

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Кафедра електричного транспорту

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:
Максим КРУПА
гр. АЕК 2022-1


Керівник:
Валерій ДОМАНСЬКИЙ
професор, д.т.н.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Автоматизовані електротехнічні комплекси нафтогазової галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ

«17» червня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Крупі Максиму Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження енергоефективної системи керування синхронним двигуном з постійними магнітами

керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи

Валерій Тимофійович Доманський, професор, д.т.н.

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

затверджено наказом університету від «22» травня 2026 р. № 440 - 03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 25.06.2026

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи матеріали переддипломної практики, технічні характеристики електричних транспортних засобів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка) Стан питання щодо енергоефективного керування синхронним двигуном з постійними магнітами.

4.2. Розробка технічного завдання (вибір та обґрунтування параметрів, розробка конструкції, структурної та електричної принципової схем, створення алгоритмів роботи тощо)

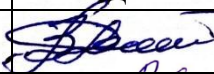
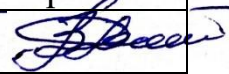

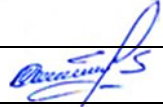
Розробка технічного завдання та структури системи.

4.3 Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення) Розрахунок тягово-бурового навантаження та параметрів електропривода транспортного засобу.

4.4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів):
Параметри PMSM, акумулятора та інвертора. Електрична схема силової частини та алгоритм роботи. Розрахунок бурового навантаження та параметрів інвертора. Енергетичний баланс та математична модель PMSM.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи


Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Валерій ДОМАНСЬКИЙ, професор		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інженер		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доцент		

7. Дата видачі завдання 15.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання	15.05 – 20.05.2026	
2	Розробка технічного завдання	21.05 – 25.05.2026	
3	Розрахункова частина	26.05 – 05.06.2026	
4	Охорона праці	01.06 – 09.06.2026	
5	Оформлення роботи	10.06 – 15.06.2026	
6	Підготовка доповіді та презентації	15.06 – 17.06.2026	

Здобувач


 (підпис)

Максим КРУПА
 (прізвище та ініціали)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи


 (підпис)

Валерій ДОМАНСЬКИЙ
 (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню енергоефективної системи керування синхронним двигуном з постійними магнітами для пересувного транспортного засобу з буровою установкою. У роботі розглянуто особливості застосування електроприводів у мобільних технологічних машинах, виконано аналіз типів електродвигунів та обґрунтовано доцільність використання PMSM завдяки високому коефіцієнту корисної дії, компактності, високій питомій потужності та можливості точного регулювання моменту і швидкості.

Розроблено технічне завдання на електромеханічну систему, запропоновано функціональну структуру установки, структурну схему системи керування та електричну принципову схему силової частини. Виконано розрахунок тягового навантаження транспортного засобу, бурового моменту, потужності двигуна, параметрів силового інвертора та акумуляторної батареї.

Для підвищення енергоефективності запропоновано алгоритм векторного керування з використанням режиму максимального моменту на ампер, ослаблення поля та програмного обмеження моменту при заклинюванні бурового інструмента. У розділі охорони праці проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори, що виникають під час експлуатації пересувної бурової установки, та запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів безпеки.

Сторінок - 55, таблиць - 9, рисунків - 10, формул – 27 ,

Графічна частина складається з 12 аркушів формату А4.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. СТАН ПИТАННЯ ЩОДО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ PMSM.....	9
1.1. Особливості застосування електроприводів у пересувних технологічних машинах.....	9
1.2. Загальна характеристика пересувного транспортного засобу з буровою установкою.....	10
1.3. Аналіз типів електродвигунів для автономних мобільних установок.....	11
1.4. Переваги синхронного двигуна з постійними магнітами	13
1.5. Методи керування PMSM.....	14
1.6. Енергоефективні режими керування.....	14
2. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ	18
2.1. Формування вимог до пересувного транспортного засобу з буровою установкою.....	18
2.2. Вибір номінальних параметрів електропривода.....	19
2.3. Розробка функціональної структури електромеханічної системи.....	20
2.4. Вибір акумуляторної батареї, інвертора та системи керування.....	22
2.5. Розробка структурної схеми системи керування.....	23
2.6. Розробка електричної принципової схеми силової частини.....	24
2.7. Алгоритм роботи електропривода у транспортному та буровому режимах	26

3. РОЗРАХУНОК ТЯГОВО-БУРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ.....	29
3.1. Розрахунок тягового навантаження пересувного транспортного засобу.....	29
3.2. Розрахунок параметрів бурового навантаження.....	30
3.3. Вибір потужності, моменту та швидкості PMSM.....	32
3.4. Розрахунок параметрів силового інвертора	33
3.5. Розрахунок ємності акумуляторної батареї.....	34
3.6. Математична модель PMSM у координатах d-q.....	36
3.7. Методика формування сигналів керування за алгоритмом FOC	37
3.8. Розробка програмного алгоритму керування.....	38
3.9. Оцінка енергоефективності запропонованої системи	39
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	41
4.1. Аналіз нормативних документів з охорони праці та електробезпеки	41
4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	41
4.3. Організаційні заходи безпеки	43
4.4. Технічні заходи безпеки	43
4.5. Заходи пожежної безпеки та безпеки в аварійних режимах.....	44
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49

ВСТУП

Електрифікація рухомих технологічних машин є одним із ключових напрямів у розвитку сучасних електромеханічних систем. Перехід від двигунів внутрішнього згоряння, а також від гідравлічних і пневматичних приводів до електричних систем керування надає можливість досягти вищої точності виконання технологічних операцій, знизити рівень шуму, покращити екологічні показники та забезпечити гнучке налаштування робочих режимів. Особливого значення це набуває для пересувних машин, що функціонують у змінних умовах навантаження, оскільки електропривод здатний швидко змінювати момент і швидкість відповідно до команд оператора та фактичного опору середовища.

Пересувний транспортний засіб, оснащений буровою установкою, є прикладом комплексної машини, де один технічний комплекс має забезпечувати як переміщення, так і позиціонування, а також виконання технологічної операції буріння. У режимі транспортування ключовими вимогами є достатня тягова сила, плавний старт, здатність долати нахили та економне використання енергії акумуляторної батареї. Під час буріння ж на перший план виходять стабілізація швидкості обертання бура, обмеження моменту, захист від заклинювання та контроль температури силових елементів.

Синхронний двигун із постійними магнітами є перспективним вибором для такого типу установки, завдяки його високому коефіцієнту корисної дії, значній питомій потужності, добрим динамічним характеристикам та можливості точного цифрового керування. Порівняно з двигунами постійного струму, PMSM не має щітково-колекторного вузла, а порівняно з асинхронними двигунами часто демонструє кращі масогабаритні та енергетичні показники. Для автономної машини це означає зменшення енергоспоживання та збільшення часу роботи від акумуляторної батареї.

Актуальність теми зумовлена необхідністю розробки енергоефективної системи керування для електроприводу мобільної бурової установки, яка б могла

адаптуватися до транспортних та технологічних режимів, підтримувати необхідні параметри руху та буріння, а також забезпечувати захист обладнання та оператора в аварійних ситуаціях.

Метою роботи є дослідження та розробка енергоефективної системи керування синхронним двигуном з постійними магнітами для пересувного транспортного засобу, обладнаного буровою установкою.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система пересувного транспортного засобу з буровою установкою. Предметом дослідження виступають методи енергоефективного керування синхронним двигуном з постійними магнітами під час роботи в транспортному та буровому режимах.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати поточний стан розвитку електроприводів мобільних технологічних машин, сформулювати технічне завдання, виконати розрахунок тягово-бурового навантаження та параметрів електропривода транспортного засобу, розглянути питання охорони праці.

Практична цінність роботи полягає в можливості застосування розробленої структури та алгоритму при проектуванні автономних електрифікованих бурових платформ, сервісних машин, малогабаритних технологічних роботів та мобільних установок спеціального призначення.

Результати роботи були представлені у матеріалах XIX Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період» (91-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. 300 с. [1]

1. СТАН ПИТАННЯ ЩОДО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ RMSM

1.1. Особливості застосування електроприводів у пересувних технологічних машинах

Автомобільні технологічні машини поєднують у собі функцію пересування та виконання робочих завдань. До цього типу відносяться мобільні бурові установки, електрифіковані платформи для обслуговування, комунальна техніка, роботизовані комплекси для ремонту, мобільні підйомники та спеціалізовані машини для експлуатації інфраструктури. Їх головна відмінність від стаціонарних технологічних установок полягає в роботі з мінливими навантаженнями, обмеженими можливостями джерела живлення та підвищеними вимогами до безпеки.

Електропривод мобільної машини повинен забезпечувати не лише номінальну роботу, а й витримувати короточасні перевантаження. Під час руху це може проявлятися як момент при старті, подолання перешкод на шляху або підйом на схил. При бурінні перевантаження виникає через зміну щільності ґрунту, наявність твердих включень або тимчасове заклинювання інструменту. Тому система керування повинна оперативнo реагувати на зміни навантаження, забезпечуючи відповідну реакцію без зайвого споживання струму [2].

Для автономної машини енергоефективність має першорядне значення. Якщо система керування генерує надмірні струми або працює в неефективних режимах, це призводить до збільшення мідних втрат у обмотках, втрат у силовому інверторі та нагрівання акумуляторної батареї. Це, у свою чергу, скорочує час автономної роботи, підвищує температуру силових компонентів та зменшує загальний ресурс обладнання.

Сучасний електропривод мобільної технологічної машини має включати силовий перетворювач, цифровий контролер, датчики струму, напруги,

температури, положення ротора, систему захисту та інтерфейс для взаємодії з людиною. Саме взаємодія силової частини з алгоритмом керування визначає загальну ефективність машини.

Для бурової установки критично важливо забезпечити два принципово різних режими роботи. У транспортному режимі головними є плавне регулювання швидкості руху, тягового зусилля та можливість обмеження прискорення. У технологічному ж режимі пріоритетом є стабілізація швидкості або моменту бурового інструменту, контроль перевантажень та захист механічної передачі.

1.2. Загальна характеристика пересувного транспортного засобу з буровою установкою

У цій роботі розглядається мобільна платформа малої або середньої розмірності, оснащена електроприводом та буровим механізмом. Така установка може бути використана для виконання інженерно-геологічних досліджень, монтажу опор, створення неглибоких свердловин, обслуговування комунальних мереж або виконання робіт на вузьких територіях, де використання двигунів внутрішнього згоряння є небажаним.

Конструктивно машина складається з несучої рами, ходової частини, акумуляторної батареї, силового інвертора, електродвигуна, редуктора, бурового механізму, панелі оператора та системи захисту. Ходова частина може бути колісною або гусеничною. У цій роботі для розрахунків обрано колісну платформу, оскільки вона простіша за конструкцією та достатньо функціональна для умов будівельного або ремонтного майданчика [3, 4].

Буровий механізм створює змінний крутний момент. На початку буріння момент відносно невеликий, але він збільшується в міру занурення бура в ґрунт. При попаданні твердого включення можливе різке зростання моменту та падіння

швидкості. Саме тому електропривод повинен не тільки підтримувати задану швидкість, але й розпізнавати ознаки заклинювання та обмежувати момент.

З точки зору електромеханіки, така установка є багаторежимною системою. Вона може функціонувати в режимах руху, позиціонування, буріння, сервісного переміщення, екстреної зупинки та режимі очікування. Для кожного режиму повинні бути визначені допустимі межі струму, швидкості, моменту, температури та напруги батареї.

Впровадження електричного привода дозволяє реалізувати логіку управління на рівні програмного забезпечення. Це суттєво спрощує реалізацію таких функцій, як плавний пуск, обмеження моменту, захист від заклинювання, діагностика, збереження інформації про помилки та взаємодія з оператором.

1.3. Аналіз типів електродвигунів для автономних мобільних установок

У сферах мобільних технологічних установок можливим є впровадження двигунів постійного струму, асинхронних двигунів, двигунів постійного струму без щіток, синхронних двигунів з постійними магнітами та реактивних двигунів. Кожен різновид має власний набір позитивних та негативних сторін, отже, процес вибору електричної машини мусить враховувати режими експлуатації, потреби в енергоефективності, умови роботи та загальну складність системи контролю.

Електродвигуни постійного струму відрізняються простотою управління моментом, але ж мають вузол з колектором та щітками. В умовах пилових робіт, наприклад, під час буріння, це зменшує їхню надійність, вимагає регулярного обслуговування, а також може призвести до підвищеного ризику утворення іскор. З огляду на це, використання таких двигунів у сучасних автономних установках видається менш обґрунтованим.

Асинхронні двигуни вирізняються надійністю, виробничою доступністю та прийнятною вартістю. Однак, при використанні у мобільних системах, їхнім

недоліком може бути нижча питома ефективність та більші габарити при рівній потужності. В машинах, що працюють від акумуляторів, кожний відсоток втраченої енергії безпосередньо впливає на ємність батареї, загальну вагу агрегату та тривалість його безперебійної роботи [5-7].

Безколекторні двигуни постійного струму мають конструктивну схожість з PMSM, проте часто функціонують з трапецієподібним профілем струму. Це може призводити до збільшення пульсацій моменту, що є небажаним фактором для бурового обладнання. PMSM, керовані за допомогою синусоїдального векторного контролю, забезпечують більш стабільний момент обертання та вищу якість регулювання.

Синхронний двигун, оснащений постійними магнітами, демонструє високий коефіцієнт корисної дії, видатне співвідношення моменту до маси, гарну динаміку та чудову сумісність з актуальними алгоритмами векторного керування (FOC). Саме тому PMSM було обрано як основний тип електродвигуна для системи, що досліджується.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика електродвигунів для мобільної бурової установки

Тип двигуна	Переваги	Недоліки	Доцільність
Двигун постійного струму	Просте керування, високий пусковий момент	Щітки, обслуговування, іскріння	Обмежена
Асинхронний двигун	Надійність, доступність, міцність	Нижча питома ефективність, більші габарити	Середня
BLDC	Компактність, відсутність щіток	Пульсації моменту при трапецієдальному керуванні	Середня
PMSM	Високий ККД, точне керування, висока питома потужність	Вища вартість, потреба в інверторі та датчиках	Висока
Реактивний двигун	Проста конструкція ротора	Шум, пульсації моменту, складніше керування	Обмежена

1.4. Переваги синхронного двигуна з постійними магнітами

Синхронний двигун з постійними магнітами – це електрична машина змінного струму, магнітне поле ротора якої генерується за рахунок постійних магнітів. Відсутність обмотки збудження на роторі призводить до зниження втрат у ньому, зростання ефективності та полегшення теплового режиму роботи. Для мобільних пристроїв це набуває особливого значення, адже відведення тепла у вузькому корпусі може бути ускладненим [1, 4, 5].

PMSM демонструє значний крутний момент на низьких обертах, що є ключовим як для початку руху транспортного засобу, так і для процесів буріння. Застосування редуктора дозволяє досягти суттєвого моменту на колесі або буровому інструменті, зберігаючи при цьому відносно невеликі габарити двигуна. Це, своєю чергою, сприяє зменшенню ваги силового привода та вивільненню простору на робочій платформі.

Серед інших переваг варто відзначити можливість точного контролю крутного моменту. У системах векторного керування момент прямо залежить від q -складової струму, що дозволяє контролеру оперативно обмежувати його у разі перевантаження чи заїдання. Така функціональність суттєво підвищує надійність механічних компонентів.

До мінусів PMSM належать висока вартість постійних магнітів, потенційний ризик розмагнічування в умовах перегріву та необхідність використання інвертора. Проте, ці недоліки повністю нівелюються високою ефективністю, компактними розмірами та можливістю впровадження енергозберігаючих алгоритмів.

Для досліджуваної установки PMSM є оптимальним вибором, що забезпечує компроміс між необхідним моментом для транспортних та технологічних завдань, а також надає можливість реалізації алгоритмів МТРА, ослаблення магнітного поля та програмного захисту.

1.5. Методи керування PMSM

Керування синхронним двигуном з постійними магнітами може виконуватися різними методами. Найпростішим є скалярне керування, яке базується на регулюванні амплітуди та частоти напруги. Його перевагою є простота, але недоліком є недостатня точність регулювання моменту та низька динаміка. Для бурової установки, де навантаження може різко змінюватися, скалярний підхід є недостатнім.

Пряме керування моментом забезпечує швидку реакцію, але може створювати підвищені пульсації моменту і струму. У механізмах з редуктором та буровим інструментом такі пульсації можуть викликати додаткові ударні навантаження, шум і вібрацію.

Векторне керування з орієнтацією за полем ротора є найбільш придатним для досліджуваної системи. Воно дозволяє розділити керування магнітним потоком і моментом, використовуючи систему координат d-q. При цьому d-складова струму впливає на потік, а q-складова формує електромагнітний момент [8].

FOC забезпечує високу якість регулювання, плавний пуск, швидку реакцію на зміну навантаження та можливість реалізації енергозберігаючих режимів. Для транспортного засобу це означає плавне переміщення, а для бурової установки — стабілізацію швидкості бура та захист від перевантаження.

У роботі приймається система векторного керування PMSM з внутрішнім контуром струму, зовнішнім контуром швидкості або моменту, блоком МТРА, блоком ослаблення поля, SVPWM-модулятором та системою аварійних обмежень.

1.6. Енергоефективні режими керування

Ефективність споживання енергії електричного приводу залежить не лише від конструктивних особливостей самого двигуна, але й від принципу його керування. Ключові втрати потужності в синхронних двигунах з постійними магнітами (PMSM) включають: втрати на нагрів міді в обмотках статора, магнітні втрати в

осерді статора, механічні втрати, втрати в силовому інверторі, а також втрати в з'єднувальних проводах та акумуляторній батареї. Серед усіх цих видів втрат, мідні втрати найлегше піддаються регулюванню, оскільки вони обернено пропорційні квадрату величини струму [5, 6].

Режим керування МТРА (Maximum Torque Per Ampere) або "Максимальний момент на одиницю струму" забезпечує досягнення бажаного електромагнітного моменту при мінімальному значенні струму статора. Для автономних систем, таких як мобільні бурові установки, це означає зменшення нагрівання обмоток двигуна, зниження споживання струму від батареї та, відповідно, подовження часу безперервної роботи. Режим МТРА є особливо ефективним для застосування в двигунах із вбудованими магнітами, оскільки він враховує відмінності в індуктивності двигуна вздовж осей d та q .

При роботі двигуна на швидкостях, що перевищують його номінальну (базову) швидкість, застосовується техніка ослаблення магнітного поля. У цьому режимі d -складова струму стає від'ємною, що призводить до зменшення загального магнітного потоку. Це дозволяє двигуну розвивати вищу швидкість, незважаючи на обмежену напругу на DC-шині інвертора. Хоча для бурової установки цей режим не є пріоритетним, він може бути корисним під час транспортування, особливо при переміщенні обладнання без робочого навантаження.

У процесі буріння найважливішим аспектом енергоефективності є підтримання стабільної швидкості обертання без надмірного створення моменту. Якщо система керування генерує занадто великий момент, це призводить до зростання струму i , як наслідок, до збільшення втрат потужності. З іншого боку, недостатній момент робить процес буріння нестабільним. Тому виникає потреба в адаптивному обмеженні моменту, яке б враховувало поточний стан ґрунту для буріння та реальну швидкість обертання.

Для системи, що розглядається, пропонується до впровадження комплексна стратегія керування. Під час транспортування доцільно використовувати плавне формування моменту разом з режимом МТРА. В режимі буріння – стабілізацію швидкості з керованим обмеженням моменту. У випадку виявлення аварійних ситуацій передбачена функція швидкого аварійного відключення або короткочасного реверсивного руху бура.

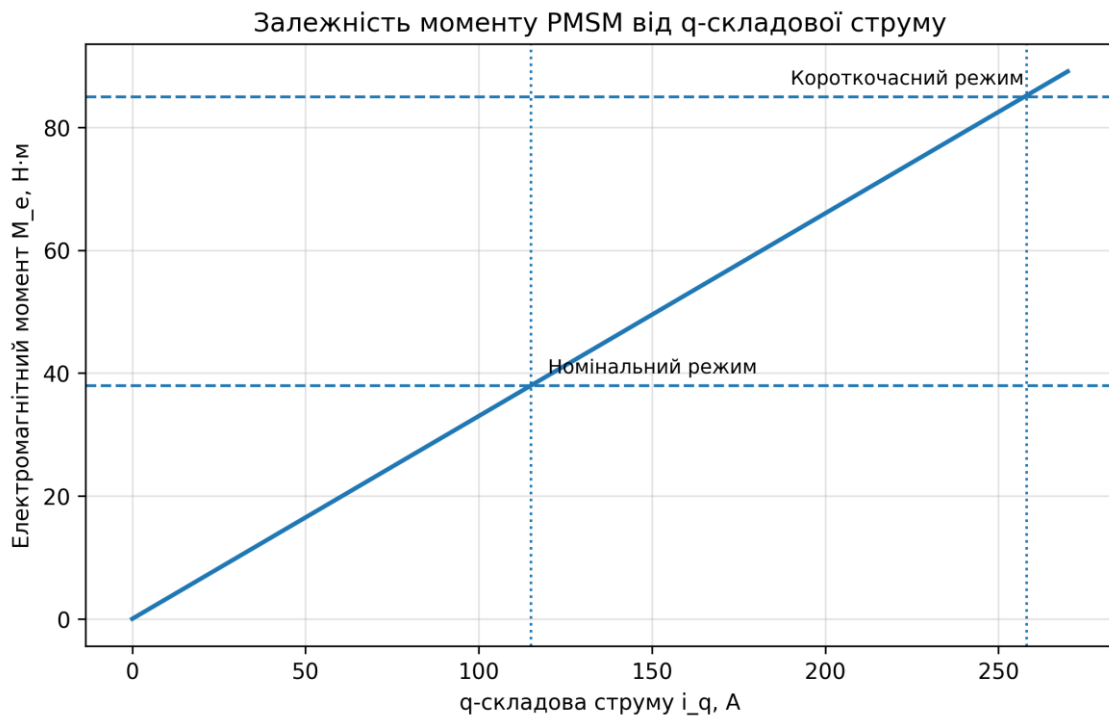


Рисунок 1.1 – Залежність електромагнітного моменту PMSM від q-складової струму

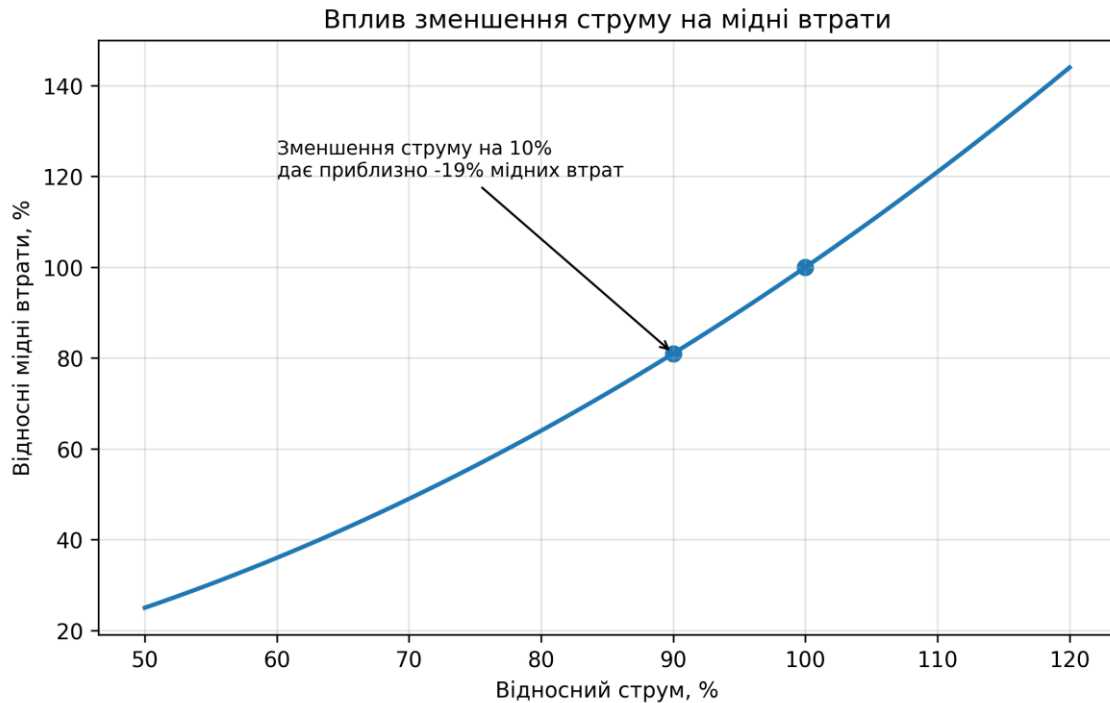


Рисунок 1.2 – Вплив зменшення струму на мідні втрати в обмотках статора

Таким чином у розділі здійснено аналіз силових установок, що застосовуються на мобільних промислових машинах. Виявлено, що для бурових установок, які переміщуються, ключовим є вибір приводу, що відзначається високою ефективністю, компактністю та здатністю до швидких змін режимів роботи. Зіставлення різних видів електричних двигунів підтвердило перевагу синхронних двигунів з постійними магнітами (PMSM). Доведено необхідність застосування векторного регулювання, методики максимального використання енергії (МТРА), послаблення магнітного поля та захисних алгоритмів як фундаментальних елементів системи енергоощадного управління.

2. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ

2.1. Формування вимог до пересувного транспортного засобу з буровою установкою

Завдання окреслює ключові вимоги до електромеханічної системи, її складових частин, способів функціонування, аспектів безпеки та логіки керування. У контексті нашої бакалаврської роботи, технічне завдання розглядається як етап інженерного обґрунтування, що передбачає підбір базових характеристик та формування архітектури системи.

Мобільний транспортний засіб, оснащений буровим обладнанням, повинен мати змогу пересуватися к пункту призначення, точно встановлюватися, здійснювати буріння та забезпечувати безпечну зупинку. Оскільки джерелом живлення є акумуляторна батарея, силова частина системи мусить мати високий коефіцієнт корисної дії, а система керування — бути оптимізованою для зниження непотрібних енергетичних витрат.

До системи висуваються наступні функціональні критерії: незалежне джерело живлення, делікатне стартування, можливість змінювати швидкість руху, підтримання стабільної швидкості обертання бура, обмеження крутного моменту, захист від перевантажень, захист від зниженої напруги акумулятора, моніторинг температури, система екстреного вимкнення та відображення робочого статусу для оператора.

Важливо приділити особливу увагу процесам перемикання між різними режимами роботи. В режимі руху транспортного засобу привід не повинен генерувати надмерний крутний момент, аби уникнути різких ривків. На противагу цьому, в буровому режимі необхідно забезпечити достатній крутний момент, але при цьому обмежити його у випадку заклинювання. Отже, керуючий пристрій мусить містити програмну логіку для коректного вибору режиму.

Таблиця 2.1 – Вихідні параметри пересувного транспортного засобу з буровою установкою

Параметр	Позначення	Значення
Маса транспортного засобу з обладнанням	m	1200 кг
Максимальна швидкість руху	v_{\max}	10 км/год
Радіус ведучого колеса	r_w	0,28 м
Максимальний ухил	α	10°
Коефіцієнт опору коченню	f	0,025
Прискорення при рушанні	a	0,3 м/с ²
ККД механічної передачі	η_t	0,90
Швидкість буріння	n_b	60–250 об/хв
Номінальний момент на бурі	M_b	200 Н·м
Короткочасний момент на бурі	$M_{b,\max}$	400 Н·м
Напруга DC-шини	U_{dc}	144 В
Тривалість автономної роботи	t	2–3 год

2.2. Вибір номінальних параметрів електропривода

З огляду на потреби в енергії при пересуванні та роботі бурової установки, обрано синхронний двигун із постійними магнітами (PMSM) номінальною потужністю 12 кВт. Така потужність враховує запас для руху в гірській місцевості та короткочасні пікові навантаження під час буріння. Важливими критеріями вибору є забезпечення достатнього максимального обертового моменту, сумісність з джерелом живлення 144 В постійного струму та можливість роботи з трифазною інверторною системою [2, 6, 8].

Номінальна частота обертання двигуна встановлена на рівні 3000 об/хв. На цій швидкості двигун, працюючи через редуктор, здатен забезпечувати потрібні оберти як приводу коліс, так і для бурового механізму. Піковий обертовий момент визначено в межах 85–90 Н·м, що гарантує впевнений старт та можливість буріння навіть при умовах значного опору.

Для управління двигуном необхідний інвертор, здатний витримувати фазний струм до 250 А. Це зумовлено тим, що під час короточасних режимів роботи значення струму компоненти q може досягати 250–260 А. Тривале функціонування двигуна в такому режимі є неприпустимим, отже, система управління повинна забезпечувати контроль тривалості таких перевантажень .

Таблиця 2.2 – Прийняті параметри синхронного двигуна з постійними магнітами

Параметр	Позначення	Значення
Тип двигуна	—	PMSM
Номінальна потужність	P_n	12 кВт
Номінальна швидкість	n_n	3000 об/хв
Номінальний момент	M_n	38 Н·м
Максимальний короточасний момент	M_{max}	85–90 Н·м
Кількість пар полюсів	p	4
Опір фази статора	R_s	0,06 Ом
Індуктивність по d-осі	L_d	0,18 мГн
Індуктивність по q-осі	L_q	0,24 мГн
Потокозчеплення магнітів	ψ_f	0,055 Вб
ККД двигуна	η_m	0,92–0,95

2.3. Розробка функціональної структури електромеханічної системи

Конструкція системи, що відповідає за її функціонування, складається з джерела енергії, пристроїв безпеки, силового перетворювача, привода, механізму передачі зусилля, виконавчого елемента, сенсорів, керуючого блоку та інформаційного пульта для користувача. Спосіб взаємозв'язку цих компонентів безпосередньо впливає на стабільність та продуктивність роботи в цілому.

Енергія від акумуляторного блоку надходить до шини постійного струму через елемент плавкого захисту, основний силовий контакт та ланку попереднього заряджання. Інвертор живлення генерує трифазну систему напруг, яка постачається

до синхронного електродвигуна з постійними магнітами. Обертальний момент від двигуна, пройшовши через понижуючий редуктор, передається на елементи приводу ходової частини або механізм буріння. Керуючий блок обробляє дані, отримані від сенсорів, і генерує сигнали для управління інвертором.

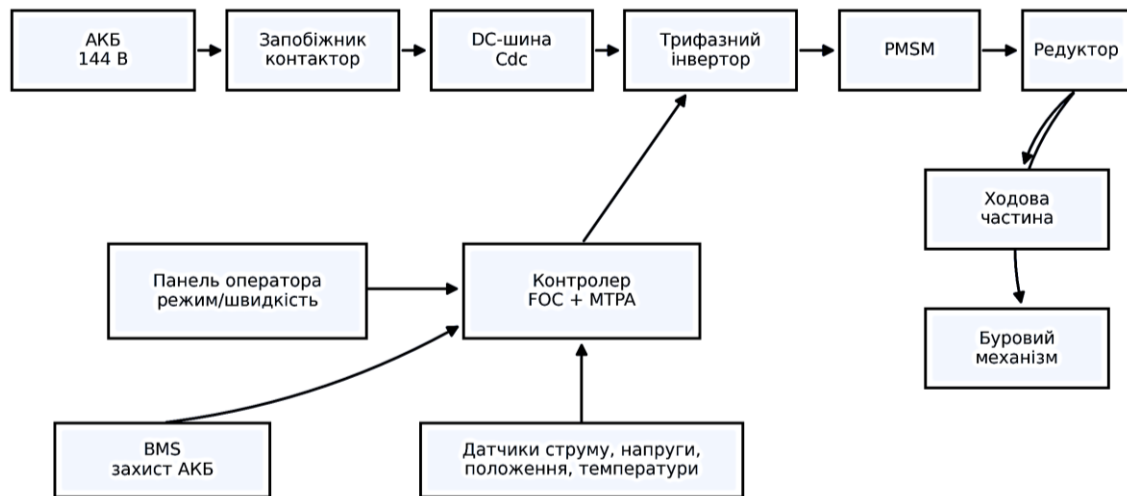


Рисунок 2.1 – Функціональна структура електромеханічної системи пересувної бурової установки

Система передбачає наявність декількох контурів зворотного зв'язку. Сенсори вимірювання струму необхідні для функціонування внутрішнього контуру векторного керування, сенсор кутового положення ротора використовується для перетворення координат Парка, сенсор напруги на шині постійного струму слугує для моніторингу рівня напруги та реалізації режиму ослаблення поля. Термосенсори застосовуються для захисту двигуна, акумуляторного блоку та інвертора від перегріву.

Інформаційний пульт надає користувачеві змогу обирати операційний режим, встановлювати бажану швидкість пересування або інтенсивність буріння, стежити за рівнем заряду батареї та отримувати сповіщення про несправності. У випадку виникнення нештатної ситуації, система повинна ініціювати автоматичне

припинення генерації ШІМ-сигналів інвертором та розмикання основного силового контакту.

2.4. Вибір акумуляторної батареї, інвертора та системи керування

Вибір акумуляторної батареї для автономного живлення зупинився на номінальній напрузі 144 В. Такий показник напруги є компромісним, оскільки він дає змогу скоротити значення струму порівняно з низьковольтними системами, але при цьому зберігає придатність для компактних мобільних установок. Ємність батареї встановлена на рівні 100 А·год, що еквівалентно енергоємності 14,4 кВт·год.

Рекомендовано використання літій-залізо-фосфатного акумулятора завдяки його високій термічній стійкості, значному ресурсу та підвищеному рівню безпеки у порівнянні з деякими іншими типами літій-іонних хімії. Необхідним компонентом є система керування батареєю (BMS), яка здійснює моніторинг напруги окремих елементів, температури, струмів зарядки та розрядки, а також балансування.

Силовий інвертор має бути обладнаний запасом за струмом та напругою. Для шини постійного струму з напругою 144 В доцільно використовувати силові ключі з максимально допустимою напругою від 200 В. Частота широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) встановлена в діапазоні 8–16 кГц, що дозволяє досягти оптимального компромісу між рівнем акустичного шуму, втратами на перемиканнях та якістю вихідного струму [3, 17, 18].

Контролер системи керування відповідає за обчислення за алгоритмом FOC (Field-Oriented Control) у режимі реального часу. До його функціоналу входять: перетворення Кларка та Парка, пропорційно-інтегральне (PI) регулювання струмів, формування задання для максимального крутного моменту (МТРА), просторово-

векторна ШІМ-модуляція (SVPWM), діагностика аварійних ситуацій, а також обмін даними з BMS та панеллю оператора.

Таблиця 2.3 – Параметри акумуляторної батареї та силового інвертора

Вузол	Параметр	Прийняте значення
АКБ	Номінальна напруга	144 В
АКБ	Ємність	100 А·год
АКБ	Енергоємність	14,4 кВт·год
АКБ	Максимальний розрядний струм	200–250 А
BMS	Контроль комірок, струму і температури	обов'язково
Інвертор	Напруга DC-шини	144 В
Інвертор	Фазний струм	до 250 А
Інвертор	Частота ШІМ	8–16 кГц
Контролер	Алгоритм керування	FOC + МТРА + FW

2.5. Розробка структурної схеми системи керування

Схематика системи управління побудована за принципом векторного контролю PMSM. Вхідний сигнал – це команда на швидкість чи момент, яка надходить від оператора або системи автоматичного управління. Наступний блок, що відповідає за вибір режиму, визначає, які обмеження та контури регулювання мають бути активними: чи то для транспортних, чи для бурових, або ж для сервісних застосувань.

Найбільш швидкодіючим є внутрішній контур, який регулює струм. Він зіставляє цільові та фактичні значення d- та q-складових струму, а PI-регулятори генерують необхідні значення напруг u_d та u_q . Зовнішній контур, який керує швидкістю, працює повільніше і формує команду на момент або q-складову струму.

Блок, відповідальний за оптимізацію енергоефективності, визначає оптимальні значення струмів i_d та i_q . У стандартному сценарії для PMSM поверхневого типу може бути прийнято $i_d = 0$. Однак, для двигунів із вбудованими магнітами рекомендується застосовувати метод МТРА. Якщо ж напруга на DC-

шині обмежена або швидкість обертання висока, активується режим послаблення поля.

SVPWM-модулятор трансформує задані значення напруг в керуючі сигнали для силових ключів інвертора. Перевагою SVPWM є ефективніше використання напруги DC-шини та знижений рівень гармонійних спотворень, якщо порівнювати з класичною синусоїдальною ШІМ [9, 10, 11].

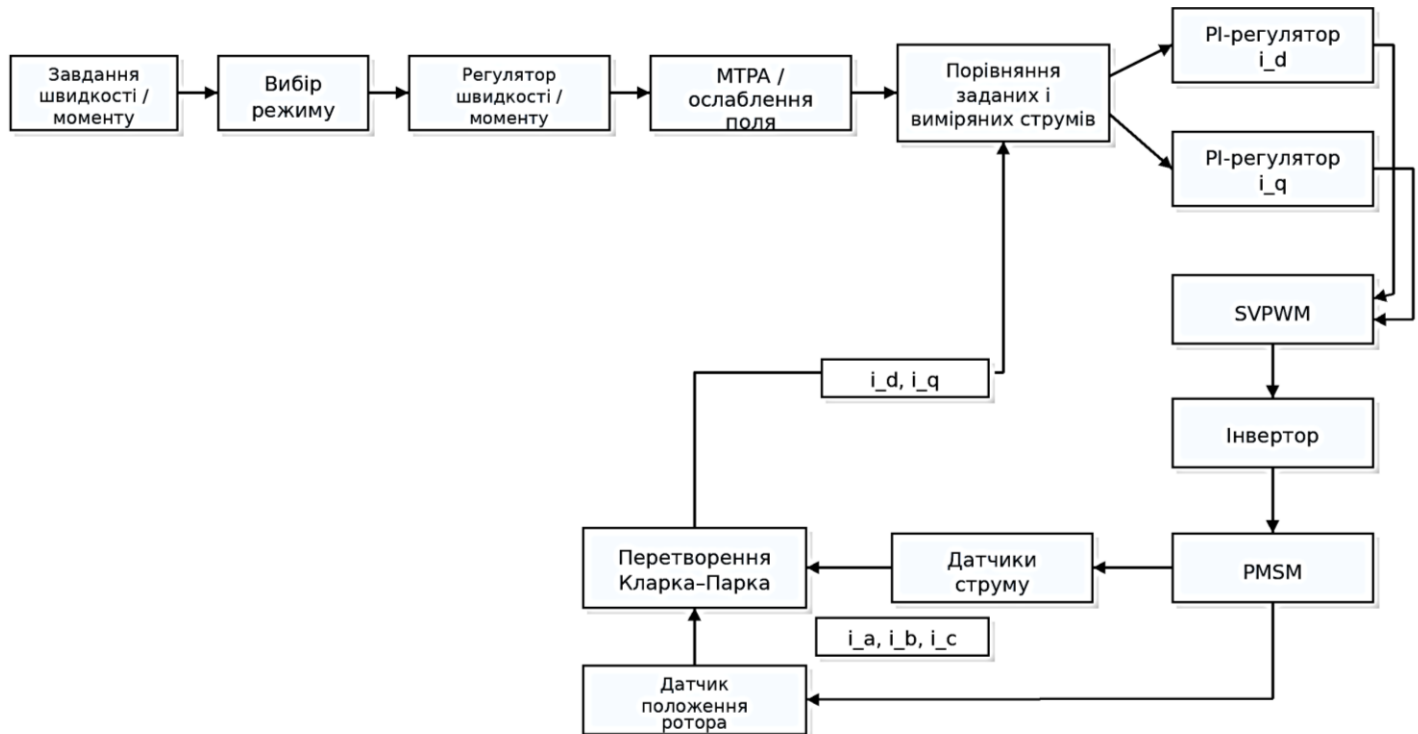


Рисунок 2.2 – Структурна схема векторного керування PMSM

2.6. Розробка електричної принципової схеми силової частини

Силова частина електричної схеми побудована з акумуляторної батареї, основного запобіжника, головного контактора, контуру попереднього заряджання, конденсатора шини постійного струму, трифазного інвертора, датчиків струму, датчика напруги та синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM). Кожна складова має свою специфічну роль у процесі передачі енергії та забезпеченні безпеки.

Основний запобіжник слугує для захисту акумуляторної батареї та силових кабелів від можливих коротких замикань. Головний контактор відповідає за роз'єднання силової частини у випадках аварійних ситуацій або після завершення експлуатації. Контур попереднього заряджання призначений для обмеження пускового струму під час заряджання конденсатора шини постійного струму під час підключення батареї [17, 18].

Конденсатор шини постійного струму сприяє зменшенню пульсацій напруги та створює запас енергії для інвертора. Трифазний інвертор складається з шести силових транзисторів, які генерують напруги на фазах А, В та С. Датчики струму інтегровані у фазні лінії або в нижні каскади інвертора.

В схемі має бути реалізовано як апаратні, так і програмні методи захисту від таких явищ, як перенапруга, зниження напруги, надмірний струм, перегрів інвертора, перегрів двигуна та втрата сигналу від датчика положення. При активації критичного захисного механізму система широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) вимикається, і головний контактор розмикається.

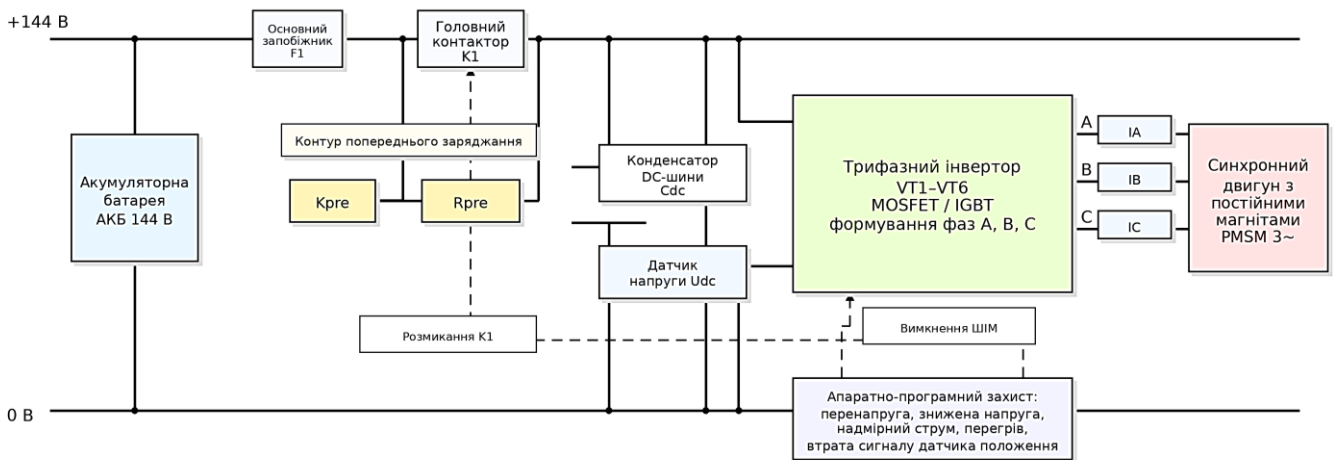


Рисунок 2.3 – Електрична принципова схема силової частини електропривода

2.7. Алгоритм роботи електропривода у транспортному та буровому режимах

Процес функціонування системи startує з автодіагностики керуючого пристрою. Відбувається перевірка стану акумулятора, системи управління батареєю (BMS), кнопки екстреної зупинки, сенсорів вимірювання струму, температури та визначення положення ротора. У випадку відсутності несправностей, проводиться попереднє наповнення енергією DC-шини, після чого активується головний контактор.

Коли силове обладнання готове до роботи, оператором обирається режим функціонування. В режимі переміщення пристрій генерує команду щодо необхідної швидкості руху та обмежує темп прискорення, аби запобігти різким поштовхам. В режимі буріння встановлюється цільова швидкість або величина моменту, що прикладається до бурового інструменту, а система керування стабілізує обраний показник.

Режим технічного обслуговування передбачений для контрольованого переміщення агрегату під час налагоджувальних робіт або проведення планового сервісу. В цьому режимі параметри швидкості та прикладеного моменту обмежуються програмно. Такий підхід зменшує ймовірність отримання травм персоналом при огляді системи [9, 10, 11, 16].

Окрема увага приділяється реалізації механізму захисту від ситуацій заклинювання. Якщо під час роботи в буровому режимі показник споживаного струму перевищує встановлену норму, а швидкість обертання падає нижче заздалегідь визначеного мінімального рівня, керуючий пристрій ідентифікує такий стан як заклинювання. У відповідь система знижує величину моменту, припиняє обертання і може виконати короткочасний рух у зворотному напрямку.

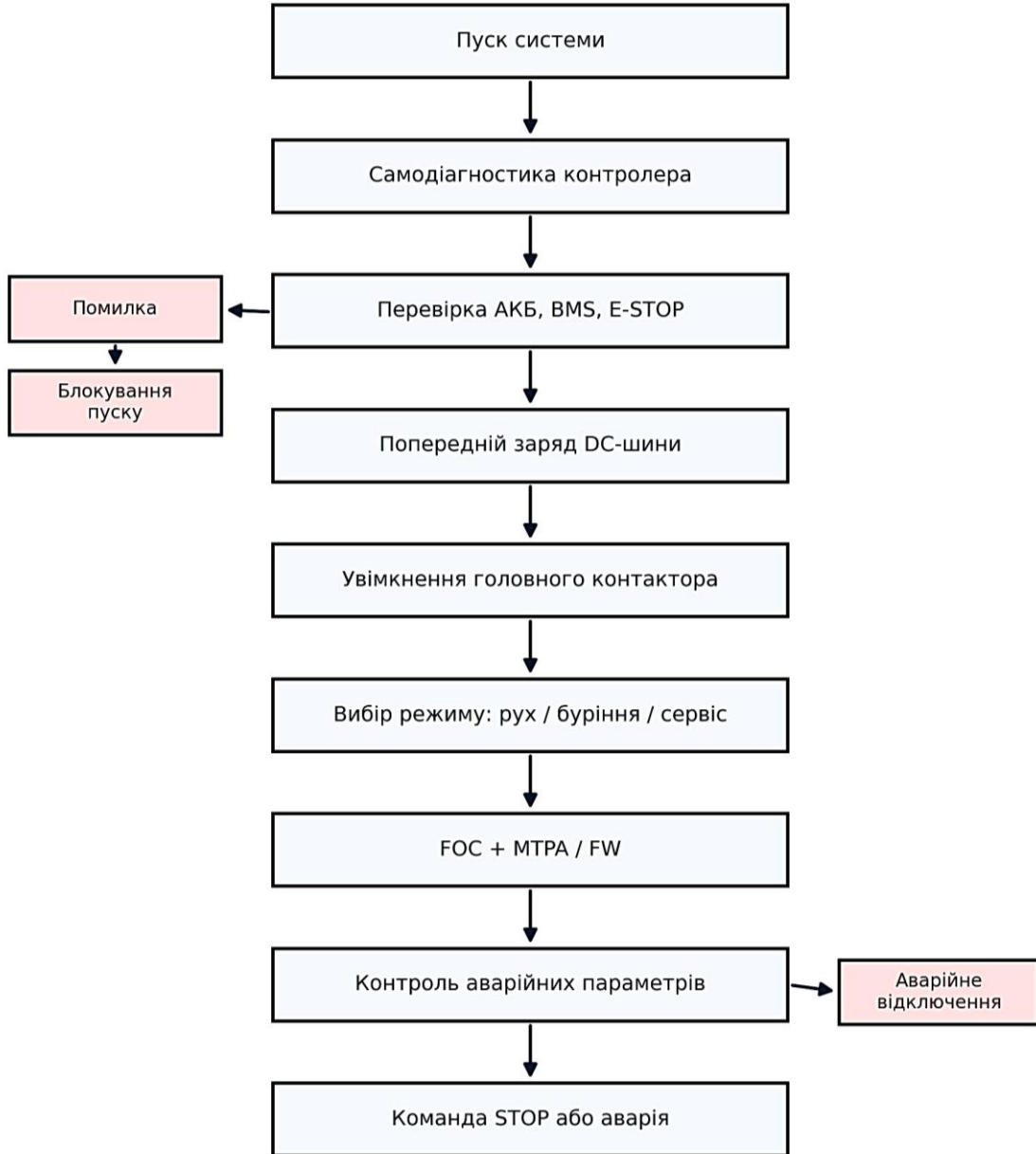


Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритму запуску та вибору режиму роботи

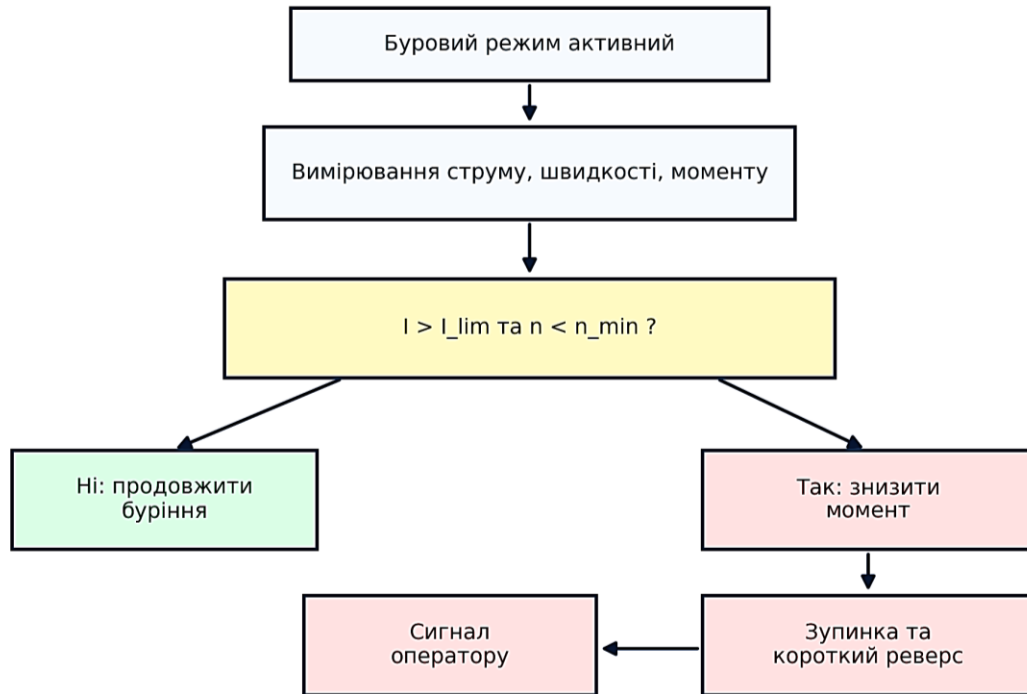


Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритму захисту від заклинювання бура

У розділі було поставлено технічне завдання для розробки системи керування двигуном PMSM, призначеної для рухомого транспортного засобу, обладнаного буровою установкою. Вибрано двигун з характеристиками 12 кВт, акумуляторну батарею на 144 В ємністю 100 А·год, а також інвертор, здатний витримувати фазний струм до 250 А. Створено функціональну структуру системи, розроблено структурну схему системи керування, підготовлено електричну принципову схему силової частини, а також визначено алгоритми роботи в режимах руху, буріння та технічного обслуговування.

3. РОЗРАХУНОК ТЯГОВО-БУРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

3.1. Розрахунок тягового навантаження пересувного транспортного засобу

Для визначення необхідної потужності електропривода виконаємо розрахунок тягового навантаження. Загальна сила опору руху визначається як сума сили опору коченню, сили опору підйому, сили інерції та аеродинамічного опору. Оскільки швидкість пересувної установки невелика, аеродинамічний опір має незначний вплив, проте для повноти розрахунку його враховано.

Прийнято масу транспортного засобу з обладнанням $m = 1200$ кг, прискорення вільного падіння $g = 9,81$ м/с², коефіцієнт опору коченню $f = 0,025$, максимальний ухил $\alpha = 10^\circ$, прискорення при рушанні $a = 0,3$ м/с² та радіус ведучого колеса $r_w = 0,28$ м.

$$F_{\Sigma} = F_f + F_i + F_a + F_w. \quad (3.1)$$

$$F_f = m \cdot g \cdot f \cdot \cos\alpha = 1200 \cdot 9,81 \cdot 0,025 \cdot \cos 10^\circ = 290 \text{ Н} \quad (3.2)$$

$$F_i = m \cdot g \cdot \sin\alpha = 1200 \cdot 9,81 \cdot \sin 10^\circ = 2044 \text{ Н} \quad (3.3)$$

$$F_a = m \cdot a = 1200 \cdot 0,3 = 360 \text{ Н} \quad (3.4)$$

$$F_w = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v^2 = 5,6 \text{ Н} \quad (3.5)$$

$$F_{\Sigma} = 290 + 2044 + 360 + 5,6 \approx 2700 \text{ Н}$$

Отримана сила опору показує, що найсуттєвішим компонентом є опір підйому [3, 8]. Це закономірно для малошвидкісної технологічної машини, де аеродинамічна складова майже не впливає на потужність, а ухил і маса визначають основне тягове навантаження.

$$M_w = \frac{F\Sigma \cdot r_w}{\eta t} = \frac{2700 \cdot 0,28}{0,90} = 840 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.6)$$

Необхідний момент на ведучих колесах становить приблизно 840 Н·м. За передатного числа редуктора $i = 12$ та ККД редуктора $\eta_r = 0,92$ момент на валу двигуна визначається як:

$$M_m = \frac{M_w}{i \cdot \eta_r} = \frac{840}{12 \cdot 0,92} = 76,1 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.7)$$

Це значення є короткочасним і відповідає режиму рушання або руху на ухилі. Воно не повинно бути постійним робочим режимом двигуна. Для обраного PMSM максимальний короткочасний момент 85–90 Н·м є достатнім, але система керування повинна обмежувати тривалість такого навантаження.

$$\omega_w = \frac{v}{r_w} = \frac{2,78}{0,28} = 9,93 \text{ рад/с} \quad (3.8)$$

$$\omega_m = i \cdot \omega_w = 12 \cdot 9,93 = 119,2 \text{ рад/с} \quad (3.9)$$

$$n_m = \frac{60 \cdot \omega_m}{2\pi} = 1138 \text{ об/хв} \quad (3.10)$$

$$P_m = M_m \cdot \omega_m = 76,1 \cdot 119,2 = 9072 \text{ Вт} \approx 9,1 \text{ кВт} \quad (3.11)$$

Отже, у розрахунковому транспортному режимі необхідна потужність на валу двигуна становить близько 9,1 кВт. Двигун номінальною потужністю 12 кВт має необхідний запас для роботи в таких умовах.

3.2. Розрахунок параметрів бурового навантаження

У процесі буріння ключовим показником виступає крутний момент, що передається на буровий інструмент. Це відрізняється від режиму транспортування, де момент зумовлюється масою та нахилом, адже під час буріння навантаження формується типом ґрунту, розмірами бура, глибиною отвору та загальним станом

інструментарію. Для здійснення розрахунків встановлено номінальний момент на бурі $M_b = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$ та піковий (короткочасний) момент $M_{b.\text{max}} = 400 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Частота обертання бура встановлюється на рівні $n_b = 120 \text{ об/хв}$. Такий вибір швидкості відповідає помірній інтенсивності буріння, що гарантує адекватний момент для роботи та запобігає надмірному зносу бурового інструмента. Кутова швидкість бура розраховується за загальноприйнятою формулою, що пов'язує частоту обертання за хвилину з кутовою швидкістю в радіанах за секунду.

$$\omega_b = 2\pi \cdot n_b / 60 = 2\pi \cdot 120 / 60 = 12,57 \text{ рад/с} \quad (3.12)$$

$$P_b = M_b \cdot \omega_b = 200 \cdot 12,57 = 2514 \text{ Вт} \approx 2,5 \text{ кВт} \quad (3.13)$$

$$P_{b.\text{max}} = M_{b.\text{max}} \cdot \omega_b = 400 \cdot 12,57 = 5028 \text{ Вт} \approx 5,0 \text{ кВт} \quad (3.14)$$

Номінальна потужність буріння становить приблизно 2,5 кВт, а короткочасна потужність при підвищеному моменті — близько 5 кВт. Це менше за номінальну потужність двигуна 12 кВт, однак за моментом режим може бути напруженим через необхідність значного зниження швидкості через редуктор.

$$M_{m.b} = \frac{M_b}{i_b \cdot \eta_b} = \frac{200}{5 \cdot 0,90} = 44,4 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (3.15)$$

$$M_{m.b.\text{max}} = \frac{M_{b.\text{max}}}{i_b \cdot \eta_b} = \frac{400}{5 \cdot 0,90} = 88,9 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (3.16)$$

Короткочасний момент у буровому режимі практично відповідає межі можливостей вибраного двигуна. Тому необхідно реалізувати програмне обмеження моменту, контроль температури та алгоритм антизаклинювання.

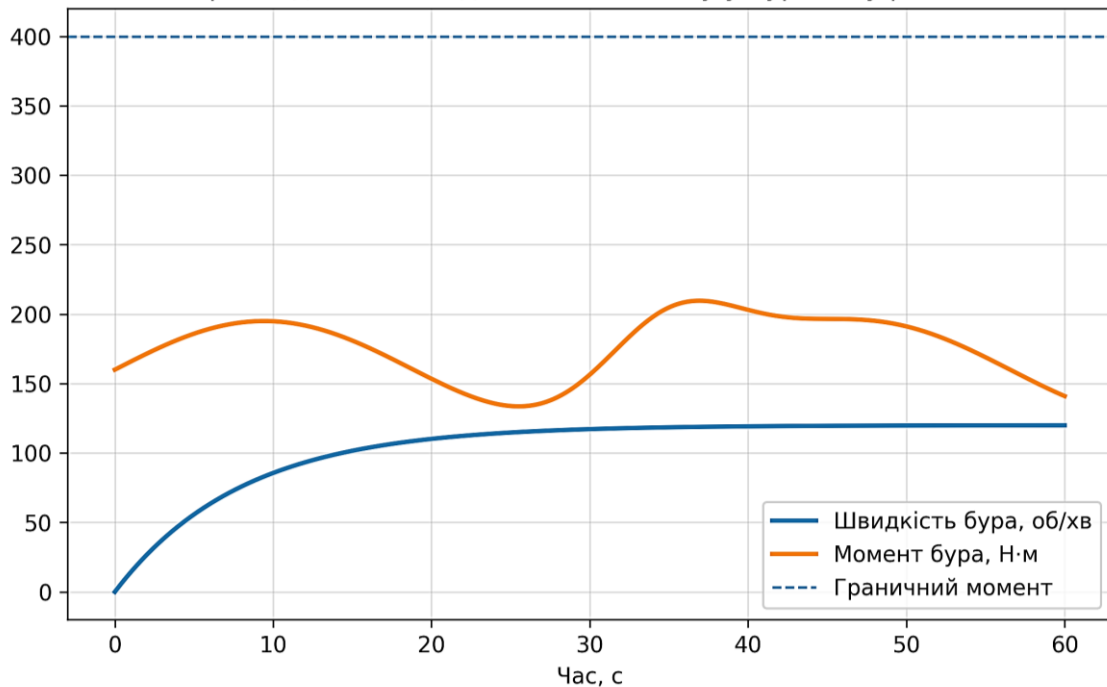


Рисунок 3.1 – Приклад зміни швидкості та моменту у буровому режимі

3.3. Вибір потужності, моменту та швидкості PMSM

Відповідно до результатів аналізу, для експлуатації в транспортному режимі необхідно близько 9,1 кВт потужності, тоді як для бурового режиму потребується від 2,5 до 5 кВт, що варіюється залежно від крутного моменту. Важливим фактором слід вважати не лише потужність, але й здатність витримувати короточасні пікові моменти. Отже, підбір PMSM (синхронного двигуна з постійними магнітами) має здійснюватися з урахуванням максимального допустимого моменту, теплових властивостей двигуна та його здатності до перевантажень.

Номінальний момент двигуна, розрахований при потужності 12 кВт і швидкості обертання 3000 об/хв, складає приблизно 38 Н·м. Цього показника достатньо для стабільної роботи за умов помірних навантажень. А показник короточасного моменту в діапазоні 85–90 Н·м забезпечує можливість початку руху на підйомі та подолання тимчасових збільшень опору при бурінні.

Для зменшення навантаження на двигун під час роботи в буровому режимі можливе підвищення коефіцієнта передачі бурового редуктора. Проте, надмірно висока передатне число може призвести до зниження максимальної швидкості бура, а також збільшити загальну масу механічної трансмісії. З огляду на це, обране значення передатного числа $i_b = 5$ являє собою оптимальний баланс для забезпечення заданого діапазону швидкостей.

Таблиця 3.1 – Порівняння розрахункових режимів роботи електропривода

Режим	Потужність	Момент на двигуні	Особливість
Рух по рівній поверхні	3–4 кВт	20–35 Н·м	економний режим
Рух на ухилі 10°	≈9,1 кВт	≈76 Н·м	короткочасний режим
Буріння номінальне	≈2,5 кВт	≈44 Н·м	стабілізація швидкості
Буріння з перевантаженням	≈5,0 кВт	≈89 Н·м	обмеження часу і моменту
Сервісний режим	до 1–2 кВт	обмежений	робота при ТО

3.4. Розрахунок параметрів силового інвертора

Інвертор потужності мусить забезпечувати живлення синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM) як у номінальному, так і в короткочасному режимах підвищеного навантаження. Процес розрахунку базується на потужності, величині струму на DC-шині, фазному струмі, напрузі силових ключів та ємності конденсатора DC-шини.

Витрачена з DC-шини потужність перевищує механічну потужність, що передається на вал, через наявність втрат у двигуні та інверторі. Для номінального режиму роботи беруться початкові значення коефіцієнта корисної дії (ККД) двигуна $\eta_m = 0,93$ та ККД інвертора $\eta_i = 0,97$.

$$P_{dc} = \frac{P_m}{\eta_m \cdot \eta_i} = \frac{12000}{0,93 \cdot 0,97} = 13296 \text{ Вт} \quad (3.20)$$

$$I_{dc} = \frac{P_{dc}}{U_{dc}} = \frac{13296}{144} = 92,3 \text{ А} \quad (3.21)$$

$$I_{dc.max} = \frac{20000}{144 \cdot 0,90} = 154 \text{ А} \quad (3.22)$$

З урахуванням динамічних режимів, пуску і короткочасного перевантаження інвертор доцільно вибрати з допустимим струмом DC-шини не менше 180–200 А. Фазний струм повинен мати запас до 250 А, що відповідає розрахунку максимального моменту двигуна [17].

$$C_{dc} \geq I_{dc} \cdot \Delta t / \Delta U = 100 \cdot 0,001 / 5 = 0,02 \text{ Ф} = 20000 \text{ мкФ} \quad (3.23)$$

Для практичної реалізації приймається конденсаторна батарея DC-шини 20000–30000 мкФ з напругою не менше 200 В. Також необхідно передбачити коло попереднього заряду, оскільки без нього підключення розрядженого конденсатора до батареї призведе до великого імпульсного струму.

3.5. Розрахунок ємності акумуляторної батареї

Визначення ємності акумулятора ґрунтується на аналізі енергетичних потреб протягом робочого циклу. У випадку мобільної бурової установки, цей цикл охоплює пересування до місця роботи, сам процес буріння, періодичні пікові навантаження, функціонування допоміжних систем, а також запас потужності для компенсації непередбачених втрат.

Розрахунок здійснюється з прицілом на приблизний час автономної роботи, який становить від 2 до 3 годин. Береться до уваги, що повний розряд акумуляторної батареї є недоцільним, оскільки це скорочує термін її служби та може спровокувати аварійне спрацьовування системи управління батареєю (BMS). Тому встановлюється максимальна допустима глибина розряду на рівні 80 %.

Таблиця 3.2 – Орієнтовний енергетичний баланс робочого циклу

Режим	Потужність, кВт	Тривалість, год	Енергія, кВт·год
Переміщення до робочої зони	4,0	0,5	2,0
Буріння у номінальному режимі	3,0	1,5	4,5
Короткочасні перевантаження	5,0	0,2	1,0
Допоміжні системи	0,5	2,2	1,1
Втрати та резерв	—	—	1,5
Разом	—	—	10,1

$$E_{\text{bat}} = E_{\text{cycle}} / \text{DOD} = 10,1 / 0,8 = 12,6 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.24)$$

$$E = U \cdot Q = 144 \cdot 100 = 14400 \text{ Вт}\cdot\text{год} = 14,4 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.25)$$

Отже, батарея 144 В, 100 А·год забезпечує робочий цикл із запасом. При цьому система керування повинна обмежувати потужність при зниженні SOC до 20 %, щоб запобігти глибокому розряду [14, 15].

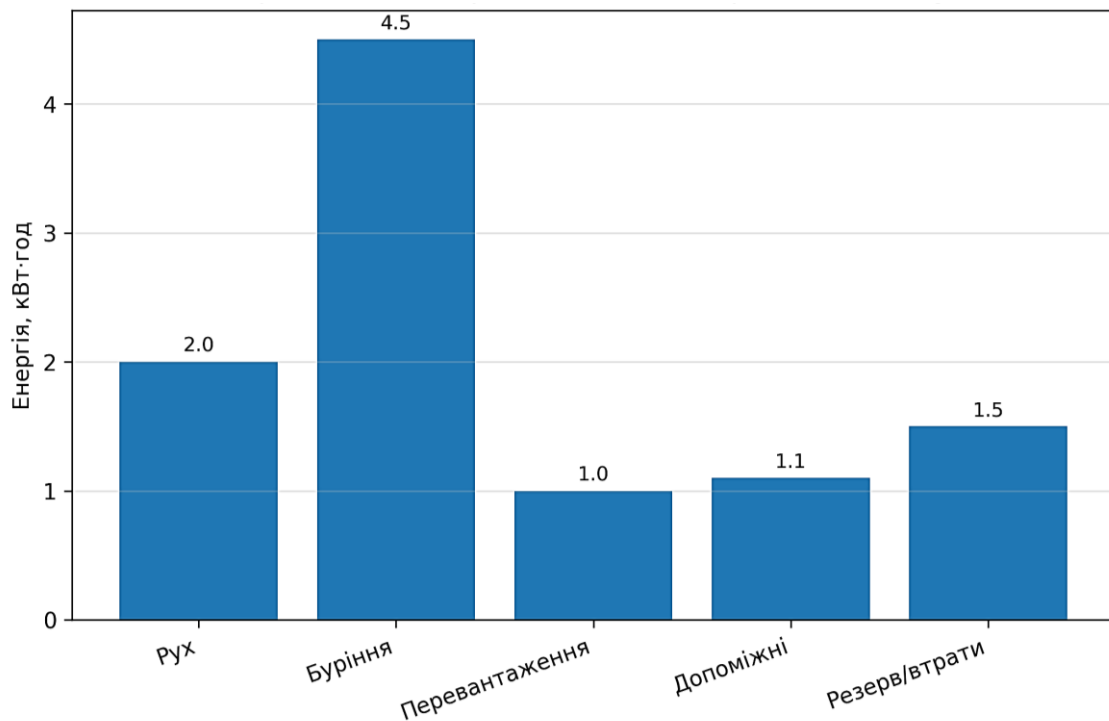


Рисунок 3.2 – Орієнтовний енергетичний баланс робочого циклу

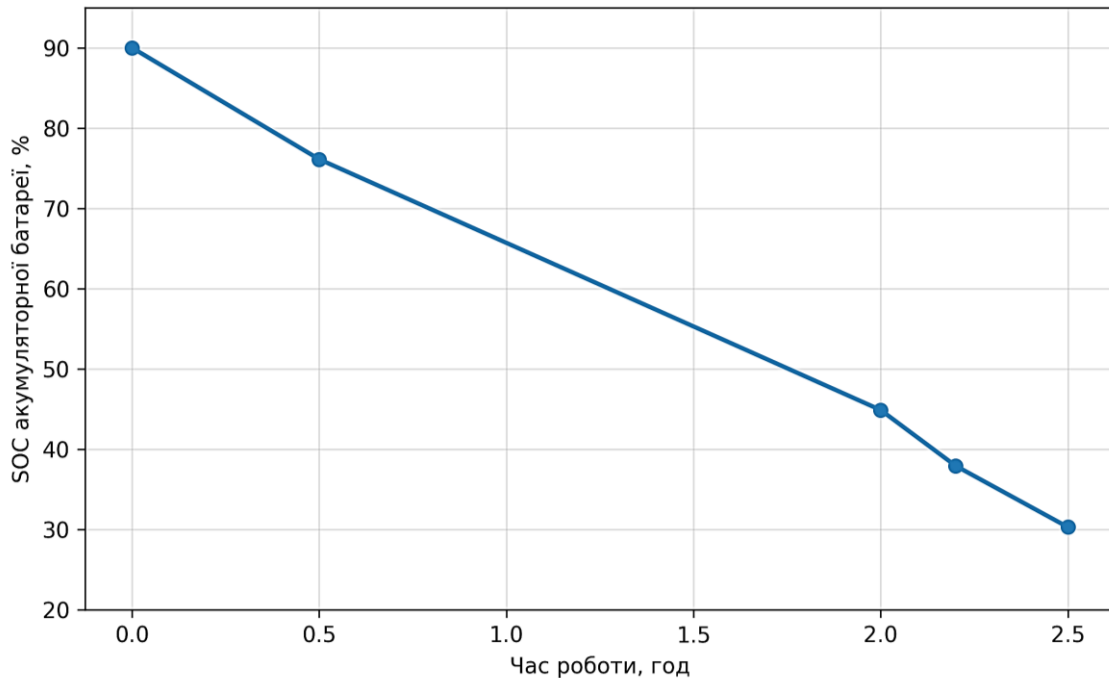


Рисунок 3.3 – Орієнтовна зміна SOC акумуляторної батареї протягом робочого циклу

3.6. Математична модель PMSM у координатах d-q

Для створення системи векторного керування застосовується математичне моделювання синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM) у системі координат d-q. Завдяки переходу до обертової системи координат, синусоїдальні значення фаз трансформуються у незмінні величини, що значно спрощує процес регулювання.

Рівняння напруг PMSM, представлені в системі координат d-q, включають в себе низку параметрів: активний опір обмотки статора, індуктивності вздовж осей d та q, електричну кутову швидкість обертання ротора, а також магнітний потік, що створюється постійними магнітами. Ці рівняння слугують фундаментальною базою для формування регуляторів струму та ефективної компенсації взаємних впливів електричних параметрів.

$$u_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_e \cdot L_q \cdot i_q \quad (3.25)$$

$$u_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot di_q/dt + \omega_e \cdot (L_d \cdot i_d + \psi_f) \quad (3.26)$$

$$M_e = 3/2 \cdot p \cdot [\psi_f \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q] \quad (3.27)$$

Для поверхневого PMSM, коли L_d приблизно дорівнює L_q , момент можна визначити наближено через q-складову струму:

$$M_e = 3/2 \cdot p \cdot \psi_f \cdot i_q \quad (3.28)$$

$$M_e = 1,5 \cdot 4 \cdot 0,055 \cdot i_q = 0,33 \cdot i_q \quad (3.29)$$

$$i_{q,nom} = 38 / 0,33 = 115 \text{ A}$$

$$i_{q,max} = 85 / 0,33 = 258 \text{ A}$$

Розрахунок підтверджує необхідність інвертора з короткочасним фазним струмом до 250–260 А. У тривалому режимі струм повинен бути нижчим, щоб не перевищувати допустиму температуру обмоток і силових ключів.

3.7. Методика формування сигналів керування за алгоритмом FOC

Алгоритм FOC розпочинається з вимірювання струмів у фазах. Як правило, для цього достатньо виміряти струми двох фаз, а третій струм обчислити, виходячи з припущення, що сума струмів у трифазній системі дорівнює нулю. Наступний крок – це застосування перетворення Кларка, яке трансформує трифазну систему координат у стаціонарну систему координат α - β .

Потім, використовуючи кут положення ротора, здійснюється перетворення Парка. Це дозволяє отримати складові струму i_d та i_q . Порівнявши фактичні значення цих струмів із заданими, блок PI-регуляторів генерує необхідні керуючі напруги u_d та u_q . Згодом виконується зворотне перетворення Парка, після чого

формується сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для керування інвертором.

Цільове значення для струму i_q визначається контуром керування швидкістю або моментом. Цільове значення для струму i_d задається модулем енергоефективного керування. У стандартному режимі роботи i_d може дорівнювати нулю. Режим максимального співвідношення крутного моменту до струму (МТРА) вимагає його оптимального розрахунку, а режим ослаблення поля призводить до від'ємного значення i_d .

У контексті бурових робіт є критично важливим, щоб регулятор швидкості не генерував надмірний крутний момент при раптових змінах навантаження. Тому, після самого регулятора швидкості, додається блок обмеження моменту та струму. Цей блок враховує такі фактори, як температура, стан заряду акумулятора (SOC) та ознаки блокування.

3.8. Розробка програмного алгоритму керування

Програмне забезпечення контролера повинно працювати у реальному часі та мати декілька рівнів періодичності. Найшвидший цикл виконує вимірювання струмів і регулювання $d-q$ складових. Повільніший цикл обробляє команди оператора, розраховує завдання швидкості, контролює температуру і напругу. Окремий діагностичний цикл відповідає за помилки та журнал подій.

У транспортному режимі програмний алгоритм формує плавний профіль швидкості. Це зменшує пікові струми, знижує механічні удари та підвищує комфорт керування. У буровому режимі пріоритетом є стабілізація швидкості бура і захист від перевищення моменту.

Нижче наведено спрощену логіку програмного алгоритму. Вона може бути реалізована на мікроконтролері, що має модулі ШІМ, аналого-цифрового перетворення, таймери, інтерфейси CAN або UART та апаратні входи аварійного відключення.

```

init_system();
check_bms();
check_sensors();
precharge_dc_bus();
close_main_contactor();
while (system_enabled) {
    read_operator_commands();
    read_currents();
    read_dc_voltage();
    read_rotor_position();
    read_temperatures();
    if (emergency_button || overcurrent || overtemperature || undervoltage) {
        disable_pwm();
        open_main_contactor();
        set_fault_state();
        break;
    }
    mode = select_mode();
    torque_ref = calculate_reference(mode);
    calculate_mtpa_or_field_weakening(torque_ref, speed_feedback, Udc);
    current_control_id_iq();
    svpwm_generate();
}

```

3.9. Оцінка енергоефективності запропонованої системи

Енергоефективність представленої системи аналізується шляхом порівняння стандартного методу керування із запропонованим векторним керуванням, що базується на принципі максимального крутного моменту на ампер (МТРА). У стандартному підході формування струмів відбувається без оптимізації, тоді як розроблений метод спрямований на досягнення потрібного моменту при мінімізації величини струму.

Величина втрат у міді прямо пропорційна квадрату струму. Якщо використання МТРА призводить до зниження середнього значення струму на 10 %, то втрати у міді скорочуються приблизно на 19 %. Загальне споживання енергії зменшується в меншій степені, зважаючи на наявність інших видів втрат: у сталі, інверторі, механічних втрат, а також споживання допоміжними пристроями. Тим не менше, вплив на тепловий режим є значним.

Зменшення струму також сприяє зниженню температури нагрівання акумуляторної батареї та силових ключових елементів, що, у свою чергу, покращує загальну надійність системи. Це особливо актуально для бурових робіт, де тривалі

періоди роботи з підвищеним навантаженням можуть швидко призвести до перегріву двигуна та інвертора. Таким чином, енергоефективне керування одночасно виконує функцію.

Таблиця 3.3 – Порівняння базового та енергоефективного режимів керування

Показник	Базове керування	FOC + МТРА + обмеження втрат
Середній струм	100 %	88–92 %
Мідні втрати	100 %	77–85 %
Нагрівання обмоток	вище	нижче
Пульсації моменту	середні	нижчі
Час автономної роботи	базовий	+5–10 %
Захист від заклинювання	обмежений	реалізований алгоритмічно

В межах цього розділу було проведено визначення тягового та бурового навантажень, як наслідок – підібрано оптимальні характеристики для синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM), інвертора та акумуляторного блоку. Встановлено, що двигун, який має номінальну потужність 12 кВт та піковий момент у діапазоні 85–90 Н·м, повністю задовольняє потреби мобільної бурової установки. Створено математичне моделювання PMSM у системі координат d-q, детально розглянуто алгоритм векторного керування (FOC) та здійснено оцінку енергоефективності розробленої системи управління.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз нормативних документів з охорони праці та електробезпеки

Експлуатація пересувного транспортного засобу з буровою установкою пов'язана з дією електричних, механічних, термічних, шумових, вібраційних та організаційних факторів. Тому під час розробки системи необхідно враховувати вимоги охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки та безпеки машин.

Нормативну основу складають законодавчі акти з охорони праці, правила безпечної експлуатації електроустановок, вимоги до електрообладнання машин, вимоги щодо безпеки рухомих механізмів та інструкції виробників силових компонентів. У практичній експлуатації важливо не лише мати технічні засоби захисту, але й забезпечити навчання персоналу та регулярний контроль стану обладнання.

Система охорони праці для такої установки повинна охоплювати аналіз небезпечних факторів, оцінювання ризиків, організаційні заходи, технічні заходи, інструктаж персоналу, контроль справності аварійних засобів та ведення журналів перевірки. Безпека повинна забезпечуватися як апаратними, так і програмними засобами [14].

4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

В процесі експлуатації мобільної бурової установки можуть проявлятися різноманітні небезпечні та шкідливі чинники. Серед електричних ризиків варто відзначити можливість ураження електричним струмом, виникнення короткого замикання, перегрівання силових кабелів, пошкодження ізоляційного покриття та несправності акумуляторної батареї. Механічні небезпеки пов'язані з обертовим буром, рухомими компонентами редуктора, ходовою частиною, а також ризиком перекидання самого механізму.

До шкідливих факторів відносяться акустичне забруднення (шум), вібраційний вплив, підвищена концентрація пилу, нагрівання силових компонентів та значне фізичне навантаження на оператора. При бурінні сухих ґрунтів утворюється будівельний пил, що може призводити до подразнення дихальних шляхів. Вібрація здатна негативно впливати на точність виконання робіт, а також викликати швидку втоми у людини, яка керує установкою.

Найбільш критичними аварійними сценаріями вважаються: заклинювання бурового інструменту, коротке замикання в електричному силовому контурі, перегрів акумулятора або інвертора, некоректна робота датчика положення ротора, а також несподіване самовільне переміщення установки. Для кожного з зазначених небезпечних режимів роботи обов'язковою є наявність передбаченої технічної реакції системи.

Таблиця 4.1 – Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

Фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки
Ураження електричним струмом	АКБ, інвертор, кабелі	травма, опік, небезпечний вплив на організм
Коротке замикання	пошкодження ізоляції, волога	пожежа, вихід з ладу обладнання
Обертіві частини	вал, редуктор, бур	захоплення одягу, травмування
Заклинювання бура	тверді включення у ґрунті	різке зростання моменту, руйнування механізму
Шум і вібрація	буріння, редуктор	втома, зниження уваги
Пил	буріння сухого ґрунту	подразнення органів дихання
Перегрівання	двигун, інвертор, батарея	відмова, пожежний ризик
Нестійкість платформи	нерівна поверхня, ухил	перекидання, травмування

4.3. Організаційні заходи безпеки

Дозволяється працювати з мобільною буровою установкою лише тим, хто пройшов належне навчання, пройшов інструктаж з техніки безпеки та уважно ознайомився з посібником з експлуатації. Оператор повинен досконало володіти процедурами запуску, вибору робочих режимів, екстреної зупинки, процесом заряджання акумулятора та регламентом технічного обслуговування.

Перед початком будь-яких робіт обов'язково слід ретельно оглянути акумуляторну батарею, всі силові кабелі та їхні з'єднання, буровий інструмент, редуктор, колеса, захисні кожухи, а також переконатися у справності кнопки аварійної зупинки. Категорично забороняється експлуатація установки, якщо виявлено пошкодження ізоляції, несправність аварійної кнопки або відсутність захисних кожухів.

Територія, де проводитимуться бурові роботи, має бути абсолютно вільною від будь-яких сторонніх предметів. Не допускається присутність сторонніх осіб поблизу зони роботи бурового інструменту. Перед початком буріння необхідно переконатися у відсутності будь-яких підземних комунікацій, кабелів, трубопроводів або інших інженерних мереж, які можуть бути пошкоджені.

Оператор установки зобов'язаний використовувати індивідуальні засоби захисту: бачити захисні окуляри, надіти робочі рукавиці, спецвзуття, шолом, використовувати засоби захисту органів слуху, а також респіратор під час виконання робіт, пов'язаних з утворенням пилу. Після завершення запланованих робіт установку необхідно вимкнути, привести до безпечного стану та провести ретельний огляд на предмет виявлення будь-яких пошкоджень.

4.4. Технічні заходи безпеки

Безпека експлуатації установки передбачає впровадження технічних рішень як у саму конструкцію, так і в систему керування. Ключові елементи цієї системи включають головний запобіжник, головний контактор, ланцюг попереднього

заряду, кнопку екстреної зупинки (STOP), сенсори контролю струму, напруги та температури, захисні кожухи для рухомих частин, а також програмні обмеження робочих параметрів.

Для захисту від перевантаження струмом передбачено дворівневий контроль. Перший рівень, програмний, обмежує максимальний момент, який може бути прикладений. Другий, апаратний рівень, відповідає за вимкнення силових ключів у випадку критичного перевищення струму. Це двоетапне рішення значно підвищує надійність системи, унеможливаючи залежність виключно від програмного забезпечення.

Термозахист є обов'язковим для двигуна, інвертора та акумуляторної батареї. За умови наближення температури до гранично допустимого показника, система має знижувати крутний момент або потужність. При досягненні критичних температурних значень здійснюється аварійне вимкнення.

Захисні кожухи повинні надійно прикривати небезпечні рухомі елементи, такі як вали, з'єднувальні муфти, ременні або ланцюгові приводи, а також компоненти редукторів. Оскільки буровий інструмент неможливо повністю закрити, навколо нього має бути встановлена чітко визначена зона підвищеної небезпеки, вхід до якої під час роботи інструменту суворо заборонений.

4.5. Заходи пожежної безпеки та безпеки в аварійних режимах

Ризик виникнення пожежі може бути спричинений коротким замиканням, перегрівом силових кабелів, несправною роботою інвертора, пошкодженням акумуляторного блоку або недотриманням правил зарядки. Для мінімізації цих ризиків слід використовувати запобіжники, кабелі відповідного перерізу, систему управління батареєю (BMS), контроль температури та ефективну вентиляцію силового відсіку.

Заряджання акумуляторного блоку слід здійснювати виключно за допомогою призначеного для цього зарядного пристрою. Забороняється проводити зарядку поблизу легкозаймистих речовин або якщо кабелі мають видимі пошкодження. У разі виявлення запаху перегріву, диму, іскріння або сповіщення від BMS про несправність зарядки, процес слід негайно припинити.

Аварійні ситуації повинні передбачати чітку реакцію системи. При активації кнопки аварійної зупинки відбувається вимкнення ШІМ-регулятора та розмикання головного контактора. У разі втрати сигналу від датчика положення PMSM, система блокується, оскільки без точних даних про кут ротора векторне управління може працювати некоректно. При заклинюванні бура обертання припиняється, і оператору надсилається відповідний сигнал.

Таблиця 4.2 – Аварійні режими та дії системи захисту

Аварійний режим	Ознака	Дія системи
Перевищення струму	$I > I_{max}$	вимкнення ШІМ, повідомлення оператора
Перегрівання двигуна	$T_m > T_{lim}$	зниження моменту або зупинка
Перегрівання інвертора	$T_i > T_{lim}$	обмеження струму, аварійне вимкнення
Зниження напруги батареї	$U < U_{min}$	обмеження потужності, зупинка
Заклинювання бура	високий струм і мала швидкість	зупинка, реверс, сигналізація
Аварійна кнопка	сигнал E-STOP	негайне вимкнення інвертора і контактора
Втрата датчика положення	недостовірний сигнал	блокування керування PMSM

В розділі досліджено ключові аспекти безпеки робіт під час експлуатації мобільного бурового комплексу. Виявлено небезпечні та шкідливі чинники, сформульовано пропозиції щодо організаційних та технічних превентивних заходів, а також надано опис поведінки системи в кризових ситуаціях. Серед першочергових засобів мінімізації загроз виділено аварійне вимкнення, систему

управління акумуляторною батареєю (BMS), захисні механізми від перевантаження по струму, контроль температури, фізичні захисні екрани та програмне обмеження крутного моменту.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі було досліджено енергоефективний блок керування для синхронного двигуна з постійними магнітами, призначеного для використання в пересувних бурових установках. Актуальність дослідження пояснюється необхідністю підвищення продуктивності автономних мобільних машин, що функціонують в умовах змінних навантажень.

Перший розділ присвячено аналізу сучасних електроприводів, що застосовуються у мобільних технологічних машинах. Зокрема, підкреслюється доцільність використання синхронних двигунів з постійними магнітами (PMSM) завдяки їх високому коефіцієнту корисної дії (ККД), компактним розмірам, значній питомій потужності та можливості точного регулювання крутного моменту та швидкості.

У другому розділі було сформульовано технічне завдання для електромеханічної системи. Прийнято ключові параметри установки: вагова категорія – 1200 кг, максимальна швидкість – 10 км/год, номінальна напруга шини постійного струму – 144 В, ємність акумуляторної батареї – 100 А·год. Передбачено використання PMSM із потужністю 12 кВт та інвертора, здатного витримувати фазний струм до 250 А. Розроблено функціональну, структурну та електричну схеми системи.

Третій розділ містить розрахунки тягового та бурового навантаження. Встановлено, що для руху під ухилом у 10° вимагається потужність приблизно 9,1 кВт, а для процесу буріння – від 2,5 до 5 кВт, залежно від рівня навантаження. Обґрунтовано вибір конкретних моделей двигуна, інвертора та акумуляторної батареї. Також розроблено математичну модель PMSM у системі координат d-q.

Запропонована система керування побудована на принципах векторного керування, включаючи оптимізацію кута максимального крутного моменту (МТРА), послаблення поля та захист від заклинювання бура. Такий підхід дозволяє

зменшити струмове навантаження, мінімізувати мідні втрати, покращити температурний режим роботи та продовжити час автономної роботи установки.

У четвертому розділі розглядаються питання охорони праці, електробезпеки та пожежної безпеки. Представлено організаційні та технічні заходи, спрямовані на зниження потенційних ризиків під час експлуатації розробленої установки. Отримані результати можуть слугувати основою для подальшого моделювання, створення прототипу або проектування мобільної електрифікованої бурової установки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матеріали ХІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період» (91-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. 300 с. URL: <https://sds.kname.edu.ua/kafedra/sklad/zdobutky/530-iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovatsijni-tehnologiji-v-svitlotekhnitsi-ta-elektroenergetitsi>
2. Krishnan R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. Boca Raton : CRC Press, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420014235>
3. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River : Prentice Hall PTR, 2002. 711 p. ISBN 978-0130167439. URL: <https://books.google.com/books/about/Modern Power Electronics and AC Drives.htm?id=QWnHQgAACAAJ>
4. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford : Oxford University Press, 1998. 760 p. ISBN 978-0198564652. URL: <https://global.oup.com/academic/product/sensorless-vector-and-direct-torque-control-9780198564652>
5. Pillay P., Krishnan R. Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives. Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive. IEEE Transactions on Industry Applications. 1989. Vol. 25, No. 2. P. 265–273. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.25541>
6. Jahns T. M., Kliman G. B., Neumann T. W. Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives. IEEE Transactions on Industry Applications. 1986. Vol. IA-22, No. 4. P. 738–747. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504786>
7. Morimoto S., Sanada M., Takeda Y. Wide-Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-Performance Current Regulator. IEEE

Transactions on Industry Applications. 1994. Vol. 30, No. 4. P. 920–926. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.297908>

8. Chau K. T. Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application. Singapore : Wiley-IEEE Press, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118752555>

9. MathWorks. PMSM Field-Oriented Control. Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/pmsmfieldorientedcontrol.html>

10. Zambada J. AN1078: Sensorless Field Oriented Control of a PMSM using a Sliding Mode Observer. Microchip Technology Inc., 2015. URL: <https://www.microchip.com/en-us/application-notes/an1078>

11. Akin B., Bhardwaj M., Warriner J. Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors. Texas Instruments Application Report SPRABY9. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/spraby9>

12. Bourgoyne Jr. A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E., Young Jr. F. S. Applied Drilling Engineering. SPE Textbook Series. Vol. 2. Richardson : Society of Petroleum Engineers, 1986. URL: <https://onepetro.org/books/book/32/Applied-Drilling-Engineering>

13. Boldyrev G. G., Novichkov G. A. Evaluation of Tip Resistance to Auger Drilling. URL: https://www.issmge.org/uploads/publications/25/26/ISC5_177.pdf

14. Manthiram A. A Reflection on Lithium-Ion Battery Cathode Chemistry. Nature Communications. 2020. Vol. 11. Article 1550. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15355-0>

15. IEC 62619:2022. Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes — Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64073>

16. ISO 12100:2010. Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction. URL: <https://www.iso.org/standard/51528.html>

17. IEC 60204-1:2016. Safety of machinery — Electrical equipment of machines — Part 1: General requirements. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/26037>
18. IEC 61800-5-1:2022. Adjustable speed electrical power drive systems — Part 5-1: Safety requirements — Electrical, thermal and energy. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62103>
19. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12>
20. Кодекс законів про працю України від 10.12.1971 № 322-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/322-08>
21. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0093-98>
22. Правила пожежної безпеки в Україні : наказ МВС України від 30.12.2014 № 1417. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0252-15>