

$$\sigma\% = \frac{h_{max} - h_0}{h_0} \cdot 100\% = \frac{A_1}{h_0} \cdot 100\%, \quad (3.22)$$

Коливальність системи характеризується числом коливань регульованої величини за час регулювання t_p .

Ступенем затухання називається відношення різниці двох сусідніх амплітуд одного знака до першої з них

$$\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1}, \quad (3.23)$$

Чим ближче один до одного ці величини амплітуд A , тим швидше затухають коливання перехідного процесу.

Проведемо дослідження перехідного процесу.

Раніше було отримане характеристичне рівняння системи

$$0,003326p^3 + 4,3676p^2 + 0,263155p + 2,85 = 0.$$

За допомогою програми знаходимо корені рівняння

$$\begin{aligned} p_1 &= -131,3109; \\ p_2 &= -2,9878 \cdot 10^{-2} + 0,8072j; \\ p_3 &= -2,9878 \cdot 10^{-2} - 0,8072j. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Далі для знаходження оригіналу $h(t)$ скористаємося другою теоремою Хевісайда, суть якої в наступному: якщо зображення $F(p)$ функції $f(t)$ має вигляд

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{p \cdot F_2(p)}; \quad (3.25)$$

то її оригінал дорівнює

$$f(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{p_k \cdot F_2'(p_k)} \cdot e^{p_k t}, \quad (3.26)$$

де p_k – корені характеристичного рівняння.

В нашому випадку маємо

$$F_1(p) = 0,0366p + 0,458;$$

$$F_2(p) = 0,003326p^3 + 4,3676p^2 + 0,263155p + 2,85;$$

$$F_2'(p) = 0,009978p^2 + 8,3676p + 0,263155.$$

Знайдемо значення $F'_2(p_k)$, де p_k – корені характеристичного рівняння.

$$F'_2(p_1) = 0,009978(-131,109)^2 + 8,3676(-131,109) + 0,263155 = -926,4477;$$

$$F'_2(p_2) = 0,009978(-2,9878 \cdot 10^{-2} - 0,8072j)^2 + 8,3676(-2,9878 \cdot 10^{-2} - 0,8072j) + 0,263155 = 6,76e^{-89,89*j};$$

$$F'_2(p_3) = 0,009978(-2,9878 \cdot 10^{-2} + 0,8072j)^2 + 8,3676(-2,9878 \cdot 10^{-2} + 0,8072j) + 0,263155 = 6,76e^{89,89*j};$$

$$F_1(0) = 0,458;$$

$$F_2(0) = 2,85;$$

$$F_1(p_1) = 0,0366 \cdot (-131,109) + 0,458 = 5,2639;$$

$$F_1(p_2) = 0,0366 \cdot (-2,9878 \cdot 10^{-2} - 0,8072j) + 0,458 = -0,4569 - 0,0295j;$$

$$F_1(p_3) = 0,0366 \cdot (-2,9878 \cdot 10^{-2} + 0,8072j) + 0,458 = -0,4569 + 0,0295j.$$

Знайдемо вираз для оригіналу $h(t)$

$$h(t) = 1 - 0,27e^{-131,31t} + 0,957e^{-0,0298t - j(0,8072t + 89,89)} + 0,957e^{-0,0298t + j(0,8072t + 89,89)};$$

$$h(t) = 1 - 0,27e^{-131,31t} + 0,957e^{-0,0298t} \cdot \cos(0,8072t + 89,89^\circ).$$

По одержаному виразу будуюмо графік перехідного процесу (рис. 3.4).

Визначаємо вищеописані характеристики якості.

Час регулювання $T_{pz} = 1,5$ с.

$$\text{Перерегулювання } \delta = \frac{h_{\max} - h_o}{h_o} = \frac{1,42 - 1}{1} = 0,42.$$

Коливальність перехідного процесу:

число коливань – 2; період коливань $T=0,95$ с.

$$\text{Ступінь затухання } \psi = \frac{b_1 - b_2}{b_1} = \left| \frac{0,42 - 0,07}{0,42} \right| = 0,83.$$

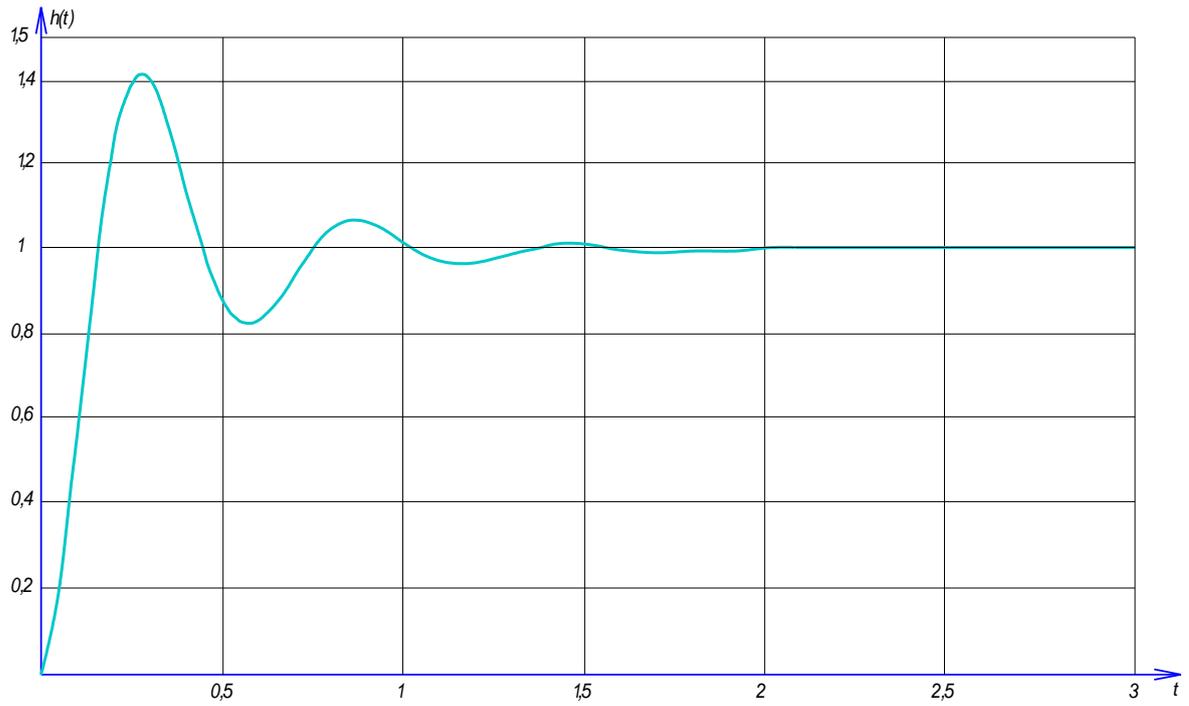


Рис. 3.4 - Перехідна функція замкненої системи

Таким чином, отримані показники перехідного процесу, що відповідають вимогам завдання та забезпечують достатню швидкодію і якість системи привода електробура.

5 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Циклічність роботи електробура

Одним з основних критеріїв вибору системи керування ТПЧ-АД є забезпечення нею технологічного процесу буріння через плавний пуск, гальмування і зупинку двигуна, які суттєво впливають на процес буріння взагалі і електробуром в тому числі.

Спочатку електробур спускають у свердловину і запускають його на мінімальних обертах, при цьому він ще не бурить породу, а знаходиться в режимі холостого ходу. В цей час в свердловину починає подаватись буровий розчин. Далі двигун розганяють до певної межі, щоб досягти швидшого обертання долота для початку буріння, так сказати, ознайомитися з твердістю порід. І лише після цього, врахувавши всі фактори, двигун розганяють до робочої частоти обертання долота (основний режим роботи електробура). Потім ця частота може незначно змінюватись в залежності від жорсткості бурильних порід.

Гальмування електробура відбувається більш швидко. Швидкість двигуна зменшують до певної мінімальної величини. При цьому різко зупинити двигун не можна, бо це може призвести до ув'язання долота в свердловині і зупинки всього процесу. Тому мінімальна частота обертання плавно зменшується до нуля. Сама зупинка настає тільки тоді, коли електробур знаходиться в підвішеному стані, повністю не контактуючи з породами.

4.3 Розрахунок параметрів роботи приводу електробура

4.2.1 Розрахунок швидкостей двигуна

$$\omega_{i0} = \omega_m \cdot i. \quad (4.1)$$

$$\omega_{i0} = 10 \cdot 5 = 50 \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\omega_{i0} = 15 \cdot 5 = 75 \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\omega_{i0} = 5 \cdot 5 = 25 \text{ (с}^{-1}\text{)},$$

де ω_m - стала швидкість робочої машини для різних етапів, i – передавальне число редуктора (для вибраного двигуна рівне 5).

Маємо $t_1 = 20$ (с), $t_2 = 10$ (с), $t_3 = 10$ (с) – час роботи механізму за усталеними швидкостями.

4.2.2 Розрахунок приведених до валу двигуна статичних моментів опору

Проведемо розрахунок статичного моменту робочої машини і побудову залежності швидкості двигуна від моменту M_{ci} тобто, $\omega_i = f(M_{ci})$.

При визначенні приведених до валу двигуна статичних моментів слід врахувати момент холостого ходу двигуна

$$M_{xx} = M_n - M_{нв}, \quad (4.2)$$

де M_n - номінальний електромагнітний момент двигуна;

$M_{нв}$ - номінальний момент на валу.

Визначимо номінальний момент на валу двигуна

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n} = \frac{175 \cdot 10^3}{62,8} = 2786,6 (\text{Н} \cdot \text{м}). \quad (4.3)$$

Тоді

$$M_{xx} = M_n - M_{нв} = 2786,6 - 2750 = 16,6 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

Фактичний момент опору робочої машини

$$M_{c1} = M'_{c1} + M_{xx}. \quad (4.4)$$

Приведений момент для двигунного режиму

$$M'_{o1} = \frac{M_{см.1}}{i \cdot \eta_{np}} = \frac{1000}{5 \cdot 0,96} = 208,3 (\text{Н} \cdot \text{м});$$

$$M'_{o2} = \frac{M_{см.2}}{i \cdot \eta_{np}} = \frac{1000}{5 \cdot 0,96} = 208,3 (\text{Н} \cdot \text{м});$$

$$M'_{o3} = \frac{M_{см.3}}{i \cdot \eta_{np}} = \frac{1000}{5 \cdot 0,96} = 208,3 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

$M'_{c1} = M'_{c2} = M'_{c3} = 1000$ Н·м (момент опору робочої машини) згідно параметрів нашого двигуна.

$$M_{c1} = M'_{o1} + M_{xx} = 208,3 + 16,6 = 224,9 \text{ (Н·м)};$$

$$M_{c2} = M'_{o2} + M_{xx} = 208,3 + 16,6 = 224,9 \text{ (Н·м)};$$

$$M_{c3} = M'_{o3} + M_{xx} = 208,3 + 16,6 = 224,9 \text{ (Н·м)}.$$

Швидкість на валу двигуна відповідає статичним моментам, які визначені в пункті 4.1.

Відклавши на графіку значення моменту опору і швидкості, побудуємо характеристику моменту опору на валу двигуна, яка буде використовуватись в подальших розрахунках.

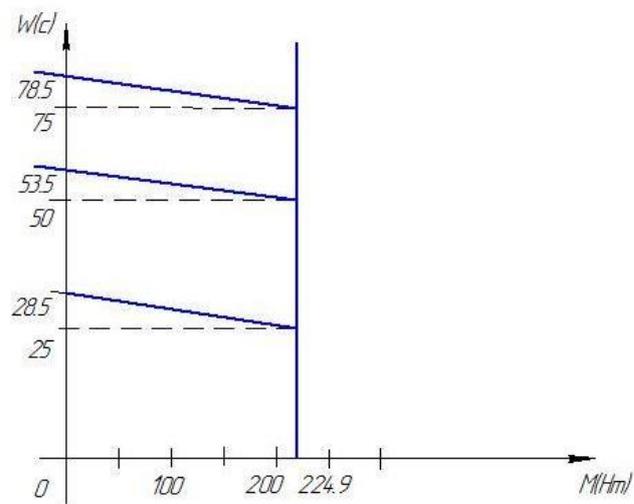


Рисунок 4.2 – Статична механічна характеристика

Пуск приводу здійснюється шляхом лінійної зміни швидкості ідеального холостого ходу.

Регулювання швидкості асинхронного двигуна проводиться шляхом зміни частоти напруги, що живить двигун, тобто частотним методом.

Гальмування відбувається з рекуперацією енергії в мережі.

4.2.3 Розрахунок статичних механічних характеристик двигуна

Статичні механічні характеристики $\omega(M)$ проєктованих регульованих ЕП в першому наближенні з урахуванням відомих припущень лінійні, тому побудуємо їх по двох точках з координатами:

- 1) $\omega = \omega_{oj}$; $M = 0$ (точка ідеального холостого ходу).
- 2) $\omega = \omega_{oj}$; $M_{Ci} = M$ (точка і-го усталеного режиму роботи координати).

Координати точок для побудови статичних механічних характеристик двигунів визначаються наступним чином.

Механічні характеристики двигуна в системі ТПЧ-АД розраховуємо в припущенні компенсації падіння напруги на активному опорі обмотки статора, тобто при законі частотного управління

$$\frac{U_{\phi i} - I_{1i} \cdot R_1}{f_{1i}} = const = A. \quad (4.5)$$

Попередньо необхідно визначити синхронні швидкості, частоти і величини напруги на виході ТПЧ, що забезпечує роботу двигуна з заданими усталеними швидкостями. Для цього знаходять падіння швидкості $\Delta\omega_2$ при роботі із заданою швидкістю ω_1 , на природній характеристиці при частоті 50 Гц. Це дозволить визначити її жорсткість

$$\beta = \frac{M_{c1}}{\omega_{e.d.1} - \omega_{io}} = \frac{224,9}{75 - 78,5} = -64,26 (H \cdot m \cdot c). \quad (4.6)$$

$$\Delta\omega_i = M_{Ci} / \beta. \quad (4.7)$$

При заданих умовах вона буде однаковою для всіх характеристик, на яких повинен працювати двигун.

Для кожної з характеристик визначимо величину $\Delta\omega_i = M_{Ci} / \beta$ при відповідних значеннях M_{Ci} і ω_{Ci}

$$\Delta\omega_1 = \frac{224,9}{64,26} = 3,5; \Delta\omega_2 = 3,5; \Delta\omega_3 = 3,5.$$

Знайдемо відповідні синхронні швидкості обертання ω_0 і необхідні частоти на виході ТПЧ

$$\omega_{o1} = \omega_{c1} - \Delta\omega_1 = 50 + 3,5 = 53,5 (\text{с}^{-1}); \quad (4.8)$$

$$\omega_{o2} = \omega_{c2} - \Delta\omega_2 = 75 + 3,5 = 78,5 (\text{с}^{-1});$$

$$\omega_{o3} = \omega_{c3} - \Delta\omega_3 = 25 + 3,5 = 28,5 (\text{с}^{-1}).$$

$$f_{1i} = f_{1H} \frac{\omega_{oi}}{\omega_H}. \quad (4.9)$$

$$f_{11} = 50 \cdot \frac{78,5}{62,8} = 62,5 \quad (\text{Гц});$$

$$f_{12} = 50 \cdot \frac{53,5}{62,8} = 42,6 \quad (\text{Гц});$$

$$f_{13} = 50 \cdot \frac{28,5}{62,8} = 22,7 \quad (\text{Гц}).$$

Відповідні цим частотам напруги на виході ТПЧ для кожного усталеного режиму роботи, визначаються виходячи із заданого закону частотного керування. Чисельне значення коефіцієнта A визначається з рівняння нижче.

$$A = \frac{U_{\phi i} - I_{1H} \cdot R_1}{f_{1H}} = \frac{220 - 131 \cdot 0,14}{50} = 4,03 (\text{В/Гц}), \quad (4.10)$$

де $U_{\phi i}$, I_{1H} , R_1 - величини, вибрані по даних двигуна.

Для розрахунку напруг, необхідно знайти струми в обмотці статора в кожному сталому режимі. Вони визначаються за формулами

$$I_{1i} \approx \sqrt{I_{2i}'^2 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha) + I_{\mu n}^2}; \quad (4.11)$$

$$I'_{2i} = \sqrt{\frac{M_{Ci} \cdot \Delta\omega_i}{3 * R'_2}}; \quad (4.12)$$

$$I_{\mu H} \approx I_{1H} \cdot \left(\sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}} \right); \quad (4.13)$$

$$\alpha = I_{\mu H} / I'_{2ГР} ; \quad (4.14)$$

$$I_{2np} = \frac{U_{\varphi H}}{\sqrt{R_1^2 + X_\kappa^2}}, \quad (4.15)$$

де $I'_{2i}, I_{\mu H}, M_{Ci}, \omega_{ci}, \omega_{op}, \lambda_M$ – приведений у сталому режимі номінальний струм та номінальний струм намагнічування; приведений статичний момент на валу двигуна і відповідна йому швидкість обертання; швидкість ідеального холостого ходу на i -тій регульованій характеристиці; номінальна перевантажувальна здатність АД по моменту.

$$I_{2np} = \frac{220}{\sqrt{0,14^2 + 0,58^2}} = 368,5(A),$$

де $X_\kappa = 0,58$ по даних двигуна.

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0,69^2} = 0,72, \quad (4.16)$$

де $\cos \varphi = 0,69$, визначено по даних двигуна.

$$I_{\mu H} \approx I_{1H} \cdot \left(\sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}} \right) = 131 \cdot \left(0,72 - \frac{0,69}{2,84 + \sqrt{2,84^2 - 1}} \right) = 77,88(A),$$

де λ_M - номінальна перевантажувальна здатність двигуна, в нашому випадку рівна 2,84.

$$\alpha = \frac{77,88}{368,509} = 0,211;$$

$$I'_{2i} = \sqrt{\frac{224,9 \cdot 3,5}{3 \cdot 0,33}} = 28,2(A).$$

$$R_2' = R_k - R_1. \quad (4.17)$$

$$R_2' = 0,47 - 0,14 = 0,33,$$

де $R_k = 0,47$ Ом.

$$I_{1i} \approx \sqrt{28,2^2 \cdot (1 + 2 \cdot 0,211) + 77,88^2} = 84,83(A).$$

Визначимо напругу на вході ТПЧ для кожного усталеного режиму роботи

$$U_{\phi 1H} = A \cdot f_{1i} + I_{1i} \cdot R_1. \quad (4.18)$$

$$U_{\phi 1H} = 4,03 \cdot 62,5 + 84,83 \cdot 0,14 = 263,75(B);$$

$$U_{\phi 2H} = 4,03 \cdot 42,6 + 84,83 \cdot 0,14 = 183,55(B);$$

$$U_{\phi 3H} = 4,03 \cdot 22,7 + 84,83 \cdot 0,14 = 103,36(B).$$

4.3 Розрахунок перехідних процесів

Розрахунок перехідних процесів в розімкнутій системі електропривода здійснюється якщо управління приводом виконується шляхом лінійної зміни в часі швидкості ідеального холостого ходу, тобто за законом

$$\omega_{o(t)} = \omega_{o.поч} + \varepsilon_o \cdot t, \quad (4.19)$$

де ε_o – прискорення швидкості ідеального холостого ходу, яке визначається із умови повного використання двигуна по моменту.

$$\varepsilon_o = \frac{M_M \pm M_{cm}}{J}, \quad (4.20)$$

де M_M, M_{CM} відповідно максимально допустимий момент двигуна і максимальний статичний момент;

$J=26,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ - приведений момент інерції.

$$\varepsilon_o = \frac{6500 \pm 4169,42}{26,4}.$$

$\varepsilon_o = 404.145 \text{ (с}^{-1}\text{)}$ при гальмуванні; $\varepsilon_o = 88,28 \text{ (с}^{-1}\text{)}$ при розгоні.

T_M – електромеханічна постійна часу електроприводу.

$$T_M = \frac{J}{\beta_c - |\beta|}, \quad (4.21)$$

β, β_c – відповідно коефіцієнти жорсткості механічних характеристик двигуна і робочої машини,

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} < 0; \quad \beta_c = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (4.22)$$

$$\omega(t) = \omega_{ноч} + \frac{\beta \cdot \varepsilon_0 \cdot t}{\beta - \beta_c} + T_M \cdot \left(\varepsilon_{ноч} - \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_0} \right) \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_M}} \right), \quad (4.23)$$

де $\Delta M, \Delta \omega$ – зміни моменту двигуна і моменту статичного опору, які відповідають змінам моментів і швидкостей.

Проведемо розрахунки

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_{c1}}{\omega_{c1} - \omega_{o1}} = \frac{224,9}{75 - 78,5} = -64,26 \text{ (Нмс)}.$$

$$T_M = \frac{26,4}{0 + 72,5} = 0,36 \text{ (с)}.$$

Швидкість двигуна і його момент в перехідних режимах змінюються за законом

$$M_{\text{поч}} - \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_c} \right) - T_m \cdot \left(\varepsilon_{\text{поч}} - \frac{\beta - \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) \right]. \quad (4.24)$$

Тут $\varepsilon_{\text{поч}}$ – початкове кутове прискорення електроприводу,

$$\varepsilon_{\text{поч}} = (M_{\text{поч}} - M_{c.\text{поч}}) / J, \quad (4.25)$$

де $M_{\text{поч}}$ і $M_{c.\text{поч}}$ – початкові моменти двигуна і статичного опору, що відповідають початку i -го етапу перехідного процесу.

Проведемо розрахунок перехідних процесів для різних етапів

4.3.1 Етап розгону двигуна електробура

В цьому випадку перехідний процес розбивається на 3 етапи.

На першому етапі, $0 \leq t \leq t_0$, двигун залишається нерухомим, оскільки момент двигуна менше статичного. Початкова механічна характеристика двигуна проходить через початок координат, а кінцева – через точку з координатами $\omega=0$, $M=M_{c0}$ (їй відповідає швидкість ідеального холостого ходу, яка рівна $\omega_{0\text{кін } i}$).

Для даного етапу справедливі початкові умови

$$\beta_c = \infty, \omega = 0, \varepsilon_{\text{поч}} = 0, M_{\text{поч}} = 0, \varepsilon_0 > 0.$$

Момент двигуна на цьому етапі змінюється за законом

$$M(t) = -\beta \cdot \varepsilon_0 \cdot t = 64,26 \cdot 88,28t = 5668t. \quad (4.26)$$

Закінчується I етап при збільшенні M до M_{c0} , коли швидкість ω_0 досягне значення

$$\omega_{0.\text{кін } I} = \varepsilon_0 \cdot t_I = -M_{c0} / \beta. \quad (4.27)$$

При моментові $M_{c0} = 224,9$ Нм

$$\omega_{0.\text{кін } I} = \frac{224,9}{64,26} = 3,5(c^{-1}).$$

Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_0(t) = \omega_{0.\text{поч}} + \varepsilon_0 \cdot t = 88,28 \cdot t. \quad (4.28)$$

Тривалість етапу пуску

$$t_0 = t_1 = -\frac{M_{co}}{\beta \cdot \varepsilon_0} = \frac{224,9}{64,26 \cdot 88,28} = 0,04 \text{ с.} \quad (4.29)$$

На II етапі $t_0 < t < t_1$, відбувається розгін двигуна при лінійній зміні ω_0 в часі.

Початкові умови цього етапу

$$\omega_{н.\text{поч}} = 0, M_{\text{поч}} = M_{co} = 224,9, \varepsilon_{\text{поч}} = 0, \omega_{0.\text{поч}} = 64,26, \varepsilon_0 > 0.$$

Швидкість і момент на даному етапі описуються рівняннями

$$\omega_{(t)} = \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \cdot \left[t - T_m \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_m}} \right) \right]; \quad (4.30)$$

$$M_{(t)} = M_{co} - \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_c} \right) + T_m \cdot \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_m}} \right) \right]. \quad (4.31)$$

Величина ε_0 має те ж значення, що і на першому етапі. Початкова механічна характеристика двигуна на II етапі розгону збігається з кінцевою характеристикою I етапу, кінцева характеристика II етапу проходить через точку і заданого усталеного режиму роботи.

Закінчується етап у момент часу t_1 , коли двигун виходить в точку на характеристику, що забезпечує задану швидкість робочої машини, при цьому ω_0 досягає значення $\omega_{0.\text{кін}} = 78.5(1/\text{с})$.

$$\omega(t) = 88,28 \cdot \left[t - 0,36 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{0,36}} \right) \right].$$

$$M(t) = 224,9 + 64,26 \left[0,36 \cdot 88,28 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{0,36}} \right) \right] = 224,9 + 2042,3 \left(1 - e^{\frac{-t}{0,36}} \right).$$

Швидкість обертання ідеального холостого ходу

$$\omega_0(t) = \omega_{0.поч} + \varepsilon_0 \cdot t = 64,26 + 88,28 \cdot t.$$

Тривалість II етапу

$$t_{II} = t_1 - t_0 = \frac{\omega_{0.кін} - \omega_{0.кін.I}}{\varepsilon_0} = \frac{53,5 - 3,5}{88,28} = 6,026(c). \quad (4.32)$$

На III етапі $t > t_1$ відбувається остаточний розгін двигуна до усталеного режиму роботи при постійному значенні швидкості ідеального холостого ходу.

Для цього етапу початкові умови

$$\omega_{поч III} = \omega_{кін. II} = 596,15 \text{ М}_{поч. III} = \text{М}_{кін. III} = 2267 \text{ (Н} \cdot \text{м)}, \varepsilon_0 = 0.$$

$$\varepsilon_{поч} = \frac{M_{поч.III} - M_{с.поч.III}}{J} = \frac{2267 - 224,9}{26,4} = 77,35(c^{-2}). \quad (4.33)$$

Рівняння швидкості на даному етапі має вигляд

$$\omega(t) = \omega_{поч} + T_M \cdot \varepsilon_{поч} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_M}} \right). \quad (4.34)$$

Рівняння моменту має вигляд

$$M(t) = M_c + (M_{поч} - M_c) \cdot e^{\frac{-t}{T_M}}. \quad (4.35)$$

Проводимо розрахунки

$$\omega(t) = 596,15 + 0,36 \cdot 77,35 \left(1 - e^{\frac{-t}{0,36}} \right) = 596,15 + 27,846 \left(1 - e^{\frac{-t}{0,36}} \right) (c^{-1}).$$

$$M(t) = 224,9 + (2267 - 224,9) \cdot e^{\frac{-t}{0,36}} = 224,9 + 2042,1 \cdot e^{\frac{-t}{0,36}} \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Тривалість III етапу

$$t_{III} = (3 - 4) \cdot 0,36 = 1,44 (c).$$

Результати розрахунків зводимо в таблицю 4.1

Таблиця 4.1 – Розрахунок розгону з I по III етап

t I етапу, с	M, Н·м	ω , с ⁻¹	t II етапу, с	M, Н·м	ω , с ⁻¹	t III етапу, с	M, Н·м	ω , с ⁻¹
0	0	0	0	224,9	64,26	0	2267	596,15
0,01	56,68	0,883	1	2140	152,54	0,25	1245	610,09
0,02	113,36	1,766	2	2259	240,82	0,5	734,102	617,05
0,03	170,04	2,648	3	2267	329,1	0,75	479,171	620,53
0,04	224,9	3,521	4	2267	417,38	1	351,871	622,265
			5	2267	505,66	1,25	288,303	623,131
			6,025	2267	596,15	1,44	262,302	623,486

4.3.2 Етап збільшення швидкості системи

Вважаємо, що вихідний режим роботи був сталим, двигун працював на початковій характеристиці. У даному випадку перехідний процес розбивається на два підетапи: підетап розгону при лінійній зміні ω_0 ($0 \leq t \leq t_1$) і при $\omega_0 = const$ ($t > t_1$).

Початкові умови IV етапу

I підетап

$$\omega_{поч} = \omega_{поч.I} = 624(c^{-1}) \quad M_{поч} = M_{с.поч.I} = 262,3 \quad \varepsilon_0 > 0, \quad \varepsilon_{поч} = 0.$$

Рівняння для швидкості і моменту в функції часу на даному під етапі

$$\omega(t) = \omega_{поч} + \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \left[t - T_m \cdot \left(1 - e^{-t/T_m} \right) \right]. \quad (4.36)$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{поч}} + 88,28 \left[t - 0,36 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) \right]. \quad (4.37)$$

$$M(t) = M_{\text{поч}} + \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_c} \right) + T_M \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) \right].$$

$$M(t) = 262,3 + 64,26 \left[0,36 \cdot 88,28 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}} \right) \right] = 262,3 + 2042,23 \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}} \right).$$

I підетап цього етапу закінчується в момент часу (t_1), коли двигун виходить на характеристику заданого режиму).

Тривалість пі етапу

$$t_I = t_1 = \frac{\omega_{\text{о.кін}} - \omega_{\text{о.поч}}}{\varepsilon_0} = \frac{78,5 - 53,5}{88,28} = 0,28(\text{с}). \quad (4.38)$$

Для розрахунку перехідного процесу необхідно визначити нове чисельне значення величини ε_0 . Подальший розгін двигуна протікає при постійному значенні $\omega_0 = \omega_{\text{о.кін}}$. Швидкість і момент на цьому етапі описуються рівняннями, які подані нижче.

На II підетапі $t > t_1$ відбувається остаточний розгін двигуна до усталеного режиму при постійному значенні холостого ходу.

Для цього підетапу є такі початкові умови

$$\omega_{\text{поч III}} = \omega_{\text{кін II}} = 648,718 \text{ М}_{\text{поч III}} = \text{М}_{\text{кін III}} = 1366, \varepsilon_0 > 0.$$

$$\varepsilon_{\text{поч}} = \frac{M_{\text{поч III}} - M_{\text{с.поч III}}}{J} = \frac{1366 - 224,9}{26,4} = 43,22(\text{с}^{-2}). \quad (4.39)$$

Рівняння швидкості на даному підетапі має вигляд

$$\omega(t) = \omega_{\text{поч}} + T_M \cdot \varepsilon_{\text{поч}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right). \quad (4.40)$$

$$\omega(t) = 648,718 + 0,36 \cdot 43,22 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}} \right) = 648,718 + 15,56 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}} \right).$$

Рівняння моменту має вигляд

$$M(t) = M_c + (M_{\text{нач.}} - M_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (4.41)$$

$$M(t) = 224,9 + (1366 - 224,9) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} = 224,9 + 1141,1 \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Тривалість даного підетапу

$$t = (3 - 4) \cdot 0,36 = 1,44 \text{ (с)}.$$

Результати розрахунків зводимо в таблицю 4.2

Таблиця 4.2 – Розгін двигуна при збільшенні швидкості системи на IV етапі

t I підетапу, с	M, Н·м	ω , с ⁻¹	t II підетапу, с	M, Н·м	ω , с ⁻¹
0	262.3	624	0	1366	648.718
0.1	757.612	632.828	0.25	794.71	656.508
0.15	958.209	637.242	0.5	509.436	660.398
0.18	1066	639.89	0.75	366.984	662.341
0.2	1133	641,656	1	295.85	663.311
0.25	1285	646.07	1.25	260.329	663.795
0.28	1366	648.718	1.44	245.8	663.933

4.3.3 Етап зниження швидкості системи

V етап також розбиваємо на підетапи.

I підетап

Зниження швидкості системи від початкової швидкості вихідного усталеного режиму до деякої кінцевої, але не нульової. Перехідний процес розбивається на 2 підетапи: на першому етапі ($0 \leq t \leq t_2$) ω_0 знижується від $\omega_{0,\text{поч}}$ до $\omega_{0,\text{кін}}$ з постійним сповільненням ε_0 .

Початкові умови I підетапу

$$\omega_{\text{поч}} = \omega_{\text{поч.I}} = 664 \text{ М}_{\text{поч}} = M_{\text{поч.I}}, = 245,8 \quad \varepsilon_{\text{поч}} = 0, \quad \varepsilon_0 < 0.$$

Швидкість і момент на даному підетапі описуються виразами

$$\omega(t) = \omega_{\text{поч}} + \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \left[t - T_m \cdot \left(1 - e^{-t/T_m} \right) \right]. \quad (4.42)$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{поч}} + 404,145 \left[t - 0,36 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) \right] = 663,933 + 404,145 \left[t - 0,36 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) \right].$$

$$M(t) = M_{\text{поч}} - \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_c} \right) + T_m \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \cdot \left(1 - e^{-t/T_m} \right) \right]. \quad (4.43)$$

$$M(t) = 245,8 - 64,26 \left[0,36 \cdot 404,145 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}} \right) \right] = 245,8 - 9349,3 \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}} \right).$$

$$t_I = t_1 = \frac{\omega_{o,\text{кін}} - \omega_{o,\text{поч}}}{\varepsilon_0} = \frac{78,5 - 28,5}{404,145} = 0,123(\text{с}). \quad (4.44)$$

На II підетапі ($t > t_2$) відбувається подальше зниження швидкості двигуна при його роботі з постійним значенням $\omega_0 = \omega_{o,\text{кін}}$, $M_{\text{поч.I}} = M_{\text{кін.III}}$.

$$\varepsilon_{\text{поч.II}} = \frac{M_{\text{поч.I}} - M_{c,\text{поч.I}}}{J} = \frac{-2460 - 224,9}{26,4} = -101,7(\text{с}^{-2}). \quad (4.45)$$

Швидкість і момент двигуна на даному під етапі описуються виразами

$$\omega(t) = \omega_{\text{поч}} + T_m \cdot \varepsilon_{\text{поч}} \cdot \left(1 - e^{-t/T_m} \right). \quad (4.46)$$

$$\omega(t) = 713,643 + 0,36 \cdot (-101,7) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) = 713,643 - 36,612 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right).$$

$$M(t) = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c) \cdot e^{-t/T_m}. \quad (4.47)$$

$$M(t) = 224,9 + (-2460 - 224,9) \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} = 224,9 - 2684,9 \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}.$$

Тривалість даного підетапу

$$t_{II} = (3 \div 4) \cdot T_M = 4 \cdot 0,36 = 1,44 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Проведені розрахунки зведемо в таблицю 4.3

Таблиця 4.3 – Гальмування двигуна на V етапі

t I підетапу, с	M, Н·м	ω , с ⁻¹	t II підетапу, с	M Н·м	ω , с ⁻¹
0	245.8	663.933	0	-2460	713.63
0.001	219.866	664.337	0.25	-1116	695.313
0.005	116.846	665.954	0.5	-444.586	686.16
0.01	-10.329	667.974	0.75	-109.409	681.59
0.05	-966.573	684.14	1	57.962	679.307
0.1	-2022	704.347	1.25	141.539	678.168
0.123	-2460	713.643	1.44	175.724	677.702

4.3.4 Етап гальмування і повної зупинки двигуна електробура

Розглянемо роботу двигуна на VI етапі.

Це етап гальмування системи від початкової швидкості $\omega_{\text{поч}}$, яку вона мала в вихідному усталеному режимі роботи, до повної зупинки. Перехідний процес розбивається на 2 підетапи. На I підетапі ($0 \leq t \leq t_2$) ω_0 знижується за лінійним законом від $\omega_{0,\text{поч}}$ до 0. При цьому $\varepsilon_0 < 0$.

Початкові умови I підетапу

$$M_{\text{поч}} = M_{\text{поч.I}} = 175,724, \omega_{\text{поч}} = \omega_{\text{поч.I}} = 677,702, \varepsilon_{\text{поч}} = 0, \varepsilon_0 < 0.$$

Закінчується етап при $\omega_{o,\text{кін}} = 0$. Для швидкості і моменту в функції часу на цьому підетапі справедливі вирази

$$\omega(t) = \omega_{\text{поч}} + \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \left[t - T_M \cdot \left(1 - e^{-t/T_M} \right) \right]. \quad (4.48)$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{поч.}} - 404,145 \left[t - 0,36 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) \right] = 677,702 - 404,145 \left[t - 0,36 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) \right].$$

$$M(t) = M_{\text{поч.}} - \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_C} \right) + T_M \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_C} \cdot \left(1 - e^{-t/T_M} \right) \right]. \quad (4.49)$$

$$M(t) = 175,724 + 64,26 \left[404,145 \cdot 0,003 + 0,36 \cdot (-404,145) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}} \right) \right] =$$

$$= 175,724 - 9349,3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}} \right).$$

$$\omega_{0,\text{поч.}I} = \varepsilon_0 \cdot t_I = -M_{(0)} / \beta = \frac{175,124}{64,26} = 2,725(\text{с}). \quad (4.50)$$

Закінчується підетап при швидкості $\omega_{\text{о.кін.}} = 0$, його тривалість складає

$$t_I = t_2 = -\frac{\omega_{\text{о.поч.}}}{\varepsilon_0} = -\frac{2,725}{404,145} = 0,0067(\text{с}).$$

На II підетапі ($t > t_2$) перехідний процес протікає при $\omega_0 = 0$. Двигун працює в режимі динамічного гальмування, швидкість і момент на даному під етапі описуються виразами наведеними нижче. Необхідно відмітити, що величини $\omega_{\text{поч.}}$ і $M_{\text{поч.}}$ визначаються координатами точки, а ω_C та M_C – координатами точки умовно усталеного режиму. Точка знаходиться в місці перетину продовжень механічних характеристик двигуна і робочої машини.

II підетап перехідного процесу закінчується при зниженні швидкості і моменту двигуна до нуля. Далі привод залишається нерухомим. Довжина перехідного процесу на цьому підетапі

$$t_{II} = T_M \cdot \ln \frac{\omega_{\text{поч.}} + |\omega'_C|}{|\omega'_C|} = 0,36 \cdot \ln \frac{28,5 - 25}{25} = 0,713(\text{с}).$$

$$\omega(t) = \omega_C + (\omega_{\text{поч.}} - \omega_C) \cdot e^{-t/T_M}.$$

$$\omega(t) = 25 + (674,994 - 25) \cdot e^{-t/T_M}.$$

$$M(t) = M_c + (M_{\text{ноч}} - M_c) \cdot e^{-t/T_m} = 224,9 + (-1412 - 224,9)e^{-t/T_m}.$$

Проведені розрахунки зведені в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Етап зупинки двигуна

t I підетапу, с	M, Н·м	ω , с ⁻¹	t II підетапу, с	M, Н·м	ω , с ⁻¹
0	175.724	677.702	0	-1412	674.994
0.001	-80.405	677.298	0.1	-1015	65.414
0.002	-329.517	676.894	0.25	-592.489	25.627
0.003	-571.805	676.49	0.4	-313.956	25.01
0.004	-807.455	676.085	0.5	-183.256	25
0.005	-1037	675.681	0.6	-84.27	14
0.0067	-1412	674.994	0.708	0	0

Розраховуємо сумарний час проходження етапів (що складається з підетапів) та відносну тривалість вмикання

$$t_{\text{nn}} = 0,004 + 6,026 + 1,44 + 0,028 + 1,44 + 0,123 + 1,44 + 0,0067 + 0,713 = 11,508 \text{ с.}$$

$$t_{\Sigma \text{nn}\%} = \sum t_{\text{nn}} \cdot 100\% / t_{\text{ц}} = 11,58 \cdot 100 / 296,402 = 3,88 \%,$$

що не перевищує 4% від часу циклу і задовольняє заданій швидкодії.

Проведені дослідження процесів пуску, розгону, гальмування і зупинки двигуна показали, що дані процеси відбуваються значно плавніше і дійсно роблять процес буріння керованим, на основі цього значно підвищуються технічні показники та ефективність роботи електроприводу.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз показав, що занурний двигун електробура має ряд важливих переваг порівняно з привідними двигунами інших типів, використовуваними в бурінні: безпосередній зв'язок двигуна електробура з долотом покращує технологію буріння; створюються сприятливі умови для автоматичного керування електробуром і для неперервного контролю за роботою занурного двигуна; робота двигуна електробура не залежить від якості і кількості промивальної рідини, що сприяє ефективному застосуванню електробурів для буріння з промиванням обваженими розчинами і стисненим повітрям. При цьому збільшується термін експлуатації бурильних труб та зменшується витрата металу.

Дослідження показали, що для керування приводом електробура краще використовувати систему ТПЧ-АД, бо її переваги в даному випадку значно перевищують недоліки у порівнянні з іншими відомими системами. Найбільш вагомими перевагами являються широкій діапазон регулювання швидкості та стійкість до перевантажень, що є дуже важливим у такому складному технологічному процесі, як буріння.

У магістерській роботі розроблена загальна структурна схема САК приводу електробура, а також функціональна і принципова схеми електропривода. В ході роботи розрахована потужність привідного двигуна електробура, вибраний новий двигун, який має кращі технологічні і економічні показники в порівнянні зі старим двигуном, доведено, що даний двигун повністю задовольняє технологічному процесу.

Вибраний комплектний тиристорний перетворювач частоти для регулювання швидкості обертання долота типу ЕКТ2Р-250/380-200, в якому проведена модернізація блоків керованого випрямляча та автономного інвертора напруги, що дозволяє використовувати стандартний комплектний тиристорний електропривод в схемі живлення двигуна електробура.

Розрахована передавальна функція розімкненої та замкненої САК, проаналізована стійкість та якість системи автоматичного керування. Отримані

показники перехідного процесу, що відповідають завданню та забезпечують достатню швидкодію і якість системи привода електробура.

В дослідній частині проведений ретельний розрахунок та дослідження різноманітних режимів роботи приводу електробура, які необхідні для дотримання основних етапів технології буріння: пуску, розгону, гальмування і зупинки двигуна.

Проведені дослідження режимів роботи показали, що дані процеси відбуваються значно плавніше і дійсно роблять процес буріння керованим, на основі цього підвищуються технічні показники та ефективність роботи електроприводу.

Таким чином, можна зробити висновок, що запропонований електропривод на базі схеми ТПЧ-АД є сучасним, економічно доцільним, надійним і відповідає поставленим задачам. Мета магістерської роботи успішно досягнута.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Судаков А.К., Коровяка Є.А., Максимович О.В., Расцветаєв В.О. та ін. Основи нафтогазової справи: підручник. – Дрогобич: Посвіт, 2023. – 599 с.
2. Білецький В.С. Основи нафтогазової інженерії: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Білецький В. С., Орловський В. М., Вітрик В. Г. — Львів: «Новий Світ - 2000», 2019. – 416 с.
3. 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.
4. Федорів, М. Й. Дослідження енергетичних параметрів електротехнічного комплексу для електробуріння / М. Й. Федорів, І. В. Гладь, А. І. Поточний // Нафтогазова енергетика. - 2011. - № 3. - С. 61-71.
5. Федорів М.Й. Шляхи підвищення надійності та енергоефективності електроенергетичного обладнання бурових установок / М.Й. Федорів, І.Д. Галушак, М.М. Рибій. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. - 2015. – С. 196-199.
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. Бунчак З. Електробур. Парадокси і реальність / З.Бунчак, О.Дудар, О.Кекот, О.Туриянський // Електроінформ. – 2003. – № 4. – С. 8-11.
8. Копистинський Л.О. Автоматизація процесу керування навантаженням електробурів з використанням методу коригування структури системи : автореф. дис. на здобуття ступеня канд. тех. наук: 05.13.07 / Л.О. Копистинський. – Івано-Франківськ: ІФНУНГ, 2018. – 20 с.
9. Гутак О.В. Аналіз зв'язків показників ефективності процесу буріння на засадах системного підходу / О.В. Гутак, Г.Н. Семенцов // Нафтогазова енергетика. – 2009. – № 2(11). – С.94-99.

10. Фадєєва О.В. Удосконалення математичної моделі технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин / О.В. Фадєєва // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 6(123). – С. 55-60.
11. Семенцов Г.Н. Автоматизація технологічних процесів у нафтовій та газовій промисловості: навчальний посібник / Г.Н. Семенцов, Я.Р. Когуч, Я.В. Куровець, М.М. Дранчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. – 301 с.
12. Дранчук М.М. Проектування систем автоматизації технологічних процесів в нафтовій і в газовій промисловості : навчальний посібник /Дранчук М.М. - Івано-Франківськ: Факел, 2005. - 448 с.
13. Основи комп'ютерного моделювання: навч. посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язєв, О.І. Лапенко, М.А. Ромашкіна. 2-е вид. стер. – К.: НАУ, 2019. – 492 с.
14. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПШ», 2016. – 150 с.
15. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.: іл.
16. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. –Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.
17. Донець О. В. Теорія електропривода / В. І. Колотіло, О. В. Донець; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с.
18. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посібник для вищ. навч. закл., за ред. Поповича М.Г., Лозинського О.Ю. – К.:Либідь, 2005. – 678 с.
19. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
20. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Либідь, 2005. – 672 с.

ДОДАТКИ

1 TECHNOLOGICAL PART

1.1 Features of electric drill drilling technology

Let's consider the basic features of electric drilling: the engine of the electric drill receives power from the drilling transformer via a cable located inside the drill string. Electricity is supplied with minimal losses due to the use of high voltage, while the power of the electric drill is almost unaffected by the amount and properties of the drilling fluid due to the design of the electric drill. Thanks to this, the characteristics of the electric drill are almost unchanged during the entire time of its operation.

The amount of pumped drilling fluid during electric drilling is determined by the conditions of normal hole cleaning, regardless of the power developed by the electric drill. The change in the moment of resistance on the bit is instantly reflected in the change in current and power, this makes it possible to observe the load on the bit, determine the nature of its operation, the degree of wear and tear and prevent accidents with the bit. The change in current and power, which occurs when the load on the bit changes, makes it possible to automate the drilling process with maximum use of the power consumed by the electric drill.

Another advantage of the unique design of the electric drill and the absence of rotation of the drill string during the drilling of inclined wells is the ability to control the angle of inclination and azimuth, as well as to install the rotation mechanism in the desired direction and adjust its position during drilling.

1.2 Description of the principle of operation of the drilling rig

Bit 1 with an electric drill 2 is lowered into the well on drill pipes 3 (Fig. 1.1). In the middle of each pipe, a cable section is mounted, consisting of cable sections 4, a contact rod and a coupling. The coupling and the rod are fixed in the lock joint 5. A swivel is attached to the square pipe 13 from above, which 11 is suspended on a hook. The swivel ensures free rotation of the drill string with the simultaneous supply of flushing fluid to the drill pipe string. It also supports the weight of the drill string with the help of rope tension. The liquid to the swivel comes from the injection line for supplying the drilling fluid 15 through the drilling hose 14.

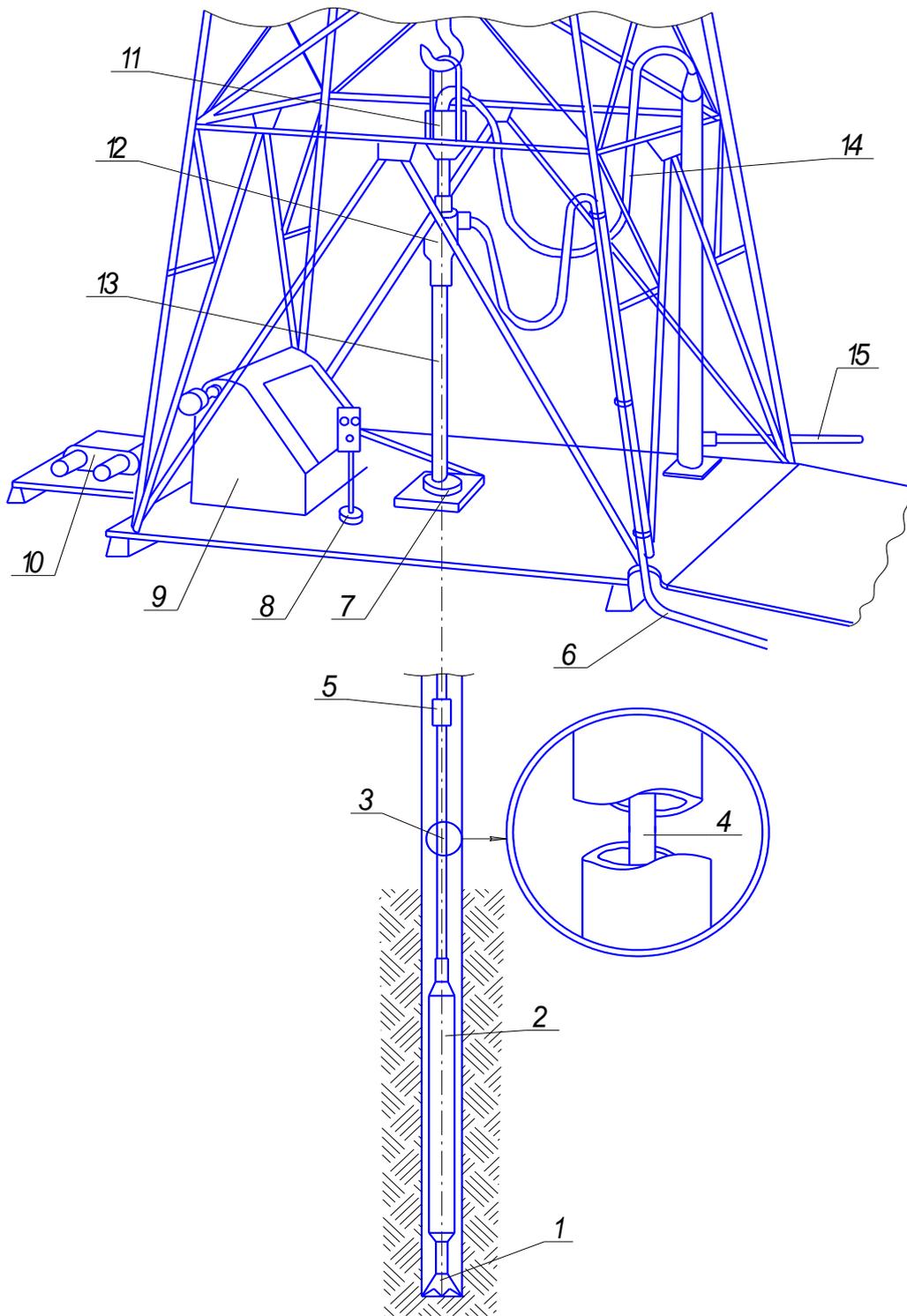


Figure 1.1 - Scheme of the installation for drilling with an electric drill

The supply of electricity from the power source (transformer) to the electric drill is carried out with the help of an external cable 6 through a current receiver 12, a cable section in a square pipe 13, and a two-core hose rubber cable with flexible copper cores. Drill pipes are used as the third wire in the power supply system of the electric drill

motor. The hose cable is made of separate segments (sections), which are automatically connected into a single whole when drilling pipes are twisted. For this, each segment of the cable has a contact rod at one end, and a contact coupling at the other, which are installed in the lock joints of the drill pipes.

The rotation of the drill pipes for auxiliary operations is performed using the rotor 7. The load on the bit is created by the weight of the drill pipes. The automatic bit feed regulator 10, which is connected by a chain transmission to the drill winch 9, is used to feed the bit to the face. The electric drill is controlled by remote control 8, which is installed near the driller's workplace.

1.3 Design features of an electric drill

The electric drill (Fig. 1.2) consists of two main parts: an electric motor and a spindle with heels for transferring the load to the bit. The motor shaft is connected to the spindle shaft by a gear coupling. In the upper part of the electric drill, there is a guide for gripping it with an elevator, and from the bottom, a spindle shaft protrudes, on which the bit is wound.

The engine works in a well at a great depth in the environment of drilling mud, the pressure of which can reach 40-50 MN/m². An oil protection system is used to protect the motor of an electric drill from the penetration of drilling mud, which can cause a breakdown of the insulation of the windings and premature abrasive wear of its components and parts.

For oil protection, the internal cavity of the motor of the electric drill is filled with transformer oil, the pressure of which exceeds the pressure of the external environment by 0.05-0.25 MN/m². Sealing of the internal cavity of the motor of the electric drill is ensured by end seals of rotating shafts and rubber rings in fixed joints.

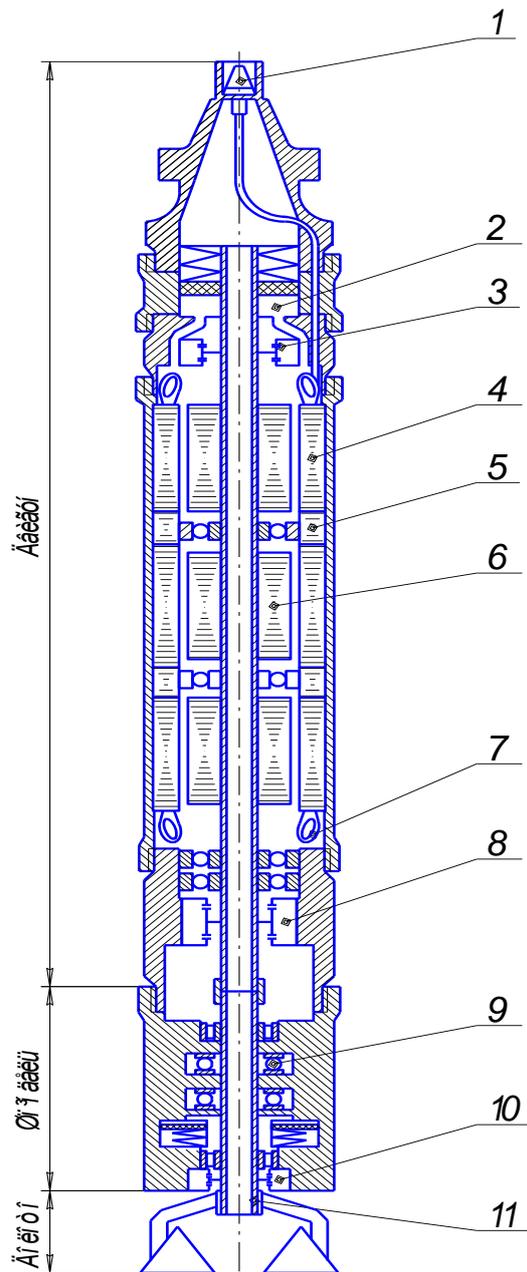


Fig. 1.2 - Construction of an electric drill with an oil-filled spindle

1-pin cable entry rod; 2-engine lubricators; 3-upper seal of the engine shaft; 4-packs of magnetically conductive stator steel; 5-non-magnetic stator packages; 6-packs of magnetically conductive rotor steel; 7-stator winding; 8-lower seal of the engine shaft; 9-thrust ball bearing of the spindle; 10-spindle shaft seal; 11-spindle shaft.

The modern serial motor of an electric drill is a high-voltage asynchronous machine with a short-circuited sectional rotor. The stator of the motor is placed in cylindrical housings connected to each other by conical threads. Magnetic steel

packages are pressed into the stator housing, alternating with non-magnetic packages. The latter are installed in order to prevent shunting of the magnetic flux through the ball bearing and to reduce losses from eddy currents that occur at the locations of the intermediate rotor supports. The stator winding is located in the grooves. Its output ends are connected by a cable to a contact rod, with the help of which the engine is connected to the cable located in the drill pipes. The engine rotor is a hollow shaft with a central channel for the passage of drilling fluid. Rotor sections with an aluminum "beam cage" are mounted on the shaft, intermediate bearings are located between them.

The lubricator system, which serves to create harmful pressure inside the engine, to compensate for oil leakage during heating, usually consists of three tubes located in the upper part of the engine. Two tubes are filled with transformer oil and connect to the internal cavity of the engine, the third is filled with more viscous oil, and connects to the central part of the upper gland.

A piston with a spring is located inside the lubricator tube, there is a cover on top, and a funnel on the bottom. When the engine is filled with oil, the piston rises and compresses the spring. The upper part of the piston connects to the environment.

Thus, the piston of each lubricator is under the pressure of the drilling fluid and the spring, therefore, regardless of the environmental pressure, excess pressure is always created inside the engine, under the influence of which the oil flows out, preventing the penetration of the drilling fluid inside the machine.

The spindle housing, in which radial and thrust bearings are installed, is screwed onto the conical thread of the lower connecting case of the engine. The spindle serves to perceive and transmit mechanical loads, as well as to transmit torque from the engine to the bit. The load, which is created by the weight of the compressed part of the drill string, is transmitted to the bit through the body of the electric drill, the heel and the spindle shaft. The spindle, which has its own lubrication system, is filled with viscous oil. The electric drill has a reserve of oil for normal operation for 15-20 hours. During this time, to replace the bit, the electric drill is raised to the surface and, if necessary, oil is added to the lubricators.

When designing the engines of electric drills, they try to get the maximum power with the smallest overall dimensions, which are determined by the diameter of the bit and the drilling technology. The synchronous speed of the engine can be determined based on the maximum permissible speed of the bit, which according to the standards should not exceed 1000 rpm. On the other hand, it is structurally difficult to manufacture an industrial frequency submerged motor with a synchronous speed of less than 500 rpm. Therefore, the synchronous frequency of rotation of the motor of electric drills can be 500, 600, 750, or 1000 rpm. The experience of drilling deep wells with an electric drill testifies to the feasibility of reducing the rotation frequency of the electric drill shaft in combination with an increase in torque. This is achieved by using an electric drill with a gear reducer. The synchronous speed of motors of geared electric drills should be 1500 rpm.

If in rotary drilling it is desirable to have a soft characteristic and a minimum moment of inertia of the drive motor to prevent pipe breakage, then in drilling with submerged motors there is no such danger. From the point of view of improving drilling, it is advisable that the rotation frequency of the bit during load jumps changes slightly. Overcoming load jumps should be due to the high overload capacity of the engine. The diameter of submerged engines is small, so the moment of inertia of their rotors is negligible. As a result, the motors of electric drills must have a rigid mechanical characteristic and a sufficient multiplicity of the maximum torque.

A feature of the motors of electric drills is increased sliding in the nominal load mode and a significant starting torque, which reaches $(1.2-1.7)M_n$. The choice of such a characteristic is due to the desire to provide the maximum possible starting moment, which is accompanied by a small multiple of the starting current. However, operational experience has shown that despite the reduction of the voltage when starting the engine to $(0.75-0.8)U_n$, the acceleration time to the nominal frequency does not exceed 0.2-0.3 seconds. Therefore, for electric drills it is possible to use motors of normal performance with high efficiency and $\cos \varphi$, and not motors with increased starting torque and increased slip. The electric drill receives power from a 6kV source through the cell of the high-voltage distribution device and the transformer, which reduces the voltage to

the required value, which depends on the length of the power line to the electric drill motor. Therefore, the transformers used for this should have taps on the primary and secondary windings; the necessary voltage is set using switches. The medium voltage winding of the transformer is intended for powering the electric drill; its voltage regulation limits should be 1085-2270 V with a power change from 270 to 560 kVA. Low-voltage winding, intended for powering the motors of the drilling winch with a voltage of 525V.

When drilling deep wells with an electric drill, when the time spent on lowering and lifting operations is significant, it is advisable to strive for an increase in penetration per bit, even at the cost of some reduction in the mechanical speed of drilling. It was experimentally established that reducing the rotation frequency of the bit (and the shaft of the electric drill) from 680 to 375 rpm, at a drilling depth of 4000 m, increased the cruising speed by 40-50%.

1.4 Methods of adjusting the rotation speed of electric drills

Until recently, the main field of asynchronous motors of electric drills was an unregulated electric drive. In recent years, in connection with the development and serial production of thyristor frequency and voltage converters by the electrical engineering industry, adjustable asynchronous electric drives with characteristics that are not inferior to those of a direct current electric drive began to be created. The use of such electric drives due to the advantages of asynchronous motors reflects the progressive trend in the development of automated electric drives.

Changing the rotation frequency of the electric drill is possible by using a reducer-insert, a motor of a different polarity, by changing the supply voltage and frequency.

Reducing the speed of rotation of an electric drill with the help of an insert reducer is performed by installing it between the engine and the spindle. The advantage of this method is to increase the torque on the output shaft. Disadvantages are that the change in rotation frequency occurs in stages, as well as the difficulty of manufacturing such a reducer due to its small diameter.

Motor speed regulation by changing the number of pole pairs can be implemented only when using special types of motors. A feature of the design of such motors is the stator winding, which consists of two identical sections (half-windings), using different connection schemes, the number of pole pairs can be changed, which entails a change in the speed of rotation of the magnetic field, and therefore the speed of rotation of the motor. The disadvantages of this method are the gradual change in the speed of rotation of the motor and a relatively small adjustment range, as well as the difficulty of manufacturing such motors for electric drills due to their long length (more than 10 m), which entails large losses in the steel of the magnet wire, and therefore a decrease in efficiency.

Regulating the speed of the engine by changing the voltage applied to the stator of the engine allows you to adjust its speed in static and dynamic modes with relatively good indicators and with the help of relatively simple control schemes, as well as to ensure economical engine operation modes. Adjusting the voltage on the stator does not change the idle speed and does not affect the critical slip, but significantly changes the critical moment. The reduction of the critical moment is proportional to the square of the voltage reduction. Therefore, this method is not very suitable for adjusting the rotation speed of the motor of an electric drill, since as the voltage decreases, the critical moment of the motor and thus its overloading capacity sharply decreases, and the speed adjustment range is very small.

The method of regulating the motor speed by changing the frequency of the supply voltage is widely used at present. The principle of operation is that by changing the frequency of the motor supply voltage, its speed can be changed, obtaining various artificial characteristics. This method provides a smooth adjustment of the speed in a wide range, and the characteristics obtained at the same time have high rigidity. Speed regulation by the frequency method is not accompanied by an increase in its slip, so power losses are small. For better use and obtaining high energy performance indicators of the engine (power coefficients, useful action, and overloading capacity), it is necessary to change the voltage supplied to it at the same time as the frequency. At the

same time, the rational law of voltage change depends on the nature of the load moment.

When implementing the frequency method of motor speed regulation, a frequency converter is used, which allows you to also adjust the voltage on its stator. Various frequency converters, which have found application in frequency asynchronous electric drives, can be divided into two groups that differ in structure and technological means.

The first group includes electric machine rotary converters (generator-motor system), in which ordinary or special electric machines are used to obtain variable frequency.

The use of frequency converters allows you to smoothly adjust the speed of the motor in a wide range, however, the process of frequency regulation in an electric machine frequency converter has significant drawbacks. To create such a converter, four electric machines are needed, which are designed for the full power of consumers, which determines its large size and cost, especially at high capacities. Double conversion of alternating current energy with industrial frequency into direct current energy and then again into alternating current energy of regulated frequency is accompanied by energy loss in the entire circuit, therefore the system is characterized by low efficiency. In addition, DC collector machines require constant supervision and care during operation, and their operation is accompanied by noise. And also, the process of changing the frequency in the electric machine frequency converter is inertial, which is explained by the mechanical inertia of the electric machine unit. This method of regulation is practically not used anymore and is considered obsolete.

Currently, static frequency converters (frequency converter-motor system), so named because they use elements and devices that do not have moving parts, such as semiconductor devices, reactors, capacitors, etc., have become widely used. The development of static frequency converters was especially accelerated due to the mass production of thyristors and power transistors. The use of static frequency converters made it possible to increase the technical and economic indicators of the adjustable

frequency electric drive: increase its efficiency and speed, eliminate noise and simplify maintenance.

Static frequency converters can be without a direct current link, with a direct connection between the power source and the load, and with an intermediate direct current link.

An important feature of frequency converters with a direct current link is the ability to provide smooth regulation of the current frequency on the motor stator, both below and above the voltage of the power source.

Frequency control is the most economical, as it provides regulation of the motor speed without large power losses in the rotor circuit, which impair the efficiency of the electric drive and lead to the need to increase the power of the motor. The frequency adjustment of the speed can be carried out smoothly in both directions from the natural characteristic, that is, the motor can have a speed both higher and lower than the nominal one. At the same time, the adjustment characteristics have high rigidity, and the engine retains a large overload capacity.

The range of speed regulation in open systems is from 5 to 10, and in closed systems its value can be much higher.

Due to the noted high indicators, the frequency method is currently the most widely used. Moreover, there are processes where the use of frequency control of an asynchronous electric drive is the only possible: the drive of high-speed electric spindles, high-speed wind tunnel fans, as well as the drive of electric drills, which is the subject of modernization in this work.

1.5 Conclusions to the section

In this master's thesis, the goal is to modernize and research the E215 electric drill drive for mechanical destruction of rocks by improving it and switching to newer technical equipment, which will increase drilling productivity at the lowest possible costs.

Having analyzed the operation of the electric drill, it can be concluded that this electric drive control system has served its time and is far behind the modern

achievements of science and technology. Elements that are used in the system now are almost impossible to replace, as their production has been discontinued. Low technical indicators, low reliability of the elemental base leads to complications in maintenance and repair, which in turn entails long-term downtime of the equipment.

Considering the above, it is most expedient to switch to new electric drill drive control systems, to a new element base. Currently, high-speed and widely adjustable complete electric drives are mass-produced and widely used. Having analyzed all of them according to such important indicators as the adjustment range, cost, overall dimensions, and others, we can conclude that for smooth adjustment of the motor speed of an electric drill, it is most appropriate to use a modern complete thyristor electric drive, which are produced for various industries and have a number of advantages over other electric drives.

The block arrangement of the element base significantly facilitates the work of service personnel and thereby reduces the time for repairs, which, in turn, affects the productivity of drilling.

To achieve the goal, the following tasks must be solved:

- calculate the power and choose the engine of the electric drill;
- conducting experimental studies of engine parameters depending on rotation speed and load moment;
- optimization of the processes of acceleration, starting the nominal mode of operation and stopping the engine;
- development of SAC with subsequent calculation of its parameters;
- conduct a study of the quality and stability of the system being developed.

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Дослідження та модернізація
електроприводу установки для буріння
електробурами нафтогазових свердловин**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

студент групи 601МЕ групи

Ярошенко Ю.С.

Керівник:

доцент, канд. техн. наук

Єрмілова Н.В.

Полтава 2023

Актуальність теми: розроблений регульований електропривод дозволяє збільшити швидкість буріння до 20%, а також дає можливість проводити буріння під певним кутом, що збільшує ККД розроблення пласту, тобто дозволяє видобути максимально можливу кількість нафти або газу. Буріння свердловин електробуром вважається актуальним і перспективним видом буріння завдяки можливості широкої автоматизації процесу.

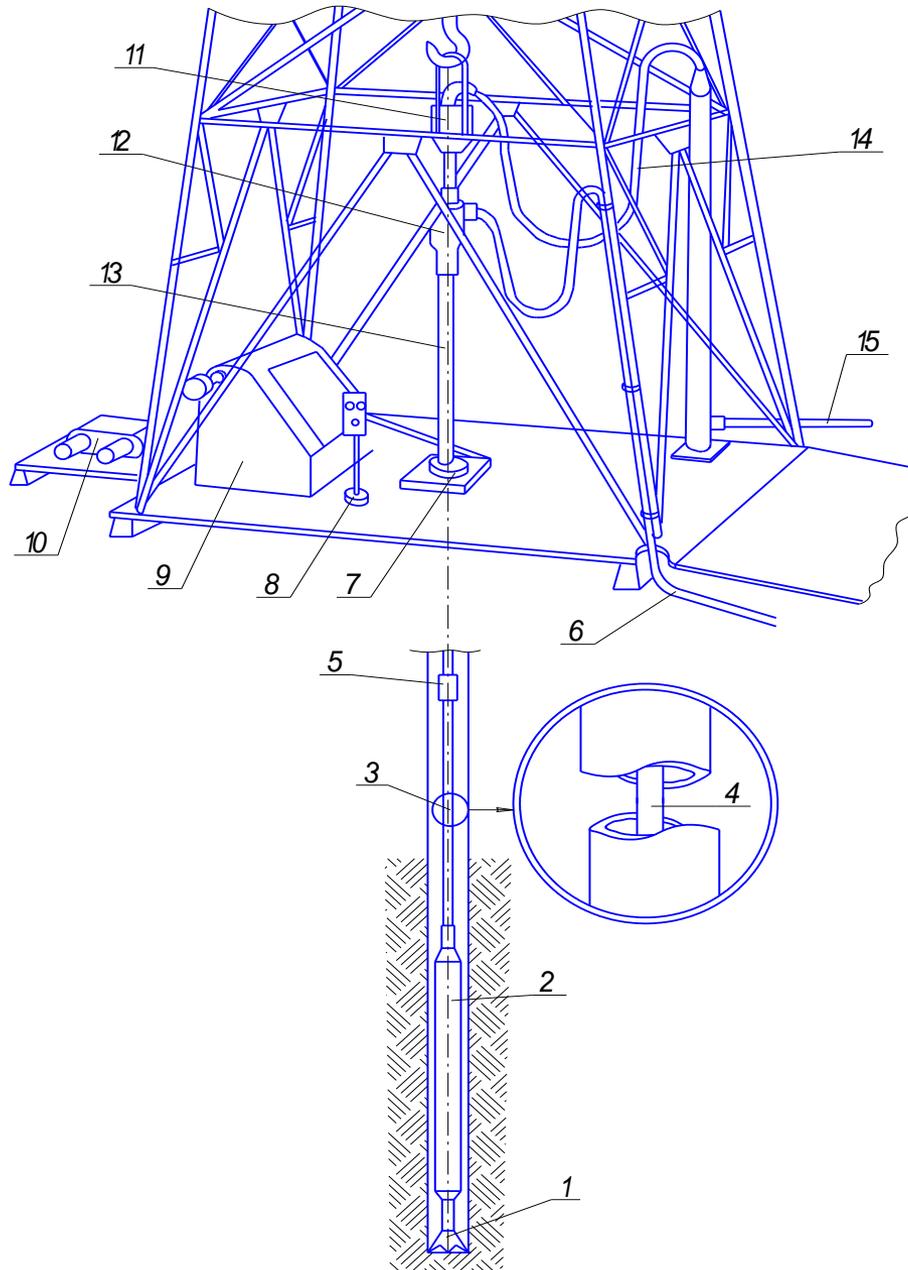
Метою роботи являється модернізація електроприводу установки для підвищення ефективності та надійності її роботи. При цьому необхідний перехід на нові системи керування приводом електробура, на нову елементну базу з блочним розташуванням, що суттєво полегшить роботу обслуговуючого персоналу.

Об'єктом дослідження є технологічний процес буріння, що здійснюється за допомогою привода електробура.

Предметом дослідження є привод установки для буріння електробурами нафтогазових свердловин.

Загальний вигляд установки для буріння електробуром

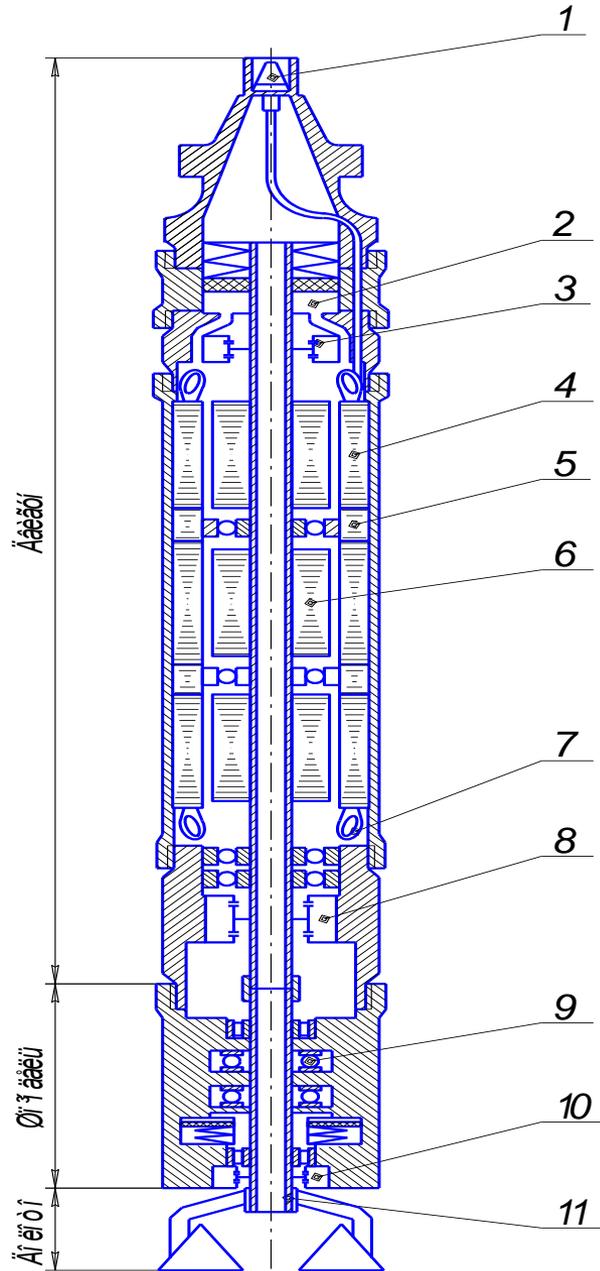
3



- 1 - долото;
- 2 - електробур;
- 3 - бурові труби;
- 4 - кабель;
- 5- замкове з'єднання;
- 6- подача електроенергії;
- 7- ротор;
- 8- пульт;
- 9- бурова лебідка;
- 10- долото;
- 11- гак;
- 12 - з'єднання;
- 13 - труба;
- 14 - шланг;
- 15 - лінія подачі рідини

Конструкція електробура з маслозаповненим шпинделем

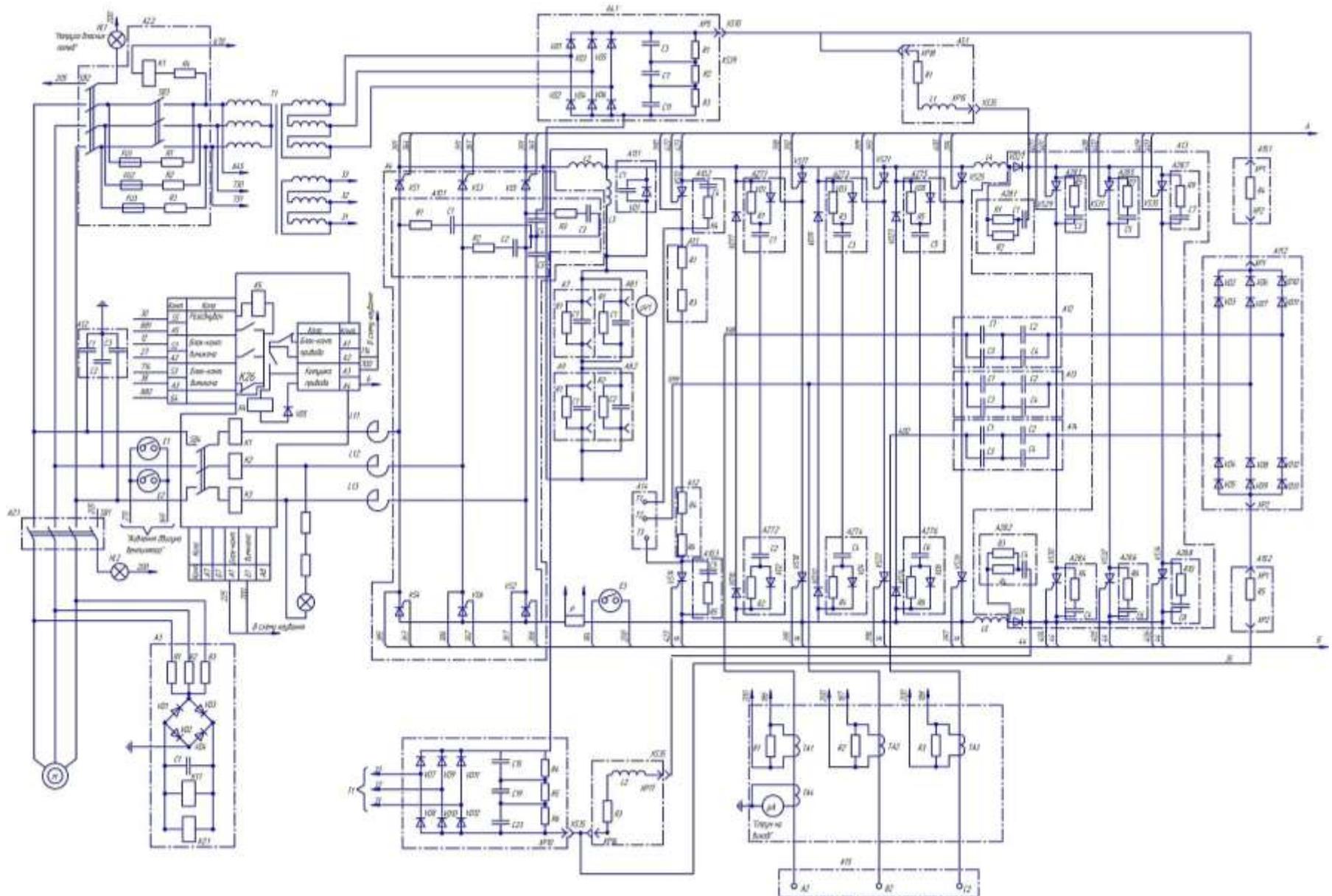
4



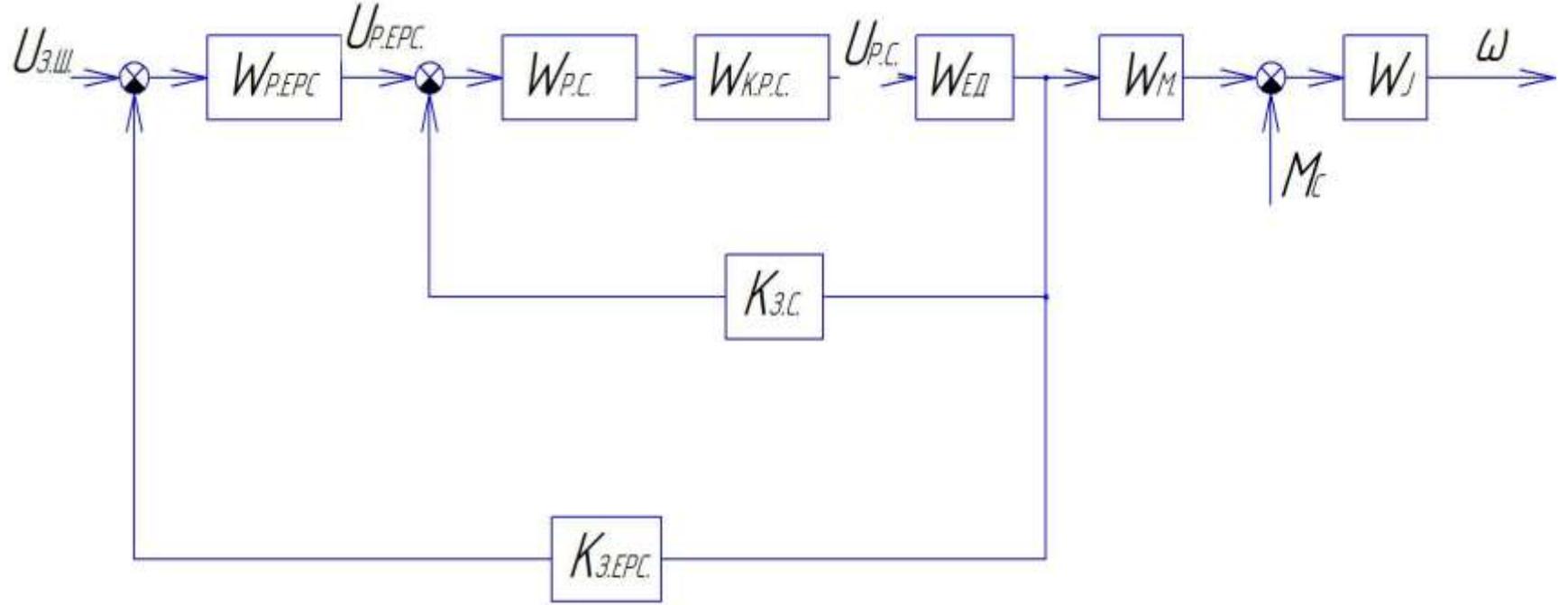
- 1- контактний стержень кабельного вводу;
- 2- лубрикатори двигуна;
- 3- верхнє ущільнення валу двигуна;
- 4- пакети магнітопровідної сталі статора;
- 5- немагнітні пакети статора;
- 6- пакети магнітопровідної сталі ротора;
- 7- обмотка статора;
- 8- нижнє ущільнення валу двигуна;
- 9- упорний шариковий підшипник шпинделя;
- 10- ущільнення валу шпинделя;
- 11- вал шпинделя

Принципова схема привода электробура

6



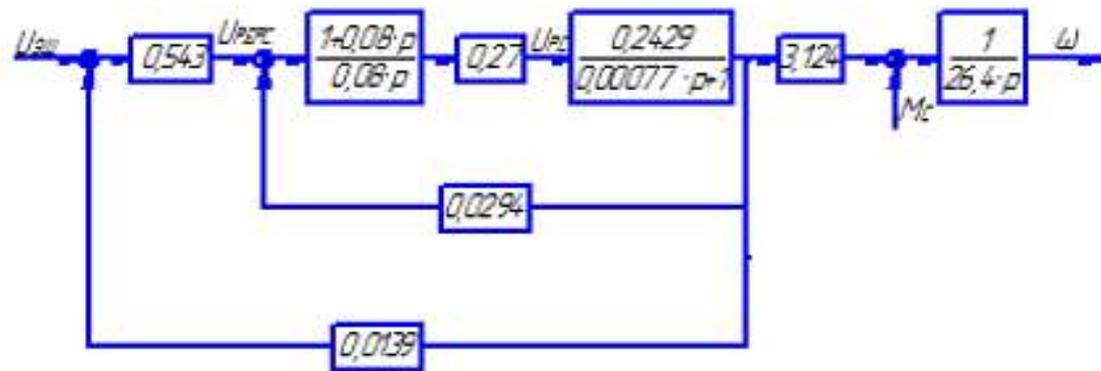
Структурна схема САК приводу електробура



$U_{зш}$ – напруга завдання швидкості; $W_{р.ерс}$ – передавальна функція регулятора ЕРС; $U_{р.ерс}$ – напруга на виході регулятора ЕРС; $W_{р.с}$ – передавальна функція регулятора струму; $U_{р.с}$ – напруга на виході регулятора струму; $W_{ед}$ – передавальна функція електродвигуна; ω – вихідна швидкість обертання двигуна; $K_{зс}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку по струму; $K_{зЕРС}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку по ЕРС.

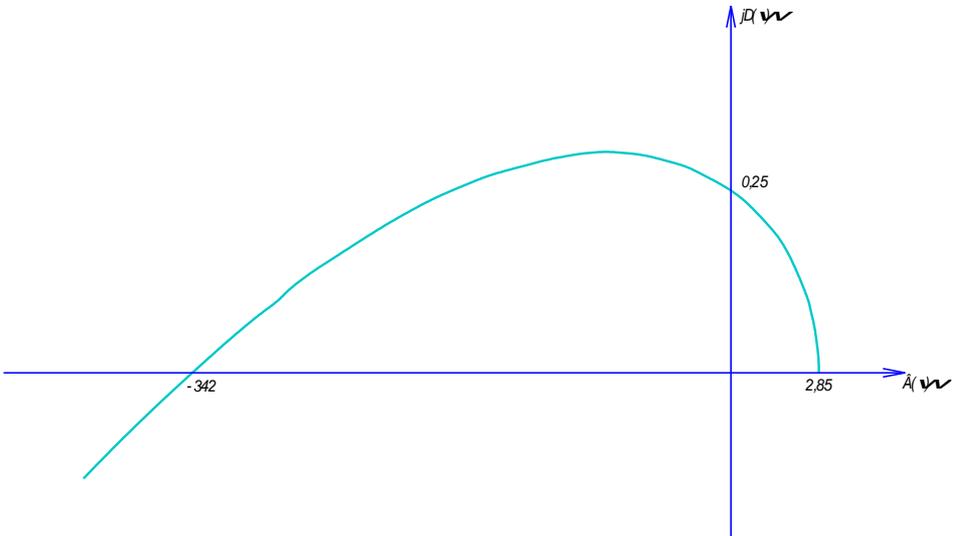
В САК реалізовано принцип керування за відхиленням, а координатами керування є струм і ЕРС двигуна електробура.

Розрахунок передавальної функції САК приводу електробура та дослідження стійкості системи



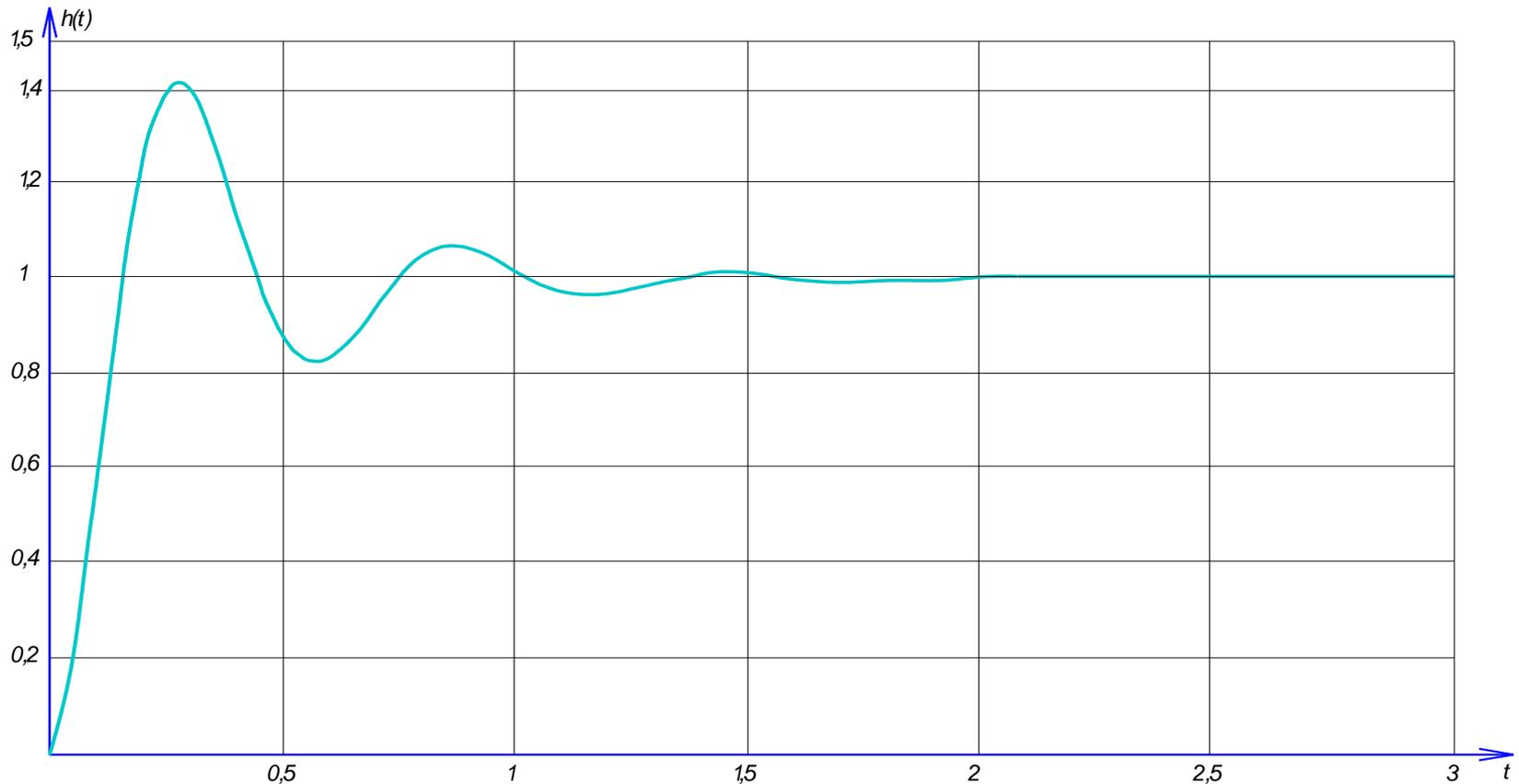
$$W_{зам}(p) = \frac{0,0366p + 0,458}{0,3326 \cdot 10^{-2} p^3 + 4,3676p^2 + 0,0,263155 \cdot p + 2,85}$$

$$M(\omega) = j(0,0263155\omega - 0,3326 \cdot 10^{-2} \omega^3) + 4,3676\omega^2 + 2,85$$



Система стійка за критерієм Михайлова, так як крива Михайлова починається на позитивній напіввісі і уходить у нескінченність у 3 квадранті комплексної площини (маємо рівняння 3 порядку)

Перехідна функція замкненої системи



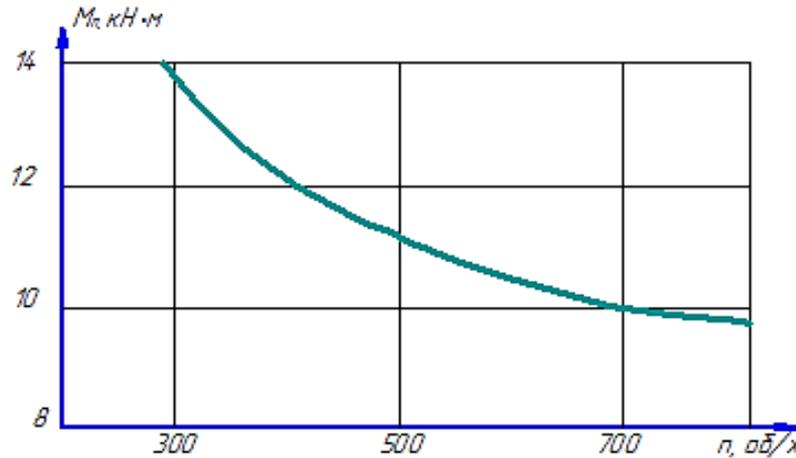
Час регулювання $T_{pe} = 1,5$ с.

Перерегулювання $\delta = \frac{h_{max} - h_o}{h_o} = \frac{1,42 - 1}{1} = 0,42$

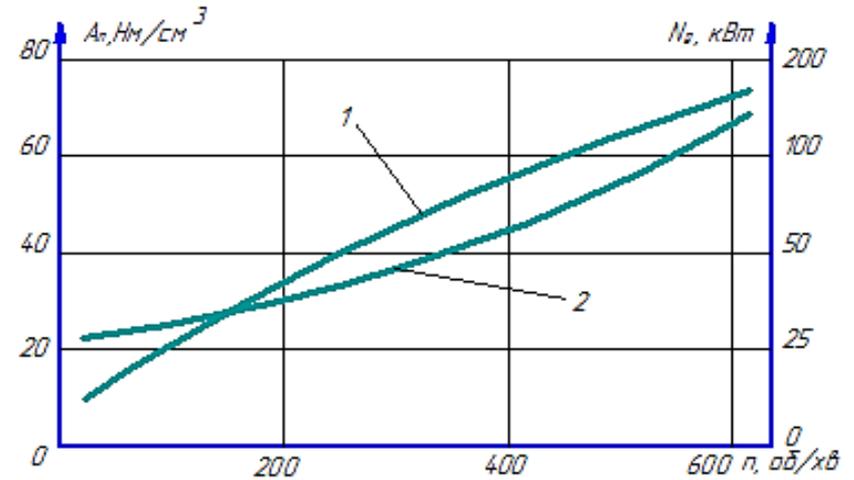
Коливальність перехідного процесу:

число коливань – 2; період коливань $T=0,95$ с.

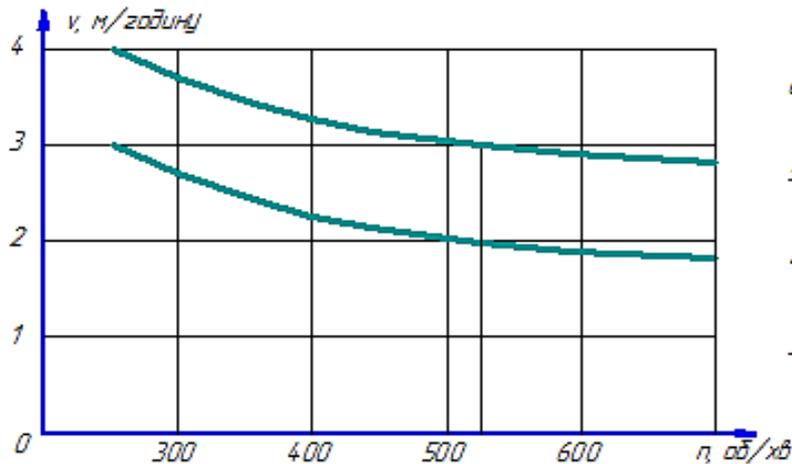
Графіки залежностей



Графік 1 – Залежність питомого моменту від швидкості обертання долота



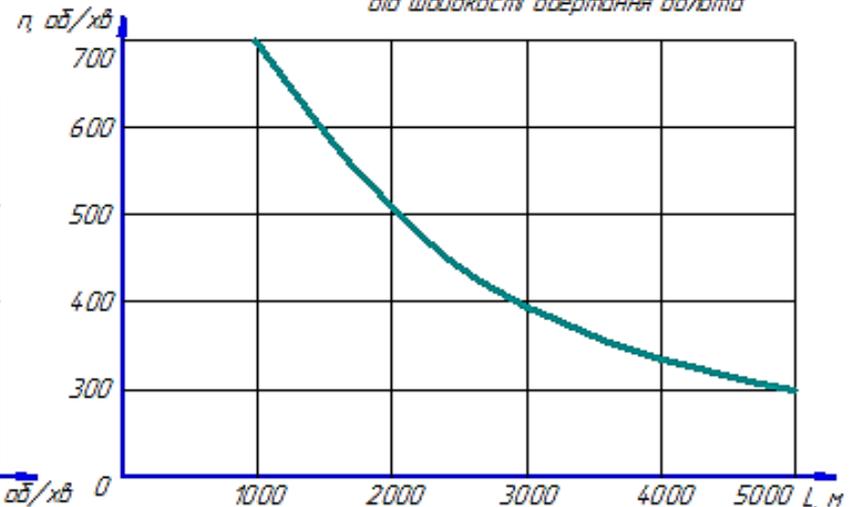
Графік 2 – Залежність зміни потужності 1 і питомих витрат енергії 2 від швидкості обертання долота



Графік 3 – Залежність механічної швидкості від швидкості обертання долота:

1- без стабілізації швидкості обертання долота;

2- з стабілізацією швидкості обертання долота.



Графік 4 – Залежність оптимальної швидкості обертання долота від глибини буріння свердловини

Розрахунок етапів пуску та розгону двигуна електробура

Етап пуску двигуна

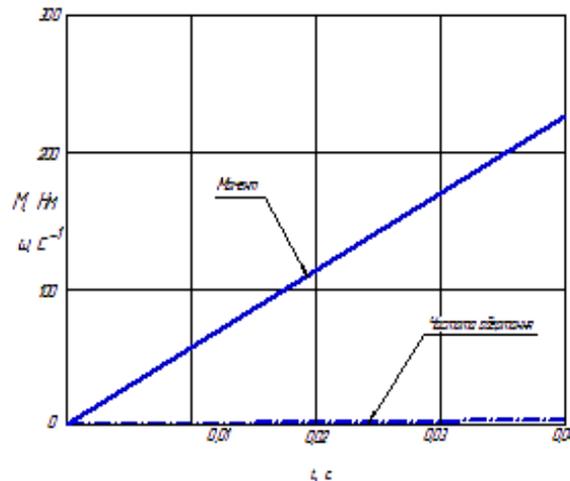
t, етапу c	M, Нм	ω , c^{-1}
0	0	0
0,1	56,68	0,883
0,2	113,36	1,766
0,3	170,04	2,649
0,4	224,9	3,521

$$M(t) = -\beta \cdot \varepsilon_0 \cdot t$$

$$M(t) = 64,26 \cdot 88,28t$$

$$\omega_0(t) = \varepsilon_0 \cdot t$$

$$\omega(t) = 88,28 \cdot t$$



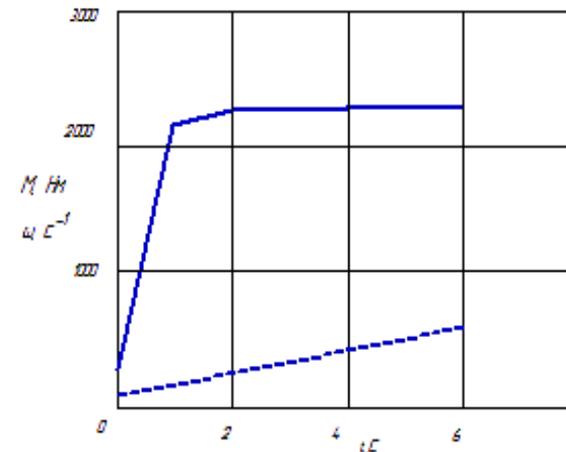
Етап розгону двигуна

t, етапу c	M, Нм	ω , c^{-1}
0	224,9	64,26
1	214,0	152,54
2	225,9	240,82
3	226,7	329,1
4	226,7	417,38
5	226,7	505,66
6,025	226,7	596,15

$$M(t) = M_{\omega} - \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_c} \right) + T_n \cdot \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right) \right]$$

$$M(t) = 224,9 + 2042,3 \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}} \right)$$

$$\omega(t) = \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \cdot \left[t - T_n \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right) \right] \quad \omega(t) = 88,28 \cdot \left[t - 0,36 \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}} \right) \right]$$



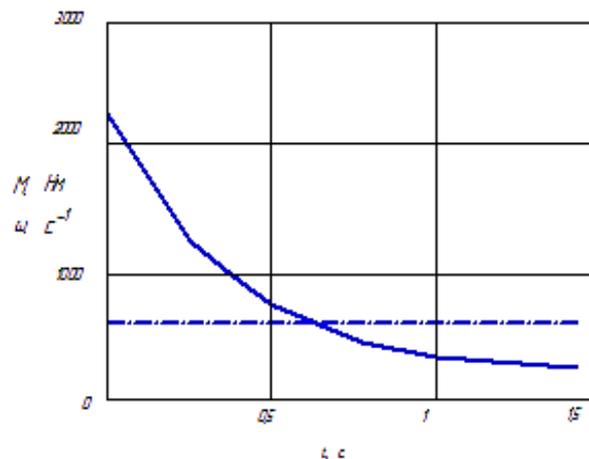
Розрахунок етапів розгону двигуна електробура

Етап остаточного розгону двигуна

t, секунди	M, Нм	ω , с^{-1}
0	2267	596,15
0,25	1245	610,09
0,5	734,1	617,05
0,75	479,17	620,53
1	351,87	622,265
1,25	288,3	623,131
1,44	262,3	623,486

$$M(t) = M_c + (M_{max} - M_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} \quad M(t) = 224,9 + 2042,1 e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$\omega(t) = \omega_{mov} + T_n \cdot \varepsilon_{mov} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}\right) \quad \omega(t) = 596,15 + 27,846 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}}\right)$$



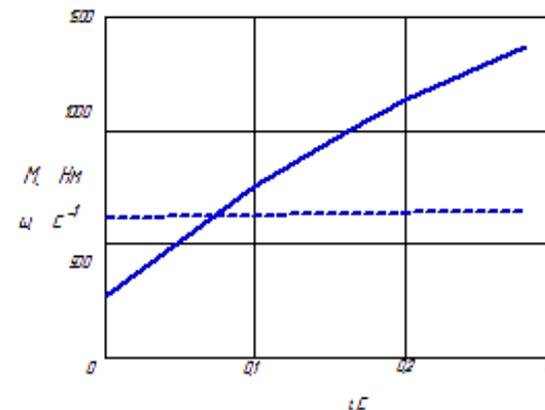
Етап розгону при збільшенні швидкості обертання

t, секунди	M, Нм	ω , с^{-1}
0	262,3	624
0,1	757,612	632,828
0,15	958,209	637,242
0,18	1066	639,9
0,2	1133	641,65
0,25	1285	646,07
0,28	1366	648,7

$$M(t) = M_{mov} + \beta \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \beta_c}\right) + T_n \cdot \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}\right) \right]$$

$$M(t) = 262,3 + 2042,3 \left(1 - e^{-\frac{t}{0,36}}\right)$$

$$\omega(t) = \omega_{mov} + \frac{\beta \cdot \varepsilon_0}{\beta - \beta_c} \left[t - T_n \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}\right) \right] \quad \omega(t) = 623,486 + 88,28 \cdot \left[t - 0,36 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}\right) \right]$$



Висновки

1. Проведений аналіз показав, що занурний двигун електробура має ряд важливих переваг порівняно з привідними двигунами інших типів, використовуваними в бурінні.
2. Дослідження показали, що для керування приводом електробура краще використовувати систему ТПЧ-АД, бо її переваги в даному випадку значно перевищують недоліки у порівнянні з іншими відомими системами.
3. У магістерській роботі розроблена загальна структурна схема САК приводу електробура, а також функціональна і принципова схеми електропривода. В ході роботи розрахована потужність привідного двигуна електробура, вибраний новий двигун, який має кращі технологічні і економічні показники в порівнянні зі старим двигуном.
4. Вибраний стандартний комплектний тиристорний перетворювач частоти для регулювання швидкості обертання, в якому проведена модернізація блоків керованого випрямляча та автономного інвертора напруги, що дозволяє використовувати цей електропривод в схемі живлення двигуна електробура.
5. Розрахована передавальна функція розімкненої та замкненої САК, проаналізована стійкість та якість системи автоматичного керування. Отримані показники перехідного процесу, що відповідають завданню та забезпечують достатню швидкодію і якість системи приводу електробура.
6. В дослідній частині проведений розрахунок та дослідження різноманітних режимів роботи приводу електробура. Проведені дослідження режимів роботи показали, що дані процеси відбуваються значно плавніше і дійсно роблять процес буріння керованим, на основі цього підвищуються технічні показники та ефективність роботи електроприводу.
7. Запропонований електропривод на базі схеми ТПЧ-АД є сучасним, економічно доцільним, надійним і відповідає поставленим задачам. Мета роботи виконана.

Дякую за увагу!

Доповідь закінчено