УДК [621.3+622.233.6]:681.3
№ держреєстрації 0110U000530
Інв. №

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«Національний гірничий університет»
(Державний ВНЗ «НГУ»)

49005, м. Дніпропетровськ, пр. К.Маркса 19;
тел./факс (0562) 47-32-09, телекс 143457 «AGAT SU»;
E-mail: Shevchsergey@gmail.com

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор,
д-р техн. наук, проф.

_____П.І. Пілов
«____»_____2011 р.

ЗВІТ

з науково-дослідної роботи

ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК ЕНЕРГОЄМНИХ ВИРОБНИЦТВ

ГП-437

(заключний)

Начальник НДЧ,
канд. техн. наук, доцент Р.О. Дичковський

Проректор з наукової роботи,
зав. кафедри електропривода,
науковий керівник теми,
д-р техн. наук, проф. О.С. Бешта

2011

Рукопис закінчено «09» грудня 2011 р.

Результати роботи розглянуті науково-технічною радою. Протокол №3 від 12.12.2011 р.

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 222 стор., 81 рис., 17 табл., 74 джерел, 3 додатки.

Об’єкт досліджень: енергетичні процеси в електротехнічних комплексах і промислових механізмах гірничо-металургійного комплексу.

НДР присвячена розробці ефективних способів керування та методів оптимізації режимів роботи електроприводів для зменшення втрат електричної енергії та покращення її якості при підвищенні рівня експлуатаційної надійності систем електропостачання технологічних комплексів гірничих підприємств.

Визначені джерела енергозбереження в комплексі шахтного водовідливу. Встановлено,мінімальне енергоспоживання забезпечується при відповідності напірних характеристик насосних агрегатів і мережі водовідливу.

Розроблені методи контролю складових струму однофазного замикання на землю розподільних мереж без зняття робочої напруги, на цій основі розроблені закони і алгоритми компенсації миттєвих значень неактивних складових повної потужності та складових струму однофазного замикання на землю.

Визначений характер зміни частоти обертання бурового інструмента в часі, на цій основі розроблені закони керування електроприводом змінного струму за мінімумом втрат в умовах змінних навантажень та частот обертання бурового верстату.

За рахунок застосування сучасних технологій та науково-обґрунтованих рішень зменшуються втрати електроенергії, підвищуються показники її якості та рівень експлуатаційної надійності і електробезпеки електроустаткування.

Ключові слова: ЕНЕРГОЄМНЕ ОБЛАДНАННЯ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, ШАХТНИЙ ВОДОВІДЛИВ, БУРОВІ ВЕРСТАТИ

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник теми, головний науковий співробітник, д-р техн. наук, професор каф. електропривода	О.С. Бешта (розділ 1)
Провідний науковий співробітник, к.т.н, професор каф. електропривода	М.М. Казачковський (розділ 4)
Старший науковий співробітник, к.т.н, професор каф. електропривода	А.А. Колб (підрозділ 4.2)
Старший науковий співробітник, к.т.н., доцент каф. електропривода	О.В. Балахонцев (підрозділ 1.9)
Старший науковий співробітник, к.т.н., доцент каф. електропривода	О.А. Яланський (підрозділ 1.8)
Старший науковий співробітник асистент каф. електропривода	С.С. Худолій (підрозділ 1.5)
Старший науковий співробітник асистент каф. електропривода	Є.Г. Худий (підрозділ 1.4)
Старший науковий співробітник асистент каф. електропривода	Д.В. Якупов (підрозділи 4.4-4.7)
Старший науковий співробітник	І.І. Пельтек (підрозділ 1.7)

Молодший науковий співробітник асистент каф. електропривода	А.О. Сьомін (підрозділ 4.3)
Молодший науковий співробітник каф. електропривода	Куваєв М.В. (підрозділ 1.2)
Молодший науковий співробітник	В.В. Ленда (підрозділ 1.3)
Молодший науковий співробітник, асистент каф. електропривода	А.І. Прохоров (підрозділ 1.6)
Інженер 1 категорії	М.В. Рибалкін (підрозділ 1.1)
Молодший науковий співробітник	І.О. Єрмолаєв (підрозділ 1.10)
Керівник розділу, д-р техн. наук, професор каф. відновлюваних джерел енергії	Ф.П. Шкрабець (розділ 2)
Старший науковий співробітник, к.т.н., доцент каф. відновлюваних джерел енергії	Д.В. Ципленков (підрозділи 2.6,2.7)
Старший науковий співробітник, к.т.н., доцент каф. відновлюваних джерел енергії	А.А. Колб (розділ 3)
Старший науковий співробітник, к.т.н., доцент каф. відновлюваних джерел енергії	О.В. Остапчук (підрозділи 2.4, 2.5)

Старший науковий співробітник, ст. викладач, каф. відновлюваних джерел енергіїї	А.М. Гребенюк (підрозділи 2.3, 2.8)
Науковий співробітник каф. відновлюваних джерел енергіїї	Є.П. Місяць (підрозділ 2.2)
Молодший науковий співробітник каф. відновлюваних джерел енергіїї	М.С. Кириченко (підрозділ 2.1)
Головний науковий співробітник, Д-р техн. наук, професор каф. техніки розвідки родовищ корисних копалин	А.О. Кожевников (розділ 5)
Провідний науковий співробітник, к.н.т., доцент каф. метрології та інформаційно-вимірювальних технологій	В.С. Хілов (підрозділи 5.4-5.9)
Молодший науковий співробітник	О.А. Борисевич (підрозділ 5.1)
Молодший науковий співробітник	О.П. Бельчицкий (підрозділ 5.3)
Молодший науковий співробітник	І.І. Журко (підрозділ 5.2)

В роботі також приймали участь: Ярошенко Ю.І. студ.,Чечельницький А.О. студ.

Нормоконтролер Л.С. Шломіна

ЗМІСТ

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНИХ ВОДОВІДЛИВНИХ УСТАНОВОК 9

1.1 Призначення, класифікація й устрій водовідливних установок 9

1.2 Параметрі та характеристики компонентів водовідливу 13

1.3 Дослідження роботи насосних агрегатів на спільну мережу 18

1.4 Калібрування технічних засобів вимірювання гідравлічних параметрів 21

1.5 Розробка моделі для опису гідравлічного режиму роботи шахтної водовідливної установки 25

1.6 Призначення та мета створення системи АСУВ 31

1.7 Критерій управління та постановка задачі управління 32

1.8 Вимоги до системи управління 34

1.8.1 Вимоги до структури та функціонування системи 34

1.8.2 Вимоги до надійності 37

1.9 Алгоритми функціонування комплексу водовідливу 37

1.9.1 Алгоритм визначення поточних параметрів насосних агрегатів .. 37

1.9.2 Алгоритм класифікації та групування насосних агрегатів за мінімумом негативного взаємного впливу 41

1.9.3 Алгоритм автоматизованого предпікового включення насосних агрегатів 46

1.9.4 Алгоритм автоматизованого управління продуктивністю при групуванні насосних агрегатів 53

1.10 Висновки до розділу 1 60

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМУ НЕЙТРАЛІ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ ТА ХАРАКТЕРУ ПОШКОДЖЕННЯ НА КРАТНІСТЬ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ ТА РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З МІНІМІЗАЦІЇ ЗНАЧЕНЬ АВАРІЙНИХ СТРУМІВ ЗАМИКАННЯ І ОБМЕЖЕННЮ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 61

2.1 Види і характеристика замикань на землю в розподільних мережах напругою 6 – 10 кВ 61

2.2 Перехідні процеси у розподільних мережах при замиканнях на землю . 63

2.3 Вплив режиму нейтралі на рівень перенапруг при замиканнях на землю 70

2.4 Основні критерії оцінки режиму нейтралі кар'єрних розподільних мереж напругою 6 – 35 кВ 77

2.5 Оцінка ефективності режимів нейтралі для умов кар'єрних розподільних мереж 80

2.6 Включення резистора в нейтраль мережі з дугогасним реактором..... 86

2.7 Розробка рекомендацій з вибору і реалізації режимів заземлення нейтралі розподільних мереж кар'єрів 91

2.8 Висновки по розділу 2..... 97

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ СИЛОВИХ АКТИВНИХ КОМПЕНСАТОРІВ В ПРИВОДАХ З ЄМНІСНИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НАКОПИЧУВАЛЬНИХ ЄМНОСТЕЙ ДЛЯ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ У ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА 99

Висновки до розділу 3..... 111

4 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З РЕЛЕЙНО-ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННННЯМ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У РЕЖИМІ СТАБІЛІЗАЦІЇ МОМЕНТУ... 112

4.1 Загальна характеристика..... 112

4.2 Розробка і дослідження моделей асинхронного частотно-керованого електропривода з релейно-векторним керуванням 113

4.2.1 Вибір системи координат для побудови моделі двигуна 113

4.3 Синтез системи регулювання асинхронним електроприводом з векторним релейним регулятором струму..... 118

4.4 Синтез регулятора швидкості..... 122

4.5 Синтез регулятора потокозчеплення ротора..... 123

4.6 Моделювання..... 124

4.7 Висновки до розділу 4..... 132

5 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВНОРЕГУЛЬОВАНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ БУРОВИХ ВЕРСТАТІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БУРІННЯ ВИБУХОВИХ СВЕРДЛОВИН НА КАР'ЄРАХ..... 133

5.1 Імпульсна технологія буріння 133

5.1.1 Аналіз процесу руйнування гірських порід при стаціонарній і імпульсній технологіях буріння 133

5.1.2 Класифікація імпульсних технологій буріння 136

5.2 Способи буріння свердловин с імпульсним обертанням інструменту.. 137

5.2.1 Класифікація способів буріння с імпульсним обертанням інструменту..... 137

5.2.2 Визначення характеру зміни частоти обертання бурового інструмента в часі..... 145

5.2.3 Дослідження аплітудно-частотних характеристик способів буріння з імпульсним обертанням бурового інструменту 153

5.3 Розробка задавача імпульсного обертання електромеханічної системи 164

5.3.1 Обґрунтування алгоритму роботи задавача імпульсного обертання електромеханічної системи 164

5.3.2 Розробка алгоритму роботи задавача імпульсного обертання електромеханічної системи 165

5.3.3 Розробка блок-схеми алгоритму функціонування задавача імпульсного обертання електромеханічної системи 167

5.3.4 Розробка структурної, функціональної й принципової схеми задавача імпульсного обертання електромеханічної системи 169

5.3.5 Моделювання процесів в замкненому електроприводі постійного струму з задавачем імпульсного обертання електромеханічної системи 172

5.4 Розробка рекомендацій на створення задавача імпульсного обертання електромеханічної системи 182

5.5 Макет задавача імпульсного обертання електромеханічної системи 183

5.6 Дослідження імпульсно-регульованого електроприводу бурового верстату 185

5.7 Експериментальне визначення потужності та енергоємності процесу руйнування гірських порід при бурінні з імпульсної частотою обертання бурового інструменту 187

5.8 Розробка рекомендацій для створення регульованого привода з задавачем імпульсного обертання електромеханічної системи 191

5.9 Висновки до розділу 5 197

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 200

ДОДАТОК А Звіт про патентні дослідження 208

ДОДАТОК Б Витяг з протоколу засідання секції Науково-технічної ради університету за напрямком "Проблеми гірничої та металургійної електроенергетики, енергозбереженн" 219

ДОДАТОК В Рецензія на науково-дослідну роботу 221

ДОДАТОК Г АКТ про впровадження результатів наукової роботи ГП-437 222

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНИХ ВОДОВІДЛИВНИХ УСТАНОВОК

Водовідливні установки є одними з основних споживачів електроенергії на шахті. Розгалуженість гідросистеми шахтних вод, розміщення насосних станцій на різних горизонтах і велика віддаленість їх один від одного ускладнюють контроль продуктивності і енергоспоживання водовідливних установок, без чого неможлива розробка і реалізація енергозберігаючих заходів на підприємстві.

Надійність і енергетична ефективність устаткування шахтних водовідливних установок – найважливіший показник, який значною мірою визначає економічні показники всього гірничого підприємства. Насосне обладнання вітчизняних шахт характеризується великим ступенем зношеності, високою аварійністю, відсутністю, в більшості випадків, засобів управління електроприводами і запірно-регулюючої арматури як в експлуатаційних, так і в аварійних режимах. Це призводить до підвищених навантажень в гідротранспортної системі, гідроударам, вібраціям, поривам трубопроводу і іншим аварійним ситуаціям. Таким чином, перспективним і важливим питанням є розробка раціональних систем електроприводів насосів, енерго- та ресурсозберігаючих технологій управління і гідрозахисту насосних комплексів, що, в свою чергу, дозволить підвищити надійність, енергоефективність і економічність всього комплексу шахтного водовіливу.

Метою представленого етапу науково-дослідних робіт є розробка варіантів підвищення енергоефективності комплексу шахтного водовідливу.

1.1 Призначення, класифікація й устрій водовідливних установок

По характеру взаємодії з відкачуваною рідиною у складі будь-якої водовідливної установки виділяють два головні елементи: силовий насосний, або вакуум-насосний агрегат, і трубопровідну (зовнішню) мережу – систему каналів, по яких рідина переміщається від водозбірних споруд до водовідвідних.

Поступаючи в насос, рідина отримує необхідний запас енергії, який витрачається при її переміщенні в каналах зовнішньої мережі.

До складу водовідливної установки для забезпечення необхідної надійності і ефективності роботи основного устаткування, входять також наступні елементи:

– пускорегулювальна і запобіжна арматура;
– контрольно-вимірювальна апаратура;
– системи ручного і автоматичного керування приводом насоса.

За призначенням водовідливні установки підрозділяють на головні (центральні), допоміжних (дільничні) і тимчасові (прохідницькі). До головних відносяться установки, призначені для перехоплення і відкачування всього або більшої частки вод. При великій протяжності шахтних і кар'єрних полів може використовуватися декілька головних водовідливних установок. Допоміжні установки призначені для місцевого водозниження в окремих забоях і для відкачування води з ділянок, розташованих нижче за водозбірника головної водовідливної установки. Тимчасові установки використовуються в період проходки капітальних гірських виробок підприємства, що будується, або в період аварійних ситуацій.

По розташуванню основного устаткування щодо осушуваного масиву водовідливні установки підрозділяють на зумпфові, основне устаткування яких розташовується поза осушуваним масивом у водозбірника, свердловинні і голкофільтрові. На свердловинних установках силове насосне устаткування розташоване безпосередньо в осушуваному масиві, в якому пройдена свердловина відповідних розмірів. На голкофільтрових установках основна частка силового устаткування розташована поза осушуваним масивом, а в свердловину поміщена тільки водозабірна його частка.

Водовідливні установки підрозділяють також на стаціонарні, напівстаціонарні і пересувні. До останніх відносять допоміжні установки, які переміщують із ходом забою. Напівстаціонарні установки змінюють своє місце розташування періодично через відносно великі інтервали часу, у міру просування фронту гірничих робіт і по глибині масиву, що розробляється.

Зумпфові водовідливні установки мають найбільше розповсюдження на гірських підприємствах. Відмітною ознакою таких установок є наявність зумпфа – водозбірника відносно великих розмірів, який акумулює воду, що поступає в нього з гірських вироблень самоплив по дренажних каналах.

За місцем розташування водозбірника відносно денної поверхні зумпфові водовідливні установки підрозділяються на відкриті і підземні, або шахтні. Перші застосовуються тільки для водовідливу на кар'єрах, а другі – на шахтах і підземних копальнях, а також на кар'єрах при підземному способі осушення кар'єрних полів.

Водозбірники виконують функції приймальних резервуарів і відстійників для освітлювання води і одночасно є і регулюючими ємкостями, компенсуючими різницю між притокою води з гірського масиву і витратою насосів, що відкачують її.

Найчастіше насоси розташовують біля водозбірника вище за рівень води (рис. 1.1). Насос 4 сполучений з водозбірником 1 за допомогою всмоктуючого трубопроводу 3 і огорожного наконечника 2, забезпеченого сіткою, яка запобігає попаданню в насос крупних механічних включень. При роботі водовідливної установки вода переміщається по нагнітальному трубопроводу (ставу) 5 до водовідвідного пристрою 7 на поверхні, в яке вона вільно виливається через скидною наконечник 6. Розміщення насосів на висоті 4 – 5 м над рівнем води у водозбірнику і 1 – 1,5 м над ґрунтом прилеглих до насосної камери гірських вироблень певною мірою оберігає насосну станцію від аварійного затоплення і не вимагає спеціальної гідроізоляції її приміщення.

Проте для відкачування води з відносно великої глибини необхідні насоси з підвищеною всмоктуючою здатністю. У відцентрових насосів, найчастіше використовуваних на водовідливних установках, із збільшенням номінальної продуктивності, як правило, зменшується всмоктуюча здатність. Крім того, при такому розташуванні насосів необхідна їх попередня заливка перед черговим пуском.

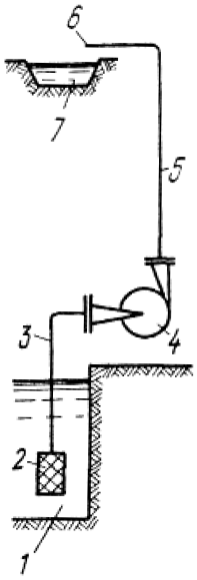


Рисунок 1.1 – Розташування насосу вище за рівня води

Надійність і економічність роботи водовідливної установки характеризується фактичним режимом роботи насоса, який в процесі експлуатації постійно змінюється в результаті зносу устаткування і унаслідок неминучих ремонтів. В результаті зносу технологічного устаткування можуть виникати наступні аварійні режими:

- кавітаційне руйнування матеріалів;
- перегрів підшипників насоса або приводного електродвигуна;
- погіршення вібраційного стану насосного агрегату;
- зниження ефективності роботи насосного устаткування;
- зниження продуктивності насоса;
- зниження тиску в напірному трубопроводі;
- порив трубопроводів;
- досягнення аварійного рівня води у водозбірнику.

На стадії проектування і розрахунку водовідливних установок передбачаються заходи, які дозволяють не допустити появи і розвитку даних аварійних режимів. В процесі експлуатації водовідливних установок деякі з цих заходів можуть виявитися малоефективними з цілого ряду причин: змінюється геометрія і характеристики трубопроводів і насосів; відсутній поточний контроль за технологічними, механічними і електричними параметрами водовідливних

установок (апаратура автоматизації не забезпечує повною мірою контроль над всіма параметрами водовідливної установки).

Лопатеві насоси представлені в сучасній промисловості трьома основними типами – відцентровими, осьовими і діагональними насосами. Широке їх розповсюдження пояснюється достатньо високим коефіцієнтом корисної дії, компактністю і зручністю комбінування з приводними двигунами.

Основними частками відцентрового насоса (рис. 1.2) є: робоче колесо 1 із зігнутими лопатями 2 і нерухомий корпус 4 спіральних форми. Робоче колесо консольно посаджено на вал 5. Корпус насоса має всмоктуючий патрубок (підведення) 3 і напірний патрубок 6.

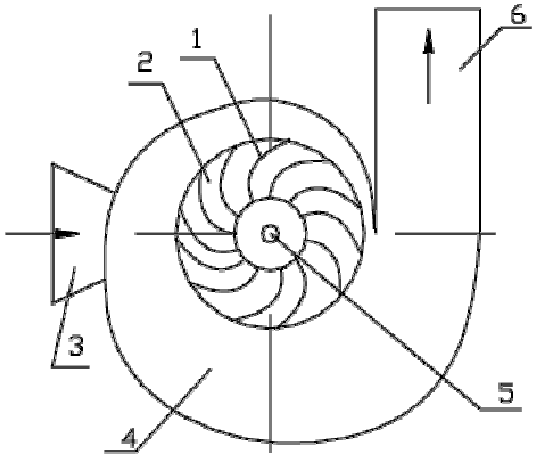


Рисунок 1.2 – Устрій відцентрового насосу

При обертанні робочого колеса рідина, залита в насос перед його пуском, захоплюється лопатками і під дією відцентрових сил рухається від центру колеса до його периферії по міжлопатевих каналах і подається через корпус 4 в нагнітальний патрубок 6. Тому на вході в колесо створюється розрідження, під дією якого рідина підсмоктується у всмоктуючий патрубок 3.

1.2 Параметрі та характеристики компонентів водовідливу

Для коректного вибору насоса використовують робочі і універсальні характеристики,які є залежністю натиску, що створюється насосом, потужності на валу насоса і повного ККД від подачі (продуктивності) насоса для певної

швидкості обертання робочого колеса. Подачею насоса Q називається об'єм рідини, що подається насосом в напірний патрубок в одиницю часу.

Для забезпечення ефективності комплексу водовідливу необхідне встановлення насосів із якомога ближчими напірними характеристиками, які, до того ж, повинні бути узгоджені із характеристикою мережі. Тому, по-перше, розглянемо теоретичні підходи до розрахунку напірних характеристик насосів.

На рис. 1.3 наведена схема встановлення вимірювального обладнання для визначення індивідуальної напірної характеристики відцентрового насоса.

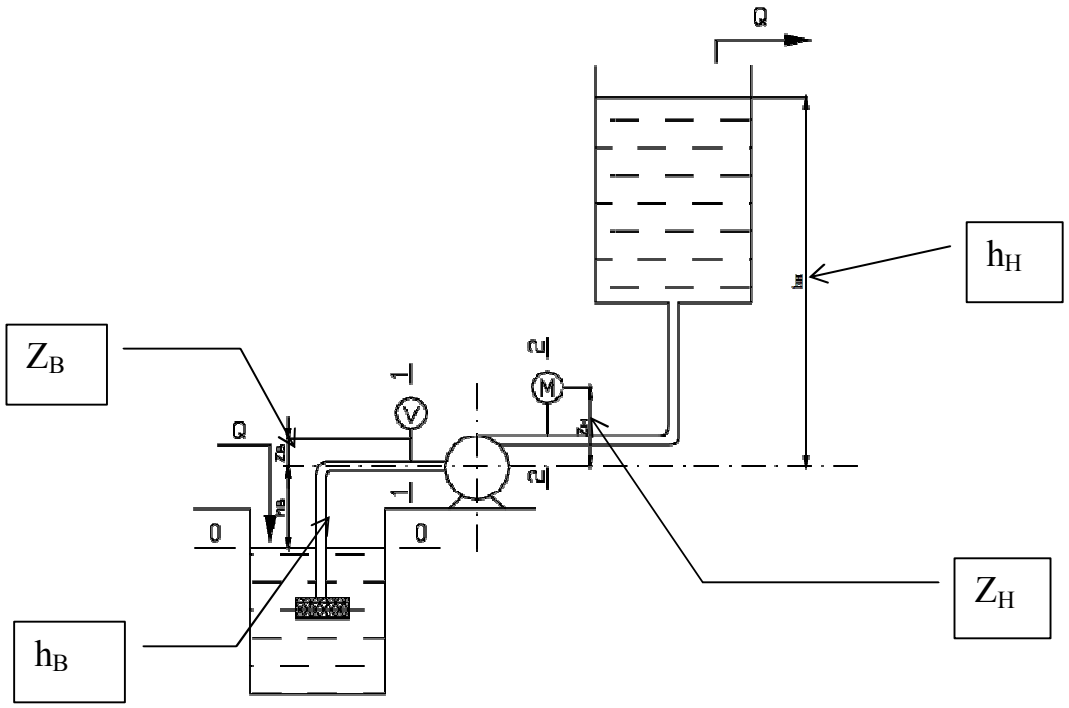


Рисунок 1.3 – Схема експерименту із визначення QH-характеристик відцентрового насоса

Розглянемо теоретичні підходи щодо опису залежностей між гідравлічними та енергетичними характеристиками компонентів водовідливу.

Енергія, що повідомляється насосом одиниці ваги переміщуваної рідини, називається натиском H. Натиск насоса дорівнює різниці повного натиску за насосом і натиску перед ним і виражається в метрах стовпа переміщуваної рідини.

Залежність має наступний вигляд:

$$\mathrm{H} = \left(\mathrm{h_в} + Z_н + \frac{P_н}{\gamma} + \frac{U_н^{\,2}}{2q} \right) - h_в + Z_в + \frac{P_в}{\gamma} + \frac{U^2 B}{2q} \qquad (1.1)$$

де:

H – напір насосу, м;

$h_В$ – висота всмоктування, м;

$Z_Н$ – відстань від осі насосу до вільної поверхні рідини в трубці манометру М, м;

$P_Н$ – гідродинамічний тиск в перетині 2-2 напірного трубопроводу, Н/м^2;

$\upsilon_Н$ – швидкість рідини в напірному трубопроводі, м/с;

$Z_В$ – відстань від осі насосу до вільної поверхні рідини в трубці вакуумметру V, м;

$P_В$ – гідродинамічний тиск в перетині 1-1 всмоктувального трубопроводу, Н/м^2;

$\upsilon_В$ – швидкість рідини у всмоктувальному трубопроводі, м/с;

γ – питома вага рідини, Н/м^3;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2.

Після деяких перетворень отримуємо наступну формулу для розрахунку тиску:

$$H = H_{\acute{i}} \pm H_{\hat{a}} \pm \Delta Z + \frac{U_{\acute{i}}{}^2 - U_{\hat{a}}{}^2}{2q}$$

де:

$H_Н$ – показання манометра, встановленого на напірній гілці, виражене в метрах стовпа переміщуваної рідини;

$H_В$ – показання манометра або вакуумметра, встановленого на всмоктуючій гілці, виражене в метрах стовпа переміщуваної рідини;

ΔZ – відмітка або відстань по вертикалі між рівнями вільних поверхонь в трубах приладів, встановлених на напірній і всмоктуючій гілках (звичайно це відстань між точкою приєднання вакуумметра і центром манометра), м.

У рівнянні (1.1) перед величиною $H_В$ береться знак плюс, якщо перед входом в насос тиск нижче атмосферного, знак мінус, якщо тиск вище атмосферного. Перед величиною ΔZ береться знак плюс, якщо рівень вільної поверхні рідини в трубці приладу, встановленого на напірній гілці, вище за той же рівень в трубці

приладу, встановленого на всмоктуючій гілці; знак мінус, якщо перший рівень нижче другого.

Корисна потужність насоса або енергія, що передається насосом рідини за одиницю часу, дорівнює:

$$N_{ï} = \gamma QH \tag{1.2}$$

Потужність на валу насоса $N_П$ (споживана потужність) більше корисної на величину втрат в насосі. Величина втрати потужності оцінюється повним ККД насоса. Останній дорівнює:

$$\eta = N_{ï} \frac{N_{ï}}{N} \tag{1.3}$$

Тоді потужність на валу насоса може бути визначена наступною формулою:

$$N = \frac{\gamma QH}{\eta} \tag{1.4}$$

Розглянемо, як аналітично описуються характеристики нагнітальних трубопроводів насосних агрегатів і колекторних трубопроводів насосної станції. Для отримання коректного результату при визначенні опору трубопроводів гідравлічну схему водовідливної установки необхідно розбити на три ділянки, що відрізняються по діаметру трубопроводу і гідравлічній арматурі: 1 – всмоктуючий трубопровід; 2 – ділянка напірного трубопроводу, що знаходиться в насосній камері; 3 – остання частка напірного трубопроводу.

Для кожної ділянки слід визначити суму коефіцієнтів місцевих опорів Σζ (табл. 1.1) і розрахункову довжину трубопроводу λр.

Загальний опір трубопроводу дорівнюватиме сумі опорів ділянок трубопроводу:

$$R_C = R_{C1} + R_{C2} + R_{C3} \tag{1.5}$$

Опір трубопроводу на кожній ділянці можна визначити по питомих гідравлічних опорах, наприклад для ділянки 1:

$$R_{C1} = A_D l_{p1} + A_{ì} \sum \xi \tag{1.6}$$

де: $A_Д$ – питомий повздовжній опір, $г^2/м^6$;

A_M – питомий місцевий опір, $г^2/м^5$;

$\Sigma\zeta$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів фасонних частин, арматури, засувок і т.і. на ділянці, що розглядається.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти місцевого опору арматури

Арматура	Діаметр умовного проходу, $d_у$, м	Коефіцієнт місцевого опору ζ, в.о.
Засувка клинова	80…400	0,26
Зворотний клапан	80…400	10
Приймальний клапан з сіткою	100	7,0
	150	6,0
	200	5,2
	250	4,5
	300	3,7
Трійник равнопроходный	80…300	1,5
Коліно зварне (90º)	80…300	0,6
Дифузор	d_1/d_2 = 0,5…0,8	0,25
Конфузор	d_1/d_2 = 1,2…1,65	0,1

Опори трубопроводу на інших ділянках визначаються аналогічним чином. Значення питомих опорів для найбільш поширених діаметрів умовного проходу приведені в таблиці. 1.2.

Таблиця 1.2 – Значення питомих опорів трубопроводів

d, мм	λ	$A_д$*, $г^2/м^6$	$A_м$*, $г^2/м^5$
50	0,051586	1082,4	1020,1
75	0,045677	122,72	201,50
100	0,041900	26,714	63,755
125	0,039187	8,4868	26,114
150	0,037102	3,1150	12,594
175	0,035425	1,3760	6,7977
200	0,034034	0,67807	3,9847
225	0,032852	0,36321	2,4876
250	0,031830	0,20780	1,6321
275	0,030933	0,12539	1,11477
300	0,030360	0,079066	0,78710
325	0,029421	0,051730	0,57145
350	0,028774	0,034930	0,42486
375	0,028184	0,024230	0,32230
400	0,026644	0,017211	0,24904
425	0,027146	0,012481	0,19541
450	0,026684	0,004220	0,15548
475	0,026255	0,006923	0,12524
500	0,025854	0,005275	0,10201

* - величину умножати на 10^6.

Для визначення робочого режиму водовідливної установки, після визначення опору трубопроводів, будуються їх характеристики згідно рівняння:

$$H_T = H_r + R_T Q^2 \tag{1.7}$$

У рівняння підставляються різні значення витрати – від 0 до 120% його номінального значення – і визначаються відповідні значення натиску. Отримана крива трубопровідної мережі накладається на напірну характеристику насоса. Точка перетину напірних характеристик насоса і трубопроводу визначає робочий режим водовідливної установки з відповідними йому координатами (тиск та продуктивність).

1.3 Дослідження роботи насосних агрегатів на спільну мережу

Системи шахтного водовідливу відносяться до технологічних об'єктів з гранично жорсткими вимогами по натиску і продуктивності. Допустимий діапазон тиску установок обмежений «знизу», оскільки необхідно здійснити відкачування води на певний горизонт або поверхню. В той же час, комплекс водовідливних установок повинен забезпечити продуктивність відповідно до добового рівня притоку вод. Тому впровадження регульованого електроприводу, наскільки привабливо б воно не здавалося з погляду полегшення пусків двигунів насосів, економічно повинно бути строго обґрунтовано.

Потенціал енергозбереження в системах шахтного водовідливу криється в коректній організації паралельної роботи декількох водовідливних установок на загальний колектор. При проектуванні систем водовідливу або плануванні енергозберігаючих заходів в існуючих системах слід враховувати взаємний вплив параметрів зовнішньої мережі і насосів, а також відмінності Q-H-характеристик окремих насосів.

При паралельній роботі двох однакових насосів на загальну мережу робочі точки насосів розподіляються, як показано на рис. 1.4.

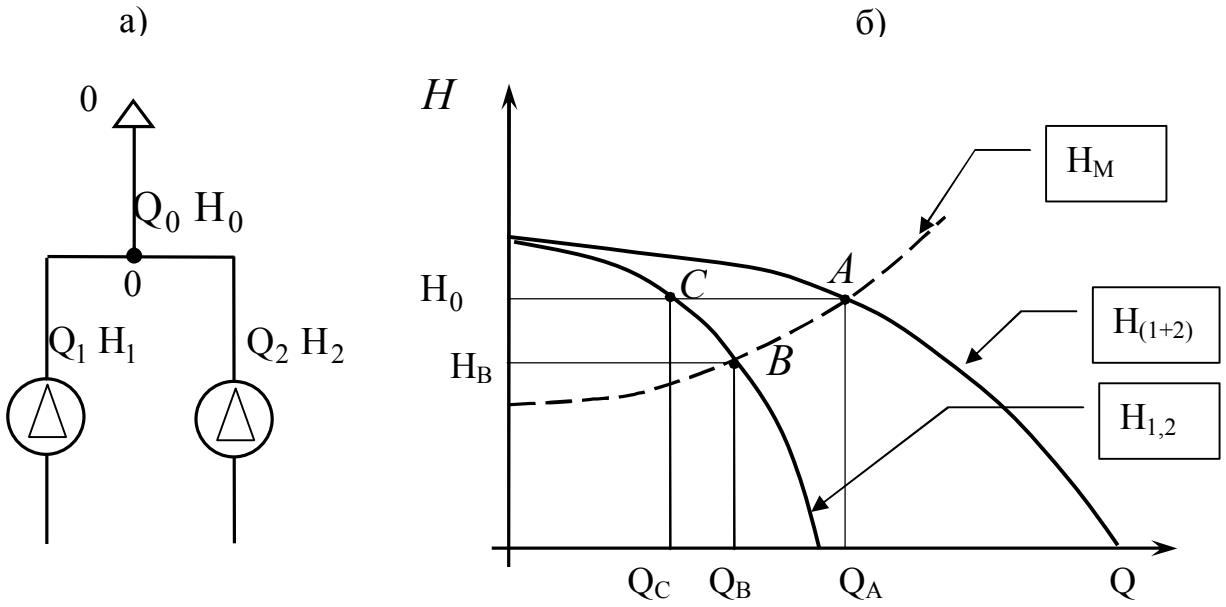


Рисунок 1.4 – Паралельна робота двох однакових насосів на спільну мережу:
а) схема підключення, б) напірні характеристики и робочі точки насосів

При паралельній роботі виконуються співвідношення $Q_0 = Q_1 + Q_2, H_0 = H_1 = H_2$.

Результуючий тиск на виході двох насосів є завжди однаковим. Таким чином, результуюча характеристика агрегатів $H_{(1+2)}$ є геометричним місцем точок, що визначаються сумою продуктивностей двох насосів при постійному тиску.

Якщо працюватиме один насос, робочою точкою установки буде точка «В». Якщо ж подача рідини Q_B виявляється недостатньою, включається другий насос і результуюча робоча точка зміщується в положення «А». Підвищення результуючого тиску зміщує індивідуальні робочі точки насосів в точку «С».

Проаналізуємо положення робочих точок і аспекти, що виникають при цьому.

Сумарна подача двох агрегатів завжди менше подвоєної початкової подачі (одного насоса). У загальному випадку зростання подачі рідини не є кратним кількості паралельно працюючих агрегатів. Це пов'язано з нелінійністю характеристик насосів і мережі.

Підвищення результуючого тиску до H_0 зміщує індивідуальні робочі точки насосів вліво і вгору по QH-характеристикам. Тобто при паралельній роботі кожен

насос експлуатується з більшим тиском і меншою подачею, чим при індивідуальній роботі.

Крім того, очевидно, що приріст сумарної подачі тим більше, чим більше жорсткість напірної характеристики мережі і меншій протитиск.

Досвід показує, що індивідуальні QH-характеристики завжди відрізняються. Це відбувається внаслідок нерівномірного зносу елементів робочих коліс, відмінності характеристик приводних двигунів і т.і. При цьому подача між насосами розподіляється нерівномірно, як це показано на рис. 1.5.

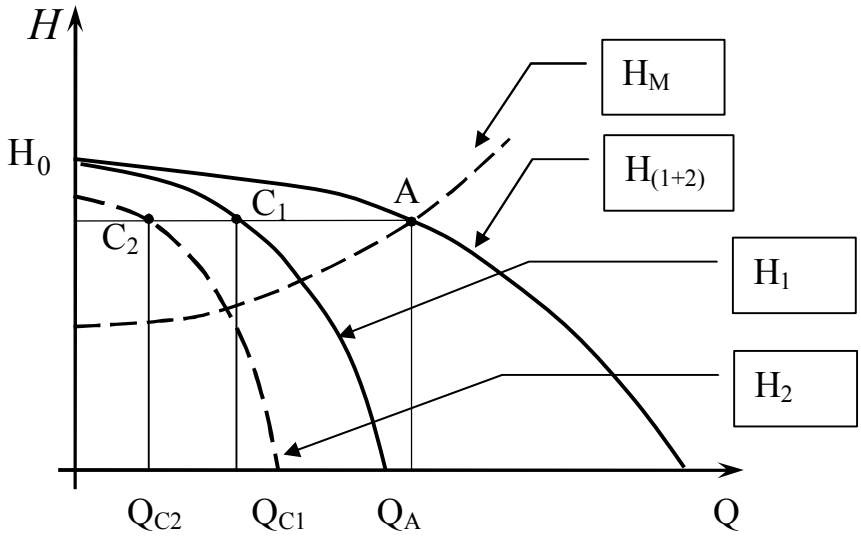


Рисунок 1.5 – Паралельна робота двох насосів на спільну мережу при відмінності їх напірних характеристик

Збільшений загальний тиск змістить робочу точку другого насоса в точку «C_2». Його ефективність і внесок в загальну продуктивність буде незначною. У граничному випадку, при значній відмінності напірних характеристик двох паралельно працюючих насосів, станеться повне замикання «слабкішого» насоса (відзначимо, що споживання потужності ним майже не знизиться).

Ключовим аспектом є залежність ККД насоса від його подачі. Системи шахтного водовідливу, як правило, розраховані так, щоб одночасно в роботі знаходилося декілька агрегатів на кожному горизонті. Тому насоси підбираються так, щоб їх номінальні параметри, зокрема ККД, забезпечувалися в точці «С». Зсув ліворуч від цієї точки істотно понизить результуючий ККД агрегатів.

Таким чином, впровадженню енергозберігаючих заходів в системах шахтного водовідливу повинне передувати ретельне техніко-економічне обґрунтування. При експлуатації декількох насосів, слід по можливості поєднувати роботу насосів з найбільш близькими напірними характеристиками.

1.4 Калібрування технічних засобів вимірювання гідравлічних параметрів

Практика свідчить, що експериментальні роботи з досліджень і оптимізації компонентів водовідливу завжди ускладнюються відсутністю певної інформації про гідравлічні параметри системи. Найбільш достовірними, зазвичай, є дані про розхід (подачу) шахтних вод. Це пов’язано із великою вартістю вимірювачів розходу (тому вони в більшості випадків просто відсутні), і також їх недостатньою точністю внаслідок кавітації, турбулентності, наявності включень в рідині та ін. Всі гідравлічні явища є нелінійними і зазвичай описуються тільки емпіричними залежностями.

Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є визначення залежностей розходу від параметрів, які піддаються більш точному вимірюванню.

Одним з параметрів, опосередковано пов’язаних із подачею, є рівень води в приймальному колодязі на виході нагнітального ставу на поверхні. Датчики рівня (поплавкові, ємнісні) на відміну від ультразвукових датчиків розходу є більш дешевими і надійними пристроями. Тому, по-перше, надамо методологію опосередкованого вимірювання розходу через рівень води у приймальному колодязі.

По-друге, системи водовідливу, зазвичай, обладнані датчиками тиску, встановленими в різних ділянках колектору. Динамічна складова різниці показань датчиків пропорційна розходу шахтних вод. Отже, надамо методологію встановлення взаємозв’язку між подачею шахтної води та різницею тиску на початку і в кінці горизонтальної частки напірного колектора перед приймальним колодязем перекачної насосної.

Для перевірки перерахованих непрямих методів визначення витрати використаємо метод прямого розрахунку, який полягає у визначенні приросту об'єму шахтної води в ізольованій секції відстійника за одиницю часу.

Схема розміщення вимірювального устаткування приведена на рис.1.6.

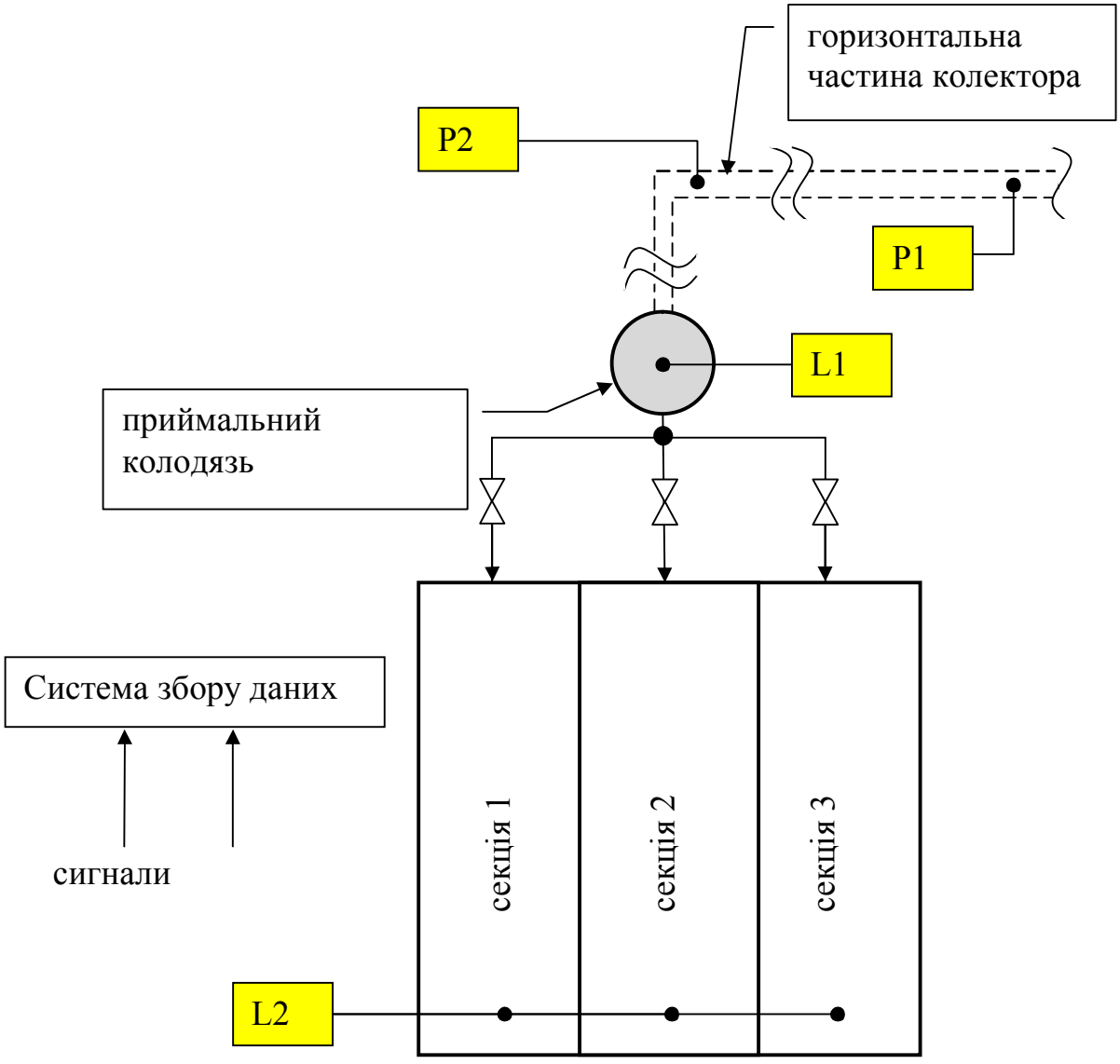


Рисунок 1.6 – Точки установки датчиків рівня і тиску

Прямим і найбільш вірогідним методом виміру витрати шахтної води є визначення відношення приросту об'єму шахтної води ΔV в одній з секцій відстійника до проміжку часу Δt, протягом якого цей приріст стався:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}.$$

Приріст об'єму визначається за показаннями рівнеміра L2, встановленого в секції відстійника, і геометрії секції. Цей метод може прийнятий як еталонний і служить для перевірки всіх останніх безпосередніх і непрямих методів визначення витрати шахтної води.

До непрямих методів відносяться:

– розрахунок розходу шахтної води за показаннями рівнеміра L1, встановленого в приймальному колодязі на виході напірного колектора перед відстійником;

– розрахунок розходу шахтної води за показаннями датчиків тиску Р1, Р2, встановлених на поверхні на горизонтальній частці колектора.

Непряме визначення величини подачі за рівнем води у приймальному колодязі основане на рівнянні Бернуллі:

$$Q = \mu \cdot S_0 \cdot \left(2g \cdot k_0 \cdot \left(H - h_0\right)\right)^{\alpha}, \qquad (1.7)$$

де μ, α – нелінійні коефіцієнти, залежні від ступеня в'язкості рідини, діаметру вихідного отвору і інших параметрів;

S_0 – площа вихідного отвору приймального колодязя;

g=9,81 – прискорення вільного падіння;

k_0, h_0 – масштабні коефіцієнти;

H – рівень води в приймальному колодязі.

Коефіцієнти, що входять в рівняння, не можуть бути розраховані аналітично зважаючи на нелінійність гідравлічних процесів, і тому повинні бути визначені за експериментальними даними ітеративним методом.

На рис. 1.7 показані криві залежності рівня води в приймальному колодязі від величини розходу шахтних вод – реальна і розрахункова криві для однієї з шахт Дніпропетровського регіону. Реальна крива визначена по приросту об'єму вод у відстійнику, розрахункова по рівнянню 1.7.

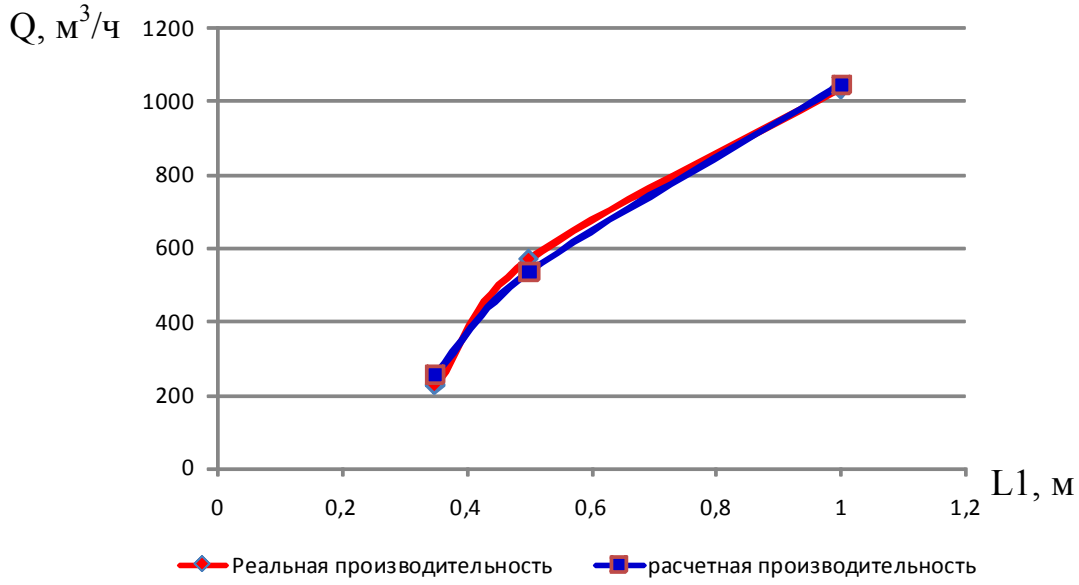


Рисунок 1.7 – Дійсна та розрахункова подача, опосередковано визначена за рівнем води у приймальному колодязі

Середня похибка визначення розходу шахтної води за рівнем води в приймальному колодязі складає 7%.

Метод розрахунку подачі шахтної води по різниці тиску заснований на зіставленні величини витрати Q з величиною падіння тиску на горизонтальній ділянці напірного колектора (на поверхні перед приймальним колодязем перекачної насосної). Для визначення вказаної залежності Q=f(ΔP) використані експериментальні дані.

Встановлено, що розхід води Q, м^3/рік, залежно від різниці тиску P1-P2, може бути визначений по формулі

$$Q = k_p \cdot [(P_1 - P_2) + 25]^{\beta}, \qquad (1.8)$$

де P1, P2 – показники датчиків тиску, кПа;

k_p – безрозмірний коефіцієнт, k_p = 283;

β – безрозмірний коефіцієнт β =0,447.

На рис. 1.8 показана експериментальна і розрахункова криві залежності подачі Q від різниці вказаного тиску ΔP = P1-P2.

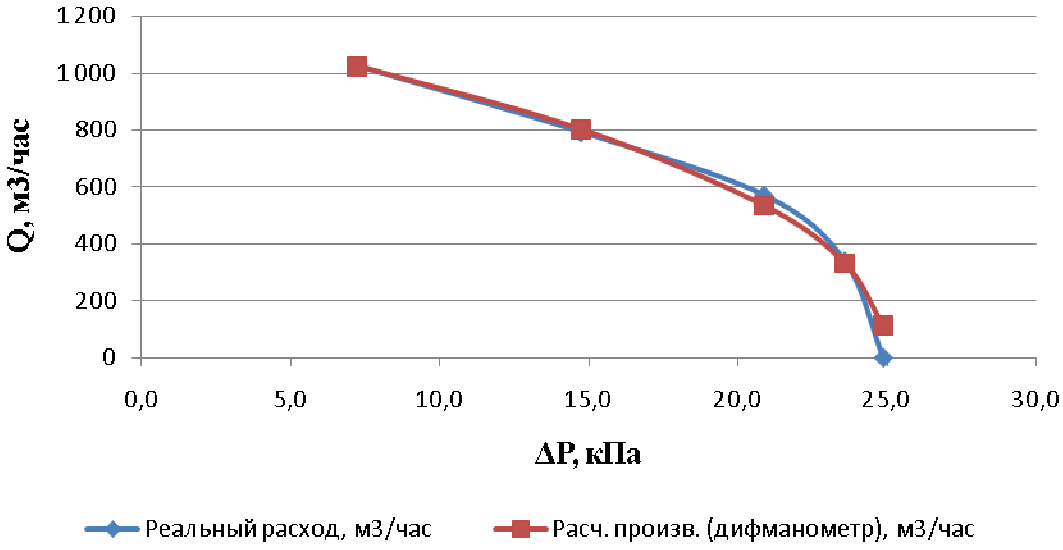


Рисунок 1.8 – Залежність розходу води від різниці тисків в начале та кінці горизонтальної частини колектора

Даний метод працездатний тільки при значному розході води(більше 300 м^3/рік) і, таким чином, не придатний для визначення індивідуальних напірних характеристик насосів. У останніх випадках, тобто при паралельній роботі двох і більш за насосів, середня похибка методу складає 3%.

Метод може використовуватись, головним чином, для оцінки тривалих за часом змін в технічному стані напірного колектора.

1.5 Розробка моделі для опису гідравлічного режиму роботи шахтної водовідливної установки

Для розробки моделі шахтної водовідливної установки використовувався метод електрогідравлічних аналогій – метод аналізу гідравлічних схем, гідромашин і гідравлічного обладнання, оснований на систематичному перенесенні теорії електричних схем в гідродинаміку.

Диференціальні рівняння, що описують взаємозалежність електричних параметрів в довгій лінії з розподіленими параметрами в зневазі витоками через ізоляцію мають вигляд:

$$-\frac{dU}{dx} = L\frac{dI}{dt} + RI$$

$$-\frac{dU}{dt}=\frac{1}{C}\frac{dI}{dx}$$

де:

U – напруга;

I – сила струму

L, R, C – відповідно індуктивність ділянки ланцюга, активний опір і ємкість;

t – час;

x – координата.

Система управлінь для потоку рідини в трубі має схожий вигляд:

$$-\frac{dP}{dx}=\frac{P_0}{S}\frac{dQ}{dt}+\frac{2a}{S}Q$$

$$-\frac{dP}{dx}=\frac{P_0c^2}{S}\frac{dQ}{dt}$$

де:

Q – об'ємна витрата;

S – площа поперечного перетину труби;

P – тиск;

c – швидкість;

a – параметр тертя.

Рівняння для довгої електричної лінії і для труби з потоком рідини ідентичні, а їх фізичні величини подібні до один одного:

Трубопровідна лінія	Тиск P	Витрата Q	$\frac{2a}{S}$	$\frac{S}{p_0c^2}$	$\frac{P_0}{S}$
Електрична лінія	Напруга, U	Сила струму I	Активний опір, R	Ємність C	Індуктивність, L

При моделюванні приймемо наступні припущення:

– гідравлічні процеси (зміна тиску і подачі) у всіх ділянках протікають без інерції.

– механічні характеристики приводних двигунів насосів є абсолютно жорсткими.

Таким чином, завдання зводиться до аналізу сталих режимів – визначення індивідуальних продуктивностей агрегатів, результуючого тиску в мережі і енергетичних показників приводних двигунів при роботі декількох водовідливних агрегатів на загальну мережу.

Важливо коректно вибрати послідовність розрахунку гідравлічних параметрів. При паралельній роботі насосів вхідним параметром є тиск, спільний для двох насосів. Саме ця величина є основою для розрахунку подачі кожного насоса, з урахуванням можливої відмінності їх напірних характеристик. Таким чином, першою ланкою моделі шахтної водовідливної установки є інверсна формула напірної характеристики, тобто залежність продуктивності від протитиску на виході насосного агрегату:

$$Q_i = f\left(H_c\right), \tag{1.9}$$

де Qi – продуктивність і-го агрегату;

Нс – вихідний тиск (у гідравлічній мережі).

Результуюча продуктивність комплексу водовідливу визначається сумою подач окремих агрегатів

$$Q_\Sigma = \sum_i Q_i . \tag{1.10}$$

Цей параметр, у свою чергу, є вхідним для розрахунку протитиску, яке гідравлічна мережа надає перебігу рідини:

$$H_c = f\left(Q_\Sigma\right). \tag{1.11}$$

Рівняння 1.11 є напірною характеристикою мережі.

Енергоефективність комплексу водовідливу визначається з урахуванням залежності активної потужності, споживаної кожним агрегатом, від його продуктивності:

$$N_i = f\left(Q_i\right), \tag{1.12}$$

де N_i − активна потужність, споживана з мережі кожним агрегатом.

Таким чином, моделлю комплексу водовідливу, фактично, є сукупність рівнянь (1.9) – (1.11). Оскільки вони є нелінійними, найдоцільніше застосувати ітеративний метод пошуку робочої точки. На рис. 1.9 приведений направлений

сигнальний граф, що ілюструє алгоритм пошуку робочої точки, тобто що реалізує модель ШВУ.

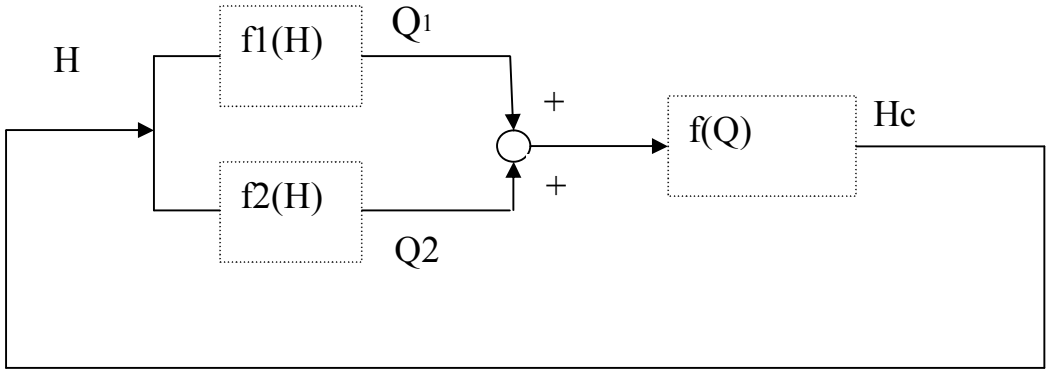


Рисунок 1.9 – Модель комплексу шахтного водовідливу

Вхідними параметрами моделі є індивідуальні напірні характеристики кожного агрегату і рівняння мережі:

$$Q_i = k_i \cdot \left(-H_i + Q_i\right)^{\alpha} . \tag{1.13}$$

Коефіцієнти k_i, H_i, Q_i та α повинні бути визначені експериментально (див. попередній пункт)

З урахуванням наявності зворотного клапана це рівняння програмно записується таким чином (на прикладі комплексу водовідливу однієї з шахт Дніпропетровського регіону)

$$Q_1(H) := \begin{cases} y \leftarrow 155 \cdot (-H + 450)^{0.15} \\ y \quad \text{if } y \geq 0 \\ 0 \quad \text{otherwise} \end{cases}$$

Залежність, побудована по даному рівнянню, має вигляд

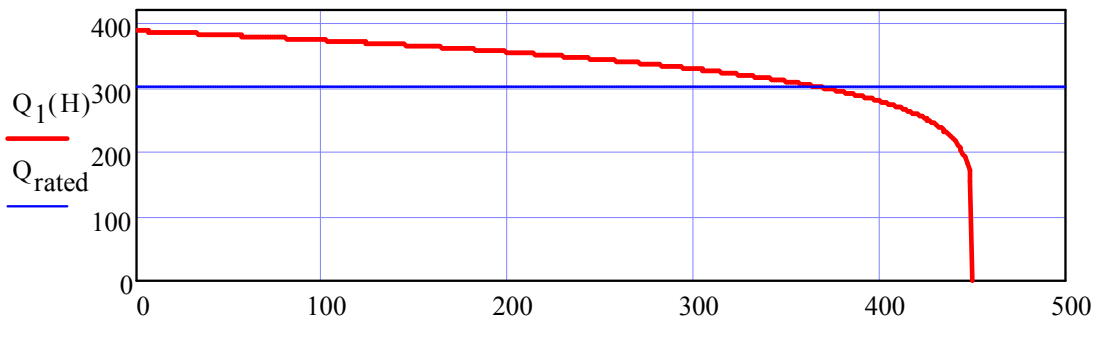


Рисунок 1.10 – Напірна характеристика агрегату (функція продуктивності вихідного тиску)

Характеристика водовідливної мережі, встановлена експериментально, є параболічною функцією

$$H_c = \mu \cdot Q^2 + H_0, \tag{1.14}$$

де μ – коефіцієнт гідродинамічного опору

H_0 – протитиск.

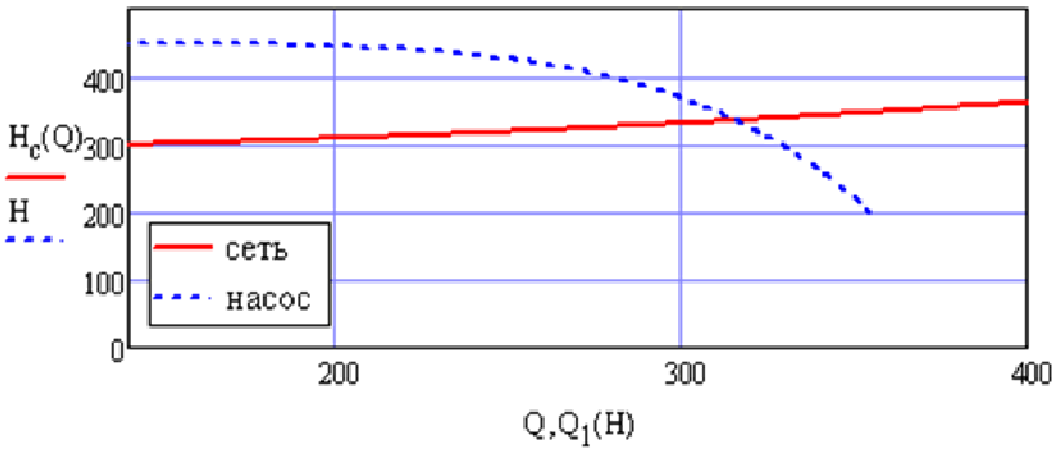


Рисунок 1.11 – Напірна характеристика мережі, зіставлена із характеристикою агрегату

Для прикладу приведемо алгоритм моделювання робочого режиму мережі водовідливу, що складається з двох однакових насосних агрегатів.

Програмний алгоритм, що реалізовує ітеративний пошук робочої крапки у функції характеристик мережі і агрегатів, має вигляд, представлений на рис. 1.12.

```
QH := | H ← Hn
      | for k ∈ 0..M
      |   H ← Hn + k·ΔH
      |   QΣk ← 2·Q1(H)
      |   Hgridk ← Hc(QΣk)
      |   Y⟨k⟩ ← ( QΣk )
      |          ( Hgridk )
      |   break if (Hgridk − H) < εH
      | YT
```

Рисунок 1.12 – Програмна реалізація моделі комплексу водовідливу з двох установок

Виходом програмного блоку є масив значень подачі і тиску, що відображає ітеративний рух до робочої точки. Рух припиняється, коли приріст по тиску стає менше наперед заданої погрішності ΔH.

На рис. 1.13 показані індивідуальні характеристики агрегатів, результуюча характеристика комплексу водовідливу, характеристика гідравлічної мережі і трейс лінії ітеративного пошуку робочої точки.

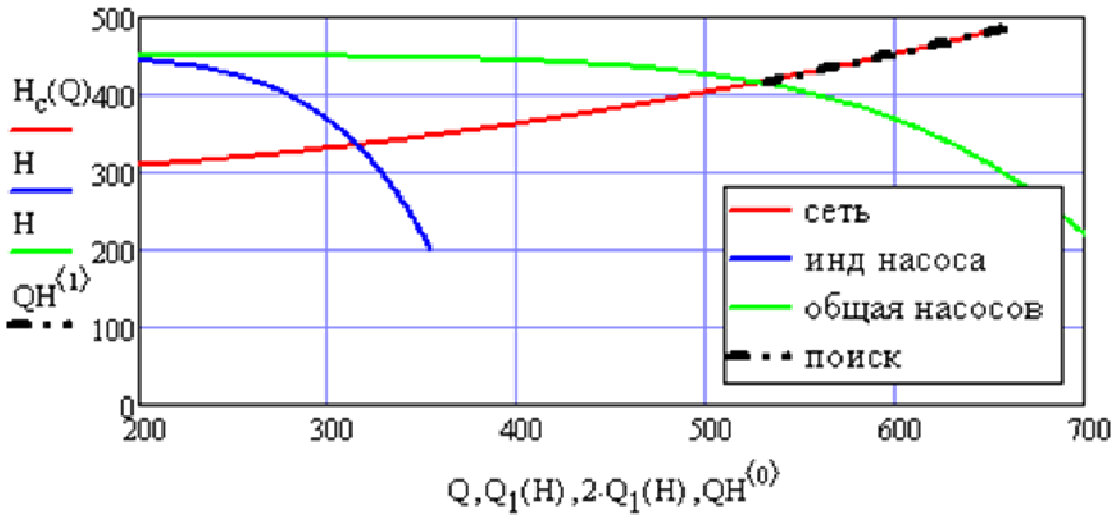


Рисунок 1.13 – Зіставлені напірні характеристики агрегатів, мережі, а також трейс лінії пошуку робочої точки

По отриманій моделі розрахована енергетична ефективність роботи комплексу водовідливу. Так при роботі однієї установки відбувається відкачування 316 $м^3$/год, при цьому з мережі споживається 677,5 кВт. Питомі енерговитрати при цьому складають 2,14 кВт·год/$м^3$.

При паралельній роботі двох установок сумарна продуктивність складає 414 $м^3$/год, при цьому з мережі споживається 1292 кВт. Питомі енерговитрати складають 3,12 кВт·год/$м^3$. Це пов'язано з тим, що при паралельній роботі насосів, робочі крапки на індивідуальних характеристиках агрегатів зміщуються убік вищого тиску, і агрегати, таким чином, працюють з меншим ККД.

1.6 Призначення та мета створення системи АСУВ

АСУВ призначена для:

– автоматичного управління технологічним процесом водовідведення відповідно до графіка навантаження енергосистеми та зміною рівня води в водозбірниках і відключення насосних агрегатів та пов'язаного з ним обладнання в разі виникнення критичних режимів роботи;

– контролю за основними технічними та технологічними параметрами роботи насосних агрегатів головного водовідливу;

– накопичення та виведення інформації про поточні параметри процесу водовідведення в зручному для оператора вигляді;

– підготовки протоколів, рапортів і зведень про роботу насосних станцій;

– автоматичної діагностики роботи обладнання, що входить до складу системи управління.

Поліпшення техніко-економічних показників роботи насосних станцій досягається за рахунок:

– автоматичного предпікового включення насосних агрегатів відповідно до графіка навантаження енергосистеми;

– групування насосних агрегатів за мінімальним негативним взаємним впливом при роботі на загальний колектор;

– збільшення кількості контрольованих технічних і технологічних параметрів;

– визначення раціональних режимів ведення технологічного процесу водовідведення;

– виявлення та реєстрації відхилень технічних і технологічних параметрів від заданих значень, аналізу отриманих відхилень і прийняття заходів щодо їх усунення.

АСУВ повинна забезпечити:

– зменшення загальної витрати електроенергії за рахунок автоматичного предпікового включення насосних агрегатів відповідно до графіка навантаження енергосистеми і групування насосних агрегатів за мінімальним негативним взаємним впливом при роботі на загальний колектор;

– резерви для подальшого розширення системи автоматичного управління при модернізації виробництва, а також при перенесенні принципів розроблюваної системи на інші об'єкти;

– підвищення технологічної дисципліни оперативного персоналу за рахунок протоколювання дій операторів;

– підвищення надійності і живучості електродвигунів і насосів водовідливних установок, скорочення витрат на експлуатацію за рахунок оперативної діагностики стану обладнання та запобігання аварійних ситуацій;

– поліпшення умов роботи оперативного персоналу за рахунок дистанційного централізованого контролю та управління, забезпечення оператора повної, достовірної, своєчасної та зручною для сприйняття інформацією про стан об'єкта, а також за рахунок сигналізації передаварійних ситуацій і автоматичного блокування помилкових дій персоналу.

1.7 Критерій управління та постановка задачі управління

Постановка завдання управління

Економічна й надійна робота водовідливної установки значною мірою визначається умовами фактичного режиму роботи насоса на зовнішню мережу, які в процесі експлуатації постійно змінюються внаслідок підвищеного зносу обладнання та заростання елементів трубопровідної мережі.

Робочий режим насосної установки на QH-характеристиках визначається точкою перетину напірних характеристик насоса та трубопровідної мережі. Щоб робота насоса була економічною, його режим повинен бути в межах робочої ділянки QH-характеристики, обмежуваного значеннями ККД:

$$\eta_{доп} = (0{,}85 \div 0{,}95) \cdot \eta_{\max},$$

де $\eta_{\max}$ – максимальне значення ККД.

Зазначена робоча ділянка, визначає зону промислового використання насоса, права межа якої (зона підвищеної витрати) обмежує роботу насосної установки по умові можливого виникнення кавітаційних режимів, а ліва (зона підвищеного напору) – за умовою недопустимого зниження ККД.

При паралельній роботі насосів на загальну мережу відбувається зміщення робочих точок насосів, в тому числі і за межі зони промислового використання. Завдання АСУВ полягає в контролі за поточним становищем робочих точок насосів при їх індивідуальної та групової роботи на загальний колектор.

Наявність інформації про ступінь взаємного впливу насосів один на одного при їх паралельній роботі, дозволяє класифікувати та групувати насосні агрегати за мінімальним негативним взаємним впливом для оптимізації режиму роботи насосного обладнання.

У запропонованій системі АСУВ розроблена та реалізована методика переведення технологічного процесу водовідведення в розряд споживачів – регуляторів енергоспоживання. Суть методики полягає в організації виконання технологічного процесу водовідведення за критерієм мінімуму енерговитрат, для чого з урахуванням встановлених періодів максимуму енергосистеми здійснюється повне або часткове відключення енергоємних споживачів на періоди максимуму. При цьому графіки роботи водовідливних установок носять циклічний характер – в них вводяться технологічні перерви в роботі, коли відбувається заповнення водозбірників, і ці перерви поєднуються з періодами максимуму навантаження енергосистеми.

1.8 Вимоги до системи управління

Система управління повинна забезпечувати виконання таких функцій:

1) інформаційні:

– централізований контроль технічних і технологічних параметрів;

– реєстрація історії процесу;

– обчислювальні та логічні функції.

2) керуючі:

– автоматичний і напівавтоматичний режим керування процесом водовідведення;

– аварійне управління гірським диспетчером;

– «Дистанційний», «Місцевий» режими управління насосними агрегатами і режим «Ремонт».

3) допоміжні:

– діагностика стану апаратних засобів;

– забезпечення стійкості системи до порушень зовнішнього електроживлення та відновлення функціонування системи при відновленні електроживлення;

– забезпечення можливості розвитку, розширення і модифікації системи управління;

– забезпечення системи ЗІП та сервісної апаратурою, перелік яких визначиться на стадії технічного проекту.

1.8.1 Вимоги до структури та функціонування системи

При розробці структури АСУВ повинні бути враховані наступні фактори:

– технологічна й організаційна структура управління об'єктом;

– територіальне розміщення технологічного обладнання, приміщень для розміщення технічних засобів АСУВ та диспетчерського пункту;

– обчислювальна продуктивність виділених структурних одиниць об'єкта;

– функціональна структура розроблюваної системи;

– вимоги до технічних характеристик системи та до її надійності;

– місце розроблюваної системи в ієрархії управління підприємством в цілому;

– перспективи розвитку, модернізації та нарощування системи.

АСУВ повинна бути реалізована на базі засобів обчислювальної техніки, а також інтерфейсних ліній зв'язку для передачі даних, що забезпечують розподілену обробку інформації та оперативне погоджене керування роботою механізмів і агрегатів насосних станцій.

Провідним принципом концепції створення АСУВ повинні бути функціональна та інформаційна інтеграція:

– функціональна інтеграція припускає, що одні й ті ж продукти та концепції використовуються в однакової формі для реалізації всіх видів моніторингу;

– інформаційна інтеграція означає, що вся система моніторингу розглядається як частина загальної обчислювальної середовища на підприємстві, що робить інформацію одночасно доступної та розподіленої між різними користувачами.

На основі аналізу перерахованих факторів, передбачається, що розробляється АСУВ повинна бути умовно трирівневої.

Перший (нижній рівень) повинен забезпечувати функції пооб'єктного збору та передачі інформації на другий рівень системи.

Зазначеним вимогам відповідає застосування польових станцій мікропроцесорних контролерів.

Другий рівень відповідає за збір інформації з першого рівня в межах насосної станції, передачу її на третій рівень, обробку інформації, формування керуючого впливу, відпрацювання алгоритмів управління окремими насосними агрегатами. Представлення інформації про технологічні параметри.

Цим завданням відповідає застосування програмованих логічних контролерів (ПЛК).

Третій (верхній) рівень призначений для централізованого прийому, обробки та подання інформації та вирішення завдань раціонального управління

технологічним процесом водовідведення, а також для підключення, в перспективі, на основі стандартного протоколу передачі інформації до загальної інтегрованої автоматизованої системи управління підприємством (ІАСУ). На верхньому рівні відповідно до обсягу та рівнем завдань інформаційного забезпечення процесів та зберігання даних доцільне застосування персональних ЕОМ.

Система повинна забезпечити роботу системи водовідведення в наступних режимах:

- автоматичний режим;
- напівавтоматичний режим;
- аварійне управління гірським диспетчером.

Автоматичний режим є основним режимом роботи АСУВ. При роботі системи в автоматичному режимі відбувається автоматичне включення і відключення насосних агрегатів з витримкою часу між пусками та паузами насосів (щоб уникнути гідравлічних ударів) відповідно до графіка навантаження енергосистеми і зміною рівня води в водозбірниках. АСУВ групує насосні агрегати в межах кожної насосної станції по мінімуму їх негативного взаємного впливу для досягнення максимальної енергоефективності процесу водовідведення.

Напівавтоматичний режим роботи є режимом автоматизованого управління і відрізняється від автоматичного режиму роботи тим, що включення і відключення насосних агрегатів здійснюється операторами з місцевих пультів управління за вказівками АСУВ або гірничого диспетчера.

Режим аварійного управління водовідливом з автоматизованого робочого місця гірського диспетчера (АРМ-Д) призначений для почергового відключення насосних агрегатів, що працюють в автоматичному режимі, в аварійних ситуаціях або для управління насосними агрегатами відповідно до плану ліквідації аварії.

Режими управління насосними агрегатами у складі АСУВ:

- дистанційне керування;
- місцеве управління;
- ремонт.

Режим «Дистанційне управління» є основним режимом управління насосним агрегатом – використовується при роботі АСУВ в автоматичному режимі.

Режим «Місцеве управління» є допоміжним режимом управління насосним агрегатом – використовується при роботі АСУВ в напівавтоматичному режимі.

Режим «Ремонт» призначений для автономного управління насосним агрегатом при ревізії, налаштування або визначенні його параметрів.

Аварійна сигналізація видається на екран дисплея оператора у всіх режимах.

1.8.2 Вимоги до надійності

Показники надійності необхідно регламентувати для двох головних функцій АСУВ – управління технологічним процесом і контролю ходу технологічного процесу.

Вимоги щодо надійності формуються виходячи з того, що система управління є багатофункціональною, багатоканальної відновлюваної системою. Вимоги до надійності системи повинні відповідати положенням ДСТУ 24.701-86.

Для підтримки необхідного рівня надійності система повинна бути забезпечена кваліфікованим обслуговуючим персоналом.

1.9 Алгоритми функціонування комплексу водовідливу

1.9.1 Алгоритм визначення поточних параметрів насосних агрегатів

Потенціал енергозбереження при експлуатації комплексів шахтного водовідливу криється в коректній експлуатації насосних агрегатів. Для цього, насамперед, необхідна розробка підходів щодо визначення фактичного технічного стану насосних агрегатів. Необхідно постійне оновлення отриманої інформації, безперервний контроль стану та ефективності обладнання.

Розроблено спеціальний алгоритм моніторингу стану насосних агрегатів. Алгоритм заснований на використанні даних, одержуваних у ході експлуатації комплексу водовідливу в штатних режимах, спеціальні тестові процедури, таким чином, не потрібні.

Перелік параметрів що контролюються:

– електричні параметри приводних двигунів насосів (складові потужності, струм статора);

– розрідження на всмоктуючому патрубку кожного насоса;

– тиск на виході кожного насоса і в ставі;

– рівень вод в приймальному колодязі поверхні;

– Висновок про технічний стан насоса робиться за двома критеріями:

– значенням тиску, що розвивається насосом при роботі на закриту засувку ΔНКЗ;

– величині зміщення (тренда) робочої точки на напірної характеристиці при індивідуальній роботі досліджуваного насоса на мережу, яка характеризується зниженням тиску ΔН і зниженням продуктивності ΔQ щодо положення робочої точки на паспортної напірної характеристиці.

Пояснення до вказанних параметрам подані на рис. 4.1.

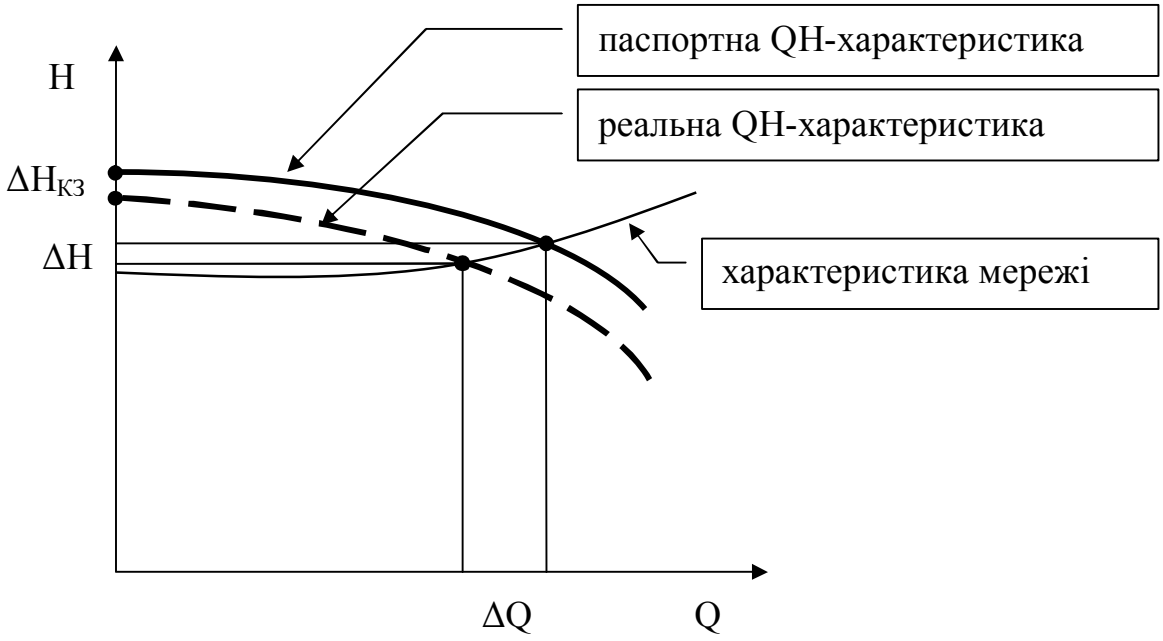


Рисунок 1.14 – Характеристики при індивідуальній роботі насоса

Крім того, значення повного тиску та продуктивності насоса служать для визначення його ККД:

$$\eta_{насоса} = \frac{\gamma g Q\left(H_{вых} + H_{вх}\right)}{P_{эл} \cdot \eta_{эл.двиг}},$$

де γ – питома маса відкачуваної рідини, кг/м^3;

g=9,81 м/сек^2 – прискорення вільного падіння;

Q – подача насоса, м^3/сек;

$H_{ВЫХ}$ – тиск на виході насоса, м;

$H_{ВХ}$ – розрідження на вході насоса, м;

$P_{ЭЛ}$ – активна потужність, що споживається електродвигуном, Вт;

$\eta_{эл.двиг}$ – ККД електродвигуна, в.о.

ККД насоса приймається незмінним в зоні промислового використання насоса та слугує для непрямого розрахунку його подачі при спільній роботі.

Значення гідравлічних параметрів, отримані під час спільної роботи насосів, служать для моніторингу стану мережі водовідливу.

Блок-схема алгоритму моніторингу стану насосного агрегату представлена на рис. 1.15.

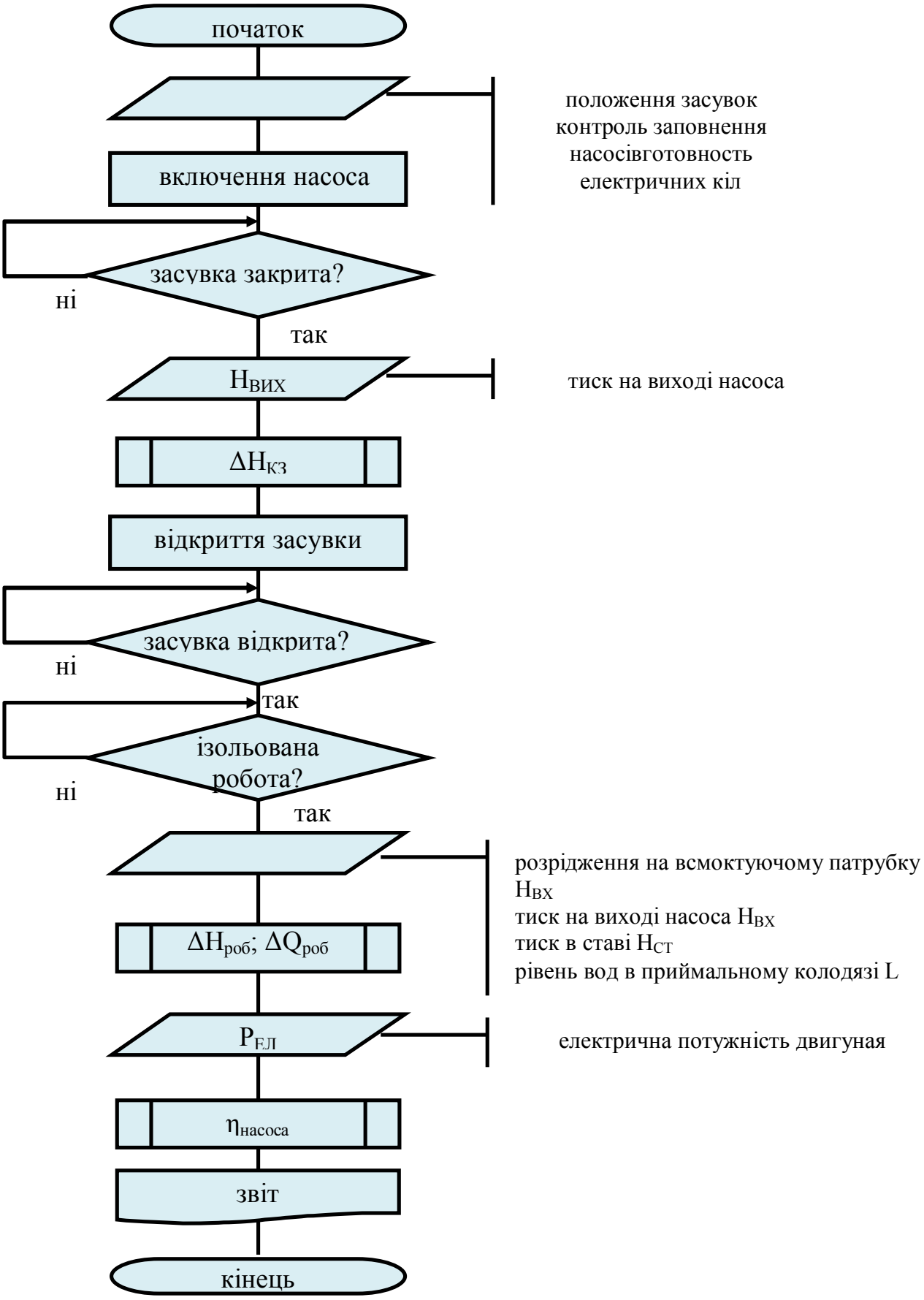


Рисунок 1.15 – Алгоритм моніторингу стану насосного агрегату

1.9.2 Алгоритм класифікації та групування насосних агрегатів за мінімумом негативного взаємного впливу

При проектуванні систем водовідливу або плануванні енергозберігаючих заходів в існуючих системах слід враховувати взаємний вплив параметрів зовнішньої мережі і насосів, а також відмінності QH-характеристик окремих насосів.

Вихідні дані:

– дані про проведені ремонти та заміни насосів / електродвигунів;
– кількість і номери задіяних колодязів;
– кількість і номери задіяних (готових до роботи) насосних агрегатів.

Робота водовідливних установок гор. 300 м і флангової водовідливної установки гор. 225 м.

Словесний опис алгоритму:

Включення насосів можливо при наявності сигналу дозволу (ГОТОВНІСТЬ). Сигнал формується з урахуванням таких обмежень: дозвіл на роботу комплексу водовідливу, дозвіл на роботу певних насосів (через ремонт насосів, електродвигунів, запірної арматури, датчиків і т.д), дозвіл на експлуатацію колодязів (через чищення, ремонтних робіт тощо д). Сигнали «ГОТОВНІСТЬ» для комплексу водовідливу, кожного колодязя і насосного агрегату формуються вручну.

Ім'я насосного агрегату складається з позначення колодязя (A, B, C) і номери насоса в колодязі (1,2,3,4). Таким чином, насосні агрегати іменуються: A1, A2, A3, B1, B2 та т.д.

Кількість працюючих насосів вибирається виходячи з рівня вод в колодязях, поточного тарифу на електроенергію та інших параметрів.

Для визначення комбінації насосів, за якої забезпечуються мінімально можливі витрати електроенергії на відкачування вод (кВт·год/м^3), використовується комплексний підхід, який включає в себе три етапи.

Етап № 1 (апріорний) призначений для ранжирування насосів з енергетичної ефективності. Ранжування виконується за даними ККД кожного насосного агрегату при індивідуальній роботі.

Формується масив, що містить номер (ім'я) насосного агрегату, значення ККД при індивідуальній роботі, і дані про можливість включення насоса (готовності). Виконується сортування масиву за зменьшенням значення ККД.

Результатом етапу є таблиця, зразок якої показаний нижче.

Таблиця 1.3 – Класифікація насосних агрегатів з енергоефективності при індивідуальній роботі (зразок)

№	Насосний агрегат	ККД при індивідуальній роботі	Тиск в робочій точці, м	Подача в робочій точці при фнд. роботі, $м^3$/год	ГОТОВНІСТЬ
	A2	71%	300	290	готов
	B3	68%	295	278	готов
	B1	67%	294	278	не готов
	C3	65%	293	275	готов
	A1	64%	293	275	не готов
	A3	63%	292	274	готов
	…	…	…	…	…

Отриманий список є, фактично, зазначенням пріоритетності включення насосів при індивідуальній роботі.

Етап № 2 полягає в складанні попередніх списків пріоритетності для випадків спільної роботи насосів по два і по три.

Формуються два масиви. У першому стовпці кожного масиву міститься вказівка на поєднання насосів. У другому стовпці міститься результуючий ККД процесу водовідливу при спільній роботі насосів (прогнозоване значення).

Кількість можливих поєднань k насосних агрегатів з їх загальної кількості n визначається за формулою:

$$\binom{n}{k} = C_n^k = \frac{n!}{k!\,(n-k)!}.$$

Таким чином, наприклад, з п'яти доступних насосів можливо 10 варіантів поєднань по два, з десяти насосів – 45 варіантів поєднань. Максимальний розмір таблиці сполучень для випадку двох працюючих насосів – 45 × 2.

З п'яти доступних насосів можливо також 10 варіантів поєднань по три, з десяти насосів – 120. Максимальний розмір таблиці сполучень для випадку трьох працюючих насосів – 120 × 2.

Проводиться сортування масивів за зменьшенням прогнозованого значення ККД. Вважається, що максимальний ККД процесу водовідливу при спільній роботі насосів досягається при виборі насосних агрегатів з найвищих позицій таблиці пріоритетності для індивідуальної роботи.

Пріоритетність вибору поєднань насосів вибирається виходячи з результуючого ККД процесу водовідливу.

Результатом етапу є дві таблиці, зразки яких показані нижче.

Таблиця 1.4 – Таблиця пріоритетності при спільній роботі двох насосних агрегатів (зразок)

№	Поєднання насосних агрегатів	Прогнозований ККД при спільній роботі
	A2 – B3	65%
	B3 – C3	61%
	A3 – B1	55%
	C3 – C1	50%
	…	…

Таблиця 1.5 – Таблиця пріоритетності при спільній роботі трьох насосних агрегатів (зразок)

№	Поєднання насосних агрегатів	Прогнозований ККД при спільній роботі
	A2 – B3 – C3	50%
	B3 – C3 – A3	47%
	A3 – B1 – C1	45%
	C1 – C2 – C3	40%
	…	…

Етап № 3 полягає в експериментальній оцінці енергетичної ефективності процесу водовідливу при спільній роботі насосів.

Етап передбачає наступну послідовність дій:

– включення насосів при їх спільній роботі в різних поєднаннях;

– вимір електричних і гідравлічних параметрів;

– оцінка питомих витрат електроенергії на відкачування вод (кВт·год/м^3) для кожного поєднання;

– корекція таблиць пріоритетності поєднання насосів.

Блок-схема алгоритму

Блок-схема алгоритму представлена на рис. 1.16.

Розглянутий алгоритм є підпрограмою загального алгоритму функціонування автоматизованої системи управління водовідливом.

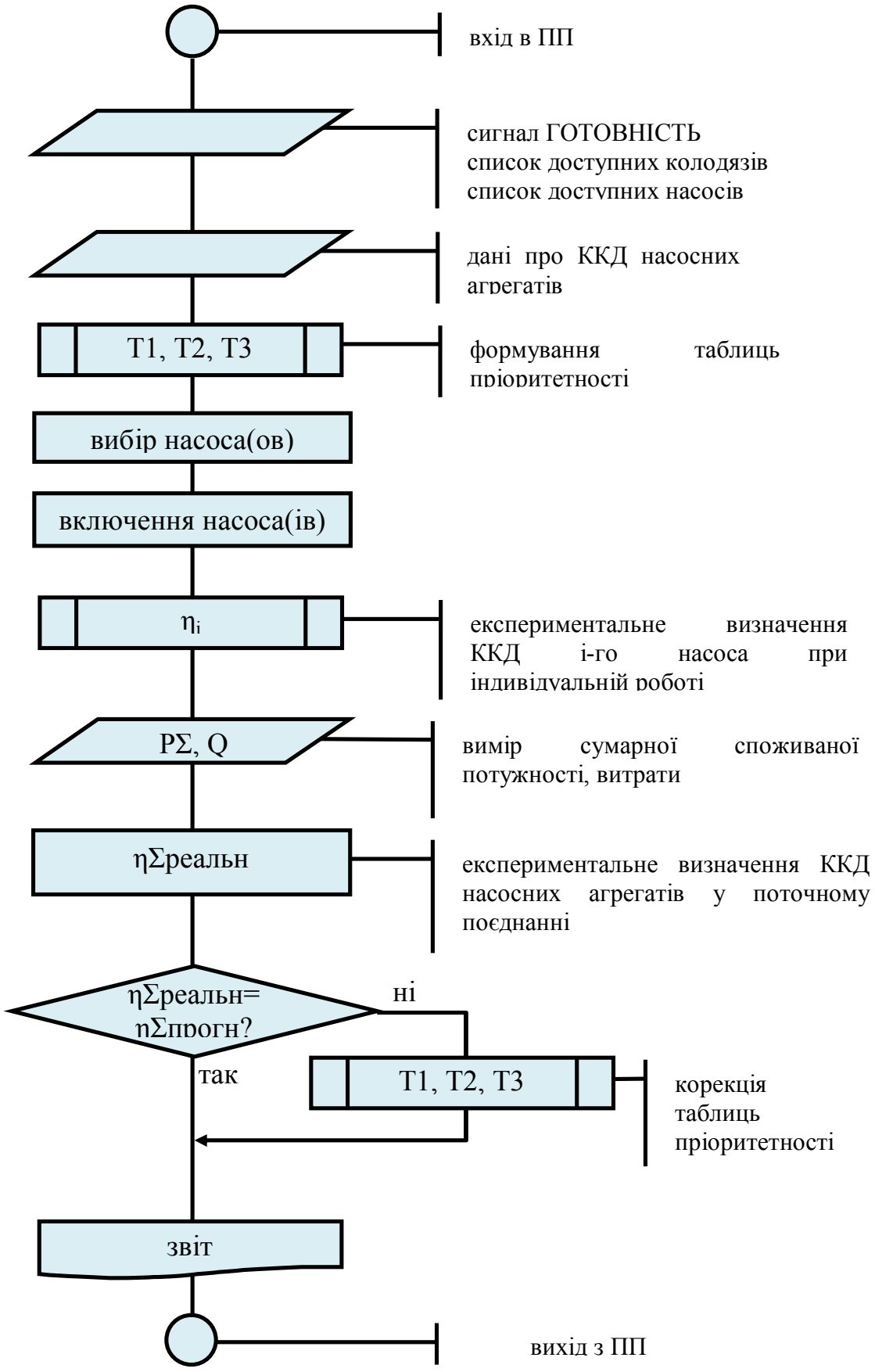


Рисунок 1.16 – Алгоритм класифікації та групування насосних агрегатів за мінімумом негативного взаємного впливу

1.9.3 Алгоритм автоматизованого предпікового включення насосних агрегатів

Вартість електроенергії варіюється протягом доби згідно регламентуючих документів НКРЕ. Це дозволяє енергогенеруючим компаніям забезпечити більш рівномірний темп споживання електричної енергії і, таким чином, ефективне використання електрообладнання. Одночасно, наявність накопичувачів шахтних вод дозволяє розподілити процес відкачування протягом доби так, щоб результуючі грошові витрати виявилися мінімальними. Комплекс водовідливу, таким чином, переводиться в розряд споживачів-регуляторів електроенергії.

Розроблено спеціальний алгоритм, що дозволяє спланувати оптимальний графік включення насосних агрегатів таким чином, щоб забезпечити мінімум результуючих грошових витрат за умови повного відкачування добового водотоку. Нижче представлено детальний опис алгоритму.

Вихідні дані:

– тарифні коефіцієнти для розрахунку вартості електроенергії по зонах доби, межі зон доби (інформація оновлюється за потребою);

– кількість і номери задіяних колодязів;

– кількість і номери задіяних (готових до роботи) насосних агрегатів;

– значення питомих енерговитрат для кожного насоса при їх індивідуальній роботі;

– таблиці пріоритетності включення насосів для випадку спільної роботи двох насосних агрегатів (дані попереднього етапу загального алгоритму);

– таблиці пріоритетності включення насосів для випадку спільної роботи трьох насосних агрегатів. (дані попереднього етапу загального алгоритму).

Словесний опис алгоритму

Цілю алгоритму - є розрахунок кількості насосних агрегатів, яке необхідно задіяти, а також відрізків часу, протягом яких вони повинні працювати, щоб забезпечити мінімальне споживання електроенергії за умови повного відкачування добового припливу вод. Враховуються поточні тарифні коефіцієнти для розрахунку вартості електроенергії по зонах доби, межі зон доби. Враховуються

технологічні обмеження (експлуатовані колодязі, доступні насосні агрегати, припустиме число включень насосного агрегату на добу). Враховується нелінійна залежність результуючої подачі від кількості працюючих насосів.

Алгоритм роботи насосних агрегатів є адаптивним, змінюється в залежності від наступних параметрів:

– поточний рівень водотоку F;

– використовувані колодязі;

– результуюча продуктивність у функції наявних у розпорядженні насосів Q (Nнас).

Алгоритм включає в себе дві стратегії:

– стратегія «А1», яка використовується в пікових зонах, а також під час ранкового та вечірнього полупика;

– стратегія «А2», використовувана в денній зоні полупика і під час нічного тарифу.

Приклад тарифної сітки зображений на рис. 1.17 (тарифи для місяців березень, квітень, вересень, жовтень, згідно постанови НКРЕ України від 20.12.2001 з урахуванням поправок від 01.12.2009).

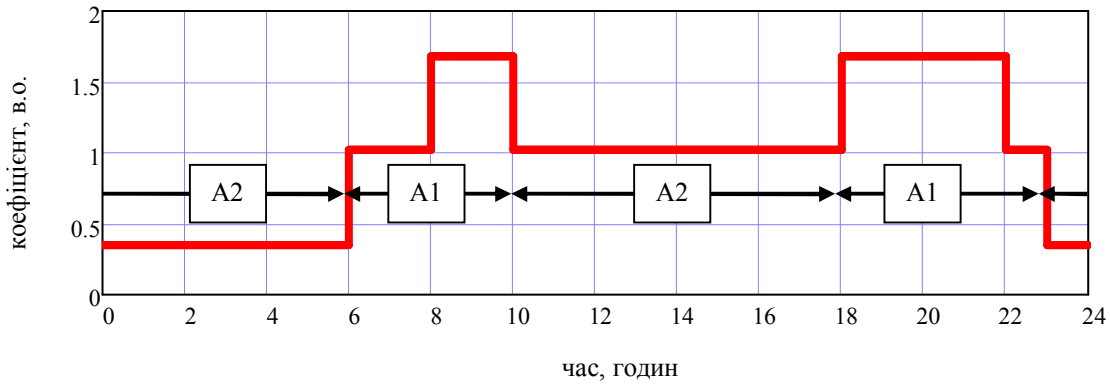


Рисунок 1.17 – Межі тарифних зон і тарифні коефіцієнти для розрахунків за електроенергію для промислових підприємств

Графік роботи насосів розраховується виходячи з допустимого рівня води в колодязях. Порядок розрахунку графіка – інверсний (від кінця до початку).

Стратегія «А1» полягає в забезпеченні мінімальних витрат електроенергії на відкачування вод в години піку, при цьому початковий рівень вод в колодязях –

мінімальний, кінцевий – максимально допустимий. Мета розрахунку для цього інтервалу – пошук мінімально можливої кількості працюючих насосів за умови не перевищення максимально допустимого рівня води в прийомних колодязях.

Рівняння наповнення колодязів за умови постійного водотоку має вигляд

$$L(t) = L_0 + \left[F(t) - Q_\Sigma(t) \right] \cdot S_{ÅÊÂ},$$

де $S_{ЕКВ}$ – еквівалентна площа прийомних колодців, м^2;

L_0 – начальний рівень вод в колодцях, м;

F – поточний рівень водотоку, м^3/сек;

Q_Σ – результуюча продуктивність комплексу водовідливу в залежності від числа працюючих насосів $\eta_{ýë.äâèã}$.

Враховуючи відносно коротку тривалість пікових зон (2 години), графік наповнення насосних агрегатів може бути сформований наступним чином (рис. 1.18):

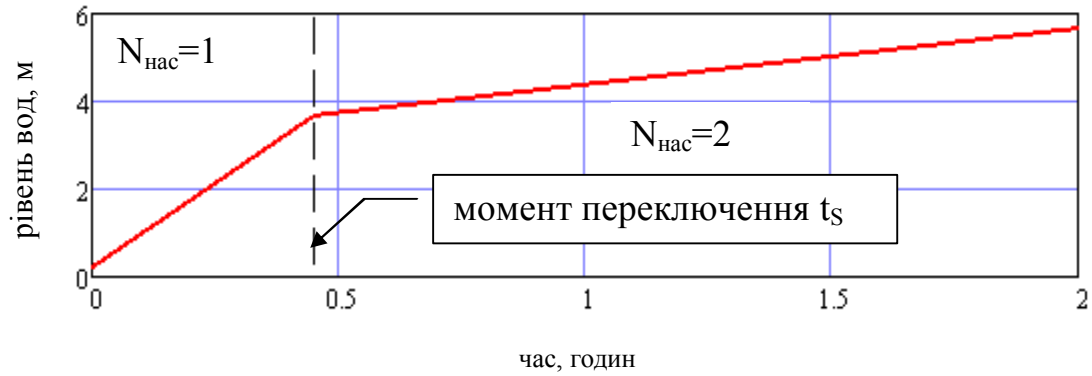


Рисунок 1.18 – График роботи насосів в стратегії «А1» (пікова зона)

Момент перемикання t_S, а також кількість працюючих насосів на кожній дільниці $N_{нас}$ розраховується виходячи з рівня водотоку таким чином, щоб до закінчення пікової зони колодязі були максимально заповнені, а кількість задіяних насосів в пікової зон було мінімальним. В розгляд приймається також варіант повного відключення насосів.

Час t_S і $T_C - t_S$ порівнюється з мінімально допустимим часом роботи електродвигуна. У випадку, якщо цей час менше мінімально допустимого, варіант

відкидається. Виняток становить випадок, коли на обох ділянках працює однакову кількість насосів, включення / вимикання насосів не передбачається.

Можливі поєднання кількості працюючих насосів вибираються з наступної таблиці:

Таблиця 1.6 – Можливі поєднання кількості працюючих насосів

№ поєднання	Кількість працюючих насосів на інтервалі $(0 – t_S)$	Кількість працюючих насосів на інтервалі $(t_S – T_C)$
1	0	0
2	1	0
3	1	1
4	2	0
5	2	1
6	2	2
7	3	0
8	…	…

Максимальний розмір матриці визначається кількістю доступних насосів, для п'яти насосів – 45 × 2 (кількість можливих поєднань $N_{поєд}$=45).

Стратегія «А2» полягає у виборі такого циклу роботи насосів, при якому забезпечуються мінімальні питомі витрати енергії на відкачування вод. Головною умовою є відповідність водотоку еквівалентної подачі комплексу водовідливу.

Проводиться перебір варіантів роботи різної кількості насосів на двох ділянках – спустошення повного колодязя, і наповнення.

Оцінюється час вийшло циклу T_C, результуючі витрати електроенергії W_C, а також питомі витрати енергії на відкачування вод w в кожному разі:

$$w = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot t_S + P_{\Sigma 2} \cdot (T_{C1} - t_S)}{Q_{\Sigma 1} \cdot t_S + Q_{\Sigma 2} \cdot (T_{C1} - t_S)},$$

де $P_{\Sigma 1}, Q_{\Sigma 1}$ – результуюча потужність і подача насосів на ділянці 0-t_S;

$P_{\Sigma 2}, Q_{\Sigma 2}$ – результуюча потужність і подача насосів на ділянці t_S-T_C.

Після закінчення прогнозу на ділянці 0-T_C розглядається ділянка T_C-2T_C-3T_C і т.д. аж до кордону тарифної зони. На останній ділянці алгоритм коригується таким чином, щоб до початку пікової зони забезпечити мінімальний рівень води в колодязі.

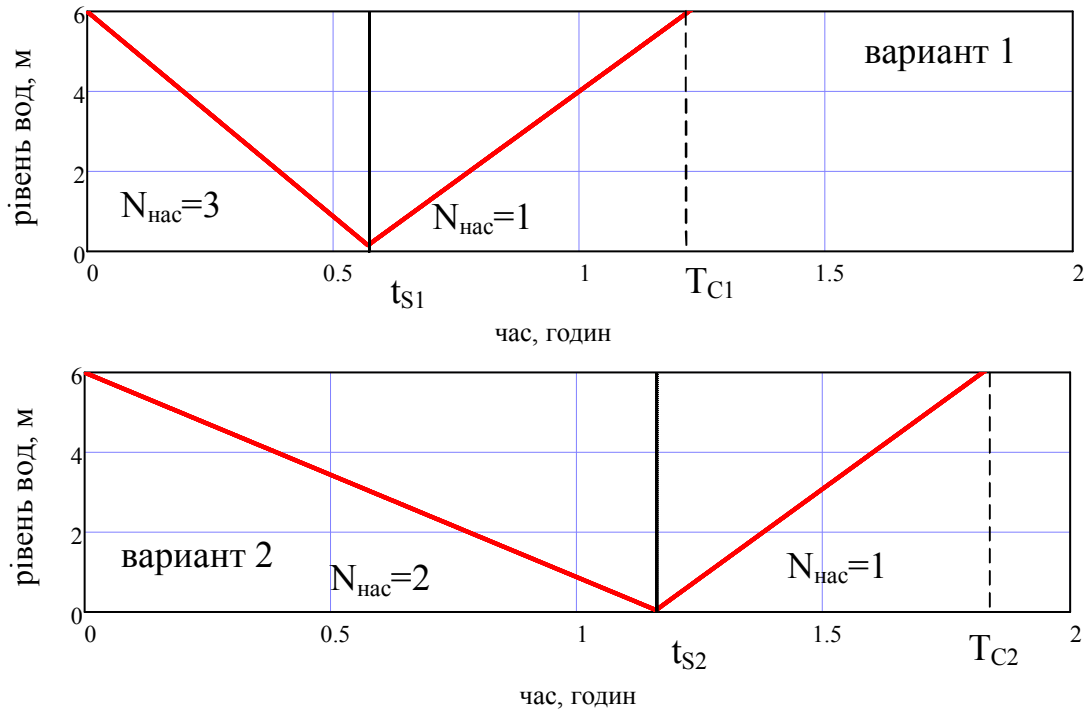


Рисунок 1.19 – Оцінка варіантів циклу роботи насосів в стратегії «А2» (напівпік. ніч)

У всіх випадках, щогодини відбувається оцінка точності прогнозованого рівня вод у криницях. Перевищення прогнозованого рівня свідчить або про збільшення припливу, або про недостатню подачі працюючих насосів. У випадку, коли відбувається накопичення вод (а не спустошення колодязів), проводиться оцінка часу, що залишився до досягнення гранично допустимого рівня. Якщо вийшло час перевищує кордон тарифної зони, алгоритм переглядається, відбувається пошук оптимального поєднання насосів з урахуванням мінливих умов.

Ведеться облік кількості пусків приводних двигунів насосних агрегатів. У випадку, якщо кількість пусків перевищує 5 на добу, зазначений насос переміщається в низ таблиці пріоритетності включення насосів.

Блок-схеми описаних стратегій представлені на рис. 1.20та 1.21.

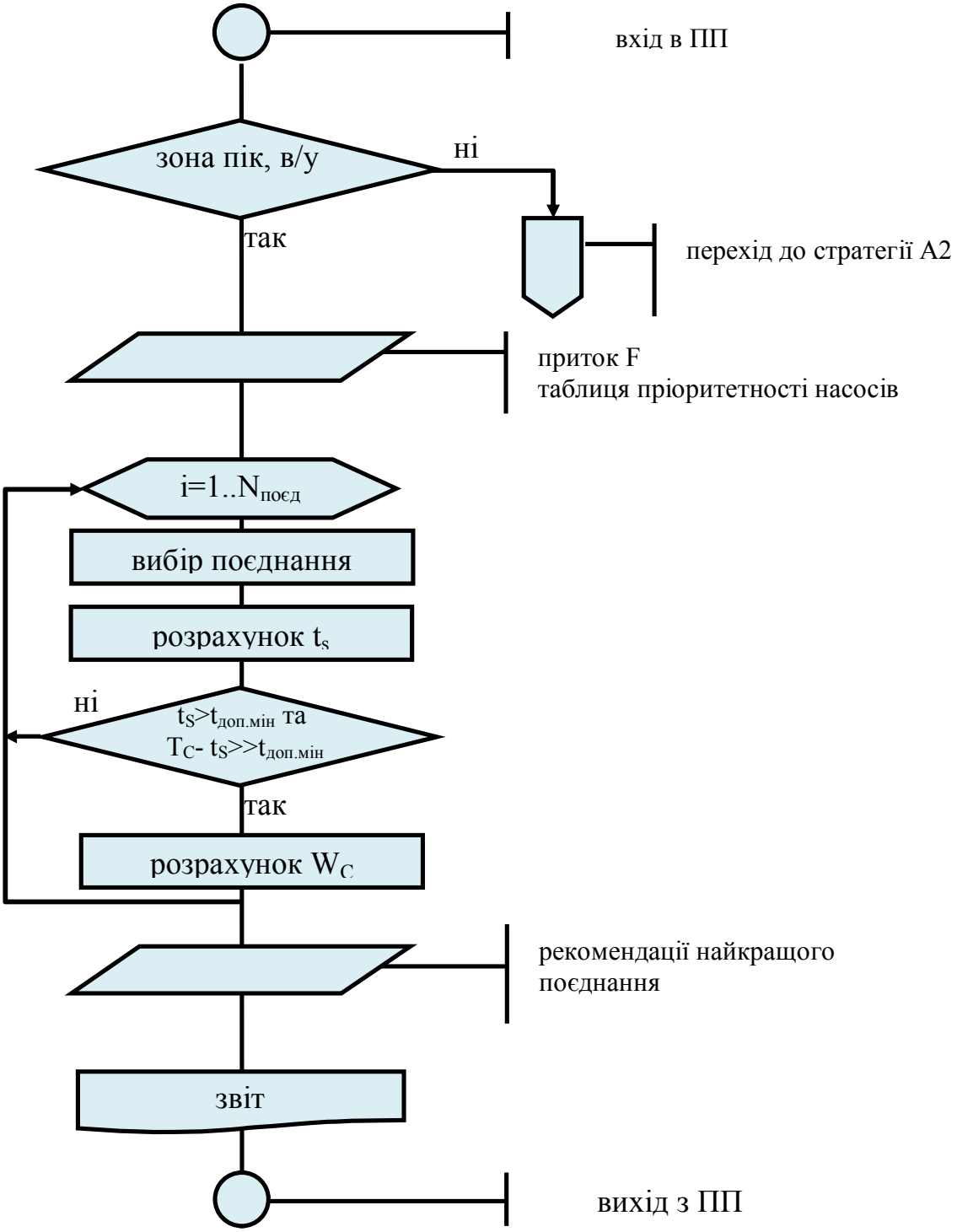


Рисунок 1.20 – Алгоритм стратегії розрахунку графіка роботи насосних агрегатів для пікової зони, ранкового та вечірнього полупика

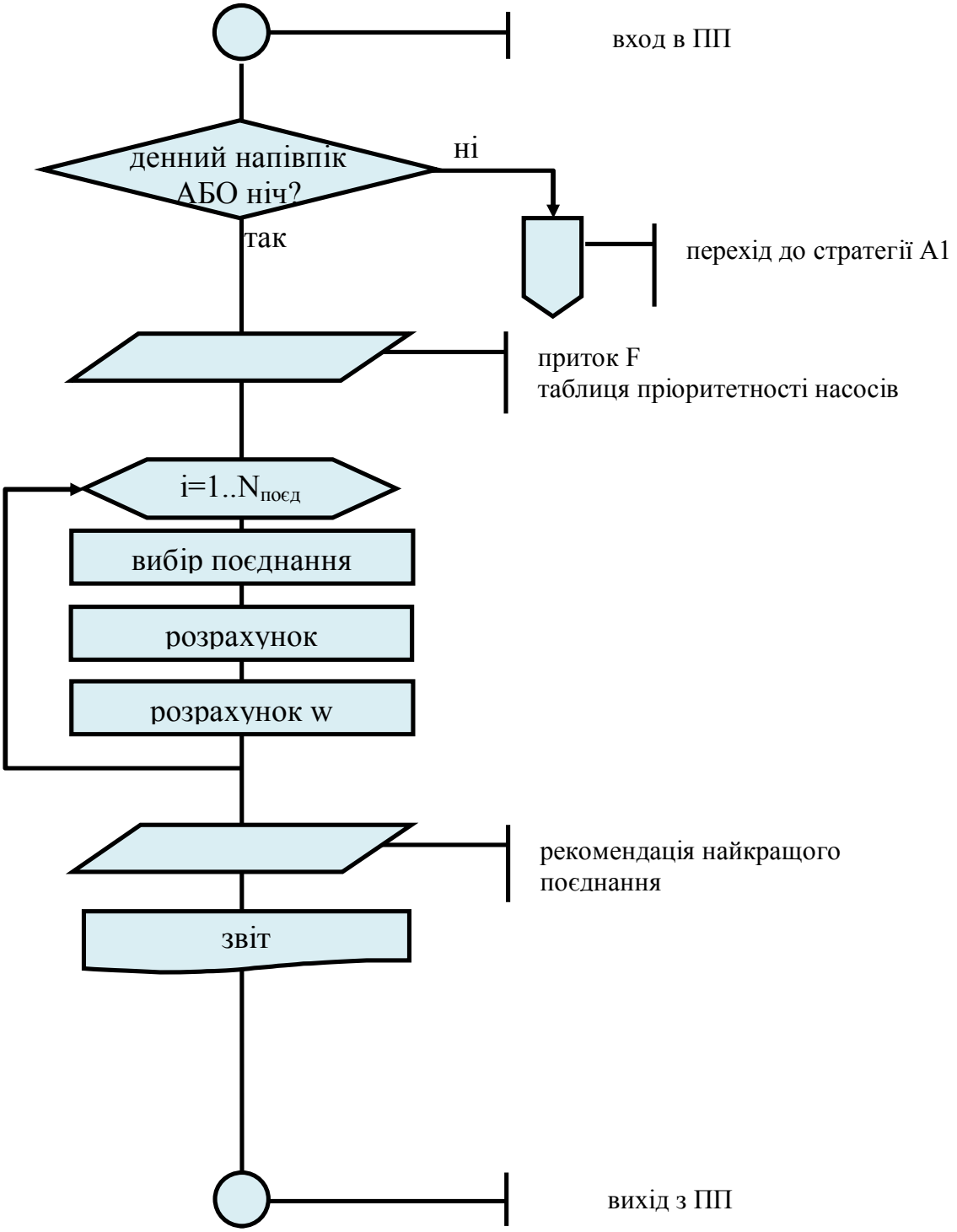


Рисунок 1.21 – Алгоритм стратегії розрахунку графіка роботи насосних агрегатів для пікової зони, ранкового і вечірнього полупика

1.9.4 Алгоритм автоматизованого управління продуктивністю при групуванні насосних агрегатів

Вихідні дані:

Рішення про включення насосних агрегатів приймається на підставі наступних вихідних даних:

– дані про проведені ремонти і заміни насосів / електродвигунів;

– кількість і номери задіяних колодязів;

– кількість і номери задіяних (готових до роботи) насосних агрегатів;

– тарифні коефіцієнти для розрахунку вартості електроенергії по зонах доби, межі зон доби (інформація оновлюється за необхідністю);

– значення питомих енерговитрат для кожного насоса при його індивідуальній роботі (результат алгоритму 1-го етапу);

– таблиці пріоритетності включення насосів для випадку спільної роботи двох і трьох насосних агрегатів (результат алгоритму 2-го етапу).

Словесний опис алгоритму

Загальний алгоритм функціонування автоматизованої системи управління комплексом водовідливу включає в себе наступні і алгоритми та підпрограми:

Алгоритм визначення поточних параметрів кожного насосного агрегату (моніторингу його стану); підпрограма призначена для відстеження тенденції стану насосних агрегатів, а також для визначення ККД агрегатів при їх індивідуальній роботі.

Алгоритм побудови списку пріоритетності включення насосних агрегатів при індивідуальній роботі; підпрограма призначена для видачі рекомендацій з вибору насоса для індивідуальної роботи з числа доступних, при роботі якого забезпечується максимальна енергетична ефективність водовідведення.

Алгоритм визначення питомих енерговитрат на відкачування вод при спільній роботі кількох насосних агрегатів та побудови списку пріоритетності залежно за енергетичними показниками; підпрограма призначена для експериментального визначення питомих енерговитрат при роботі декількох насосних агрегатів та вибору найкращого поєднання насосних агрегатів.

Алгоритм автоматизованого предпікового включення насосних агрегатів; підпрограма призначена для розрахунку оптимальної кількості насосних агрегатів у межах тарифних зон, при якому забезпечуються мінімальні витрати грошових коштів на відкачування вод протягом доби.

Алгоритм штатного запуску насосного агрегату і моніторингу режиму роботи комплексу водовідливу.

Алгоритми (1-4) представлені в анотованих звітах по попередніх етапів, а також у технічному проекті АСУ ТП комплексу водовідливу. Нижче описаний узагальнюючий алгоритм штатного запуску, який можна застосовувати для кожного насосного агрегату. Дано опис алгоритму моніторингу стану комплексу водовідливу.

Алгоритми виконуються поза режимом реального часу, незалежно від поточного режиму роботи водовідливу. За результатами поточних вимірювань і розрахунків коректуються таблиці пріоритетності, зміни в порядку черговості пусків вступають в силу тільки до моменту наступних запусків.

У режимі реального часу, після встановлення засувок та клапанів насосних агрегатів у вихідне положення (за потребою), запускається процедура штатного запуску кожного насосного агрегату. Процедура передбачає:

– заливку насоса;

– запуск приводного двигуна;

– опитування датчиків тиску і запис отриманих даних в пам'ять для подальших розрахунків;

– відкриття вихідний засувки в разі, якщо тиск на виході насоса більше тиску в ставі.

Для запобігання аварійних ситуацій, передбачений опитування датчиків рівня. У випадку, якщо відбувається перевищення максимального рівня, подається команда на включення всіх насосних агрегатів. У випадку, якщо рівень води в колодязях відрізняється від прогнозованого і є нижчим мінімального значення, відбувається поетапне вимкнення насосних агрегатів і коректування алгоритму.

Міститься процедура оцінки поточного технічного стану насосів і електродвигунів – за даними датчиків вібрації і температури. У разі перевищення допустимих рівнів, виводиться сигнал попередження.

На кожному етапі (пуск двигуна насоса і робота на закриту засувку, індивідуальна робота, спільна робота насосних агрегатів) проводиться збір даних про потужність, яка споживається кожним агрегатом і кількості відкачуваної води. Ці дані служать для уточнення ККД насосних агрегатів та корекції таблиць пріоритетності.

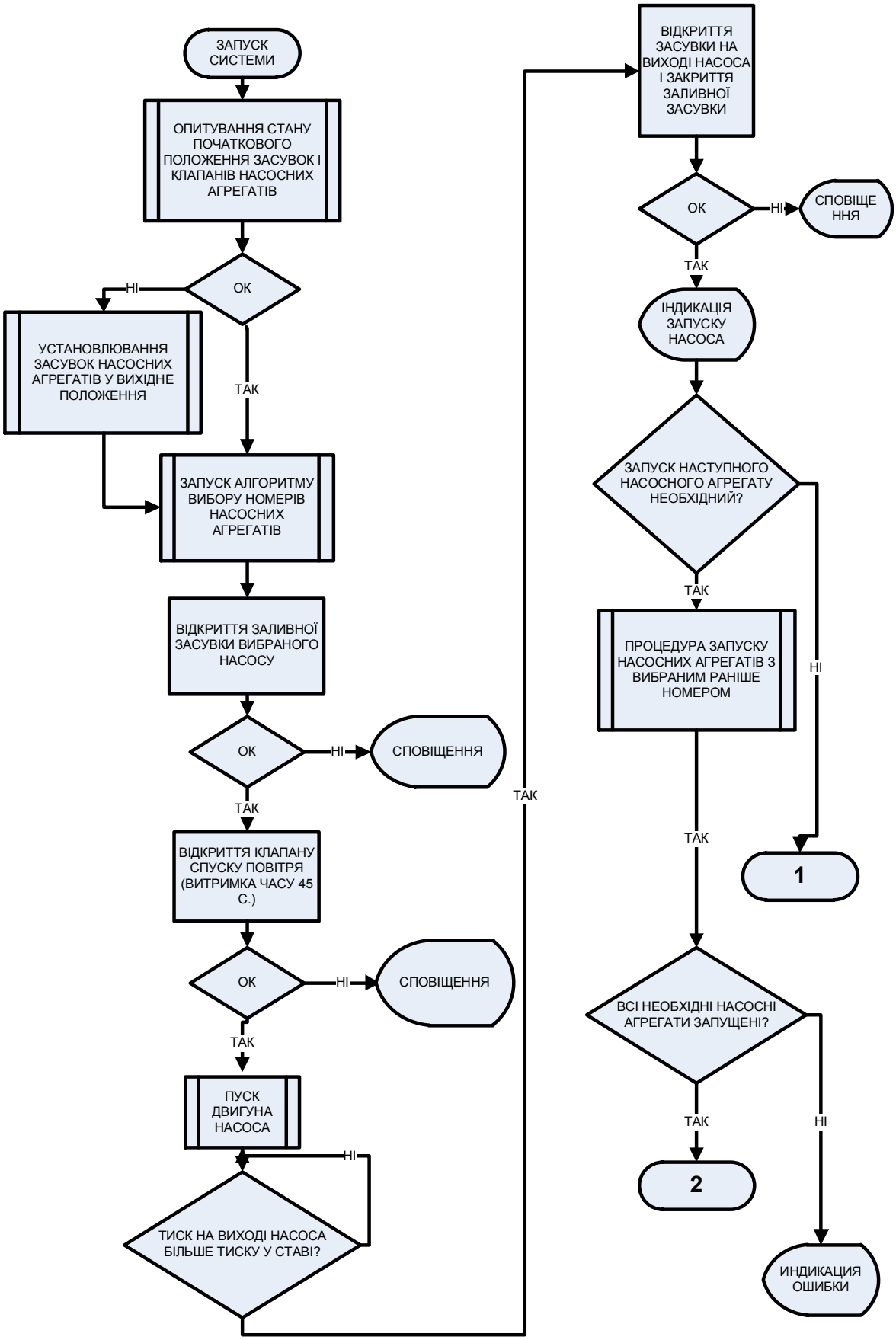


Рисунок 1.22 – Блок-схема алгоритма функціонування АСУ ТП водовідлива

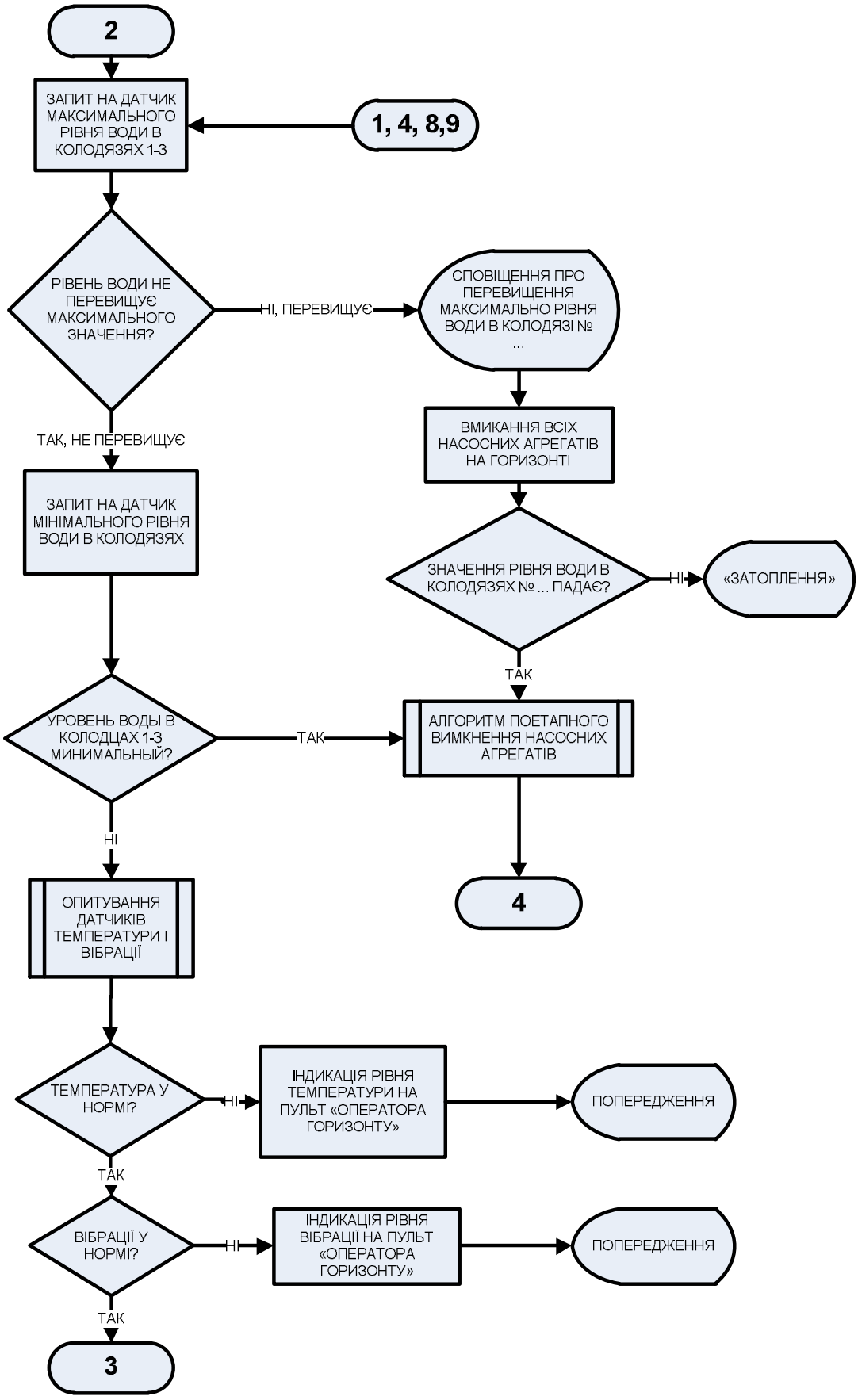


Рисунок 1.22 – Блок-схема алгоритма функціонування АСУ ТП водовідлива (продовження)

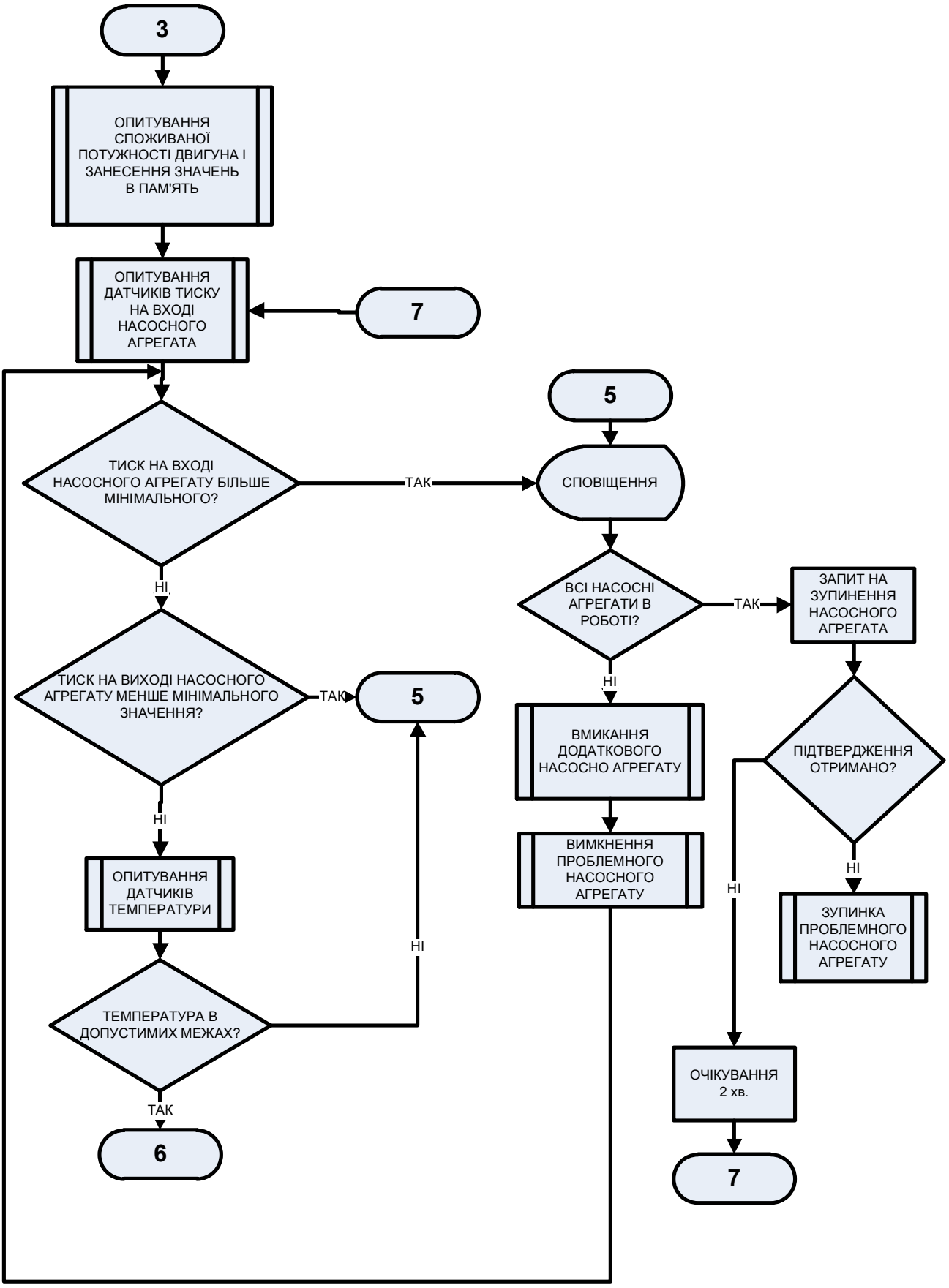


Рисунок 1.22 – Блок-схема алгоритма функціонування АСУ ТП водовідлива (продовження)

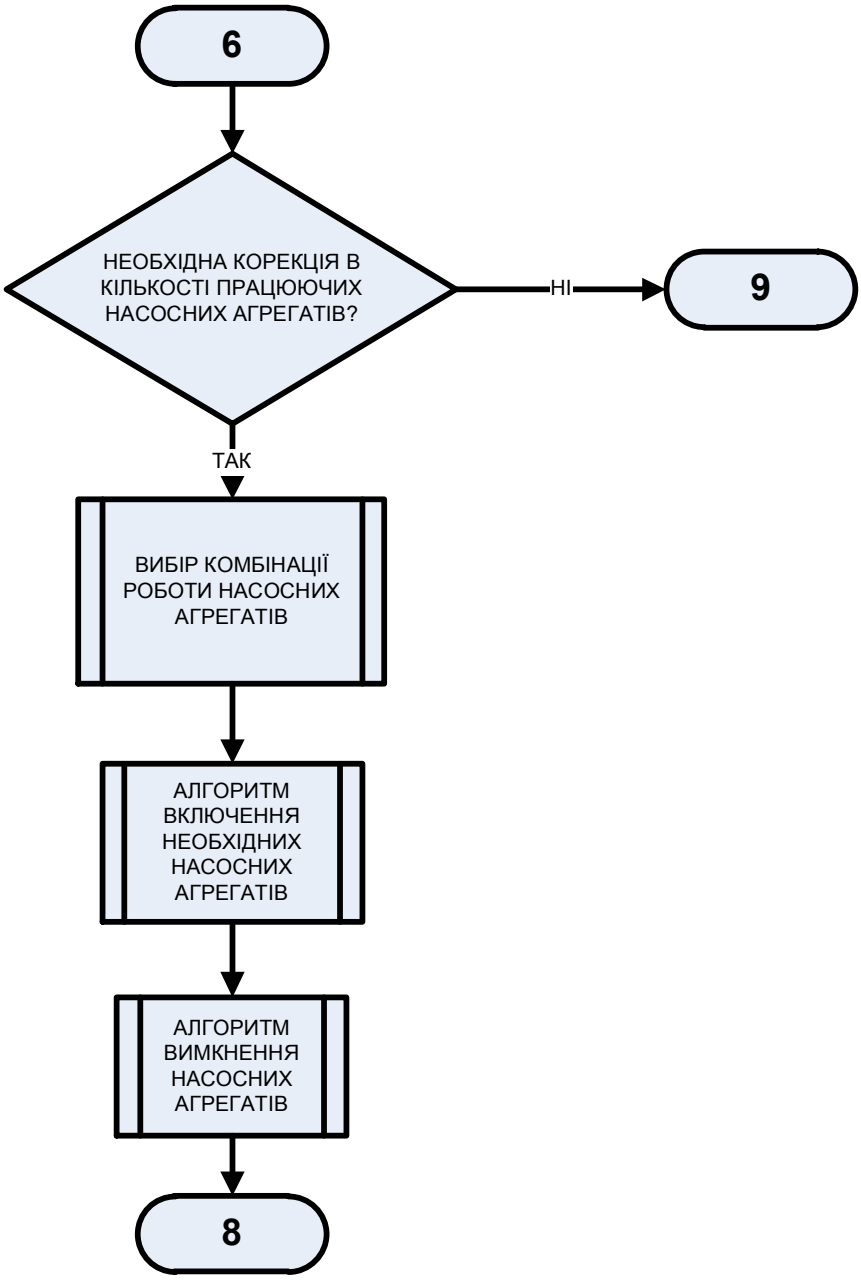


Рисунок 1.22 – Блок-схема алгоритма функціонування АСУ ТП водовідлива (продовження)

1.10 Висновки до розділу 1

1. Джерелом енергозбереження в комплексі шахтного водовідливу є забезпечення якомога більшого ступеня відповідності індивідуальних напірних характеристик насосних агрегатів. При відмінності напірних характеристик насосних агрегатів необхідне застосування методів їх моніторингу і адаптивного управління комплексом шахтного водовідливу, який забезпечує мінімальне питоме енергоспоживання при відкачуванні заданої кількості рідини.

2. При визначенні гідравлічних характеристик агрегатів та системи водовідливу, найбільш доцільне використання методу опосередкованого визначення подачі, що оснований на вимірюванні рівня води в приймальному колодязі на поверхні і розрахунку поточного рівня подачі на основі рівняння Бернуллі.

3. Розроблено алгоритм визначення поточного технічного стану насосних агрегатів. Критеріями стану виступають значення тиску, що розвивається агрегатами в штатних режимах пуску на закриту засувку і при індивідуальній роботі на мережу, а також величина питомих енерговитрат на відкачування шахтних вод.

4. Розроблено алгоритм групування насосних агрегатів по мінімуму негативного взаємного впливу. Алгоритм заснований на прогнозі і подальшої корекції величини питомих енерговитрат при груповій роботі агрегатів у різних поєднаннях.

5. Розроблено алгоритм автоматизованого предпікового включення, суть якого полягає в розрахунку оптимального графіка включення насосних агрегатів, при якому забезпечується мінімальні грошові витрати на відкачування добового водотоку.

6. Сформульовано вимоги, критерії управління і структура автоматизованої системи управління технологічним процесом водовідливу. При інтегруванні всіх алгоритмів енергозберігаючого управління в програмне забезпечення АСУ ТП, система набуває нової якості – система підтримки прийняття рішень, дозволяючи планувати ресурси підприємства.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМУ НЕЙТРАЛІ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ ТА ХАРАКТЕРУ ПОШКОДЖЕННЯ НА КРАТНІСТЬ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ ТА РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З МІНІМІЗАЦІЇ ЗНАЧЕНЬ АВАРІЙНИХ СТРУМІВ ЗАМИКАННЯ І ОБМЕЖЕННЮ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Види і характеристика замикань на землю в розподільних мережах напругою 6 – 10 кВ

Класифікація видів замикання [15, 16, 17, 18]:

– за часом існування замикання поділяються на: короткочасні й сталі;

– за тимчасовою структурою процесу замикання: імпульсні (безперервні в певному малому інтервалі часу, що не перериває напівперіод промислової частоти); перемежовані (переривані в часі) та глухі (безперервні в часі);

– за характером провідного каналу: іскрові, дугові, металеві, через перехідний опір в точці замикання.

Відмінною рисою перемежованого замикання є зміна опору між пошкодженою фазою і землею в широких межах (від 0 до нескінченності) з незначними інтервалами часу. Для перемежованого замикання характерне накладення процесів від різних стрибкоподібних змін ізоляції. Якщо інтервали часу між окремими циклами "порушення ізоляції - обрив провідного каналу" досить великі для того, щоб процеси від кожного з циклів встигли згаснути і не накладалися на наступні, то такі порушення ізоляції можна розглядати як окремі імпульсні замикання.

Імпульсні замикання відносяться до групи короткочасних. За стадією процесу імпульсні замикання поділяються на середньочастотні і промислово-частотні. Середньочастотні імпульсні замикання можуть бути іскровими, у випадку, якщо провідний канал припиняє своє існування після першого ж проходження на нуль середньочастотного струму замикання, або дуговим, якщо канал обривається після загасання средньочастотного струму. Імпульсне промисловочастотне замикання є іскровим. Для нього характерний обрив

провідного каналу при першому проходженні через нуль струму промислової частоти без подальшого повторного пробою ізоляції.

Переміжні замикання, також як і імпульсні, поділяються на середньочастотні і промисловочастотні. Середньочастотні переміжні замикання можуть носити іскровий або дуговий характер. У разі іскрового характеру замикання представляє з себе послідовність імпульсів струму тривалістю в напівперіод середньої частоти. У разі дугового характеру замикання є послідовністю затухаючих середньочастотних коливань, кожна група яких виникає при подальшому пробої. Переміжні середньочастотні замикання правомірно віднести до короткочасних замикань, тому в них не міститься довготривалих складових промислової частоти і вищих гармонік.

Переміжні промисловочастотні замикання є, навпаки, сталими. Вони носять дуговий характер і часто іменуються переміжними дугами. Гасіння переміжної дуги відбувається при проходженні струму промислової частоти через нуль, після чого протягом деякого інтервалу часу провідний канал відсутній, а потім на передньому фронті півхвилі поновлюваної напруги відбувається повторний пробій. У наступному півперіоді процес повторюється. Таким чином, струм при переміжному частотному дуговому замиканні має характер послідовних півхвиль промислової частоти з накладеними перехідними складовими.

При дуговому замиканні опір між пошкодженою фазою і землею практично незмінні і дорівнюють нулю. Глухі замикання відносяться до групи сталих. За характером провідного каналу вони можуть бути дуговими або металевими. Глухе дугове замикання має місце при досить високій температурі провідного каналу, коли він не встигає відновити свій опір, навіть при проходженні струму замикання через нуль. Причиною утворення металевого провідного каналу є наявність між фазою і землею зовнішнього провідника з малим опором.

В деяких випадках замикання на землю є досить складним процесом. Наприклад, воно може початися у вигляді імпульсного середньочастотного іскрового замикання, потім перейти в переміжне іскрове, наступним етапом може бути імпульсне середньочастотне дугове замикання, яке може перейти в переміжне

середньочастотне дугове замикання. Найбільшу небезпеку представляє саме переміжне дугове замикання, перенапруги можуть досягати значних величин, що підвищують ймовірність появи другого пробою ізоляції і вносить небезпеку термічного руйнування міжфазової ізоляції.

Хвильова стадія перехідного процесу при замиканнях на землю обумовлена поширенням вздовж лінії хвилі струму, що розряджає ємність відносно землі пошкодженої фази від попереднього замикання значенням фазної напруги до нуля, а також перерозподіляє заряди між міжфазними і фазними ємностями непошкоджених фаз. Хвильова стадія перехідного процесу не характерна для кар'єрних розподільних мереж в силу відносно малих значень фізичної довжини ліній.

Після затухання перехідного процесу настає стала стадія замикання, обумовлена протіканням ємнісних струмів промислової частоти і вищих гармонік.

2.2 Перехідні процеси у розподільних мережах при замиканнях на землю

Відповідно до діючих галузевих Правил безпеки захисти від однофазних замикань на землю в кар'єрних мережах повинні діяти на відключення без витримки часу, тобто аварійний режим є короткочасним. У зв'язку з цим слід говорити про перехідні процеси як на початку аварійного режиму, так і після його завершення, тобто, після відключення пошкодженого приєднання або самоліквідації замикання на землю [19, 20, 21, 22].

Мережа з повністю ізольованою нейтралю

Пошкодження ізоляції відносно землі однієї з фаз призводить до повного перерозподілу напруг фазних проводів у всій системі і джерелом зміни є місце ушкодження. Перехідний процес характеризується в цьому випадку стіканням заряду з провідників пошкодженої фази і розряду їх до потенціалу землі та перенесенням додаткового заряду неушкодженим фазам для передачі їм нового потенціалу щодо землі. Відповідно до спрощеної схеми заміщення мережі, представленої на рис. 2.1, запишемо вираження для максимальних значень трьох

складових струму металевого замикання на землю, що створюють струм замикання в перехідному режимі [17, 21].

1. Стала складова перехідного струму

$$I_з = 3U_ф \omega C \tag{2.1}$$

2. Перехідна складова, що залежить від моменту замикання фази на землю й обумовлена стрибкоподібною зміною потенціалу нейтралі при виникненні замикання на землю при напрузі пошкодженої фази відмінною від нуля:

$$i_{a1} = -\frac{2}{3} I_{зм} \frac{C}{C + C_M} \sin \omega t_0 \tag{2.2}$$

3. Перехідна складова, обумовлена зміною напруг непошкоджених фаз:

$$i_{a2} = -\frac{2}{3} I_{зм} \frac{C}{C + C_M} \frac{\omega_{св}}{\omega} \cos \omega t_0, \tag{2.3}$$

де C_M – міжфазна ємність усієї електрично-зв'язаної мережі; t_0 – початок відліку часу, відповідний моменту позитивного максимуму напруги пошкодженої фази; $\omega_{св}$ – кутова частота вільних коливань системи у режимі однофазного замикання на землю.

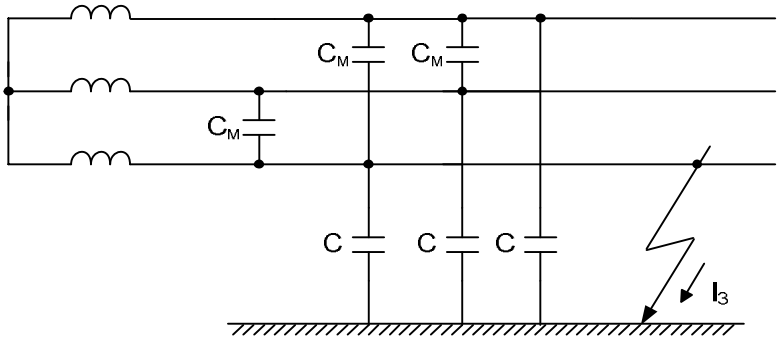


Рисунок 2.1 – Схема заміщення розподільної мережі,
що представляє коливальний контур

З виразів (2.1) – (2.3) видно, що амплітудне значення перехідної складової i_{a1} в порівнянні зі значенням сталої складової струму замикання I_3, визначається в основному відносними значеннями фазної і міжфазної ємностей мережі. Максимальне значення перехідної складової i_{a2} у порівнянні зі сталим струмом замикання залежить, крім співвідношення фазної і міжфазної ємності, від співвідношення частоти вільних коливань і примусових коливань (промислової частоти). Враховуючи, що

$$\omega_{св} = \sqrt{\frac{1}{3L_{ф}\left(C + C_{M}\right)}} \tag{2.4}$$

і для реальних параметрів розподільчих мереж у 2,5...22 рази перевищує про-промислову частоту, максимальне значення перехідної складової i_{a2} може перевищувати значення усталеного струму замикання, приблизно, від 1,4 до 14 разів.

Миттєве значення сумарного струму металевого замикання однієї фази на землю для будь-якого моменту часу з урахуванням перехідного режиму визначиться виразом:

$$i_{\Sigma} = I_{ЗМ}\begin{cases} \sin\omega t \cdot \left(-\frac{2}{3}\right) \cdot \frac{C}{C + C_{M}} \cdot e^{-\delta_1 t} \times \\ \times \left[\sin\omega t_0 \cos\omega_{св}\left(t - t_0\right) + \frac{\omega_{св}}{\omega}\cos\omega t_0 \sin\omega_{св}\left(t - t_0\right)\right] \end{cases} \tag{2.5}$$

де $\delta_1 \approx 1/(2CR)$ – коефіцієнт, що враховує ступінь затухання; R – активний опір ізоляції фази мережі відносно землі.

Перехідний процес характеризується появою, крім вільних коливань середньої частоти, в початковій стадії високочастотних (десятки і сотні кГц) коливань розрядного струму, обумовлених зміною заряду ємності відносно землі

пошкодженої фази. Високочастотні коливання затухають, як правило, протягом чверті періоду промислової частоти.

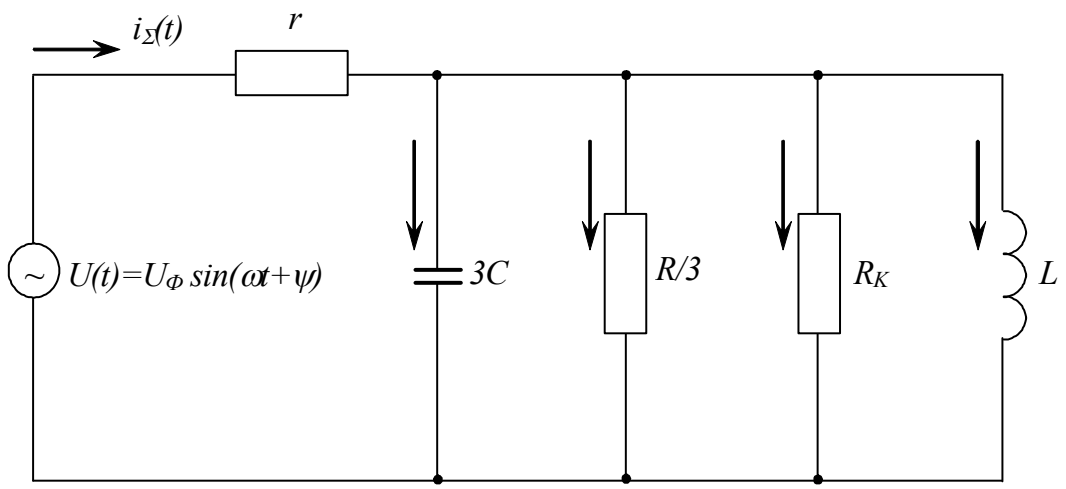


Рисунок 2.2 – Схема заміщення розподільної мережі для дослідження перехідних процесів при замикані фази на землю

У мережі з ізольованою нейтраллю перехідний струм при виникненні замикання на землю з урахуванням перехідного опору в точці замикання та без урахування індуктивного опору фаз мережі визначиться виразом [22, 23, 24] (рис. 2.2), R_k, L_k приймаються рівними нескінченності):

$$i_\Sigma(t) = 3U_\phi \sqrt{\frac{(\omega CR)^2 + 1}{(3\omega CRr)^2 + (3r+R)^2}} \times$$
$$\times \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{R}{3r\sqrt{(\omega CR)^2 + 1}} \cdot \sin(\psi + \gamma) \cdot e^{-\frac{3r+R}{3Rr\omega C}t} \right], \tag{2.6}$$

де r – перехідний опір у точці пошкодження; ψ – початкова фаза напруги пошкодженої фази; φ – фазова характеристика загального опору мережі, яка дорівнює

$$\varphi = arctg \frac{-\omega CR^2 r}{r(3r+R) + (\omega CRr)^2}, \ \gamma = arctg\left[-\frac{3\omega CRr}{3r+R} \right].$$

Максимальна амплітуда вільної складової перехідного струму буде мати місце за умови $\psi + \gamma = \pm\frac{\pi}{2}$ і визначиться виразом

$$i_{асв} = U_{ф}\frac{R}{r\sqrt{(3\omega CRr)^2 + (3r + R)^2}} \tag{2.7}$$

Спільний аналіз виразів (2.6) і (2.7), після перетворень, дозволяє отримати вираз для вільної складової перехідного струму через максимальне значення сталого струму замикань на землю

$$i_{асв} = I_{ЗМ}\frac{y}{3Y} = I_{ЗМ}\frac{z}{r} = I_{ЗМ}\frac{R}{3r\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} \tag{2.8}$$

і зробити висновок, що кратність кидка вільної складової струму замикання визначається співвідношенням повного опору ізоляції всієї мережі щодо землі

$$Z = \frac{R}{3\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$$

і перехідного опору в точці замикання на землю r.

Вільна складова перехідного струму дорівнює нулю при виконанні умови $\psi + \gamma = 0$. У цьому випадку перехідний процес відсутній, а струм у колі буде рівним примушеній складовій (сталому значенню).

Аналіз отриманих виразів показує, що кратність перехідного струму при замиканнях на землю в мережах з ізольованою нейтраллю залежить від моменту замикання (від діючого значення фазної напруги), в деякій мірі від параметрів ізоляції мережі відносно землі і від значення перехідного опору в точці замикання. Зі збільшенням останнього, амплітуда перехідного струму різко зменшується.

Параметри ізоляції мережі відносно землі і перехідного опору в місці пошкодження впливають також на тривалість перехідного процесу. При значенні перехідного опору в точці замикання на землю на рівні 100÷200 Ом, перехідний

процес в мережі з ізольованою нейтраллю з періодичного затухаючого переходить в аперіодичний. При металевих замиканнях на землю в мережі з ізольованою нейтраллю можна вважати, що для реальних параметрів мережі перехідний процес практично закінчується за 10 ... I5 мс (рис. 2.3).

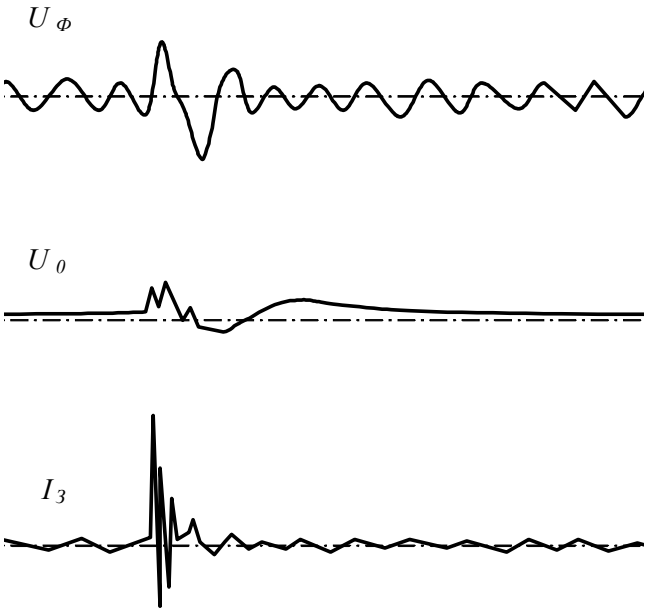


Рисунок 2.3 – Осцилограми перехідного процесу при замиканні на землю

Мережа з ізольованою нейтраллю

Залежно від співвідношення параметрів розподільної мережі (включаючи і параметри пристрою, що компенсує) перехідний процес може носити коливальний або аперіодичний характер [22, 23]. Коливальний перехідний процес виникає при виконанні умови

$$\frac{1}{4R_{\Sigma}^2C_{\Sigma}^2} < \frac{1}{L_kC_{\Sigma}} \tag{2.9}$$

аперіодичний перехідний процес настає при

$$\frac{1}{4R_{\Sigma}^2C_{\Sigma}^2} \geq \frac{1}{L_kC_{\Sigma}}, \tag{2.10}$$

де L – індуктивність пристрою, що компенсує; $C_\Sigma = 3C$ – сумарна ємність електрично зв'язаної мережі відносно землі; R_Σ – сумарний активний опір всієї мережі відносно землі в аварійному режимі, з урахуванням перехідного опору визначається виразом

$$R_\Sigma = \frac{RR_k r}{RR_k + Rr + 3R_k r},$$

де R_k – еквівалентний активний опір, що імітує активні втрати у пристрої, що компенсує.

Вільна складова перехідного струму в електричній мережі при резонансному налаштуванні пристрою, що компенсує має коливальний характер. Частота затухаючих коливань і найбільше значення вільної складової перехідного струму визначаться виразами:

$$\omega_{св} = \sqrt{\frac{1}{LC_\Sigma} - \frac{1}{4R_\Sigma^2 C_\Sigma^2}} = \sqrt{\frac{1}{LC_\Sigma} - \delta_2^2};$$

$$i_{св.т} = U_ф \frac{z}{z_n r} = \frac{I_з z}{r}, \qquad (2.11)$$

де $z = R_n = RR_k/(R + 3R_k)$ – модуль повного опору ізоляції усієї мережі відносно землі при резонансному налаштуванні пристрою, що компенсує; $z_n = r + R_n$ – модуль повного опору всієї мережі для перехідного струму при резонансній настройці пристрою, що компенсує; δ_2 – коефіцієнт, що враховує ступінь затухання процесу, що визначається формулою

$$\delta_2 = \frac{1}{2R_\Sigma C_\Sigma} = \frac{1}{6R_\Sigma C}. \qquad (2.12)$$

З виразів видно, що максимум вільної складової перехідного струму в мережі з компенсованою нейтраллю так само, як і в мережі з ізольованою нейтраллю може перевищувати амплітуду усталеного струму в число раз, визначається співвідношенням модуля повного опору ізоляції мережі відносно землі до перехідного опору в точці замикання. Тривалість перехідного процесу в компенсованих мережах становить кілька періодів промислової частоти.

Мережа з резистором в нейтралі

У таких мережах перехідний процес за характером практично не відрізняється від перехідного процесу в мережі з ізольованою нейтраллю. Однак включення резистора в нейтраль мережі призводить до різкого зменшення активного опору ізоляції мережі відносно землі.

$$R' = RR_a /(R + 3R_a),$$

і відповідно до збільшення коефіцієнта загасання перехідного процесу, чим досягається різке скорочення тривалості та зменшення кратності аварійних струмів перехідного процесу.

2.3 Вплив режиму нейтралі на рівень перенапруг при замиканнях на землю

За інших рівних умов надійність кар'єрних розподільних мереж визначається пошкоджуваністю елементів мережі, яка в свою чергу в значній мірі залежить від рівнів внутрішніх перенапруг в системі електропостачання. Характер перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю, як вже встановлено, залежить від режиму нейтралі розподільчої мережі. При цьому природно очікувати залежності кратності перенапруг, що супроводжують однофазні замикання на землю, від характеру і параметрів заземлення нейтралі.

Мережі з повністю ізольованою нейтраллю

Найбільший рівень напруги між неушкодженими фазами і землею на підставі теорії Петерса і Слепяна визначається виразом [24, 25, 26]

$$U_{пер} = \frac{3}{2} U_{ф} \frac{\frac{3}{2} + \frac{C(1-d)}{C + C_M}}{\frac{3}{2} - \frac{C(1-d)}{C + C_M}(1-a)} \qquad (2.13)$$

де C_M – сумарна міжфазна ємність електрично зв'язаної мережі; $(1-a)$ – коефіцієнт, що враховує зменшення утриманих зарядів за рахунок активної провідності і в мережах з ізольованою нейтраллю може приймати значення від 0,85 до 0,95; $(1-d)$ - коефіцієнт, що враховує затухання амплітуди власних коливань і пов'язаний з втратами в коливальному колі при замиканні на землю і в загальному випадку визначається формулою $(1-d) = e^{-1/(4rCf_{cd})}$, r – перехідний опір у точці замикання; $f_{св}$ – частота вільних коливань перехідного процесу.

З урахуванням можливих змін понижуючих коефіцієнтів, для реальних параметрів кар'єрних розподільних мереж максимальне значення напруги між здоровими фазами і землею знаходиться на рівні 4,5 фазної напруги. Для цих же мереж теоретичний максимум напруги зміщення нейтралі складає триразову фазну напругу.

Системи електропостачання з повністю ізольованою нейтраллю в порівнянні з мережами із іншими режимами нейтралі не вимагають додаткових капітальних витрат. Однак експлуатаційні витрати в мережах з повністю ізольованою нейтраллю за рахунок більшої пошкоджуваності, а також за рахунок збитків від перерв електропостачання значно більше, ніж у мережах, що працюють з іншими режимами нейтралі. Слід також зазначити, що можна в деякій мірі знизити експлуатаційні витрати і збитки від перерв за рахунок застосування обладнання і електричних мереж з більш високим рівнем ізоляції, що, звичайно, вимагає додаткових капітальних вкладень.

Мережі з компенсованою нейтраллю

Компенсація ємнісного струму однофазного замикання на землю в електричних мережах застосовується при перевищенні значення ємнісного струму однофазного замикання на землю в сталому режимі понад допустимого нормативними документами (більше 30 А при напрузі 6 кВ; більше 20 А - 10 кВ і більше 10 А - 35 кВ). Ефективність компенсації ємнісних струмів і ефективність роботи електричних мереж з компенсованою нейтраллю у значній мірі залежить від режиму налаштування пристрою, що компенсує. Більшість дослідників при цьому віддають перевагу резонансному налаштуванню індуктивності пристрою, що компенсує з ємністю мережі щодо землі, тобто

$$X_L = X_C \qquad \text{або} \qquad \omega L_k = \frac{1}{3\omega C}, \tag{2.14}$$

де X_L і X_C – відповідно індуктивний пристрій, що компенсує і ємнісний опір всієї електрично зв'язаної мережі відносно землі; L_k – індуктивність пристрою, що компенсує; C – ємність однієї фази всієї електрично зв'язаної мережі відносно землі.

Умова (2.14) в сталому режимі однофазного замикання на землю забезпечує рівність за значенням ємнісної I_C і індуктивної I_L складових струмів замикання на землю і, враховуючи їх напрям, залишковий струм замикання буде рівним активній складовій струму замикання (без урахування гармонійних складових струму замикання) . У разі недотримання умови (2.14) залишковий струм визначається як геометрична сума активної і реактивної складових. Реактивна складова в свою чергу залежить від ступеня розладу (відхилення від резонансної настройки) компенсації:

$$v = \frac{I_L - I_C}{I_L} = 1 - 3\omega^2 C L_k = 1 - K \tag{2.15}$$

де $K = \frac{I_C}{I_L} = 3\omega^2 CL$ – коефіцієнт (ступень) настройки пристрою, що компенсує.

Крім резонансного режиму настройки пристрою, що компенсує, розрізняють також режим недокомпенсації (залишковий реактивний струм замикання на землю носить ємнісний характер) і перекомпенсації (залишковий реактивний струм замикання на землю носить індуктивний характер).

Якщо оцінювати надійність електропостачання електроприймачів пошкоджуваністю елементів розподільних мереж, то слід вказати на безпосередній зв'язок цього показника з режимом настройки пристрою, що компенсує, так як саме налаштуванням пристрою, що компенсує визначається рівень перенапруг в мережі при однофазних замиканнях на землю.

На рис. 2.4 показані криві залежності максимальної кратності перенапруг від ступеня розладу компенсації [26, 27]. Значення коефіцієнта, γ, що враховує фактори, що знижують перенапруги, в загальному випадку залежить від частоти коливань вільних складових струму замикання, довжин ліній розподільної мережі, розташування місця пошкодження щодо джерела, опору у колі замикання і з достатньою для практичного застосування точністю може бути визначено за виразом :

$$\gamma = \frac{U_{пкр} - U_{кон}}{U_{нач}}, \qquad (2.16)$$

де $U_{кон}$ – миттєве значення напруги на пошкодженій фазі, стале безпосередньо після замикання на землю; $U_{нач}$ – значення напруги на непошкодженій фазі в момент замикання.

Для реальних параметрів кар'єрних розподільних мереж даний коефіцієнт знаходиться на рівні 0,8...0,9 [27].

З рис. 2.4 видно, що при резонансному налаштуванні пристроя, що компенсує, а також при його розлагодженні в межах 5%, навіть теоретично перенапруги на непошкоджених фазах не можуть перевищити 2,75 $U_{ф}$. Зниження рівня перенапруги обумовлено створенням зручного шляху для стоків статичних зарядів по фазах за рахунок включення в нейтраль мережі дугогасного реактора.

Збільшення ступеня розладу компенсації від 5 до 30 ... 40% призводить до швидкого наростання рівня перенапруг. Необхідно відзначити, що при розладі пристрою, що компенсує на 20 ... 25% від резонансного, ефективність пристроїв, що компенсують в частині обмеження перенапруг при замиканнях на землю практично не відчувається в порівнянні з мережами з повністю ізольованою нейтраллю.

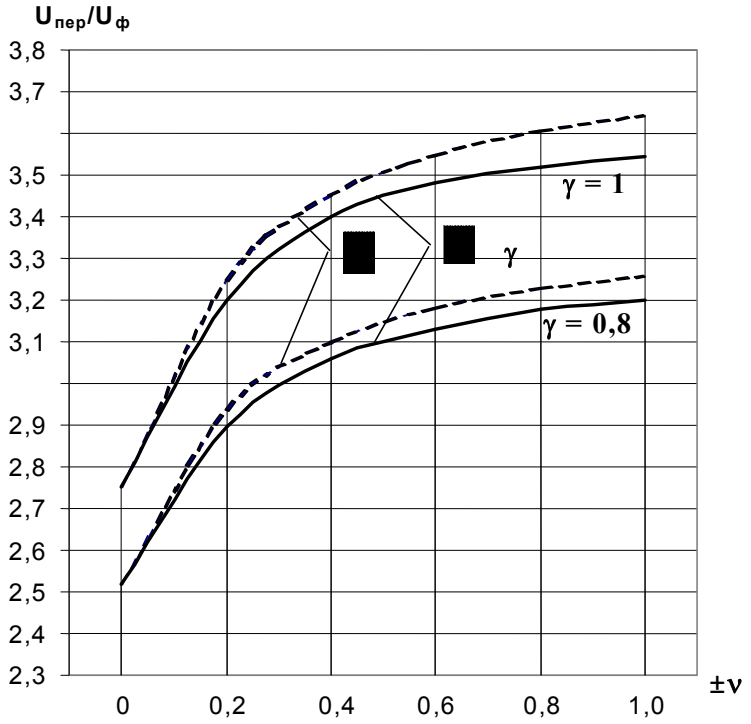


Рисунок 2.4 – Залежності максимальної кратності перенапруг від ступеня розлагодження компенсації у режимі:
1 – перекомпенсації; 2 – недокомпенсації

Перенапруження в нейтралі мережі, приблизно у 1,5 ... 2 рази менше кратності перенапруг на непошкоджених фазах, що також сприяє зниженню пошкоджуваності елементів системи електропостачання з резонансним режимом налагодження пристрою, що компенсує. При такому режимі, а також при незначному розладі компенсації в електричних мережах запаси електричної міцності ізоляції по відношенню до впливаючих перенапруг збільшуються до 30% [28, 16].

Необхідно нагадати, що ефективність компенсації ємнісних струмів замикання на землю спостерігається при резонансному і близьких до нього режимах налагодження пристроїв, що компенсують. Враховуючи можливу в процесі експлуатації зміну параметрів кар'єрних розподільних мереж (оперативні і аварійні перемикання, нарощування ЛЕП тощо), слід орієнтуватися на застосування пристроїв автоматичної настройки режиму дугогасних реакторів.

Мережі з активним опором в нейтралі

Одним з ефективних методів подавлення перехідних процесів є зменшення добротності коливального контуру, що досягається зменшенням значення активного опору ізоляції мережі відносно землі, яку включено паралельно реактивним опором ізоляції [29, 15, 25]. У результаті з'являється активна складова струму, яка накладається на електричну мережу і збільшує активну складову струму однофазного замикання на землю. Ефективність методу подавлення перехідного процесу істотно проявляється при значенні створюваного активного струму замикання на землю на рівні не менше 40% від ємнісного, тобто

$$I_a = (0{,}4 \div 1{,}0) I_C \quad . \tag{2.17}$$

Електричні мережі з резистором в нейтралі, в порівнянні з мережами з повністю ізольованою або компенсованою нейтраллю є більш надійні за рахунок виключення ферорезонансних процесів і зменшення пошкоджуваності елементів системи електропостачання. Останнє обумовлено значним зниженням рівня внутрішніх перенапруг, супроводжуючих однофазне замикання на землю.

Величина перенапруг в трифазній мережі з активним опором в нейтралі визначається виразом [25, 27]

$$U_{пер} = \sqrt{3} U_ф \sin(\varphi_з + 30^\circ) + U_ф \left[\sin\varphi_з - (\sin\varphi_{г.м.} - 0{,}2) e^{-k_a(\varphi_з - \varphi_{22})}\right] \frac{C(1-d)}{C + C_M} \tag{2.18}$$

де φ_3 – фаза напруги пошкодженої фази у момент займання, рад.; $\varphi_{г.м.}$ – фаза напруги пошкодженої фази у момент гасіння дуги, при якій напруга зсуву достигає максимуму.

На рис. 2.5 показана залежність максимальної кратності внутрішніх перенапруг в мережі з резистором в нейтралі від співвідношення активної і ємнісної складових струму однофазного замикання на землю, отримана з урахуванням найнесприятливіших умов за виразом (2.18).

Як видно з рисунка, у міру зростання активної складової струму замикання по відношенню до ємнісної складової, кратність перенапруг зменшується до значення 2,4 при рівності активного і ємнісного струмів замикання. З рисунка також видно, що подальше збільшення активної складової практично не призводить до суттєвого зменшення кратності перенапруг.

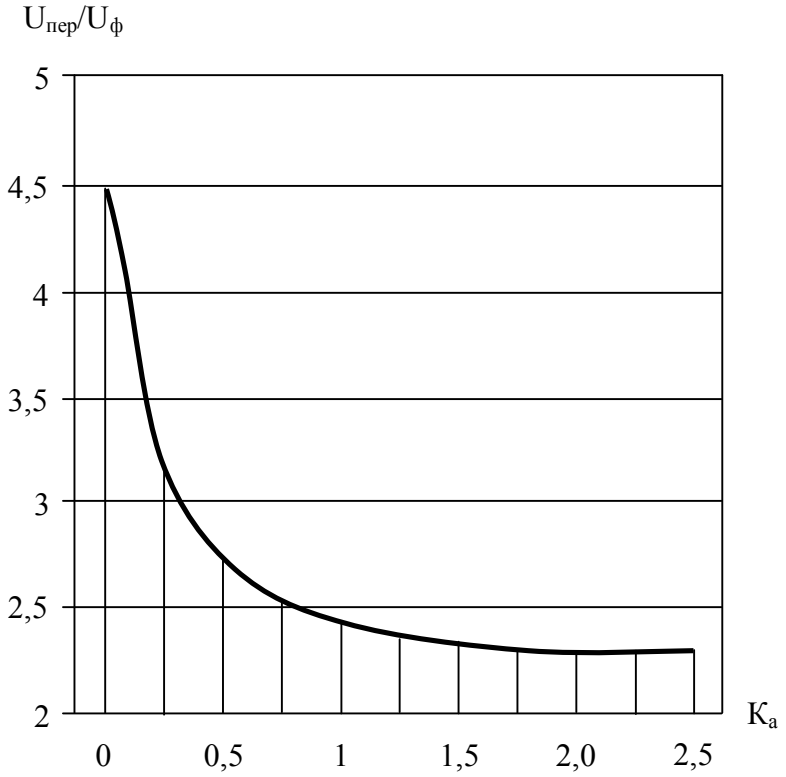


Рисунок 2.5 – Залежність максимальної кратності перенапруг в мережі з резистором в нейтралі від співвідношення активної і ємнісної складових струму замикання K_a

З порівняння варіантів заземлення нейтралі випливає, що найбільш висока експлуатаційна надійність забезпечується в розподільних мережах з накладенням додаткової активної складової на струм замикання на землю (мережі з резистором в нейтралі). У таких мережах при певних умовах різко обмежуються рівні внутрішніх перенапруг супроводжуючих однофазні замикання на землю, практично виключається розвиток ферорезонансних процесів, що, відповідно, сприяє зменшенню пошкоджуваності елементів мережі.

2.4 Основні критерії оцінки режиму нейтралі кар'єрних розподільних мереж напругою 6 – 35 кВ

Стан нейтралі електричної мережі має безпосереднє відношення до ймовірності виникнення аварійного стану, оскільки переважна кількість порушень в кар'єрних розподільних мережах починається з замикання на землю. Ефективність будь-якого виду режиму роботи нейтралі електричної мережі визначається доцільною техніко-економічною відповідністю безперебійного електропостачання споживачів, величини капіталовкладень та експлуатаційних витрат. При цьому враховується, що всякого роду аварійні відключення ліній електропередачі та підстанцій, як правило, призводять або до повного знеструмлення споживачів, або до обмежень споживання електроенергії.

Відповідно до ПУЕ електричні мережі напругою 6 - 35 кВ можуть працювати з повністю ізольованою нейтраллю або з нейтраллю, заземленою через реактивний (компенсована мережа) або активний (мережа з резистором в нейтралі) опір. У загальному випадку оцінка ефективності і вибір режиму роботи нейтралі електричної мережі здійснюється на основі техніко-економічного порівняння варіантів. При цьому визначальними критеріями оцінки режимів роботи нейтралі кар'єрних розподільних мереж слід вважати: надійність електропостачання, електробезпеку і економічність системи [30, 27, 31].

При порівнянні показників ефективності роботи електричних мереж з різними способами заземлення нейтралі, крім задоволення вимогам щодо забезпечення надійності електропостачання споживачів, серйозна увага звертається

на основні параметри мереж, що впливають на експлуатаційні характеристики систем електропостачання, до яких можна віднести:

– рівні ізоляції і стійкість до перенапруг (захист від перенапруг);

– забезпеченість захистом від однофазних замикань на землю та простота виконання якісної роботи;

– селективність дії захисту від замикань на землю;

– забезпечення безпеки від дії напруги доторку і шагових напруг при замиканнях на землю в кар'єрних мережах.

За інших рівних умов надійність електропостачання електроприймачів або надійність розподільних мереж в основному визначається пошкоджуваністю елементів мережі і якістю роботи пристроїв релейного захисту. Ступінь впливу зазначених факторів на надійність роботи розподільних мереж залежить від режиму нейтралі, який в свою чергу визначає рівень внутрішніх перенапруг і характер перехідних процесів при однофазних замикаючи-пах на землю. Рівень перенапруг справляє визначальний вплив на пошкоджуваність електричних мереж та їх елементів, а характер перехідних процесів - на якість роботи пристроїв захисту від замикань на землю.

Розподільні мережі напругою вище 6 - 10 кВ з повністю ізольованою нейтраллю отримали переважне поширення, однак такий режим нейтралі мережі не завжди є оптимальним з точки зору зазначених раніше критеріїв. Системи електропостачання з повністю ізольованою нейтраллю в порівнянні з мережами з іншими режимами нейтралі не вимагають додаткових капітальних витрат.

Однак експлуатаційні витрати в мережах з повністю ізольованою нейтраллю за рахунок більшої пошкоджуваності, а також за рахунок збитків від перерв електропостачання значно більше, ніж у мережах, що працюють з іншими режимами нейтралі. Слід зазначити, що можна в деякій мірі знизити експлуатаційні витрати та збитки від перерв за рахунок застосування обладнання та електричних мереж з більш високим рівнем ізоляції, що, природно, вимагає додаткових капітальних вкладень.

Ефективність компенсації ємнісних струмів і ефективність роботи електричних мереж з компенсованою нейтраллю в значній мірі залежить від режиму налаштування пристрою, що компенсує. Більшість дослідників при цьому віддають перевагу резонансному налаштуванню (що вкрай складно забезпечити в динамічних кар'єрних мережах) індуктивності пристрою, що компенсує з ємністю мережі щодо землі, тобто

$$X_L = X_C \qquad \text{або} \qquad \omega L_k = \frac{1}{3\omega C}.$$

З економічної точки зору розподільні мережі з компенсацією ємнісного струму замикання на землю вимагають додаткових капітальних витрат на дугогасні реактори і пристрої для їх підключення. Що стосується експлуатаційних витрат, то вони значно менші, ніж у мережах з повністю ізольованою нейтраллю за рахунок меншої пошкоджуваності елементів системи. При резонансному налаштуванні пристрою, що компенсує, і при незначних розладах компенсації в електричних мережах запаси електричної міцності ізоляції по відношенню до перенапруг, що впливають збільшуються до 30% [16].

Електричні мережі з резистором в нейтралі, мають, у порівнянні з мережами з повністю ізольованою або компенсованою нейтраллю, більш високу надійність за рахунок придушення перехідних процесів супроводжуючих однофазні замикання на землю; зменшення пошкоджуваності елементів системи електропостачання (останнє зумовлено значним зниженням внутрішніх перенанапруг); виключення феррорезонансних процесів. Порівняно відчутні додаткові капітальні витрати на виконання мереж з резистором в нейтралі в порівнянні з повністю ізольованою нейтраллю мережі будуть при струмах замикання на землю більше 5 ... 10 А. У цьому випадку потрібно включення в нейтраль мережі високовольтного резистора і пристроїв для його підключення, до складу яких крім комутаційних апаратів можуть входити спеціальні трансформатори, необхідні для підключення резисторів. У мережах зі струмом замикання на землю до 5 А додаткові капітальні витрати зменшуються практично до нуля, тому що в цьому випадку можливо

обійтися наявними в мережі вимірювальними трансформаторами НТМИ та низьковольтними резисторами [32, 33].

2.5 Оцінка ефективності режимів нейтралі для умов кар’єрних розподільних мереж

Підвищення рівня надійності систем електропостачання та кар'єрних розподільних мереж, поліпшення умов електробезпеки залежить від успішного вирішення комплексу питань, одним з яких є оптимізація режимів роботи нейтралі електричних мереж. У загальному випадку оцінка ефективності режиму нейтралі кар'єрних розподільних мереж здійснюється на основі техніко-економічного порівняння варіантів. При цьому визначальними критеріями оцінки режимів нейтралі слід вважати: надійність електропостачання; електробезпека; забезпеченість захистом від однофазних замикань на землю і якість його роботи; економічність системи.

Діючі нормативні документи приписують ізольований режим роботи нейтралі розподільних мереж напругою 6 - 35 кВ. При цьому розуміють, що нейтраль системи повністю ізольована від землі або з'єднана з землею через великий індуктивний (компенсована нейтраль) або активний (з резистором в нейтралі) опір. Основною перевагою мереж з ізольованою нейтраллю є те, що в таких мережах однофазні замикання на землю не пов'язані з порушенням нормальної роботи електроприймачів.

Компенсація ємнісного струму однофазного замикання на землю в електричних мережах застосовується при перевищенні значення ємнісного струму однофазного замикання на землю в сталому режимі понад допустимого нормативними документами. Компенсація ємнісних струмів замикання на землю здійснюється включенням в нейтраль мережі індуктивності, за допомогою якої при замиканні на землю створюється індуктивна складова струму однофазного замикання на землю, що має в точці замикання напрям, протилежний ємнісній складовій струму замикання. Ефективність компенсації ємнісних струмів і

ефективність роботи електричних мереж з компенсованою нейтраллю в значній мірі залежить від режиму налагодження пристрою, що компенсує.

В теперішній час в системах електропостачання починають застосовувати метод заземлення нейтралі високовольтних розподільних мереж через високоомний резистор. Перевагою даного способу є простота здійснення, дешевизна і можливість надійного відключення (контролю) пошкодженого приєднання простими засобами релейного захисту. При цьому важливим є установити ступінь впливу резистора в нейтралі на процеси, що протікають у системі, і експлуатаційні показники систем електропостачання кар'єрів.

Аналіз виконаних в роботі і викладених вище результатів досліджень впливу заземлення нейтралі електричних мереж на надійність і умови електробезпеки систем електропостачання в цілому, на пошкоджуваність розподільних мереж та електрообладнання, а також на працездатність засобів релейного захисту, дозволяє дати оцінку кожному конкретному режиму роботи нейтралі і розробити рекомендації, спрямовані на посилення позитивних показників відповідних режимів.

Мережі з повністю ізольованою нейтраллю

Розподільні мережі напругою 6 - 35 кВ з повністю ізольованою нейтраллю отримали переважне поширення в системах електропостачання гірничих підприємств. Однак такий режим нейтралі мережі не завжди є оптимальним з точки зору зазначених раніше критеріїв.

За інших рівних умов надійність електропостачання електроприймачів або надійність розподільних мереж в основному визначається пошкоджуваністю елементів мережі і якістю роботи пристроїв релейного захисту. Ступінь впливу зазначених факторів на надійність роботи розподільних мереж залежить від режиму нейтралі, який в свою чергу визначає рівень внутрішніх перенапруг і характер перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю. Рівень перенапруг справляє визначальний вплив на пошкоджуваність електричних мереж та їх елементів, а характер перехідних процесів - на якість роботи пристроїв захисту від замикань на землю.

З урахуванням можливих змін понижуючих коефіцієнтів, для реальних параметрів розподільчих мереж максимальне значення напруги між здоровими фазами і землею знаходиться на рівні 4,5 фазної напруги. Для цих же мереж теоретичний максимум напруги зміщення нейтралі становить трикратну фазну напругу.

Однофазні замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю супроводжуються перехідними процесами, які виникають в момент появи замикання та в момент відключення пошкодженої ділянки (процес відновлення напруги в мережі). Зазначені перехідні процеси забезпечують значну частину помилкових спрацьовувань пристроїв захисту від замикань на землю в мережах з повністю ізольованою нейтраллю.

Системи електропостачання з повністю ізольованою нейтраллю в порівнянні з мережами з іншими режимами нейтралі не вимагають додаткових капітальних витрат. Однак експлуатаційні витрати в мережах з повністю ізольованою нейтраллю за рахунок більшої пошкоджуваності, а також за рахунок збитків від перерв електропостачання значно більше, ніж у мережах, що працюють з іншими режимами нейтралі. Слід також зазначити, що можна в деякій мірі знизити експлуатаційні витрати і збитки від перерв за рахунок застосування обладнання і електричних мереж з більш високим рівнем ізоляції, що, звичайно, вимагає додаткових капітальних вкладень.

До недоліків мереж з ізольованою нейтраллю можна віднести нестабільність напруги нейтралі, сприятливі умови для виникнення дугових замикань, феррорезонансні явища, підвищені напруги дотику і кроку при дугових замиканнях на землю, підвищені кратності внутрішніх перенапруг та ін Зазначені явища призводять до появи багатомісних замикань на землю і до зниження рівня надійності та електробезпеки.

Мережі з компенсованою нейтраллю

Застосування дугогасних реакторів обумовлено тією обставиною, що в системі з ізольованою нейтраллю при дуговому замиканні на землю однієї з фаз перехід від нормального режиму роботи до режиму із заземленою фазою

здійснюється шляхом загасання коливань з частотою, що залежить від значень індуктивностей і ємностей системи. Проходження струму дуги через нульове значення може призводити до обриву дуги з подальшим її запалюванням при підвищеній напрузі. Цей процес супроводжується виникненням на непошкоджених фазах перенапруги, що перевищує значення фазної напруги. Небезпека для ізоляції цих перенапруг посилюється тим, що вони можуть бути тривалими і охоплювати всю електрично зв’язану мережу. У результаті в місцях з ослабленою ізоляцією можуть виникати нові замикання на землю, які, в свою чергу, будуть сприяти підвищенню напруг.

При заземленні нейтралі через дугогасний реактор (налаштовану індуктивність) перенапруження дугових замикань менше і, що особливо важливо для ізоляції, тривають порівняно невеликий проміжок часу (зазвичай близько напівперіоду). Однак ця перевага мінімізується при розлагодженні режиму компенсації від резонансного значення більш ніж на 5%. Також недоліком системи заземлення нейтралі через дугогасний реактор є складність забезпечення резонансного налаштування. Тому при струмах менше рекомендованих ПУЕ застосування даного виду заземлення економічно не доцільно.

Якщо оцінювати надійність електропостачання електроприймачів пошкоджуваності елементів мережі і якістю роботи релейного захисту, то необхідно зазначити, що в основному застосування компенсованих мереж, де потрібна дія захисту на відключення, стримується другою умовою. Що стосується пошкоджуваності елементів розподільних мереж, то слід відзначити безпосередній зв'язок цього показника з режимом налагодження пристрою, що компенсує, так як саме ступінь розладу пристрою, що компенсує, від резонансного режиму визначає рівень перенапруг в мережі при однофазних замиканнях на землю.

З економічної точки зору розподільні мережі з компенсацією ємнісного струму замикання на землю вимагають додаткових капітальних витрат на дугогасні реактори і пристрої для їх підключення. Що стосується експлуатаційних витрат, то вони значно менше, ніж у мережах з повністю ізольованою нейтраллю за рахунок меншої пошкоджуваності елементів системи. Як вже зазначалося, при

резонансному налаштуванні пристрою, що компенсує і при незначних розладах компенсації в електричних мережах запаси електричної міцності ізоляції по відношенню до діючих перенапруг збільшуються до 30% [16].

Необхідно нагадати, що ефективність компенсації ємнісних струмів замикання на землю спостерігається при резонансному і близькому до нього режимах налагодження пристроїв, що компенсують. Враховуючи можливу зміну параметрів кар'єрних розподільних мереж (оперативні і аварійні перемикання, нарощування ЛЕП тощо), необхідно орієнтуватися на використання технології автоматичного налаштування дугогасних реакторів.

Мережі з активним опором у нейтралі

Раніше зазначалося, що основною причиною помилкових спрацьовувань направлених захистів від замикань на землю в мережах з повністю ізольованою нейтраллю слід вважати виникнення в мережі після відключення пошкодженого приєднання (або після самоліквідації пошкодження) коливального процесу з частотою близькою до частоти 50 Гц . Природно, що для усунення помилкових спрацьовувань пристроїв захисту від замикань на землю, викликаних зазначеними коливаннями, необхідно виключити або різко скоротити тривалість перехідних процесів. Одним з ефективних методів усунення коливання є зменшення добротності коливального контуру, що досягається зменшенням значення активного опору ізоляції мережі відносно землі включенням резистора в нейтраль мережі. При цьому слід вказати на безпосередній зв'язок між значенням опору резистора в нейтралі і експлуатаційними характеристиками кар'єрних розподільних мереж.

Виконані автором дослідження показали, що електричні мережі з резистором в нейтралі, мають, у порівнянні з мережами з повністю ізольованою або компенсованою нейтраллю, більш високу надійність за рахунок поліпшення якості роботи пристроїв захисту від однофазних замикань на землю (придушення після аварійних перехідних процесів), виключення феррорезонансних процесів і зменшення пошкоджуваності елементів системи електропостачання. Останнє обумовлено значним зниженням внутрішніх перенапруг, супроводжуючих

однофазні замикання на землю. У міру зростання активної складової струму замикання по відношенню до ємнісної складової, кратність перенапруг зменшується до значення 2,4, при рівності активного і ємнісного струму замикання.

З точки зору забезпеченості захистом від однофазних замикань на землю, а також якості її роботи (що безпосередньо пов'язано з електробезпекою і безперебійністю живлення електроприймачів) найбільш сприятливими можна вважати електричні мережі з резистором в нейтралі, тобто з накладенням на струм замикання на землю додаткової активної складової. У таких мережах пристрої струмового та спрямованого захисту, що застосовуються в мережах з ізольованою нейтраллю, показують більш надійну і якісну роботу за рахунок придушення перехідних процесів. У самому несприятливому положенні за умов забезпеченості захистом від однофазних замикань на землю знаходяться електричні мережі з компенсованою нейтраллю. Як встановлено раніше, залежність аварійних струмів і параметрів нульової послідовності від режиму налагодження пристрою, що компенсує практично виключає можливість застосування в таких мережах пристроїв, що реагують на параметри усталеного режиму, навіть при автоматичному настроюванні режиму компенсації.

Стосовно до кар'єрних розподільних мереж порівняно відчутні додаткові капітальні витрати на реалізацію заземлення нейтралі через резистор в порівнянні з повністю ізольованою нейтраллю мережі будуть при струмах замикання на землю більше 5...10 А. У цьому випадку потрібно включення в нейтраль мережі високовольтного резистора і пристроїв для його підключення, до складу яких крім комутаційних апаратів можуть входити спеціальні трансформатори, необхідні для підключення резисторів. У мережах зі струмом замикання на землю до 5 А додаткові капітальні витрати зменшуються практично до нуля, тому що в цьому випадку є можливим досягти бажаного результату і обійтися наявними в мережі вимірювальними трансформаторами НТМИ (наявними в кожному кар'єрному приключательному пункті) і низьковольтними навантажувальними резисторами у колі відкритого трикутника. За рахунок зниження пошкоджуваності елементів

мережі і поліпшення якості роботи пристроїв захисту від однофазних замикань на землю значно зменшуються і експлуатаційні витрати.

За умовами забезпечення електробезпеки електричних мереж при безпосередньому дотику людини до струмоведучих частин жоден з можливих режимів нейтралі не можна визнати сприятливим. Незалежно від режиму нейтралі з урахуванням реальних параметрів ізоляції відносно землі розподільних мереж і часу дії пристроїв захисту, а також часу дії застосовуваної в таких мережах комутаційної апаратури, значення струму через тіло людини будуть значно перевищувати безпечні рівні.

Ступінь непрямої небезпеки електричної мережі, наприклад, від дії напруги дотику (при дотику людини до корпусів електроустаткування і машин, які опинилися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції однієї з фаз) і кроку (при обриві проводу повітряної ЛЕП та замиканнях на грунт), в значній мірі залежить від режиму нейтралі. Для сталого режиму однофазного замикання в цьому випадку перевагу слід віддати електричній мережі з компенсованою нейтраллю при резонансному (або близькому до резонансного) налаштування пристрою, що компенсує. Якщо враховувати перехідні процеси, що супроводжують металеві та дугові однофазні замикання на землю, то найбільш сприятливим слід вважати електричну мережу з активним резистором в нейтралі.

2.6 Включення резистора в нейтраль мережі з дугогасним реактором

Дослідження впливу заземлення нейтралі електричних мереж на надійність і умови електробезпеки систем електропостачання кар'єрів, на пошкоджуваність розподільних мереж та електрообладнання, а також на функціональні характеристики релейного захисту показали, що найбільш висока експлуатаційна надійність забезпечується в розподільних мережах з накладенням додаткової активної складової на струм замикання на землю (мережі з резистором в нейтралі). У таких мережах при певних умовах різко обмежуються рівні внутрішніх перенапруг супроводжуючих несиметричні пошкодження, практично виключається розвиток ферорезонансних процесів, що, відповідно, сприяє зменшенню пошкоджуваності елементів мережі. Крім того, при цьому практично

виключається помилковою робота пристроїв захисту від замикань на землю за рахунок різкого придушення (практично усунення) перехідних процесів при появі і відключенні ушкоджень.

Щодо електричних мереж та обладнання напругою 6 кВ, працюючих з компенсацією ємнісного струму замикання на землю, які за указаними раніше критеріями в частині їх ефективності (якщо не враховувати забезпеченість і працездатність захистів від однофазних замикань на землю) дещо уступають мережам з резистором в нейтралі. Крім того, слід зазначити, що при резонансних налаштуваннях або при незначних розладах компенсації в таких мережах запаси електричної міцності ізоляції по відношенню до діючих перенапруг збільшуються до 30%. Розлагодження режиму компенсації більш ніж на 5% від резонансного призводить до різкого зниження ефективності в частині кратності перенапруг, розвитку ферорезонансних процесів т.п. Крім того слід зазначити, що у випадках, коли використовуються неправильні схеми приєднання пристроїв компенсації ємнісних струмів (дугогасних апаратів) і допускаються неправильні оперативні та автоматичні дії, компенсація ємнісних струмів замикання на землю не тільки втрачає частково або повністю свою ефективність , а й стає причиною багатомісних ушкоджень ізоляції мережі. Небезпечні для ізоляції мережі за рівнем і довгостроково діючі ферорезонансні перенапруги виникають у випадках, коли трансформатор з пристроєм компенсації ємнісних струмів виявляється підключеним до мережі не всіма фазами [28].

Однак повністю відмовитися від компенсованої нейтралі в системах електропостачання кар'єрів не є можливим з об'єктивних умов. По перше природний розвиток підприємств веде до природного розвитку (тобто нарощування) розподільних мереж і зростанню ємнісних струмів однофазного замикання на землю і можливого їх перевищення граничних значень, що рекомендовано ПУЕ. По-друге, застосування нових технологій на відкритих гірничих роботах, може бути причиною підвищеного застосування кабельних мереж, питома ємність яких практично на порядок перевищує питому ємність повітряних ЛЕП, що також пов'язано з наростанням значень аварійних струмів. По-

третє, конструктивне виконання кар'єрних розподільних мереж може бути причиною більш жорсткого, згідно з ПУЕ, обмеження максимально можливого струму однофазного замикання на землю (наприклад, 10 А замість 30 А для мереж напругою 6 кВ).

Як вже зазначалося ефективність компенсації ємнісних струмів замикання на землю спостерігається при резонансному і близьких до нього режимах налаштування пристроїв, що компенсують, тобто, з урахуванням можливої динаміки кар'єрних розподільних мереж є необхідним застосування пристроїв автоматичного налаштування дугогасних реакторів.

Аналіз інформації про застосування систем автоматичного налаштування режиму компенсації ємнісних струмів замикання на землю свідчить про негативний досвід навіть у мережах промислових підприємств, які, у порівнянні з кар’єрними, є більш стабільними. До причин можна віднести: неефективні принципи настроювання, застосування механічних систем налаштування індуктивності у плунжерних реакторів; непрацездатність автоматики в режимі замикання на землю.

На підставі викладеного, а також з урахуванням того, що в електричних мережах напругою 6 - 35 кВ системи електропостачання більшості промислових підприємств при перевищенні струмів замикання на землю допустимих значень, установлені дугогасні реактори не обладнані пристроями автоматичного налаштування індуктивності в резонанс з ємністю мережі, крім того, часто експлуатаційна динаміка кар'єрних розподільних мереж може перевищувати 20 - відсоткову зміну параметрів ізоляції мереж відносно землі, нами пропонується підвищити ступінь ефективності мереж з компенсованою нейтраллю шляхом додаткового заземлення нейтралі цієї ж мережі через резистор, тобто, використаний так званий комбінований режим нейтралі мережі. Суть комбінованого режиму заземлення нейтралі полягає в тому, що окрім створення індуктивної складової струму однофазного замикання на землю, пропонується також одночасно накладати на струм замикання і активну складову [34]. Тобто,

комбінований режим заземлення нейтралі, це компенсована мережа з накладенням в аварійному режимі додаткової активної складової.

Дослідження показали, що значення яке накладається на компенсовану мережу активної складової струму замикання на землю має бути на рівні 30 - 50% від ємнісної складової, тобто, вибиратися з умови

$$I_R = (0{,}3 \div 0{,}5) I_C . \qquad (2.19)$$

На рис. 2.6 представлена схема заміщення розподільчої мережі, що пояснює принцип реалізації комбінованого режиму заземлення нейтралі мережі. Повний аварійний струм при однофазному замиканні на землю складається з ємнісного, індуктивного, активного обумовленого активним опором ізоляції мережі і активним через резистор в нейтралі

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_C + \underline{I}_L + \underline{I}_a + \underline{I}_R . \qquad (2.20)$$

Рекомендовані значення, що накладаються на компенсовану мережу активної складової аварійного струму забезпечують придушення перехідних процесів при замиканнях на землю, поліпшення працездатності пристроїв захисту (сигналізації) від замикань на землю, виключення феррорезонансних явищ, чим і досягається підвищення рівня електробезпеки та надійності і забезпечуються експлуатаційні показники адекватні системам електропостачання тільки з резистором в нейтралі навіть при розладі дугогасного реактора до 50% від резонансного режиму компенсації.

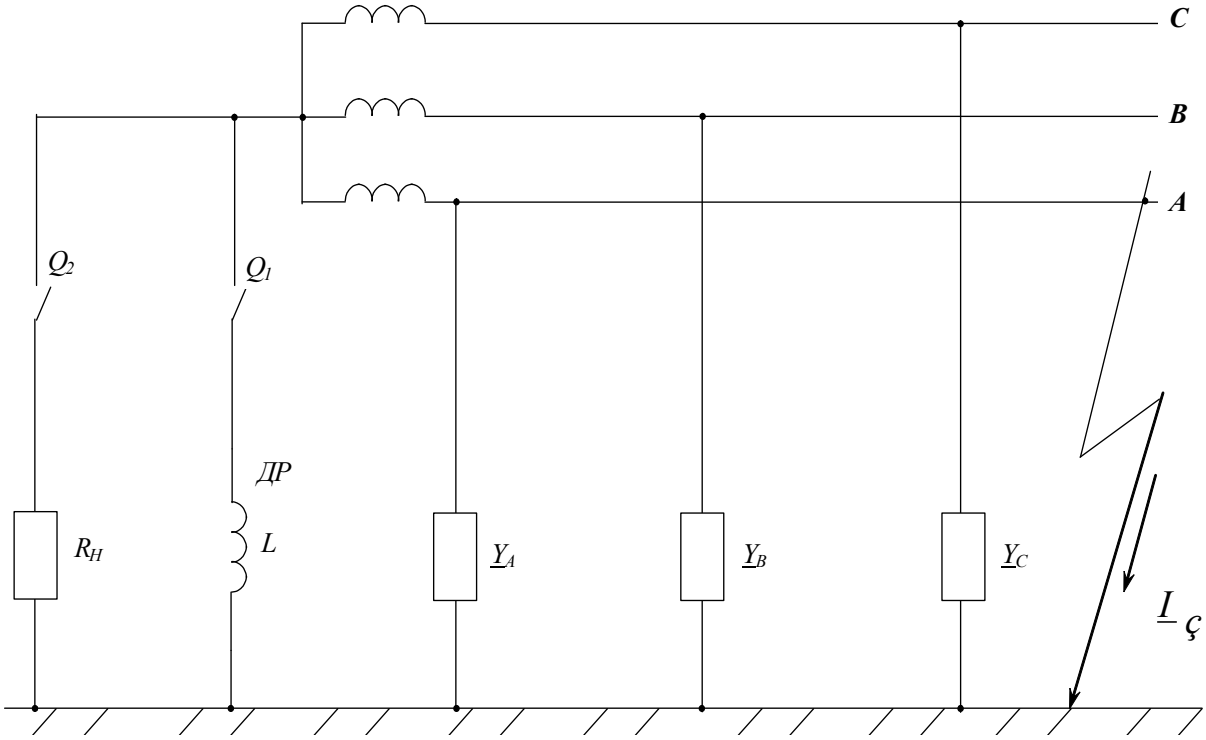
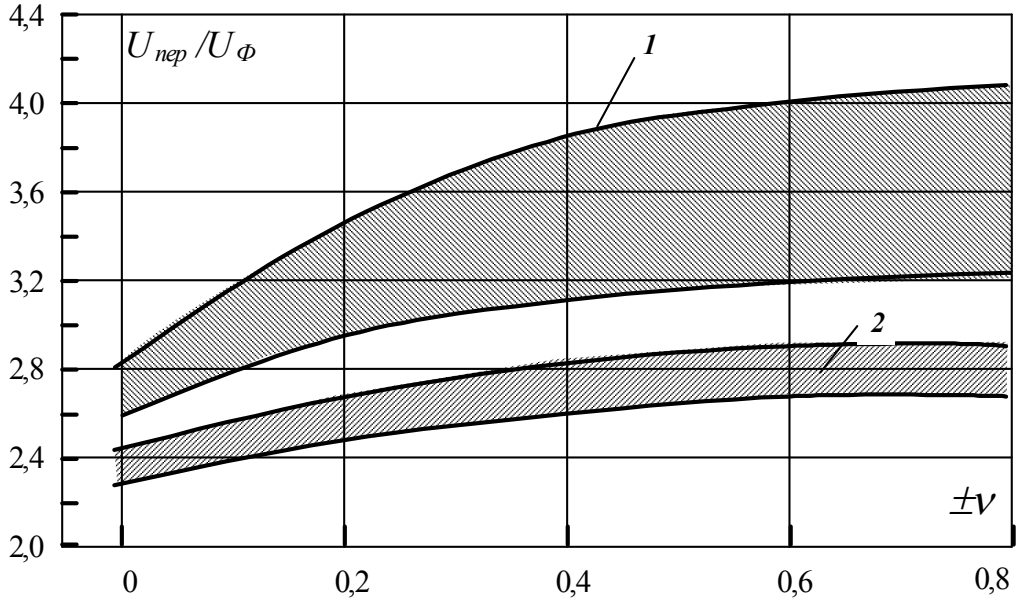


Рисунок 2.6 – Схема заміщення розподільної мережі
з комбінованим режимом заземлення нейтралі



1 – у мережі з компенсованою нейтрал`ю;

2 – у мережі з комбінованим заземленням нейтралі

Рисунок 2.7 – Залежність кратності внутрішніх перенапруг при замиканнях на землю від ступені розлагодження режиму компенсації

На рис. 2.7 для порівняння показані зони максимальної кратності перенапруг від ступеня розладу компенсації від резонансного режиму в мережі з компенсованою нейтрал`ю (зона 1) і в мережі з комбінованим режимом роботи нейтралі (зона 2). Верхня і нижня межі зон відповідають значенням коефіцієнта γ рівному відповідно 1 та 0,8, який враховує фізичні характеристики мережі, відносне місце пошкодження та інше.

2.7 Розробка рекомендацій з вибору і реалізації режимів заземлення нейтралі розподільних мереж кар'єрів

У мережах напругою 6 - 35 кВ, що працюють з нейтраллю повністю ізольованою від землі, пропонується режим роботи з резистором в нейтралі, тобто накладення в аварійному режимі на ємнісний струм замикання активної складової, значення якої вибирається з умови (2.17), створення активної складової струму однофазного замикання на землю величиною на рівні 50% від ємнісного струму. Реалізація в електричних мережах напругою 6 - 35 кВ режиму нейтралі зі створенням додаткової активної складової струму замикання на землю (режим роботи мережі з резистором в нейтралі) може бути здійснена найбільш просто одним з методів, приведених на рис. 2.8, або їх комбінацій [25, 27].

Для створення додаткового штучного активного струму замикання можуть використовуватися резистори, що включаються між нейтральною точкою мережі і землею. У цьому випадку високовольтний резистор може включатися:

– в нейтраль силового трансформатора при включенні його обмоток в зірку і виведеною нульовою точкою (рис. 2.8, а);

– в нейтраль первинної обмотки спеціального заземлювального трансформатора або трансформатора власних потреб (рис. 2.8, б).;

– між кожною фазою і землею трьох опорів, з'єднаних в зірку зі штучною нульовою точкою (рис. 2.8, в).

Крім того, створення штучного додаткового активного струму однофазного замикання на землю може бути забезпечене включенням низьковольтного резистора одним із наступних способів:

– в якості навантажувального резистора вторинної обмотки спеціального однофазного трансформатора, первинна обмотка якого включається між нейтральною точкою мережі і землею (рис. 2.8, г);

– в якості навантажувального резистора, підключеного до вторинних обмоток трьох однофазних трансформаторів, включених за схемою розімкнутого трикуиника (первинні обмотки включаються при цьому в зірку з заземленою нульовою точкою) (рис. 2.8, д).

Для реалізації процесу накладення активної складової на аварійний струм для умов кар'єрних знижувальних підстанцій найбільш перспективним слід вважати варіант включення в нейтраль мережі трьох однофазних трансформаторів потужністю від 1,25 до 4,0 кВт (залежно від значення накладеного активного струму), вторинні обмотки яких включені в розімкнутий трикутник і навантажені активним резистором, з опором відповідним бажаному струму (рис. 2.8, д).

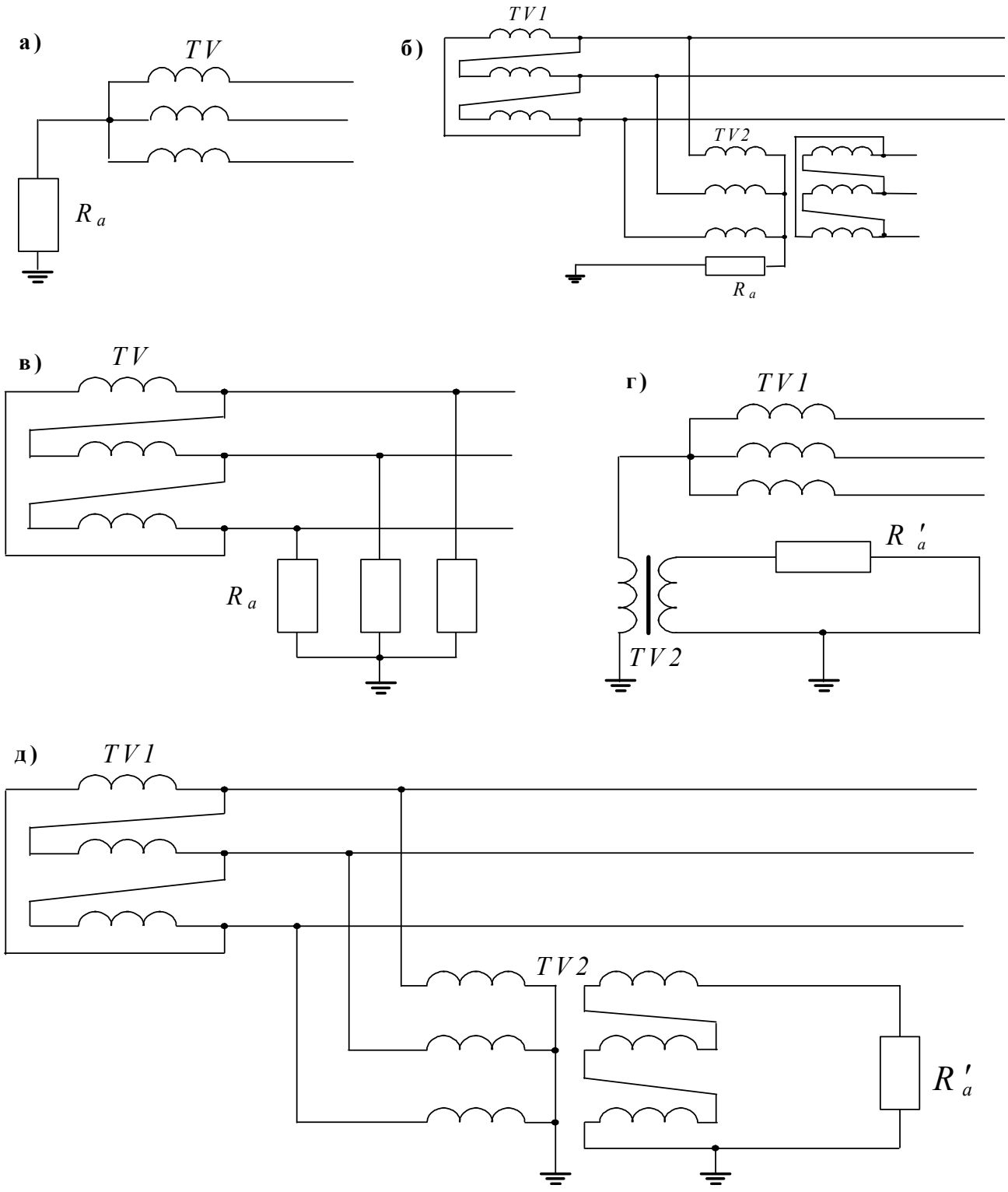


Рисунок 2.8 – Варіанти реалізації режиму нейтралі мережі,

заземленої через активний опір

Всі приєднання кар'єрних підстанцій, що відходять, в обов'язковому порядку обладнані діючим на відключення двоступеневим захистом від замикань на землю

з витримкою часу другого ступеня 0,5 с. Отже, навантажувальний резистор і заземлювальні трансформатори будуть працювати протягом витримки часу, плюс час спрацьовування вимикача, яке не перевищить однієї секунди.

Відповідно до прийнятої класифікації режим роботи навантажувального рези-стора відноситься до короткочасного, для якого характерно, що робочий період t_p менше $4T$, а пауза більше $4T$. Тобто $T_p << T$, де T - постійна часу нагріву резистора: час, протягом якого резистор нагріється від температури навкольшнього середовища до реально усталеної температури при відсутності віддачі тепла в навколишнє середовище.

У такому режимі роботи резистора можна вважати, що нагрівання відбувається без віддачі тепла в навколишнє середовище. У цьому випадку на підставі відомого рівняння теплового стану ідеального тіла, можна розрахувати максимальне перегрівання резистора в кінці робочого періоду

$$\Theta_{\max} = \Theta_{уст}(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}), \tag{2.21}$$

де $\Theta_{уст}$ – стале значення нагріву при тривалому впливі струму.

Еквівалентний по нагріванню тривалий струм $I_{эп}$, який викликає такий же максимальний перегрів, що і даний короткочасний струм I_p, тобто струм $I_{эп}$ проходячи резистором нагріває його до такої ж температури, що і реальний короткочасний струм I_p (рис. 2.9).

$$I_{эп} = I_p \cdot \sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}. \tag{2.22}$$

Як видно, максимальний перегрів за тривалість робочого періоду t_p залежить не тільки від величини I_p, але і від постійної часу нагріву резистора T.

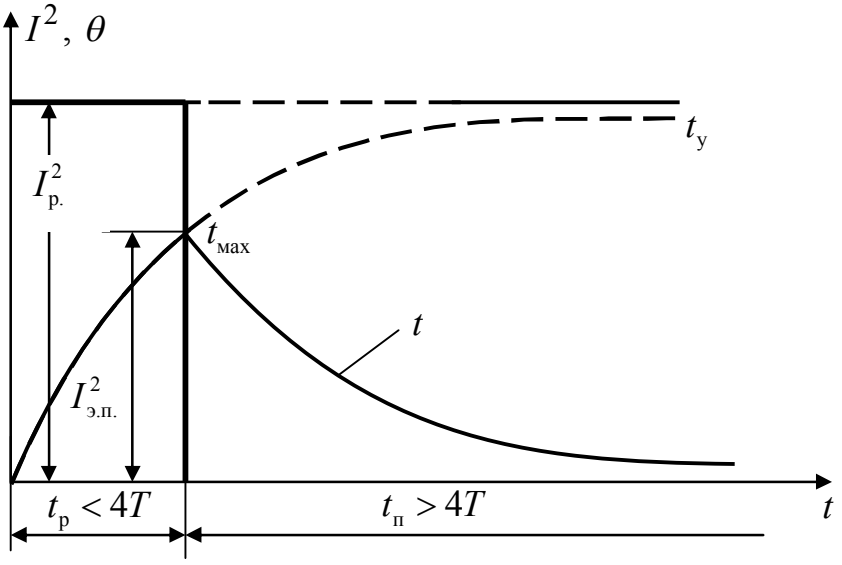


Рисунок 2.9 – Крива перегріву опору при короткочасному режимі навантаження

Відомо, що постійна часу нагрівання для резисторів, виготовлених з дроту або стрічки шляхом її навивки на циліндричну оправку, становить для круглого проводу – $T = 44{,}5d$, і для плоскої стрічки $T = 89b$, де d – діаметр круглої проволоки, мм; b – товщина стрічки, мм.

Якщо спіраль намотана на керамічний каркас у вигляді трубки, то в процесі нагрівання бере участь і дріт, і каркас, і постійна нагріву такого елемента

$$T = \frac{\beta_к G_к + G_{пр}}{K_T \cdot S}, \tag{2.23}$$

де $G_к$ – маса каркаса; $G_{пр}$ – маса проволоки; S – поверхня охолодження.

Коефіцієнт $\beta_к$ враховує, що в перехідному режимі теплоємність каркаса не використовується повністю. У короткочасних режимах можна прийняти $\beta_к = 0{,}3 \div 0{,}4$. Коефіцієнт тепловіддачі $K_T = 21 \div 23$ Вт/м^2 °С. Встановлено, що навіть при короткочасному режимі роботи елемента каркас більш ніж у 2 рази збільшує постійну часу нагріву за рахунок своєї великої маси.

При виборі стандартних елементів з ящиків опорів, які використовуються у електромеханіці в якості пускових, гальмових, розрядних, заземлюючих або інших резисторів, і які, в основному, призначені для роботи в короткочасних режимах й повинні мати якомога більшу постійну часу нагріву, зазвичай в каталогах вказуються значення постійних часу, довготривалий струм при розрахунковій температурі нагріву (як правило 270° С) і опір всього ящика і його окремих елементів. Так, для ящиків опору типу КФ із фехралієвими елементами стала часу різних елементів коливається від 450 до 250 с; для ящиків опору типу ЯС100 з стрічковими елементами - $T = 50 \div 180 c$, а з дротяними - $T = 60 \div 290 c$.

З урахуванням викладеного, якщо, наприклад, $I_p = 50 A$, а $t_p = 1 c$, то навіть при $T = 50 c$

$$I_{эп} = I_p \sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}} = 50 \sqrt{1 - e^{-\frac{1}{50}}} = 7 A,$$

а при $t_p = 0{,}5 c$ та $T = 50 c$, $I_{эп} = 5 A$.

На рис. 2.10 представлена графічна залежність співвідношення $\frac{I_{эп}}{I_p} = \sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}$, від значення $\frac{t_p}{T}$. Знаючи для призначеного навантажувального резистора його постійну часу нагріву T (з каталогу) і режим роботи (тобто I_p й t_p), визначається $\frac{t_p}{T}$ і за кривою рис. 2.10 визначається співвідношення $\frac{I_{эп}}{I_p}$. Помноживши його на відомий струм I_p, визначаємо еквівалентний довготривалий струм $I_{эп}$.

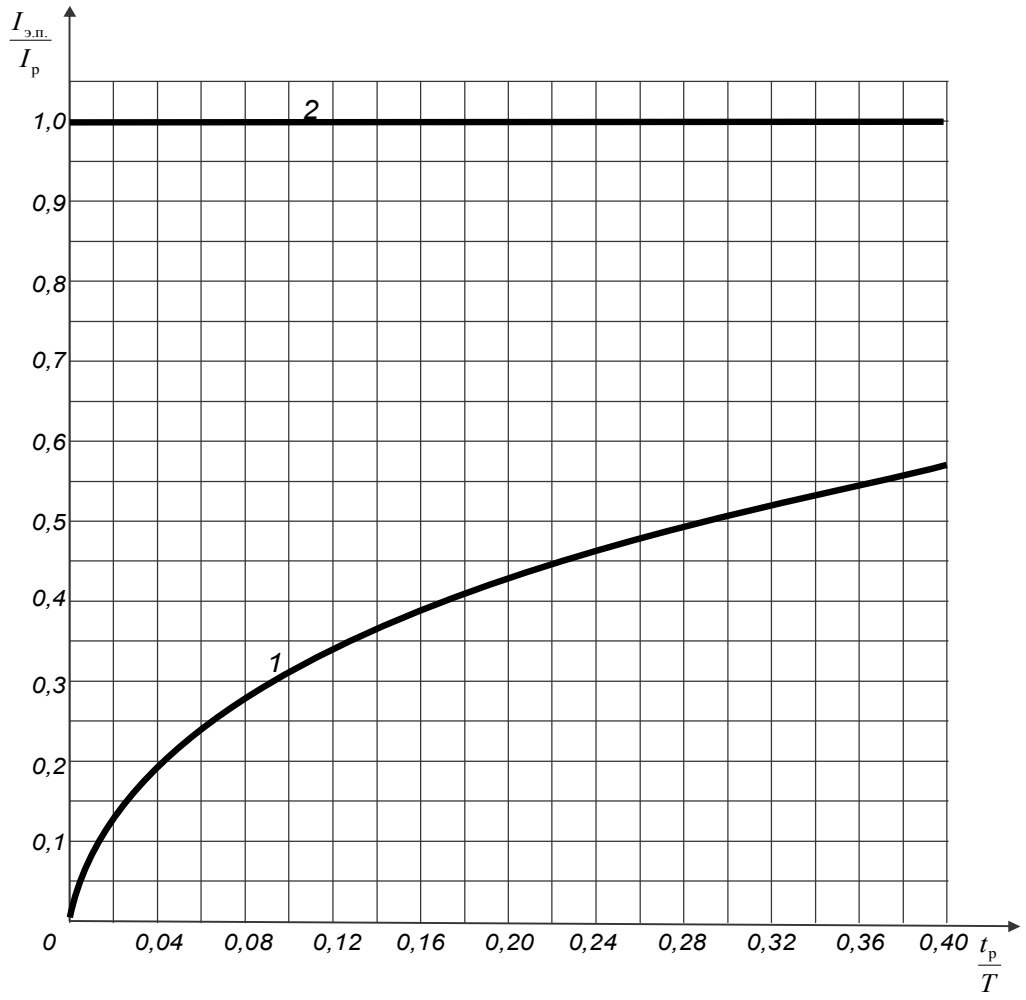


Рисунок 2.10 – Залежність $\frac{I_{э.п.}}{I_р}$ від $\frac{t_р}{T}$ для резисторів при роботі в короткочасному (1) і довготривалому (2) режимах

2.8 Висновки по розділу 2

1. Встановлено, що найбільш поширеними ушкодженнями у розподільних мережах кар'єрів напругою 6 кВ є однофазні замикання на землю, які можуть різко відрізнятися за характером процесу (металеві, дугові, що перемежовуються, з перехідним опором тощо), що ускладнює виконання пристроїв виявлення і усунення аварій, і в загальному випадку представляють небезпеку як для ізоляції кар'єрних електричних мереж і установок, так і для обслуговуючого персоналу.

2. Однофазні замикання на землю супроводжуються перехідними процесами, параметри яких в загальному випадку залежать від моменту замикання (від діючого значення фазної напруги), в деякій мірі від параметрів ізоляції мережі

щодо землі, від режиму заземлення нейтралі і від значення перехідного опору в точці замикання.

3. За інших рівних умов надійність електропостачання електроприймачів або надійність розподільних мереж в основному визначається пошкоджуваністю елементів мережі і якістю роботи пристроїв релейного захисту. Ступінь впливу зазначених факторів на надійність роботи розподільних мереж залежить від режиму нейтралі, який в свою чергу визначає рівень внутрішніх перенапруг і характер перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю.

4. Найнижчий рівень експлуатаційної надійності відповідає мережам з повністю ізольованою нейтраллю, а також мережам з компенсованою нейтраллю при розладі компенсації на 20% і більше від резонансної. Це обумовлено високою пошкоджуваністю елементів систем електропостачання від дії внутрішніх перенапруг і ферорезонансних явищ.

5. Найбільш висока експлуатаційна надійність забезпечується в розподільнихмережах з накладенням додаткової активної складової на струм замикання на землю (мережі з резистором в нейтралі). У таких мережах при певних умовах різко обмежуються рівні внутрішніх перенапруг, що супроводжують несиметричні ушкодження, практично виключається розвиток ферорезонансних процесів, крім того, в таких мережах практично виключається помилкова робота пристроїв захисту від замикань на землю за рахунок різкого придушення (практично усунення) перехідних процесів при появі і відключені пошкоджень.

6. У разі компенсованих мереж при відсутності автоматичної резонансної настройки режиму компенсації в мережах з дугогасним реактором рекомендований комбінований режим роботи нейтралі, тобто, окрім створення індуктивної складової струму однофазного замикання на землю, пропонується також одночасно накладати на струм замикання і активну складову, що рекомендована на рівні 30 - 50% від ємнісної, що забезпечує експлуатаційні показники адекватні системам електропостачання тільки з резистором в нейтралі навіть при розладі дугогасного реактора до 50% від резонансного режиму компенсації.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ СИЛОВИХ АКТИВНИХ КОМПЕНСАТОРІВ В ПРИВОДАХ З ЄМНІСНИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НАКОПИЧУВАЛЬНИХ ЄМНОСТЕЙ ДЛЯ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ У ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Безперервне зростання встановленої потужності нелінійних та несиметричних споживачів з різко змінним реактивним навантаженням (тиристорні електроприводи прокатних станів, електричні сталеплавильні пічки тощо) значно загострило проблему забезпечення основних нормативних показників якості електроенергії. При відхиленнях показників якості електроенергії, що перевищують нормовані стандартами значення, нормальна робота електроустаткування або взагалі неможлива, або може бути забезпечена ціною значного зниження навантажень. Відхилення напруги від норми і викривлення її форми приводять до додаткових втрат в електромережах і електроприймачах, що знижує їх довговічність, ефективність передачі і споживання електроенергії. Так, наприклад, термін служби асинхронного двигуна при несиметрії напруги в 4% і номінальному навантаженні скорочується в два рази.

Електроприводи споживають значну частину електроенергії, що виробляється. Тому важливе значення отримують питання комплексного підходу до розробки і практичного вживання методів та засобів енергозбереження і гнучкого керування традиційними показниками якості електроенергії засобами промислового електроприводу, де є величезні резерви.

В частотно-регульованому асинхронному електроприводі, щоб уникнути ускладнення вхідного кола, силовий перетворювач в більшості випадків складається із АІН з ШІМ і некерованого діодного випрямляча. Останній шунтується конденсаторною батареєю для забезпечення двостороннього обміну енергією між двигуном і вхідним колом постійного струму. Така побудова силової схеми дозволяє керувати амплітудою і частотою вихідної напруги в одному інверторі та уникнути ускладнення вхідного кола. Проте, при цьому можливо реалізувати лише інверторне гальмування без рекуперації енергії в мережу, що

викликає додаткові втрати в розрядних резисторах в електроприводах з напруженими динамічними режимами і великими інерційними масами, а також в підйомно-транспортних установках. Реалізація рекуперативного гальмування вимагає ускладнення силової схеми і замість діодного випрямляча необхідно використовувати перетворювач з двосторонньою провідністю на основі АІН з ШІМ. Проте, і в цьому випадку, внаслідок двосторонньої циркуляції енергії між електродвигуном і мережею, виникають додаткові втрати в лінії, трансформаторі та вхідному перетворювачі.

Одним з напрямів усунення перерахованих недоліків і вирішення проблеми нормалізації якості електроенергії на основі сучасних повністю керованих перетворювачів з ШІМ є використання групового живлення електроприводів від загальних шин постійного струму з ємнісними накопичувачами енергії [35-37].

У схемі рис. 3.1 виключається двостороння циркуляція енергії між мережею і двигунами, оскільки енергія гальмування одного або групи електродвигунів передається (минаючи мережу) через ємнісний накопичувач на інші електроприводи у режимі двигуна. Істотно, що енергія запасена в ємнісному накопичувачі повторно використовується для керування якістю електроенергії за допомогою оберненого АІН з ШІМ, який сумісно з системою релейно-векторного керування, утворюють так званий паралельний (силовий) активний фільтр (ПАФ).

Така система електропривода володіє рядом істотних переваг [37, 38]: гнучка конфігурація й уніфікація силових блоків і модулів керування; виключається двостороння циркуляція енергії між мережею й двигунами, тому що енергія рекуперативного гальмування одного або групи двигунів передається (минаючи мережу) за допомогою ємнісного накопичувача на інші електроприводи рухового режиму роботи; знижуються динамічні навантаження, сприймані ємнісним накопичувачем, а отже, і втрати енергії в елементах силового кола, що знижує їхню встановлену потужність. Істотно, що запасена енергія ємнісним накопичувачем може бути ефективно використана для нормалізації основних показників якості електроенергії за допомогою паралельних активних фільтрів (ПАФ) із системою релейно-векторного керування [39, 40].

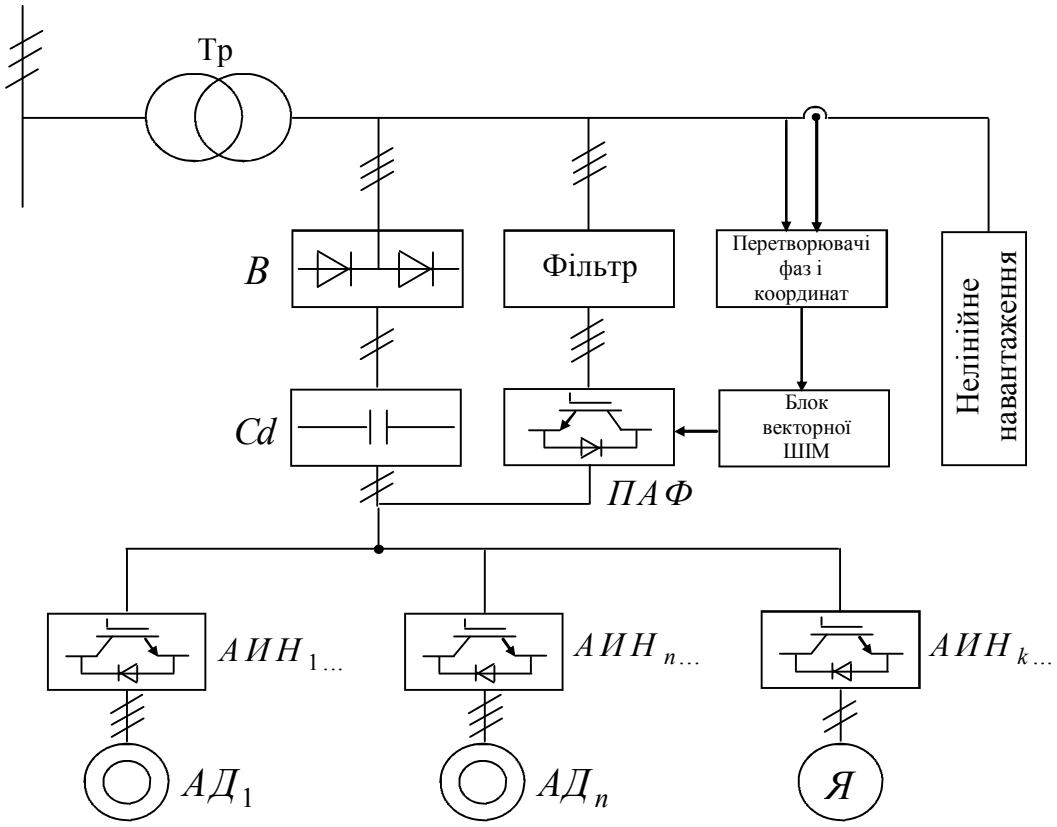


Рисунок 3.1 – Функціональна схема управління якістю електроенергії в системах групового живлення електроприводів

Формування керуючого параметра для оптимізації енергетичних процесів і мінімізації втрат у нелінійних і несиметричних системах з реактивним навантаженням обумовлює необхідність оперувати миттєвою потужністю, яка однозначно характеризує енергообмінні процеси, що відбуваються в нелінійних системах [41]. Ця задача може бути вирішена на основі методу I_x, I_y $\left(I_d, I_q\right)$ теорії *p-q* миттєвої потужності з використанням узагальнених векторів струму і напруги мережі в системі координат *x,y*, що синхронно обертається, орієнтованої по вектору напруги мережі [42].

У трифазних симетричних системах за відсутності нульових складових струмів миттєве значення потужності визначається як скалярний добуток узагальненого (результуючого) вектора напруги мережі $\overline{U}$ і сполученого вектора струму $\overline{I}^*$ [42]

$$p = \frac{3}{2}\mathrm{Re}[\overline{U}\overline{I}^*]. \qquad (3.1)$$

Якщо в нерухомій системі координат α, β позначити кути між віссю α та узагальненими векторами напруги і струму відповідно φ_u і φ_i, то вирази для векторів напруги і сполученого струму можна представити у вигляді [42]:

$$\begin{aligned} \overline{U} &= U_\alpha + jU_\beta = U_m \cos\varphi_u + jU_m \sin\varphi_u \\ \bar{I}^* &= I_\alpha - jI_\beta = I_m \cos\varphi_i + jU_m \sin\varphi_i \end{aligned} \tag{3.2}$$

де U_m, I_m – модулі відповідних векторів, що дорівнюють амплітудним значенням фазних напруг і струмів.

З урахуванням (3.2) вираз для миттєвої потужності (3.1) має вигляд:

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2}(U_\alpha I_\alpha + U_\beta I_\beta) \\ P &= \frac{3}{2}(U_\beta I_\alpha + U_\alpha I_\beta) \end{aligned} \tag{3.3}$$

що відповідає методу *p-q* (I_α, I_β) теорії миттєвої потужності [43].

У трифазній симетричній системі синусоїдальних величин узагальнені вектори в площині комплексного змінного представляються вектором, який рівномірно обертається з кутовою частотою напруги. При цьому ортогональні складові I_α, I_β у (3.3) є гармонійними функціями, що ускладнює їх використання для побудови і синтезу САР якості електроенергії на основі ПАФ. Додаткові переваги, з погляду простоти формування керуючих дій, пропорційних неактивним складовим повної потужності, дає перехід від нерухомої системи координат *α, β* до *x, y,* що синхронно обертається, орієнтованої по вектору напруги мережі. В цій системі координат трифазна синусоїдальна система напруг представляється вже нерухомим вектором з однією лише постійною проекцією на вісь *x*, що спрощує реалізацію і синтез регуляторів, які працюють на постійному, а не змінному струмі.

Перехід до системи координат *x,y*, що обертається та зворотній перехід реалізується за допомогою співвідношень [42]:

$$\bar{I}_{x,y} = \bar{I}_{\alpha,\beta} e^{-j\varphi_u}, \tag{3.4}$$

$$\bar{I}_{\alpha,\beta} = \bar{I}_{x,y} e^{-j\varphi_u} \tag{3.5}$$

де φ_u – кут між координатними системами; $I_x; I_y; I_\alpha; I_\beta$ – ортогональні складові узагальнених векторів струму в системі координат, що обертається, і в нерухомій.

Для сполученого вектора струму

$$\overline{I}^*_{x,y} = \overline{I}_{\alpha,\beta} e^{j\varphi_u};\ \overline{I}^*_{\alpha,\beta} = \overline{I}_{x,y} e^{-j\varphi_u}, \tag{3.6}$$

де $\overline{I}^*_{x,y}$, $\overline{I}^*_{\alpha,\beta}$ – сполучені вектори струму у відповідній системі координат.

У системі координат *x, y*, що обертається, орієнтованої за вектором напруги мережі, вираз (3.1) для миттєвої потужності з урахуванням (3.4) і (3.6) набуває вигляд:

$$p_{x,y} = \frac{3}{2}\mathrm{Re}\left[\overline{U}_{\alpha,\beta}\overline{I}^*_{\alpha,\beta}\right] = \frac{3}{2}\mathrm{Re}\left[\overline{U}_{x,y}e^{j\varphi_u}\overline{I}^*_{x,y}e^{-j\varphi_u}\right] = \frac{3}{2}\mathrm{Re}\left[\overline{U}_{x,y}\overline{I}^*_{x,y}\right], \tag{3.7}$$

що відповідає методу i_d, i_q (I_x, I_y) – теорії миттєвої потужності [11].

Результуючі вектори в системі координат що обертається, орієнтованій за вектором напруги ($U_y = 0$), можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} &\overline{U}_{x,y} = U_x = U_m; \\ &\overline{I}^*_{x,y} = I_x - jI_y = I_m\cos\varphi - jI_m\sin\varphi, \end{aligned} \tag{3.8}$$

де φ – фазовий зсув між напругою і струмом.

З урахуванням (3.8) вираз для миттєвої потужності (3.7) набуває вигляду:

$$p_{x,y} = \frac{3}{2}\mathrm{Re}\left[U_x(I_x - jI_y)\right] = \frac{3}{2}\mathrm{Re}\left[U_m(I_m\cos\varphi - jI_m\sin\varphi)\right], \tag{3.9}$$

дійсна складова якого відповідає активній потужності, а уявна – реактивній:

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2}U_m I_m\cos\varphi = 3UI\cos\varphi = 3UI_x; \\ Q &= \frac{3}{2}U_m I_m\sin\varphi = 3UI\sin\varphi = 3UI_y. \end{aligned} \tag{3.10}$$

Наведені вирази дають такий же результат, що і (3.3) для нерухомої системи координат, оскільки перехід від однієї системи до другої не приводить до зміни кута зсуву між векторами напруги і струму. Проте, використання системи координат *x,y* значно спрощує процедуру виділення і безперервного контролю миттєвих значень неактивних складових повної потужності. В лінійних

симетричних системах обидві складові I_x і I_y не містять змінних компонентів і, як випливає з (3.10), пропорційні відповідно активній і реактивній потужності. В нелінійних симетричних системах за наявності гармонік струму в обох складових з'являються змінні компоненти, пропорційні потужності викривлення. При цьому сума змінних складових $I_{x\sim} + I_{y\sim}$ пропорційна потужності викривлення, обумовленої несинусоідальністю кривих струму і напруги. З урахуванням цього можна сформулювати узагальнений параметр мінімізації неактивних складових повної потужності в нелінійних симетричних системах у вигляді:

$$I = I_y + I_{x\sim} \tag{3.11}$$

який відповідає струмам, що підлягають компенсації, і може бути використаний у САР якості електроенергії з допомогою ПАФ як задавальна дія.

За відсутності нульової складової струму миттєве значення потужності несиметричної системи визначається як скалярний добуток узагальненого вектора напруги $\overline{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2^*$ і сполученого вектора струму мережі $I = \dot{I}_1^* + \dot{I}_2$ [43].

$$p = \frac{3}{2}\mathrm{Re}[\overline{U}\,\overline{I}^*] = \frac{3}{2}\mathrm{Re}[(\dot{U}_1 + \dot{U}_2{}^*)(\dot{I}_1{}^* + \dot{I}_2)] = \frac{3}{2}\mathrm{Re}(\dot{U}_1\dot{I}_1{}^* + \dot{U}_1\dot{I}_2 + \dot{U}_2{}^*\dot{I}_1{}^* + \dot{U}_2{}^*\dot{I}_2) \tag{3.12}$$

Оскільки [43]

$$\mathrm{Re}[\dot{U}_2^*\dot{I}_2] = \mathrm{Re}[\dot{U}_2\dot{I}_2^*];\ \mathrm{Re}[\dot{U}_2^*\dot{I}_1^*] = \mathrm{Re}[\dot{U}_2\dot{I}_1]$$

то

$$p = \frac{3}{2}\mathrm{Re}[\dot{U}_1\dot{I}_1{}^* + \dot{U}_2\dot{I}_2{}^* + \dot{U}_2\dot{I}_1 + \dot{U}_1\dot{I}_2] \tag{3.13}$$

У наведеному виразі складові

$$\frac{3}{2}\mathrm{Re}[\dot{U}_1\dot{I}_1{}^*] = P_1,\ \ \frac{3}{2}\mathrm{Re}[\dot{U}_2\dot{I}_2{}^*] = P_2 \tag{3.14}$$

відповідають середній потужності прямої та зворотної послідовностей, а складова

$$\frac{3}{2}\mathrm{Re}[\dot{U}_1\dot{I}_2 + \dot{U}_2\dot{I}_1] \tag{3.15}$$

є змінною потужністю, пульсуючою з подвійною частотою навколо нульового середнього значення. Амплітуду цієї нульової складової називають потужністю

несиметрії. Таким чином, в трифазних системах з ізольованою нейтраллю, де відсутні струми нульової послідовності, симетрування навантаження відповідно компенсації пульсуючої з подвійною частотою потужності.

На підставі сказаного на рис.1 наведена функціональна схема замкненої САР компенсації неактивних складових потужності в електроприводах зі спільними живлячими шинами постійного струму і накопичувачами енергії за допомогою конденсаторних батарей.

Перетворювач фаз (ПФ) рис. 3.1, побудований на підставі співвідношень [43]

$$I_\alpha = \mathrm{Re}(\bar{I}) = \mathrm{Re}\left[\frac{2}{3}\cdot\left(i_A + \bar{\alpha}\cdot i_B + \bar{\alpha}^2\cdot i_C\right)\right] = \frac{2}{3}\cdot\left(i_A - \frac{i_B + i_C}{2}\right) \qquad (3.16)$$

$$I_\beta = \mathrm{Im}(\bar{I}) = \mathrm{Im}\left[\frac{2}{3}\cdot\left(i_A + \bar{\alpha}\cdot i_B + \bar{\alpha}^2\cdot i_C\right)\right] = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}, \qquad (3.17)$$

реалізують перехід від трифазної системи до двофазної, а перетворювач координат (ПК) на основі (3.4) – до системи координат *x, y* що обертається, орієнтованої за вектором напруги мережі. У перемикачі режимів (ПР) залежно від компонент ортогональних складових I_x і I_y, що надходять на вхід ПК1 (реалізує на підставі (3.2) перехід від системи координат, що обертається, до нерухомої), встановлюється режим компенсації: компенсація всіх неактивних складових повної потужності (реактивна потужність зсуву, потужність викривлення та несиметрії); окремих складових або їх комбінація.

На виході перетворювача фаз ПФ2, що реалізує перехід від двофазної системи до трифазної, за допомогою виразів [39]

$$i_A = I_\alpha;\ i_B = -\frac{I_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta;\ \ i_C = -\frac{I_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta \qquad (3.18)$$

формується завдання на трифазні струми $I_{зк}$, що підлягають компенсації, які надходять на входи релейних регуляторів струму (РРС), охоплених від'ємним зворотним зв'язком.

При подачі на вхід ПК1 тільки постійної складової I_y реалізується компенсація тільки реактивної потужності зсуву перших гармонік напруги та струму.

У системах групового живлення електроприводів накопичувальні конденсатори в колі постійного струму, включені на виході випрямляча (рис.0.1) служать для обміну енергією між електроприводами, що працюють у різних режимах, а також для акумулювання енергії рекуперативного гальмування групи приводів і електромагнітної енергії, запасеної в обмотках машин.

Останній випадок має місце як при черговій комутації ключів інвертора, так і в аварійних режимах, коли закриваються всі ключі інвертора й накопичена енергія в обмотках двигуна, розряджаючись через зворотні діоди й конденсатор, збільшує його напругу.

Зменшення напруги в колі постійної напруги можливо в перехідних процесах пуску й прийому навантаження внаслідок інерційності вхідного випрямляча. В обох випадках коливання напруги на конденсаторі повинні перебувати в припустимих межах.

У системах індивідуального електропривода з живильними шинами змінного струму, силові блоки яких містять випрямляч і інвертор, допускається збільшення напруги в колі постійного струму на 15% від максимальної випрямленої напруги $U_{d0} = 2,34U_{\phi}$ [45].

У системах групового живлення електроприводів від загальних шин постійного струму й наявності паралельного активного фільтра, призначеного для керування якістю електроенергії, напруга на конденсаторі може неконтрольовано збільшуватися при надлишковій енергії рекуперативного гальмування групи приводів лише протягом часу запізнювання T_{μ} АІН, що звичайно приймається рівним 0,001с. [46].

Більше жорсткі вимоги варто пред'являти до припустимого зниження напруги в колі постійного струму. Це обумовлено зниженням статичних і динамічних показників електропривода, а в ряді випадків порушенням технологічного процесу, наприклад, внаслідок зменшення необхідної кутової швидкості двигуна при номінальному потоці.

Розглянемо необхідне значення ємності накопичувального конденсатора для акумулювання надлишкової енергії рекуперативного гальмування. Якщо в процесі

роботи електропривода кутова швидкість змінюється від ω_1 до ω_2, то кінетична енергія, що віддається, становить

$$\Delta W = J(\omega_1^2 - \omega_2^2)/2, \tag{3.19}$$

де J – сумарний наведений момент інерції привода.

Стосовно вихідного запасу кінетичної енергії це становить

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1^2} = \omega^*(2 - \omega^*), \tag{3.20}$$

де $\omega^* = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$ – відносне зниження кутової швидкості.

З наведеного виразу видно, що процес віддачі накопиченої кінетичної енергії відбувається непропорційно швидкості й наприкінці процесу гальмування відбувається в незначних межах.

При лінійному законі зміни швидкості в процесі гальмування поточне значення швидкості ω_2 по витіканню часу запізнювання T_μ ПАФ становить

$$\omega_2 = \omega_1 - \frac{\omega_1}{t_m} T_\mu, \tag{3.21}$$

де t_m – час гальмування привода.

Енергія, що віддається при цьому, у процесі гальмування

$$W_m = \frac{J}{2}(\omega_1^2 - \omega_2^2) = \frac{J}{2}[\omega_1^2 - (\omega_1 - \frac{\omega_1}{t_m} T_\mu)]^2 = \frac{J\omega_1^2 T_\mu}{2t_m}(2 - T_\mu / t_m). \tag{3.22}$$

Звичайно $t_m >> T_\mu$, тому (3.22) можна представити у вигляді

$$W_m = \frac{J\omega_1^2}{t_m} T_\mu = \omega_1 T_\mu (M_m + M_c), \tag{3.23}$$

де $t_m = J\omega_1 / (M_m + M_c)$ – час гальмування; M_m, M_c – гальмовий момент двигуна й момент опору.

Вважаючи, що гальмування починається із $\omega_1 = \omega_н$ при моменті опору $M_c = M_н$, маємо з (3.23)

$$W_m = T_\mu (\lambda + 1) P_н, \tag{3.24}$$

де $\lambda = M_m / M_н$ – відношення гальмового моменту до номінального, граничне значення якого відповідає перевантажувальній здатності двигуна.

Зневажаючи втратами, умову рівності кінетичної енергії, що віддається, і енергії, що запасається в конденсаторі, можна представити у вигляді

$$T_\mu(\lambda+1)P_н = 0,5C_d[(U_d+\Delta U)^2 - U_d^2] = 0,5C_d(2U_d\Delta U + \Delta U^2), \tag{3.25}$$

де U_d й ΔU – початкове значення напруги на конденсаторі і його перевищення.

Згідно наведеного виразу

$$C_d = \frac{T_\mu(\lambda+1)P_н}{0,5\Delta U_{доп}(2U_d + \Delta U_{доп})} \tag{3.26}$$

Так, наприклад, при $U_d = 500B$, $\Delta U_{доп} = 0,1U_д$, $T_\mu = 0,002c$ на 1кВт потужності двигуна потрібен накопичувальний конденсатор ємністю

$$C_д \approx 75(\lambda+1) \text{ мкФ}, \tag{3.27}$$

що при λ=(3,0-3,5) становить (300-350) мкФ.

У системах групового живлення електроприводів із загальним вхідним випрямлячем на вході вираження (3.26) можна представити у вигляді

$$C_d = \frac{T_\mu \Delta P_m}{0,5\Delta U_{доп}(2U_d + \Delta U_{доп})}, \tag{3.28}$$

де ΔP_m – надлишкова потужність рекуперативного гальмування над споживаною.

Енергію, що генерується двигуном в аварійному режимі при знятті керуючих імпульсів із ключів інвертора, можна без великої погрішності визначити в припущенні сталості потокозчеплення ротора. При цьому протягом провідного стану зворотних діодів, що змінюються по величині струми статора й ротора підтримують потокозчеплення ротора незмінним.

Безпосередньо перед зняттям керуючих імпульсів із ключів інвертора потокозчеплення статора Ψ_{10} й ротора Ψ_{20} в синхронно обертовій системі координат визначаються як

$$\begin{aligned}\overline{\Psi}_{10} &= L_1\overline{I}_{10} + L_m\overline{I}_{20};\\ \overline{\Psi}_{20} &= L_m\overline{I}_{10} + L_2\overline{I}_{20},\end{aligned} \tag{3.29}$$

де $\overline{I}_{10}, \overline{I}_{20}$ – результуючі вектори струмів статора й ротора перед закриттям ключів інвертора; L_1, L_2, L_m – повна індуктивність статора, ротора і їх взаємоіндуктивність, знайдена з урахуванням дії трьох фаз двигуна.

Після запирання зворотних діодів $\overline{I}_1 = 0$ і, отже, згідно (3.29) маємо

$$\overline{\Psi}_1 = L_m\overline{I}_2; \overline{\Psi}_2 = L_2\overline{I}_2, \tag{3.30}$$

де $\overline{I}_2$ – результуючий вектор струму ротора після запирання зворотних діодів.

Згідно наведених виразів

$$\overline{\Psi}_1 = \overline{\Psi}_2 L_m / L_2 = \overline{\Psi}_2 K_2. \tag{3.31}$$

А тому що потокозчеплення ротора залишається незмінним, тобто

$$\overline{\Psi}_1 = \overline{\Psi}_{20} K_2, \tag{3.32}$$

де $K_2 = L_m / L_2$ – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора.

Протягом часу провідного стану зворотних діодів векторна діаграма потокозчеплень статора й ротора може бути представлена, як показано на рис.3.2.

У загальному випадку запасена електромагнітна енергія перед зняттям керуючих імпульсів визначається як скалярний добуток відповідних векторів

$$W_0 = \frac{3}{2}\cdot\frac{1}{2}\left[\overline{\psi}_{10}\overline{I}^*_{10} + \overline{\psi}_{20}\overline{I}^*_{20}\right], \tag{3.33}$$

де $\overline{I}^*_{10}, \overline{I}^*_{20}$ – сполучені результуючого вектора струмів статора й ротора до зняття керуючих імпульсів.

Після запирання ключів $\overline{I}_1 = 0; \overline{\Psi}_2 = \overline{\Psi}_{20}$ і, отже, запасена енергія стає рівною

$$W_1 = \frac{3}{2}\cdot\frac{1}{2}\overline{\psi}_{20}\overline{I}^*_2. \tag{3.34}$$

Зміна магнітної енергії

$$W = W_0 - W_1 = \frac{3}{2}\cdot\frac{1}{2}\left[\overline{\Psi}_{10}\overline{I}^*_{10} + \overline{\Psi}_{20}\left(\overline{I}^*_{20} - \overline{I}^*_2\right)\right]. \tag{3.35}$$

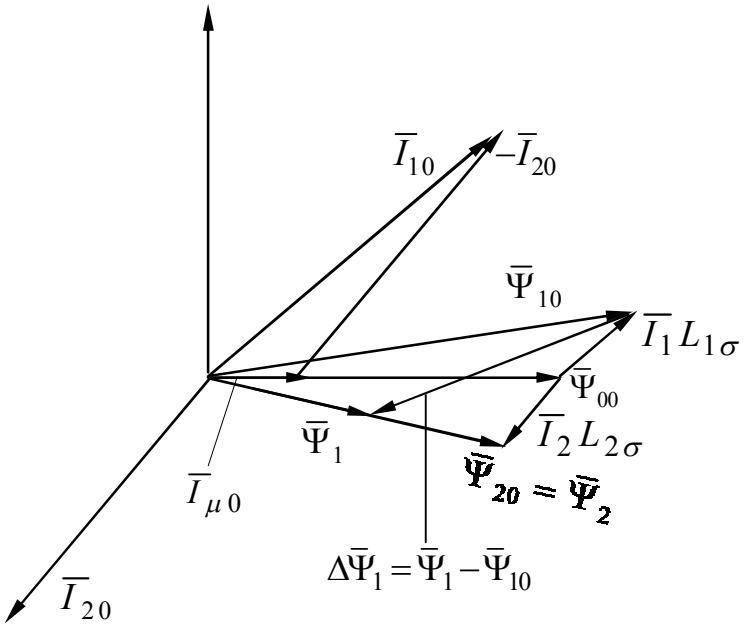


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма потокозчеплення статора й ротора до та після запирання ключів інвертора

Різниця $\left(\overline{I}_{20}^{*} - \overline{I}_{2}^{*}\right)$ у виразі (3.35) може бути знайдена на підставі сталості потокозчеплення ротора $L_m\overline{I}_{10} + L_2\overline{I}_{20} = L_2\overline{I}_2,$ звідки

$$\overline{I}_{20} - \overline{I}_2 = \overline{I}_{10}L_m / L_2 = -\overline{I}_{10}K_2. \tag{3.36}$$

З урахуванням (3.36) маємо з (3.35)

$$\Delta W = \frac{3}{2}\cdot\frac{1}{2}\left[\left(L_1\overline{I}_{10} + L_m\overline{I}_{20}\right)\overline{I}_{10}^{*} - \left(L_m\overline{I}_{10} + L_2\overline{I}_{20}\right)\frac{L_m}{L_2}\overline{I}_{10}^{*}\right] = \frac{3}{2}\cdot\frac{1}{2}\overline{I}_{10}^{2}L_{1n}, \tag{3.37}$$

де $L_{1n} = L_1 - L_m^2 / L_2$ – перехідна індуктивність обмотки статора.

Отже, асинхронний двигун з короткозамкненим ротором в аварійному режимі при запиранні ключів інвертора відносно зміни магнітної енергії може розглядатися як котушка з індуктивністю, рівної $\frac{3}{2}L_{1n}$.

У системах групового живлення електроприводів в (3.37) варто підставляти сумарну перехідну індуктивність $L_{n1\Sigma}$ обмоток статора й сумарний струм $I_{1\Sigma}$, споживаний двигунами. При цьому, за аналогією з (3.25) і (3.26) одержимо вираження для розрахунку ємності накопичувального конденсатора для

акумулювання електромагнітної енергії при аварійному знятті керуючих імпульсів із ключів інверторів

$$C_d = \frac{3}{2}\frac{I_{1\Sigma}^2 L_{n1\Sigma}}{\Delta U_{доп}(2U_d + \Delta U_{доп})}. \quad (3.38)$$

У розрахунках потрібно приймати більше зі значень, знайдених за (3.28) і (3.38).

Висновки до розділу 3

1. На основі звернених АІН із ШІМ можуть бути побудовані багатофункціональні швидкодіючі системи керування якістю електроенергії в приводах з ємнісними накопичувачами, що дозволяють як компенсувати неактивні складові потужності, так і стабілізувати напругу мережі.

2. Висока точність і гранично можлива швидкодія системи керування якістю електроенергії при заданих енергетичних ресурсах досягається застосуванням релейних регуляторів струму та формуванням керуючого параметра за миттєвим значенням потужності.

3. У системах групового живлення регульованих електроприводів від загальних живильних шин постійного струму ємність накопичувального конденсатора може бути визначена на підставі рівності надлишкової енергії рекуперативного гальмування над споживаною й енергії, що запасається в конденсаторі протягом часу некерованого заряду ємності, рівного часу запізнювання системи ПАФ.

4. Відносно зміни електромагнітної енергії асинхронний двигун з короткозамкненим ротором в аварійному режимі при запиранні ключів інвертора може розглядатися як котушка з індуктивністю, що в 1,5 рази більше перехідної індуктивності обмотки статора.

4 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З РЕЛЕЙНО-ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У РЕЖИМІ СТАБІЛІЗАЦІЇ МОМЕНТУ

4.1 Загальна характеристика

Робота електропривода у тривалому режимі стабілізації моменту є типовим режимом роботи для вузького класу механізмі. К таким механізмам можна віднести намотувально-змотувальні пристрої та дво або багатодвигунні системи, які працюють на загальне навантаження у режимі ведучий-ведений і мають механічний зв'язок (надалі розглядаються лише дводигунні системи). Дамо згорнуту характеристику роботи електропривода для наведених систем.

Намотувально-розмотувальні пристрої використовуються у різних галузях промисловості: металургії, паперовій, текстильній та інших. Вони здійснюють змотування готового матеріалу у рулони або навпаки, розмотування, для використання у технологічному процесі. У будь якому разі, задачею електропривода цього механізму є підтримання постійного натяжіння перемотуваного матеріалу [47]. У процесі перемотування постійно змінюється радіус котушок з намотуваним матеріалом, що приводить до постійної зміни маси котушок та її моменту інерції. Це означає, що електропривод постійно працює у динамічних режимах.

У іншому випадку електропривод працює з постійним навантаження, яке не змінюється мінімум у одному робочому циклі, або на протязі всього робочого періоду. До таких механізмів можна, наприклад, віднести системи дводвигунного підйому або повороту (механізми повороту екскаваторів-драглайнів та інших).

Стрімкий розвиток напівпровідникової техніки, теорії управління, мікропроцесорної техніки привів до стрімкого розвитку електроприводів змінного струму з напівпровідниковими перетворювачами частоти та асинхронними, синхронними і вентильно-індукторними двигунами. Діапазон потужностей сучасних електроприводів сягає от долів кіловат до десятків мегават. При чому

найбільш розповсюдженими є електроприводи потужністю до 100 кВт. Сьогодні в світі існує більше 20 різних виробників перетворювачів частоти (ПЧ), які продають свою продукцію по всьому світові.

Функціональність сучасних перетворювачів частоти широка. Найбільш функціональні ПЧ мають близько 300-500 параметрів, які можна налагоджувати. Різні типи вбудованих функцій для керування електроприводами різних механізмів, різні типи законів керування, починаючи від самих простих скалярних до різноманітних векторних законів керування. Завдяки стандартам МЕК електроприводи різних виробників можуть замінювати один одного майже без втрати функціональності або з отриманням нових функцій. Однак, не зважаючи на все віще сказане, слід відмітити, що функції, які забезпечують роботу електропривода у режимі стабілізації моменту є лише у самих функціонально розвинутих представників, наприклад [48].

Сучасний електропривод постійно розвивається, змінюється. З'являються нові схемні рішення, нові закони керування. Це потребує проведення великої кількості досліджень, моделювання роботи у різних режимах. Тому у даному розділі здійснено дослідження частотно-керованого електропривода, який працює у режимі стабілізації моменту, з раніше розробленими авторами релейно-векторними алгоритмами керування [49-51].

4.2 Розробка і дослідження моделей асинхронного частотно-керованого електропривода з релейно-векторним керуванням

4.2.1 Вибір системи координат для побудови моделі двигуна

При виборі системи координат для побудови моделі двигуна і системи автоматичного регулювання необхідно враховувати наступне:

- вибрана система відліку повинна забезпечувати найпростіше представлення електричної машини;
- моделі двигуна і системи автоматичного регулювання (САР) повинні мати мінімальне число перехресних зв'язків;
- змінні об'єкту, вибрані для регулювання, повинні легко вимірюватись або обчислюватись;

– побудова САР і вибір передавальних функцій регуляторів здійснюються відповідно до принципів підлеглого регулювання параметрів.

При раціональному виборі регульованих координат деякими перехресними зв'язками між каналами об'єкту регулювання можна буде нехтувати зважаючи на їх слабкість.

За наявності внутрішніх перехресних зворотних зв'язків між каналами об'єкту регулювання, якими не можна нехтувати, їх компенсація здійснюється за допомогою введення компенсуючих сигналів в САР. Компенсуючі зворотні зв'язки є головним засобом забезпечення “грубості” системи. Задовільна компенсація перехресних зв'язків вимагає достатньої швидкодії, як вимірників сигналів цих зв'язків, так і внутрішніх контурів регулювання. Якщо в перехресних зв'язках структурної схеми є нелінійності, то розв'язання каналів управління одночасно лінеарізує об'єкт регулювання.

За наявності в об'єкті регулювання статичних нелінійностей їх компенсація здійснюється введенням в САР нелінійних елементів, із зворотніми функціональними залежностям між координатами що регюлюються.

Для побудови моделей електричних машин змінного струму і систем регулювання на їх основі використовують системи координат, що обертаються з синхронною швидкістю, системи, що обертаються із швидкістю ротора і нерухомі системи координат (система α, β). Раціональний вибір кутової швидкості і орієнтації вісей системи координат в перехідних режимах також може спростити представлення об'єкту і вибір регуляторів САР.

Рівняння асинхронної машини, записані у термінах узагальненого вектора і представлені в координатній системі, що обертається з швидкістю ω з, мають вигляд [52]:

$$\overline{U}_s = \bar{I}_s R_s + \frac{d\overline{\Psi}_s}{dt} + j\omega_c \overline{\Psi}_s, \tag{4.1}$$

$$\overline{U}_r = \bar{I}_r R_r + \frac{d\overline{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_c - \omega)\overline{\Psi}_r. \tag{4.2}$$

$$\overline{\Psi}_s = \bar{I}_s L_s + \bar{I}_r L_m, \tag{4.3}$$

$$\overline{\Psi}_r = \bar{I}_s L_m + \bar{I}_r L_r , \tag{4.4}$$

де $\overline{U}_s, \bar{I}_s, \overline{\Psi}_s$ – узагальнені вектори напруги, струму і потокозчеплення статора; $\overline{U}_r, \bar{I}_r, \overline{\Psi}_r$ – узагальнені вектора напруги, струму і потокозчеплення ротора; R_s, R_r – активні опори статора і ротора; ωс – швидкість обертання системи координат; ω – швидкість обертання ротора; L_s, L_r, L_m – індуктивність статора, ротора і взаємна індуктивність статора і ротора відповідно; $j = \sqrt{-1}$.

Оскільки результуючі просторові вектори струмів, напруг і потокозчеплень статора і ротора в усталеному режимі при синусоїдальній напрузі живлення взаємно нерухомі, будь-яка система координат, прив'язана до одного з цих векторів, придатна для оптимізації [53, 54].

У [55] проведено детальний аналіз шести різних структурних схем АД, побудованих в системі координат, що обертається, і прив'язана дійсною віссю до одного з шести векторів $\overline{U}_s, \bar{I}_s, \overline{\Psi}_s$, $\overline{U}_r, \bar{I}_r, \overline{\Psi}_r$. Початковими для синтезу структур були рівняння (4.1-4.4). Автори дійшли наступного висновку. Структурні схеми побудовані в системі координат орієнтованій за векторами потокозчеплень $\overline{\Psi}_r$ і $\overline{\Psi}_s$ мають невелику кількість перехресних зв'язків, прості вирази для моменту, порівняльно прості вирази для ω_c, нелінійності в прямих каналах регулювання відсутні. Вирішальна перевага цих структур полягає у тому, що вони містять лише одну складову потокозчеплення, яка легко знаходиться через напругу і струм. Труднощі розв'язання каналів мінімальні, а передавальні функції регуляторів найбільш прості. По складності структури $\overline{\Psi}_r$ і $\overline{\Psi}_s$ однакові. Відмітною особливістю є те, що структура $\overline{\Psi}_r$ найбільш придатна для систем регулювання АД з короткозамкненим ротором, а структура $\overline{\Psi}_s$ більше підходить для АД з фазним ротором (машина подвійного живлення). Також слід додати, що динамічні характеристики частотно-регульованого АД з САР, орієнтованої за вектором потокозчеплення, подібні характеристикам компенсованого двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Істотним недоліком даних структур є те, що потрібна висока точність у визначенні просторового положення вектора

потокозчеплення. Оскільки для визначення потокозчеплення в основному використовуються непрямі методи, що дозволяє не ускладнювати конструкції асинхронних двигунів, то помилка його вимірювання може привести до коливальної електромагнітного моменту в динамічних режимах.

Асинхронний електропривод з короткозамкненим двигуном є найпоширенішим типом приводу. Частка регульованого електроприводу з АД з короткозамкненим ротором постійно зростає. Тому, далі розглядається структурне уявлення АД з короткозамкненим ротором в системі координат d, q. Система координат d, q обертається з синхронною швидкістю ωс і орієнтована за вектором потокозчеплення ротора $\overline{\Psi_r}$.

Для виводу рівнянь, за якими будується структурна схема, виконаємо наступні дії. З рівнянь (4.3) і (4.4) виразимо вектори потокозчеплення статора $\overline{\Psi_s}$ і струму ротора $\bar{I}_r$:

$$\overline{\Psi_s} = \bar{I}_s L_s \left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r} \right) + \overline{\Psi_r} \frac{L_m}{L_r} = \bar{I}_s L_s' + K_r \overline{\Psi_r}, \tag{4.5}$$

$$\bar{I}_r = K_r \left(\frac{\overline{\Psi_r}}{L_m} - \bar{I}_s \right), \tag{4.6}$$

де $K_r = \frac{L_m}{L_r}$ – коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора;

$L_s' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$ – перехідна індуктивність статора [54].

Підставимо (4.5) в (4.1):

$$\overline{U_s} = \bar{I}_s \left[R_s + (p + j\omega_c) L_s' \right] + (p + j\omega_c) K_r \overline{\Psi_r}, \tag{4.7}$$

де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа.

Підставимо (4.6) в (4.2):

$$\overline{U_r} = \left[\frac{K_r R_r}{L_m} + p + j(\omega_c - \omega) \right] \overline{\Psi_r} - K_r R_r \bar{I}_s. \tag{4.8}$$

Обидві частини виразу (4.8) помножимо на K_r і визначимо складову $K_r \overline{\Psi_r}$:

$$K_r\overline{\Psi}_r(p+j\omega_c)=\overline{U}_rK_r-\overline{\Psi}_r\frac{K_r^2R_r}{L_m}+j\omega K_r\overline{\Psi}_r+K_r^2R_r\bar{I}_s. \qquad (4.9)$$

Підставляючи (4.9) у вираз (4.7) одержимо:

$$\overline{U}_s-\overline{U}_rK_r=\bar{I}_s\left[R'+\left(p+j\omega_c\right)L_s'\right]+\left(j\omega K_r-\frac{K_r^2R_r}{L_m}\right)\overline{\Psi}_r, \qquad (4.10)$$

де $R'=R_s+K_r^2R_r$ – перехідний опір статора [54].

У виразах (4.8) і (4.10) вектора представимо як додаток дійсної і уявної частин:

$$\begin{aligned}\left(U_{sd}+jU_{sq}\right)&=(\Psi_{rd}+j\Psi_{rq})\frac{K_rR_r}{L_m}+(\Psi_{rd}+j\Psi_{rq})p+\\&+(\Psi_{rd}+j\Psi_{rq})j\omega_c-(\Psi_{rd}+j\Psi_{rq})j\omega-\left(I_{sd}+jI_{sq}\right)K_rR_r\end{aligned}, \qquad (4.11)$$

$$\begin{aligned}\left(U_{sd}+jU_{sq}\right)-K_r\left(U_{rd}+jU_{rq}\right)&=R'\left(1+p\frac{L_s'}{R'}\right)\left(I_{sd}+jI_{sq}\right)+\\&+j\omega_cL_s'\left(I_{sd}+jI_{sq}\right)+j\omega K_r\left(\Psi_{rd}+j\Psi_{rq}\right)-\frac{K_r^2R_r}{L_m}\left(\Psi_{rd}+j\Psi_{rq}\right)\end{aligned} \qquad (4.12)$$

Розкладемо рівняння (4.11) і (4.12) на дійсну і уявну частини.

$$\left.\begin{aligned}\Psi_{rd}&=\frac{U_{rd}T_r+I_{sd}L_m}{1+pT_r}\\\omega_c&=\omega+\frac{U_{rq}+K_rR_rIsq}{\Psi_{rd}}\end{aligned}\right\}, \qquad (4.13)$$

$$\left.\begin{aligned}U_{sd}-K_rU_{rd}&=I_{sd}R'(1+pT_s')-\omega_cL_s'I_{sq}-\frac{K_r}{T_r}\Psi_{rd}\\U_{sq}-K_rU_{rq}&=I_{sq}R'(1+pT_s')+\omega_cL_s'I_{sd}+\omega K_r\Psi_{rd}\end{aligned}\right\}, \qquad (4.14)$$

де $T_r=\frac{L_r}{R_r}$ – постійна часу ротора; $T_s'=\frac{L_s'}{R'}$ – перехідна постійна часу статора [45].

Рівняння електромагнітного моменту двигуна:

$$M=\frac{3}{2}Z_pK_r\Psi_{rd}I_{sq}, \qquad (4.15)$$

де Zp – число пар полюсів двигуна.

Рівняння руху системи:

$$J\frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c, \tag{4.16}$$

де J – момент інерції двигуна (або сумарний момент інерції системи, приведений до валу двигуна); Мс – статичний момент на валу двигуна, ω_m – механічна швидкість обертання ротора.

На рис. 4.1 представлено структурну схему АД з короткозамкненим ротором, побудовану за виразами (4.13 – 4.16) в системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора $\overline{\Psi_r}$.

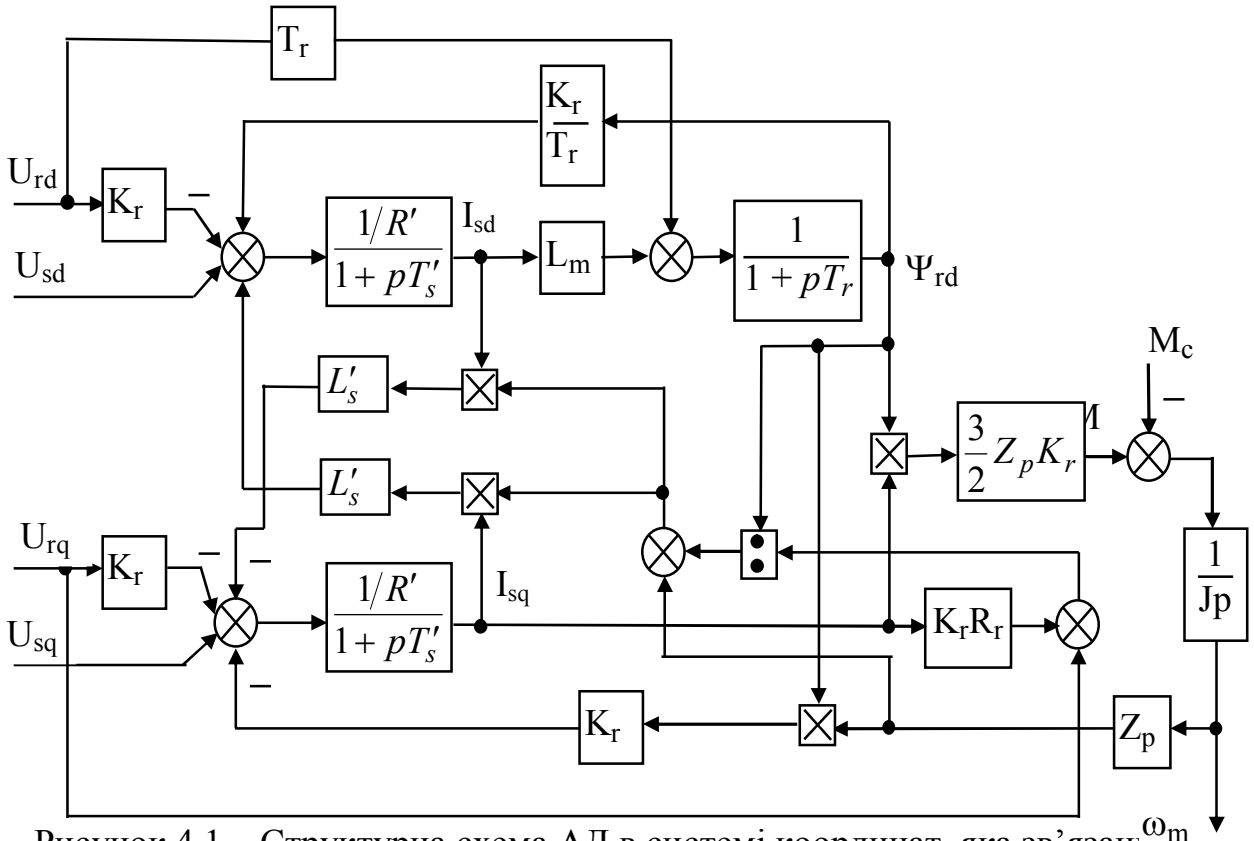


Рисунок 4.1 – Структурна схема АД в системі координат, яка зв'язан вектором потокозчеплення ротора Ψ_r

4.3 Синтез системи регулювання асинхронним електроприводом з векторним релейним регулятором струму

Всі сучасні системи регулювання будуються за принципом підлеглого регулювання координат електроприводу і характеризуються каскадним з'єднанням регуляторів, кількість яких дорівнює кількості регульованих координат (струм, потік, момент, швидкість і т.і.) [55]. На вході регулятора кожного з контурів

порівнюються сигнали, пропорційні заданому і дійсному значенням координати даного контуру, а вихідна напруга регулятора є сигналом завдання для наступного контуру. Однією з переваг даних систем є можливість обмежувати будь-яку координату шляхом обмеження сигналу завдання з попереднього зовнішнього регулятора. Серед недоліків слід зазначити зниження швидкодії системи удвічі при використанні нового зовнішнього контуру регулювання. Синтез регуляторів системи здійснюється зсередини назовні, від внутрішнього контуру до зовнішнього. Серед критеріїв оптимізації, що використовуються для синтезу регуляторів, найбільше поширення набули модульний і симетричний критерії оптимізації. Вибір критерію залежить від типу передавальних функцій, що входять до складу контуру, що оптимізується, і бажаної перехідної функції контуру.

Оскільки електроприводи, які здійснюють стабілізацію моменту, завжди працюють у парі з електроприводом який здійснює стабілізацію швидкості, то надалі здійснено синтез повної двоконтурної системи регулювання швидкості на базі якої будується система регулювання моменту.

На рис. 4.2 представлено структурну схему системи регулювання швидкості АД з короткозамкненим ротором. Як видно з рисунку, система регулювання має два зовнішні контури: контур регулювання швидкості АД і контур регулювання потокозчеплення ротора. Дані контури містять усередині себе контури регулювання відповідних складових струму статора. При однозонному регулюванні швидкості завдання на потокозчеплення ротора Ψ_r залишається постійним (не є функцією швидкості) і дорівнює номінальному потокозчепленню $\Psi_н$, відповідно завдання на потокоутворюючу складову струму статора в номінальному режимі Isd = const. Зміна швидкості (моменту) здійснюється за рахунок регулювання складової струму статора Isq. Регулювання струму здійснюється в осях α-β Для забезпечення динамічних режимів введене додаткове коло похибки (назвемо її динамічною областю), радіус якої на 20% більше радіусу робочої області похибки регулювання струму. При роботі в динамічній області заборонені нульові стани і завжди вибирається найбільш швидкодіючий вектор напруги інвертора. Це дозволяє забезпечити найбільшу швидкодію в перехідних

режимах при стрибкоподібній зміні завдання швидкості або моменту навантаження.

Система регулювання моменту будується на базі розглянутої раніше системі стабілізації швидкості (рис. 4.3). Завдяки відповідному представленню моделі двигуна та побудові системи з роздільними каналами регулювання потокоутворюючої Isd та моментоутворюючої Isq складових струму регулювання моменту можливе лише зміною завдання на струм Isq. Всі інши складові системи залишаються незмінними.

Завдання на струми Isd і Isq формуються регуляторами швидкості і потокозчеплення в системі координат d-q. Оскільки регулювання струму здійснюється в системі α-β, то для переходу з однієї координатної системи в іншу використовується координатний перетворювач ПК1, який працює згідно рис. 4.4 і виразу:

$$\begin{cases} X_\alpha = X_d \cos\theta - X_q \sin\theta \\ X_\beta = X_d \sin\theta + X_q \cos\theta \end{cases} \tag{4.17}$$

Зворотне перетворення має вигляд:

$$\begin{cases} X_d = X_\alpha \cos\theta + X_\beta \sin\theta \\ X_q = -X_\alpha \sin\theta + X_\beta \cos\theta \end{cases} \tag{4.18}$$

Кут θ є кутом повороту системи координат d-q, орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора Ψ_r, щодо системи α-β. Обчислення θ здійснюється в блоці БВ1 за наступною формулою:

$$\theta = \int \omega_c dt = \int (Z_p \omega_m + \omega_{sk})dt = \int \left(Z_p \omega_m + \frac{L_m I_q}{T_r \Psi_r} \right) dt , \tag{4.19}$$

де ω_m – механічна швидкість обертання ротора; ω_{sk} – частота ковзання ротора.

Потокозчеплення ротора Ψ_r обчислюється за виразом (4.13) при $U_{rd} = 0$:

$$\Psi_{rd} = \frac{I_{sd} L_m}{1 + pT_r} . \tag{4.20}$$

Струми Isd і Isq обчислюються за проекціями струмів Iα і Iβ, яки одержані з фазних струмів в блоці ПК2, і зворотному перетворенню (4.18).

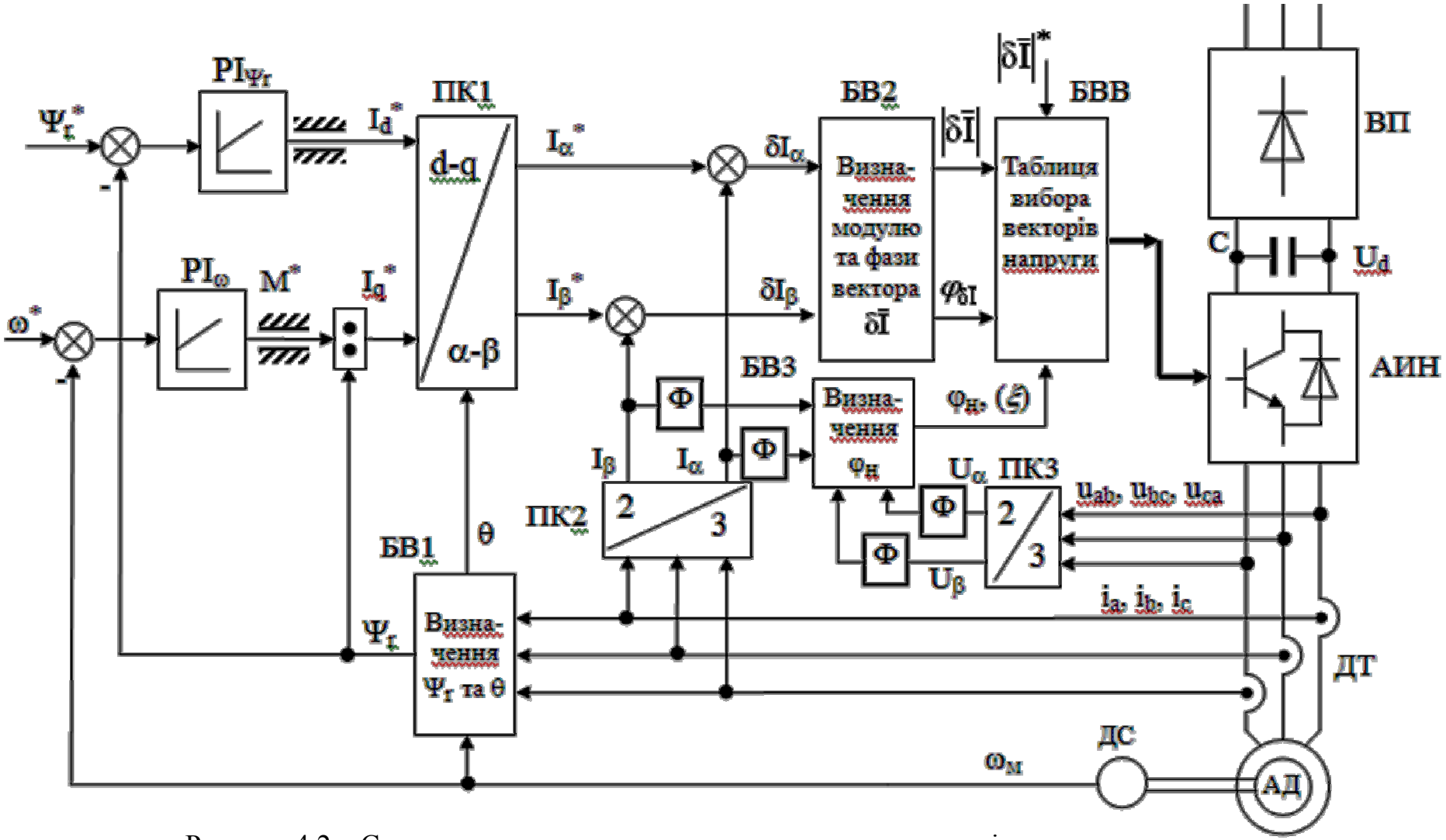


Рисунок 4.2 – Структурна схема системы регулювання швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

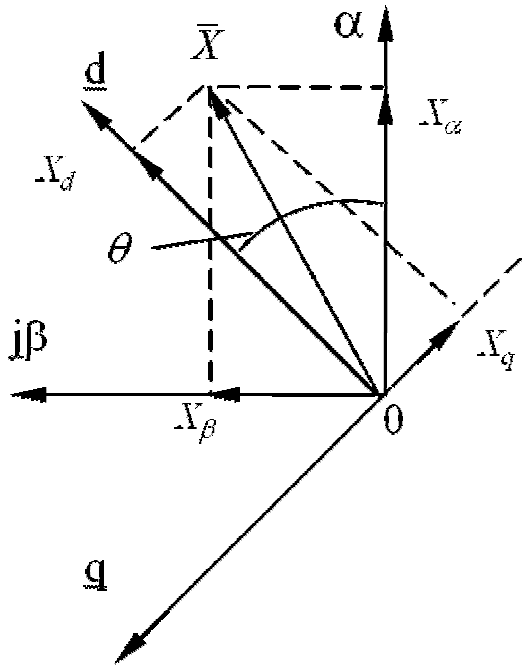


Рисунок 4.3 – Система координат *d-q*

Обчислене за (4.20) значення потокозчеплення ротора далі використовується для організації зворотного зв'язку за потокозчепленням і для формування завдання на струм I*sq.

4.4 Синтез регулятора швидкості

При синтезі передавальної функції регулятора швидкості передавальна функція замкненого контуру струму має вигляд:

$$W_T(p) = \frac{1/K_T}{2T_\mu p + 1},$$

де K_T – коефіцієнт передачі датчика струму, T_μ – мала некомпенсована постійна часу контуру струму.

Мала постійна часу контуру струму включає суму інерційностей (затримок) в системі, виникаючих при відпрацюванні керуючої дії. До таких затримок можна віднести постійні часу фільтрів вхідних сигналів струму і напруги, період дискретизації цифрової системи керування, “мертвий час” силових ключів і т.і. При синтезі регулятора швидкості T_μ прийнято рівною $T_\mu = 0{,}0005$ с.

Контур регулювання швидкості зображений на рис. 4.4. Для отримання передавальної функції ПІ-регулятора швидкості (астатична система) скористаємося симетричним критерієм оптимізації, передавальна функція якого має вигляд [54, 55]:

$$W_{sop}(p) = \frac{8T_\mu p + 1}{32T_\mu^2 p^2 (2T_\mu p + 1)}.$$

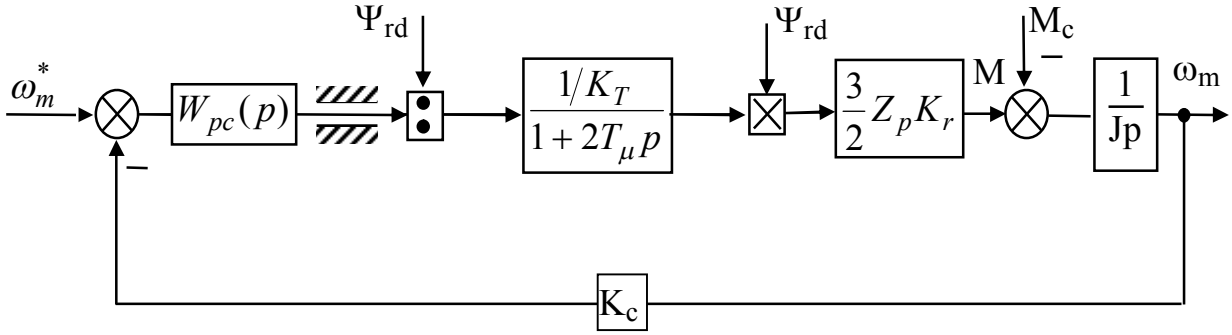


Рисунок 4.4 – Структурна схема контуру регулювання швидкості
K_c – коефіцієнт датчика швидкості

Прирівнявши добуток всіх ланок розімкненого контуру швидкості до передавальної функції симетричного оптимуму, знайдемо передавальну функція ПІ-регулятора швидкості:

$$W_{pc} = \frac{JK_T(8T_\mu p + 1)}{48T_\mu^2 p Z_p K_r}.$$

4.5 Синтез регулятора потокозчеплення ротора

Синтез регулятора потокозчеплення здійснюється аналогічно синтезу регулятора швидкості. Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення ротора має вигляд (рис. 4.5):

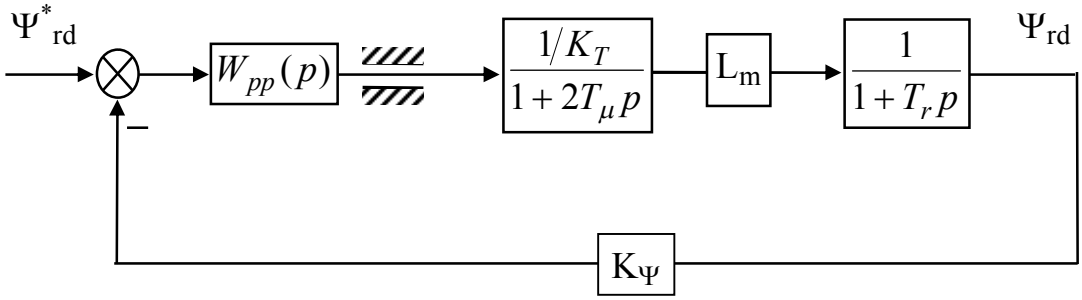


Рисунок 4.5 – Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення

Для отримання передавальної функції регулятора потокозчеплення скористаємося модульним критерієм оптимізації, який має вигляд [55]:

$$W_{тор}(p) = \frac{1}{4T_{\mu} p(2T_{\mu} p + 1)}.$$

Одержана передавальна функція ПІ-регулятора потокозчеплення відповідає виразу:

$$W_{рр}(p) = \frac{K_T(T_r p + 1)}{4T_{\mu} p L_m K_{\Psi}}.$$

4.6 Моделювання

Перевірка працездатності запропонованої системи регулювання проводилась методами математичного моделювання. Для цього в системі MATLAB, з використанням вище приведених виразів, була розроблена модель системи регулювання (рис. 4.5). Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна у відносних одиницях наведені в табл. 4.1 [56].

Для використання в моделі параметри з табл. 4.1 необхідно перевести до абсолютних одиниць, а також розрахувати номінальні момент, струм, потокозчеплення і т.і.

Номінальний момент двигуна визначимо за формулою:

$$M_н = \frac{9{,}55 \cdot P_н}{n_0 \cdot (1 - s_н)},$$

де $P_н$ – номінальна потужність електродвигуна; Вт; n_0 – синхронна швидкість обертання поля статора, об/мин; $s_н$ – номінальне ковзання електродвигуна.

Номінальний фазний струм статора:

$$I_{фн} = \frac{P_н}{3 \cdot U_{фн} \cdot \eta_н \cdot cos\,\varphi_н},$$

де $U_{фн}$ – номінальна фазна напруга електродвигуна; В; $\eta_н$ – номінальний ККД електродвигуна; $\cos\varphi_н$ – номінальний коефіцієнт потужності електродвигуна.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані асинхронного двигуна

Тип двигуна	4A160S8У
Номинальна потужність $P_н$, кВт	7,5
Номинальна фазна напруга $U_{фн}$, В	220
Номінальний ККД $\eta_н$	0,86
Номінальний $\cos\varphi_н$	0,75
Момент інерції J, кг*м^2	0,14
Число пар полюсів Z_p	4
Номінальне ковзання $s_н$	0,025
Активний опір статора R_S^*, о.е.	0,075
Приведений активний опір ротора R_r^*, о.е.	0,032
Індуктивний опір статора X_S^*, о.е.	0,14
Приведений індуктивний опір ротора X_r^*, о.е.	0,18
Індуктивний опір повітряного зазору X_μ^*, о.е.	2

Номінальне потокозчеплення двигуна:

$$\Psi_н = \frac{M_н}{1{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{фн} \cdot Z_p \cdot K_r}.$$

Для переведення опорів з відносних одиниць в абсолютні скористаємося виразом:

$$Z = Z^* \cdot Z_Б = Z^* \cdot \frac{U_{фн}}{I_{фн}}$$

де $Z_Б = \frac{U_{фн}}{I_{фн}}$ – базовий опір; Ом; Z^* – опір у відносних одиницях; Z – опір, що визначається, Ом.

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{S\sigma} = X_S / \omega_o,$$

де $\omega_o = 2\pi f$ – кутова частота живлячої мережі, рад/с; $f = 50\ Гц$ – номінальна частота живлячої мережі.

Індуктивність розсіювання обмотки ротора

$$L_{r\sigma} = X'_r / \omega_o .$$

Максимальна взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора:

$$L_m = X_\mu / \omega_o .$$

Повна індуктивність обмотки статора:

$$L_{1S} = L_{S\sigma} + L_m$$

Повна індуктивність обмотки ротора:

$$L_r = L_{r\sigma} + L_m .$$

Розраховані по вище приведених формулах параметри зведені в табл. 4.2.

При моделюванні системи регулювання моменту з використанням векторного релейного регулятора струму (ВРРС) досліджувалися режими роботи електроприводу при різних швидкостях (від 0 до ωн) і моментах навантаження Мс.

На рис. 4.6 представлена діаграма відпрацювання завдання на номінальний момент М=Мн при нульовій швидкості обертання системи ωз=0. На рис. 4.7 представлена діаграма встановлення потокозчеплення перед відпрацюванням навантаження. Як можна побачити з графіків, момент встановлюється з максимальною швидкодією. При цьому задане потокозчеплення та швидкість системі залишаються на заданому рівні. На рис. 4.8 зображені фазні струми. Як видно з рисунку струми мають чітку синусоїдальну формую.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані моделі

Активний опір статора R_S, Ом	0,9365
Приведений активний опір ротора R_r, Ом	0,3996
Індуктивність обмотки статора L_S, Гн	0,0056
Індуктивність обмотки ротора L_r, Гн	0,0072
Індуктивність намагнічування L_m, Гн	0,0795
Номінальний момент $M_н$, Нм	97,95
Номінальний фазний струм $I_{фн}$, А	17,61
Номінальне потокозчеплення $\Psi_н$, Вб	0,7142
Номінальна частота обертання $\omega_н$, рад/с	76,57
Коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора K_r (5.5)	0,9174
Перехідний опір статора R' (5.10), Ом	1,273

Перехідна індуктивність статора L'_S (4.6), Гн	0,0121
Перехідна електромагнітна постійна часу обмотки статора T'_S (4.14), с	0,0095
Електромагнітна постійна часу обмотки ротора T_r, с	0,2168
Мала некомпенсована постійна часу контуру струму (напівпровідникового перетворювача) T_μ, с	0,0005
Коефіцієнт датчика швидкості Кс, В/(рад/с)	1
Коефіцієнт датчика струму K_T, В/А	1
Коефіцієнт датчика потокозчеплення КΨ , В/Вб	1

На рис. 4.9 та рис. 4.12 представлена діаграмі відпрацювання завдання на момент, що змінюється за лінійною та квадратичною залежностями, а також потокозчеплення. Задані струми Id та Iq показані на рис. 4.10 та рис. 4.12, відповідні їм фазні струми - на рис. 4.11 та рис. 4.14.

Як можна побачити з графіків моменту, для будь якого завдання середній момент на виході співпадає с заданим (з струмом Iq). При цьому при будь якій зміні моменту потокозчеплення завжди залишається на заданому рівні. Форма фазних струмів для будь якого режиму завжди синусоїдальна. Дані показники говорять про високу якість роботи застосованих алгоритмів регулювання струму.

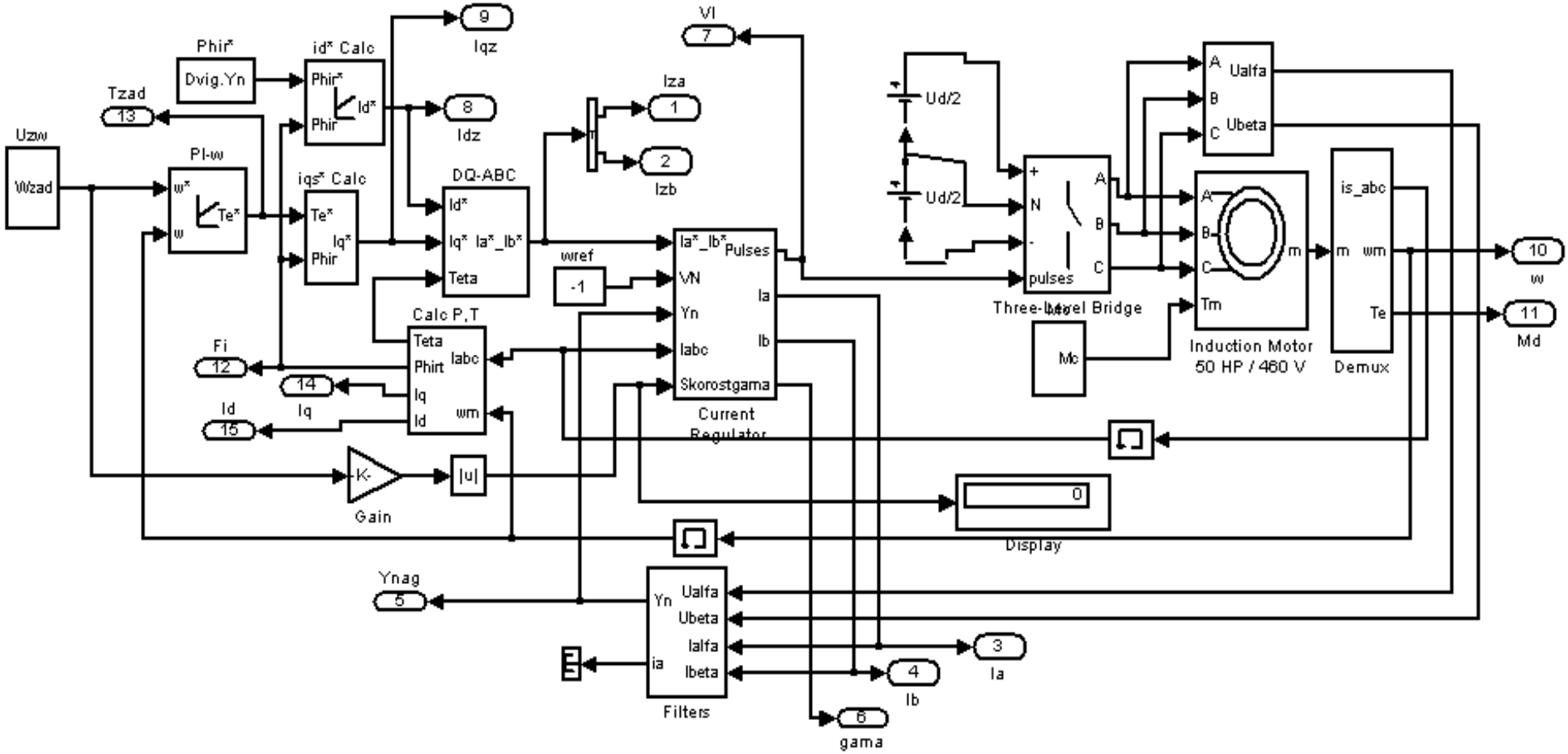


Рисунок 4.6 – Загальна модель системи регулювання швидкості (моменту) АД з короткозамкненим ротором

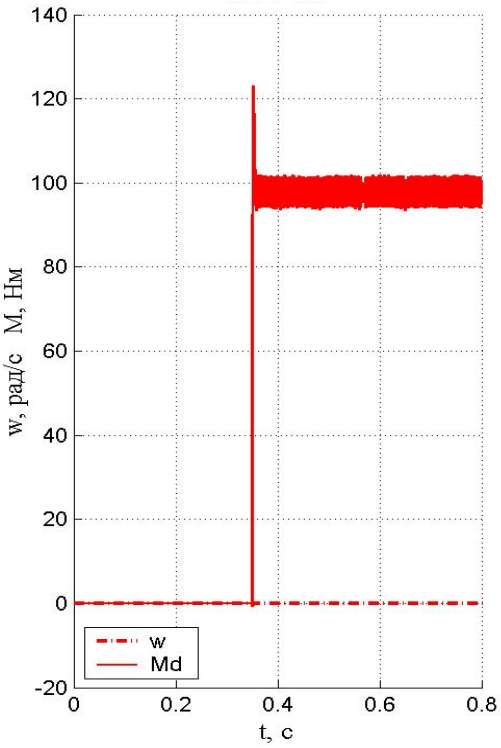


Рисунок 4.7 – Швидкість і момент двигуна (ω =0, M=$M_н$)

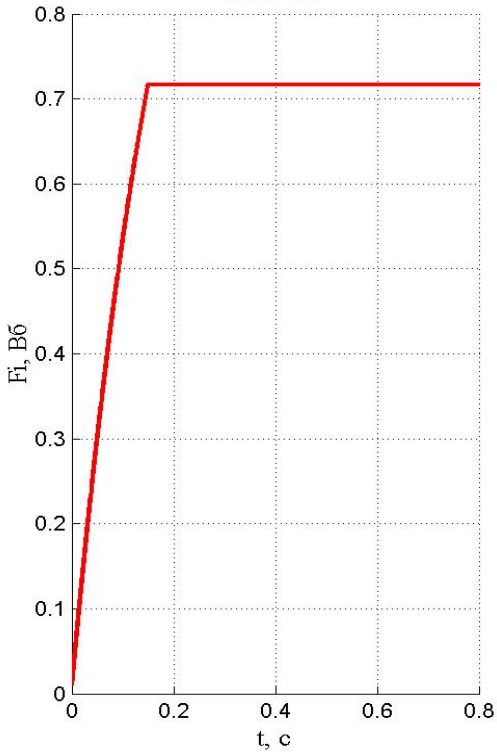


Рисунок 4.8 – Потокозчеплення ротора Ψ_r (ω =0, M=$M_н$)

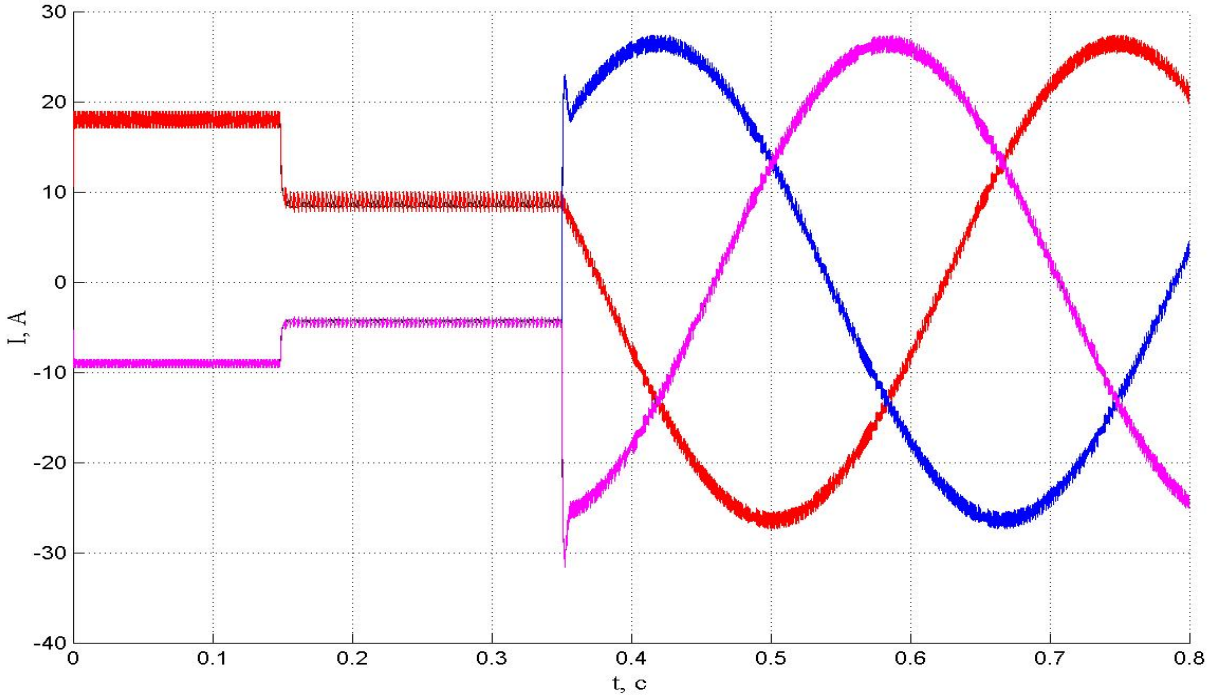


Рисунок 4.9 – Фазні струми (ω =0, M=$M_н$)

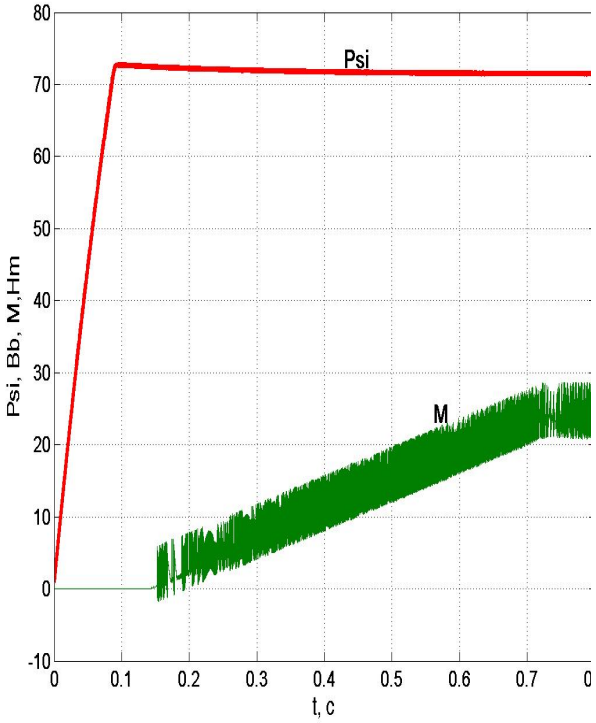


Рисунок 4.10 – Потокозчеплення та момент

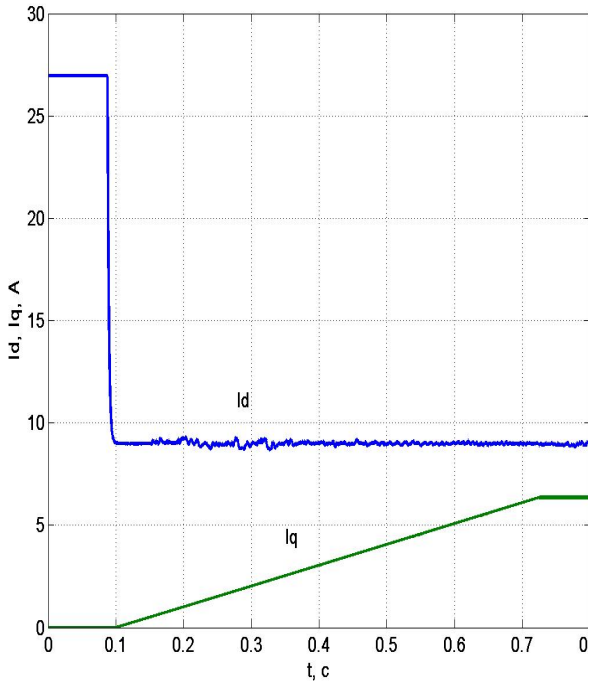


Рисунок 4.11 – Струми I_d та I_q

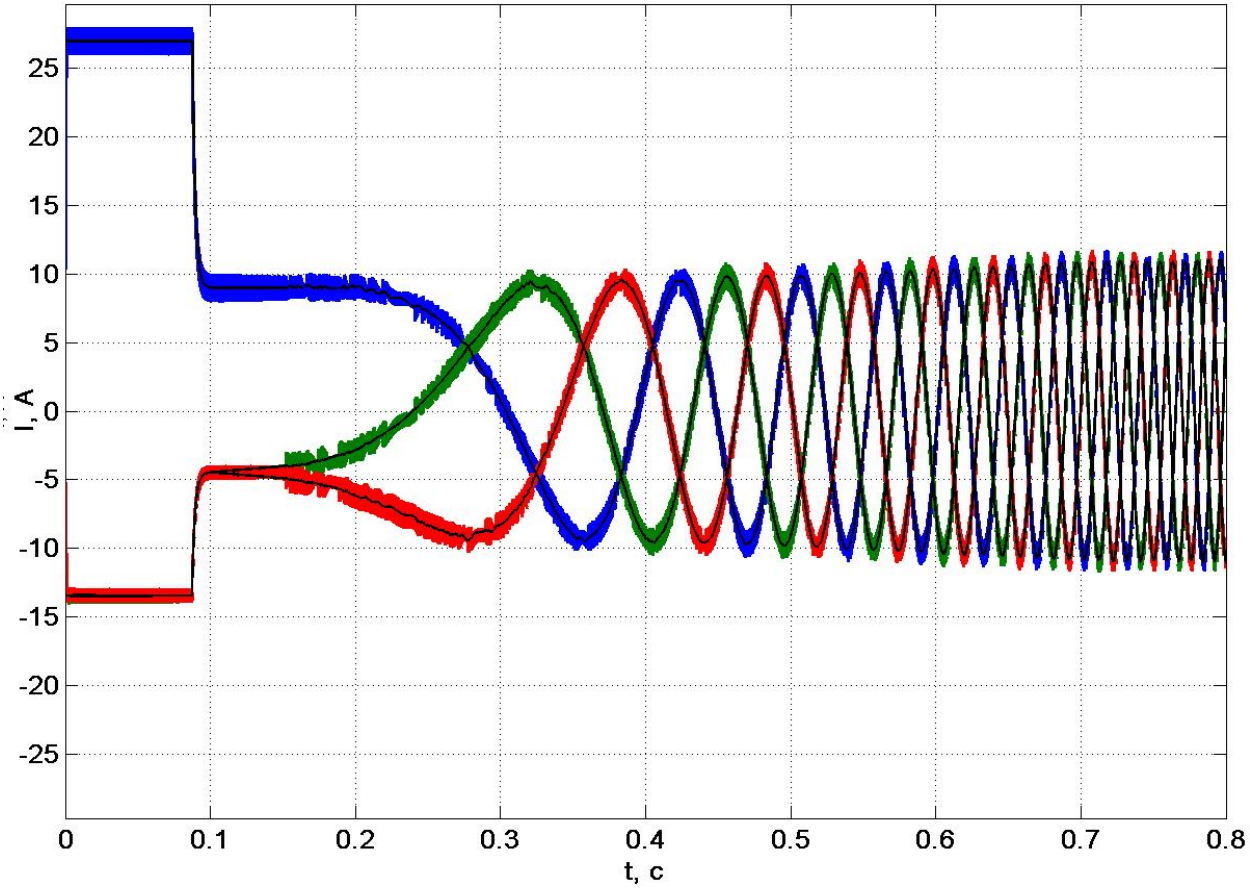


Рисунок 4.12 – Фазні струми

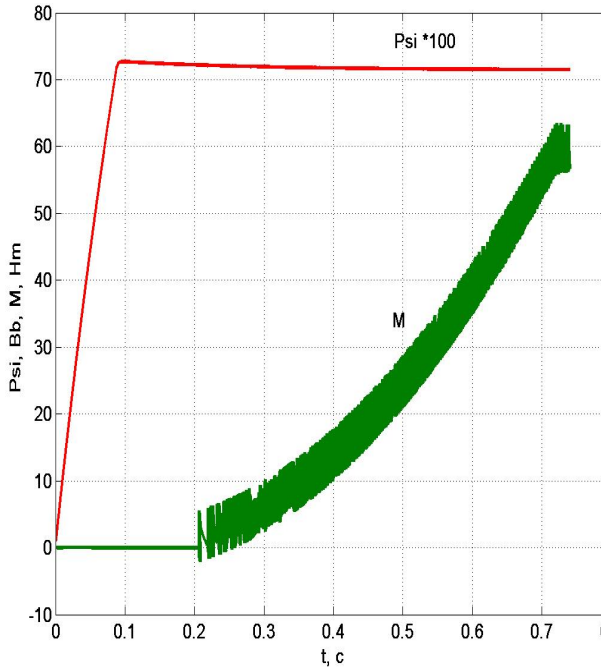


Рисунок 4.13 – Потокозчеплення та момент

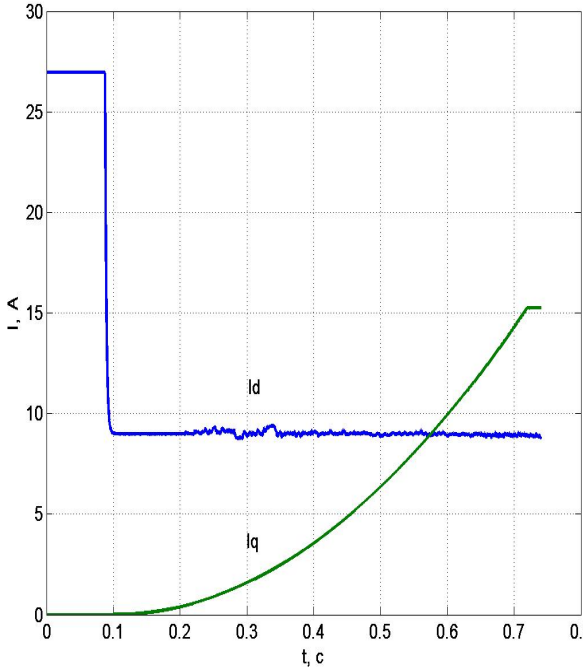


Рисунок 4.14 – Струми I_d та I_q

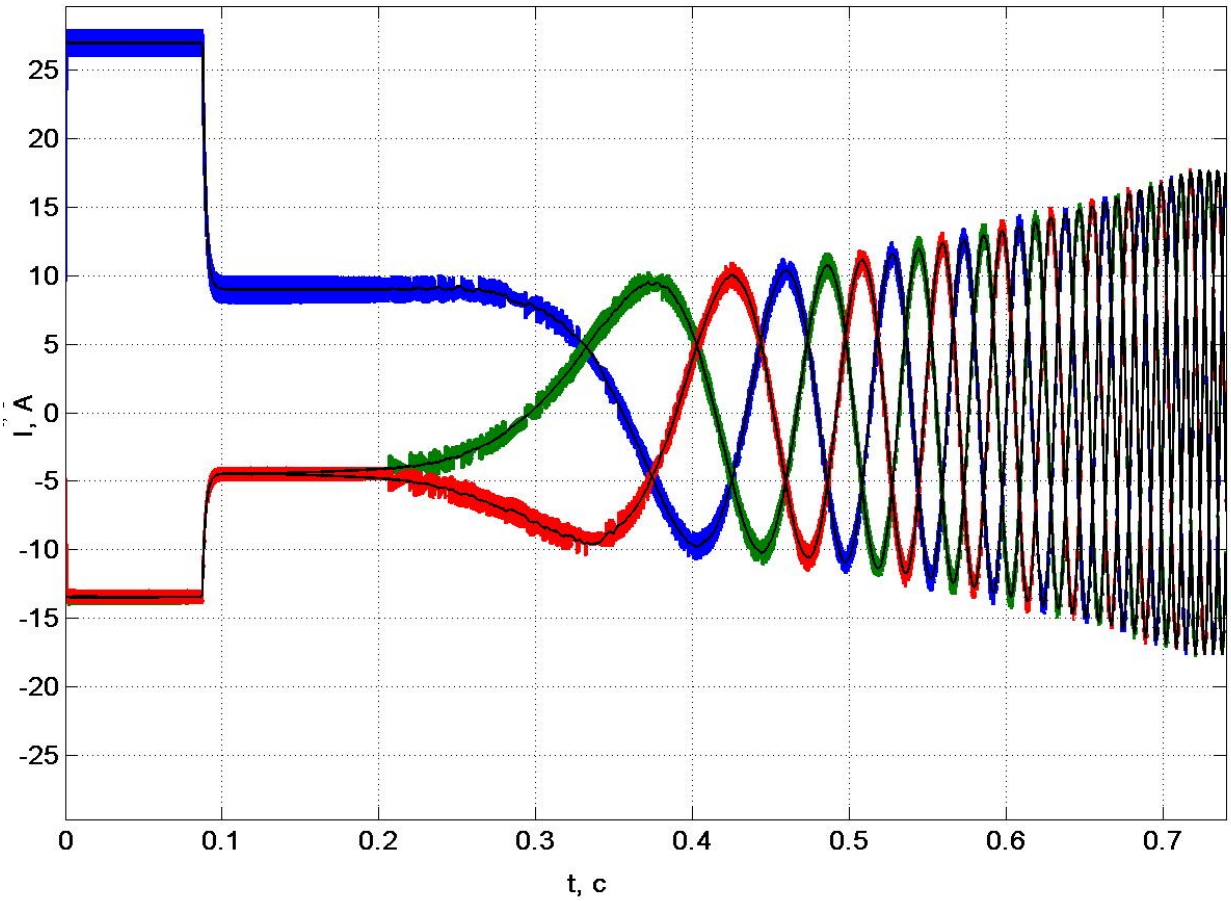


Рисунок 5.15 – Фазні струми

З рис. 4.6 видно, що момент встановлюється майже миттєво. Це можна пояснити тим, що застосовується регулятор струму релейного типу. Як відомо, такі регулятори мають максимальну швидкодію.

Звертаючись до графіків потокозчеплення ротора Ψ_r видно, що у відмінності від систем прямого управління моментом, описаних в [45], у всіх режимах роботи потокозчеплення тримається на заданому рівні. Це говорить про відсутність явища демагнетизації двигуна в даній системі регулювання моменту, що особливо важливе при роботі на малих швидкостях.

Також слід відмітити наявність такого негативного явища як достатньо великі пульсації моменту відносно середнього значення. Пульсації складають приблизно ±10% від сигналу завдання і обумовлені наявністю петлі гістерезісу регулятора струму. Зменшення петля гістерезісу приведе до зменшення пульсацій, але до збільшення частоти перемикань силових ключів. Тому при налаштуванні регулятора необхідно знаходити баланс між цими показниками.

4.7 Висновки до розділу 4

1 Векторні релейні регулятори струму (моменту), працюючі у складі системи регулювання моменту асинхронного електродвигуна, забезпечують задовільну динаміку системи при відпрацюванні задаючих і збурюючих дій.

2 Використання векторного релейного регулятора струму призводить до пульсацій миттєвих значень моменту, але середній момент відповідає заданому.

3 Для зменшення пульсацій моменту та частоті перемикань необхідно використовувати більш досконалі алгоритми керування ніж ті що застосовувались при моделюванні та дослідженнях.

5 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВНОРЕГУЛЬОВАНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ БУРОВИХ ВЕРСТАТІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БУРІННЯ ВИБУХОВИХ СВЕРДЛОВИН НА КАР'ЄРАХ

5.1 Імпульсна технологія буріння

5.1.1 Аналіз процесу руйнування гірських порід при стаціонарній і імпульсній технологіях буріння

При обертальному бурінні руйнування гірської породи здійснюється при впровадженні породоруйнівного інструменту під дією статистичного осьового зусилля (осьового навантаження) і обертального моменту на якусь глибину h.

При бурінні твердосплавними коронками цю глибину впровадження різців h називають товщиною стружки або проходкою на один різець на один оберт. Знання h залежить від осьового навантаження F і частоти обертання n інструменту у хвилину або секунду. Тоді механічна швидкість буріння V запишеться як

$$V = knh, \tag{5.1}$$

де k - кількість різців у буровій коронки.

Така ж залежність поширюється й на лопатеві долота.

При бурінні алмазними коронками, алмазними й шарошечними долотами визначити глибину впровадження одиничного породоруйнівного елемента складно, тому користуються терміном, що називається проходка на один оберт інструменту $h_{об}$. Тоді механічна швидкість буріння для цих типів породоруйнівних інструментів запишеться як

$$V = nh_{об}. \tag{5.2}$$

Значення h і $h_{об}$ залежать від осьового навантаження F і частоти обертання n.

Проілюструємо цю залежність $h = f(F,n)$ на прикладі даних з буріння граніту твердосплавними коронками ТКД у лабораторії Дніпропетровського гірничого інституту (нині Національного гірничого університету) [57].

У табл. 5.1 наведено значення h і відповідні значення механічної швидкості буріння V при зміні F (1000; 1500; 2000 даН) і n (74; 132; 242хв$^{-1}$). На рис. 5.1 наведено залежність $h = f(n)$ для різних F.

Таблиця 5.1 – Значення h і V при бурінні коронками ТКД.

$n, хв^{-1}$	$h, \frac{мм}{різець \cdot оберт}$			$V, \frac{см}{хв}$,		
	$F, даН$			$F, даН$		
	1000	*1500*	*2000*	*1000*	*1500*	*2000*
74	0,62	1,04	1,55	9,2	15,5	22,9
132	0,42	0,72	1,23	11,1	19,1	32,6
242	0,32	0,57	0,67	15,3	27,7	32,4

Дані табл. 5.1 і рис.5.1. свідчать, що значення h ростуть, як при зростанні F, так і при зменшенні n. Зміна V носить інший характер. Механічна швидкість буріння росте, як при зростанні F, так і при зростанні n, не дивлячись на зменшення h при рості n. Це пояснюється тим, що темп росту n більше темпу зниження h.

Така залежність h і V при стаціонарній технології буріння, коли F і n постійні в часі ($F = const, n = c\text{const}$).

Підвищити техніко-економічні показники буріння можна перейшовши від стаціонарної технології буріння до імпульсної, коли параметри режиму буріння (один, два або всі три) змінні в часі. У цьому випадку зміниться характер взаємодії породоруйнівного інструменту з гірською породою вибію свердловини, що приведе до зміни h і V.

Розглянемо приклад імпульсної технології буріння при змінній частоті обертання, коли $n = \text{var}$. У цьому випадку процес буріння буде характеризуватися послідовним чергуванням фаз обертання інструменту з високим і невисоким значенням n (аж до нуля). Тоді на фазі при невисоких значеннях n інструмент впроваджується на більшу глибину h в породу (табл. 5.1), а на фазі при зростанні n буде продовжувати руйнувати породу з високим значенням h. А це згідно формулі (5.1) приведе до зростання V.

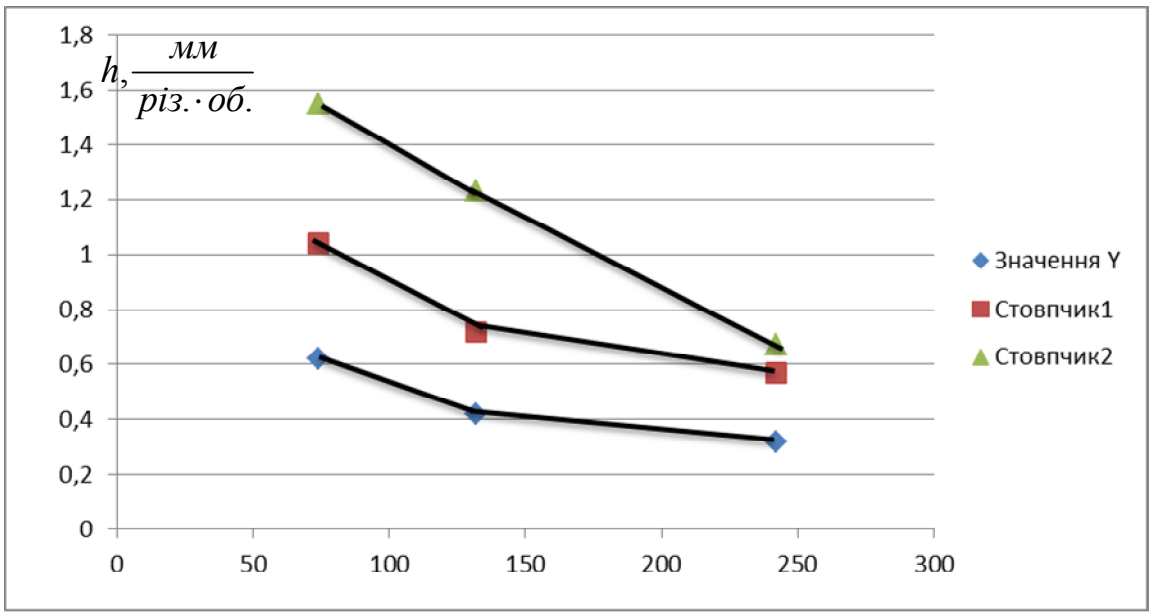


Рисунок 5.1 – Залежність $h = f(n)$ для різних F

◆ F = 1000 даН

■ F = 1500 даН

▲ F = 2000 даН

Подальше зростання n приведе до зменшення h, але за фазою росту n піде фаза зменшення n, що приведе до зростання h і до зростання V на наступній фазі росту n.

Таким чином спосіб реалізація імпульсної технології буріння ($n = \text{var}$) приведе до зміни характеру взаємодії породоруйнівного інструменту з породою вибою свердловини - на фазі зменшення частоти обертання зростає товщина руйнування породи, що приведе до зростання механічної швидкості буріння на фазі росту частоти обертання. Цей ефект підсилиться, якщо на фазі зменшення частоти обертання вона стане рівною нулю ($n = 0$).

При бурінні за технологією $n = \text{var}$ буровий інструмент буде мати середньозважену частоту менше, ніж $n = const$, тобто при $n = \text{var}$

$$n_{ср.-зв.} = \frac{\int n(t)dt}{T}, \tag{5.3}$$

де T - час циклу зміни частоти обертання.

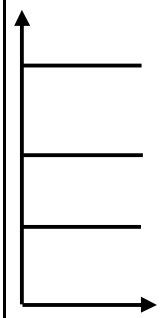
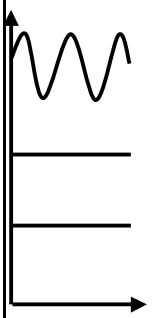
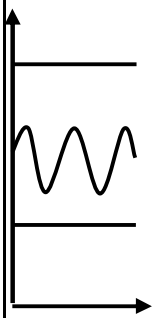
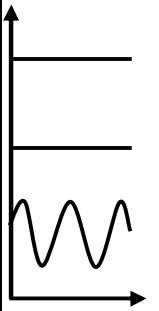
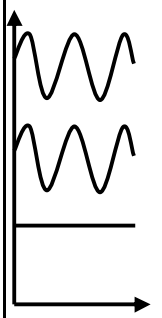
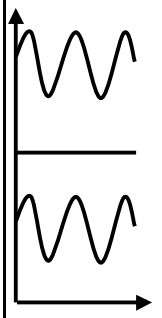
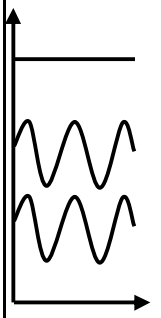
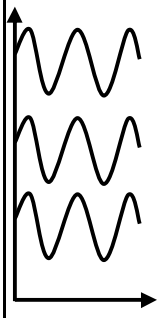
Якщо імпульсна технологія буріння буде здійснюватися при середньозваженій частоті обертання інструменту менші, чим частота обертання при стаціонарній

технології, то в цьому випадку буде мати місце менше зношування бурового інструменту.

5.1.2 Класифікація імпульсних технологій буріння

Напрямком подальших робіт з формування енерго- та ресурсозберігаючих технологій буріння є перехід від стаціонарної технології буріння (усі параметри постійні в часі) до нестаціонарної - імпульсної технології бурінні (один або кілька параметрів режиму змінних у часі).

Таблиця 5.2 – Класифікація імпульсних технологій буріння

Стаціонарна		Імпульсна					
		монопараметрична		біпараметрична			Трипараметрична
F=const	F=var	F=cons	F=cons	F=var	F=var	F=cons	F=var
n=const	n= const	n=var	n= cons	n=var	n=cons	n=var	n=var
Q=const	Q=const	Q=cons	Q=var	Q=cons	Q=var	Q=var	Q=var
							
Обертальне буріння	Ударно-обертальне буріння						

Класифікація технологій буріння примітка: Q – кількість очисного агента, що подається в свердловину в одиницю часу.

Таким чином імпульсні технології буріння утворюють три групи:

– монопараметричні (змінним є один з трьох параметрів режиму буріння :(F ,n або Q);

– біпараметричні (змінними є два параметри режиму буріння: F і n, n і Q або F і Q);

– трипараметричні (змінними є всі три параметри режиму буріння: F, n і Q).

Вперше класифікація імпульсних технологій буріння представлена в 1986 році в звіті ДГІ (Дніпропетровського гірничого інституту) з науково-дослідної роботи, виконаної за госпдоговором з ВІТР (Всесоюзним науково-дослідним інститутом методики і техніки розвідки) [58]. У табл. 5.2 представлена ця класифікація.

5.2 Способи буріння свердловин с імпульсним обертанням інструменту

5.2.1 Класифікація способів буріння с імпульсним обертанням інструменту

Традиційно бурова наука і практика зазначає, що тільки постійна частота обертанням $n_{ном}$ (рис. 5.2), розрахована відповідно до конкретних геолого-технічних умов буріння, створює сприятливі умови для роботи породоруйнівного інструменту.

Проте наукові дослідження показали, що обертання інструменту зі змінною частотою також сприяє кращому руйнуванню гірської породи породоруйнівним інструментом

На рис. 5.3 наведені способи буріння з імпульсним обертанням інструменту які враховуються до симетричних імпульсів.

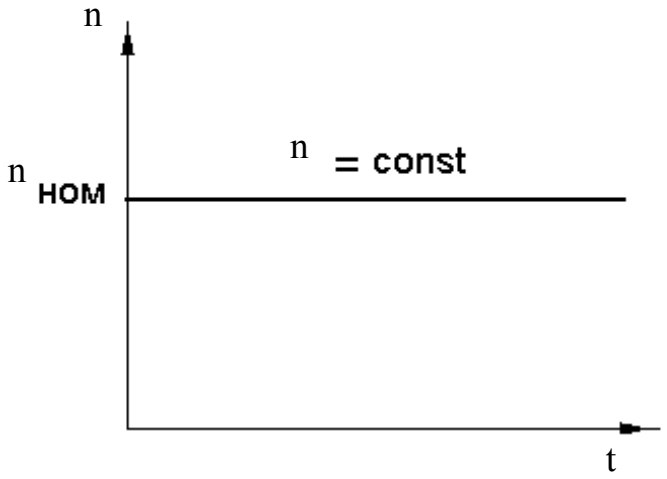


Рисунок 5.2. – Залежність $n=f(t)$ при бурінні свердловини з постійною частотою обертання

За амплітудою зміни частоти обертання інструменту способи буріння з імпульсним обертанням пропонується розділити на буріння зі змінним (рис. 5.3, а),

пульсуючим (рис. 5.3, б), переривчастим (рис. 5.3, в) і реверсивним (рис. 5.3, г) обертанням інструменту.

Імпульсна технологія буріння зі змінним обертанням бурового інструменту (рис. 5.3,а), характеризується такими параметрами:

- максимальна частота обертання $n_{\max}$;
- мінімальна частота обертання $n_{\min}$;
- середньозважена частота обертання $n_{ср-вз}$;
- амплітуда зміни частоти обертання Δn;
- період (час циклу зміни частоти обертання) T
- частота зміни частоти обертання f;

де:

$$\Delta n = n_{\max} - n_{\min}; \quad (5.4),$$

$$f = \frac{1}{T}; \quad (5.5),$$

$$n_{\min} > 0; \quad (5.6),$$

$$n_{ср-вз} = \frac{\int \mathrm{n(t)dt}}{T}; \quad (5.7)$$

Імпульсна технологія буріння з пульсуючим обертанням інструменту (рис. 5.3, б) характеризується такими ж параметрами, що і технологія зі змінним обертанням, однак зміна частоти обертання походить від максимальної частоти обертання $n_{\max}$ до нуля,

тому що ; $n_{\min} = 0;$ (5.8)

тоді, $\Delta n = n_{\max}.$ (5.9)

При цьому режимі обертання інструменту пульсації частоти обертання слідують один за одним без пауз між ними.

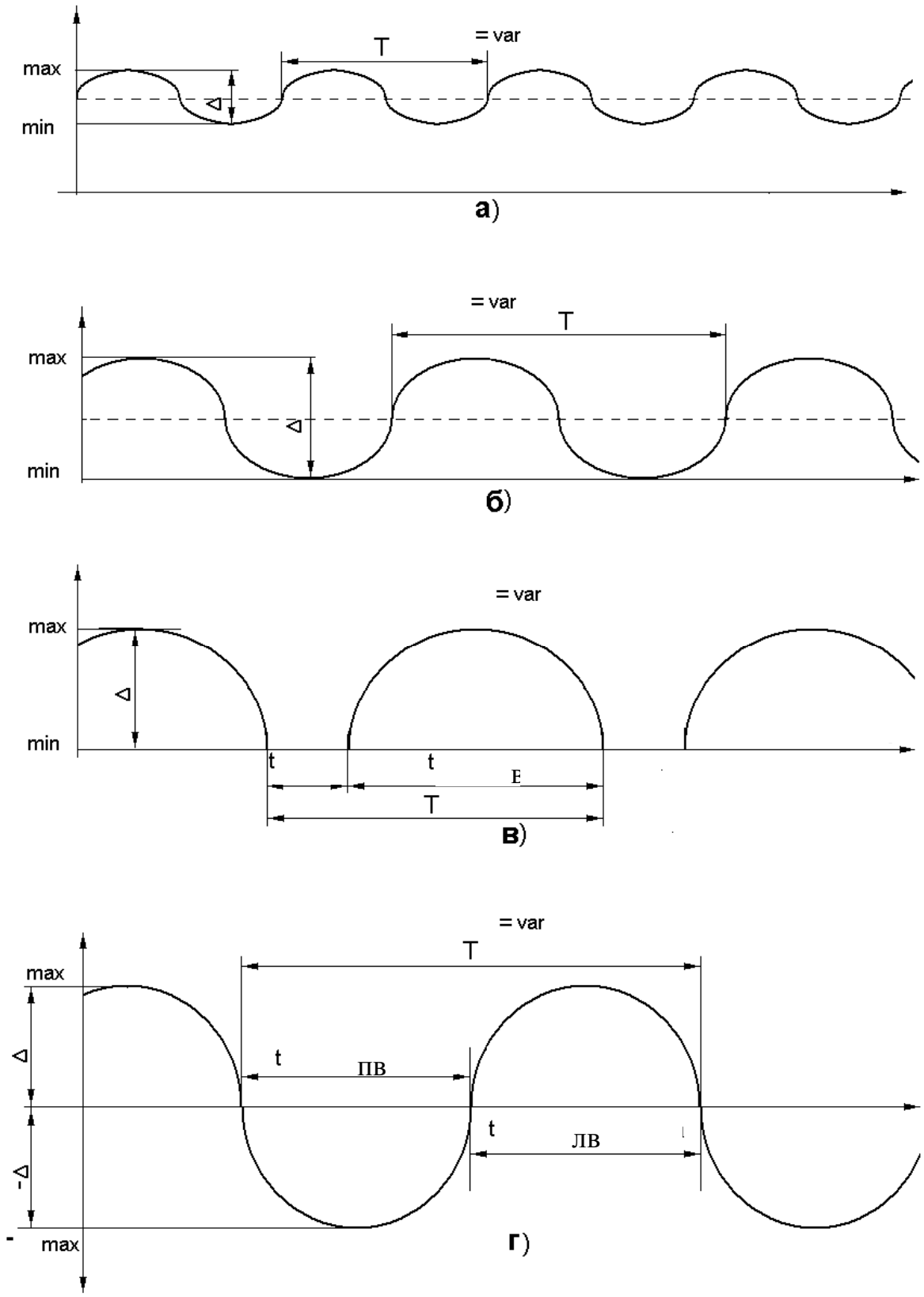


Рисунок 5.3 – Способи буріння з імпульсним обертанням інструменту:

а) змінне обертання; б) пульсуюче обертання;

в) переривчасте обертання; г) реверсивне обертання.

Основною відмінною особливістю імпульсної технології буріння з переривчастим обертанням (рис. 5.3, в) є наявність пауз між імпульсами обертання зі зміною частоти обертання від нуля до $n_{\max}$. У цьому випадку, так само як і при пульсуючому режимі, $\Delta n = n_{\max}$., а період дорівнює сумі часів двох фаз: фази обертання інструменту і фази паузи в обертанні,

$$T = t_в + \mathrm{t_п}, \tag{5.10}$$

де $t_в$ - тривалість фази обертання інструменту; $t_п$ - тривалість фази паузи в обертанні, т. е. перебування інструменту без обертання.

При цьому режимі обертання інструменту $t_п = t_і$. Якщо $t_і$ стане рівним нулю, паузи не буде ($t_п = 0$) і режим обертання перейде з переривчастого в пульсуючий.

Імпульсна технологія буріння з реверсивним обертанням характеризується наявністю в одному періоді двох напрямків обертання: прямого і зворотного, тобто правого обертання і лівого обертання. Буровий інструмент після досягнення частоти його обертання нульового значення здійснює обертання в протилежну сторону. Таким чином, період зміни частоти обертання бурового інструменту при реверсивному його русі дорівнює сумі тривалостей двох фаз

$$T = t_{пв} + t_{лв}, \tag{5.11}$$

де $t_{пв}$ - тривалість фази прямого обертання, наприклад правого обертання; $t_{лв}$ - тривалість фази зворотного обертання, відповідно лівого обертання.

При цьому,

$$\Delta \mathrm{n} = \pm n_{\max}, \tag{5.12}$$

а тривалість фази паузи між реверсуванням обертання дорівнює нулю

$$t_п = 0, \tag{5.13}$$

Таким чином всі п'ять режимів обертання інструменту при бурінні: один режим при $n = const$ (рис. 5.2) і 4 режиму при $n = \mathrm{var}$ (рис. 5.3); знаходяться в тісному зв'язку між собою:

– при $\Delta Q = 0$ імпульсне обертання зі змінною частотою $n = \mathrm{var}$ (рис. 5.3, а) переходить в режим стаціонарного обертання з $n = const$ (рис. 5.2);

– при $\Delta n = n_{\max}$ режим змінного обертання (рис. 5.3, а) переходить в режим пульсуючого обертання (рис. 5.3, б) і, навпаки, пульсуюче обертання стане змінним обертанням,якщо $\Delta n \le n_{\max}$;

– пульсуюче обертання стане переривчастим, якщо в ньому порушується умова $t_n = 0$ і стане більше нуля $t_n > 0$ відповідно, переривистий рух перейде в пульсуючий при досягненні паузи нульового значення ($t_n = 0$);

– реверсивне обертання перетворюється на переривчасте, якщо одна з фаз (лівого або правого обертання) не буде реалізовуватися.

В якості критерію класифікації імпульсного обертання по частоті зміни частоти обертання пропонується використовувати співвідношення часу двох процесів: процесу обертанняня інструменту при постійній частоті обертання, коли $t_n = const$, та процесу обертання інструменту при імпульсній частоті обертання, коли $n = \text{var}$. У першому випадку мається на увазі час одного обороту коронки або долота при номінальній частоті обертання. У другому випадку - час циклу зміни частоти обертання при імпульсному обертанні, тобто період Т.

Час одного оберту залежить від частоти обертання,

$$t_{об} = \frac{1}{n}, \tag{5.14}$$

де n - частота обертання бурового інструменту,$с^{-1}$.

При $n = n_{ном} = n_{\max}$

$$t_{об} = \frac{1}{n_{ном}} = \frac{1}{n_{\max}}. \tag{5.15}$$

Прийнявши рівність цих двох часів, отримаємо режим імпульсного обертання, який можна охарактеризувати, як рівноважний, тобто

$$t_{об} = T \tag{5.16}$$

Тоді

$$T = \frac{1}{n_{ном}} = \frac{1}{n_{\max}}. \quad (5.17)$$

Частота процесу зміни частоти обертання інструменту $f_ч$, в цьому випадку дорівнює n.

Таким чином, імпульсне обертання з рівноважною частотою характеризується умовою

$$f_{рч} = n_{ном}. \quad (5.18)$$

Для інших випадків справедлива умова

$$f_ч = k_f n_{ном}, \quad (5.19)$$

де k_f - коефіцієнт нерівномірності за частотою, що визначає рівень співвимірності частоти імпульсів зміни частоти обертання при імпульсному русі і номінальної частоті обертання, тобто

$$k_f = \frac{f_ч}{n_{ном}}. \quad (5.20)$$

Такий режим імпульсного обертання буде відбуватися з незрівноваженною частою.

У табл. 5.3 наведено назви та характеристики імпульсного обертання з позиції частоти зміни частоти обертання інструменту.

На рис. 5.4 наведені графіки, що характеризують імпульсне обертання за частотою зміни частоти обертання інструменту.

Рисунок 5.4,а ілюструє рівноважне імпульсне обертання. При цьому виконуються умови

$$T = t_{об}, \text{ а } f_{рч} = n_{ном}.$$

На рис. 5.4, б показано співвідношення T і tоб характерне для високочастотного імпульсного обертання. При цьому

$$T = k_t t_{об} \quad (5.21)$$

де k_t - коефіцієнт нерівномірності за часом, величина якого зворотня k_f, тому що

$$k_t = \frac{1}{k_f}. \qquad (5.22)$$

У цьому випадку. $k_t < 1$

Таблиця 5.3 – Параметри імпульсного обертання по частоті зміни частоти обертання

Назва		Характеристика частоти
Імпульсне обертання з рівноважною частотою, $f_{рч}$		$f_{рч} = n_{ном}$, $k_f = 1$ Один імпульс зміни частоти обертання на один оберт бурової коронки (долота)
Імпульсне обертання з нерівномірною частотою	Високочастотна, $f_{вч}$	$f_{вч} > n_{ном}$, $k_f > 1$ Частота імпульсів зміни частоти обертання більше частоти обертання бурової коронки (долота)
	Низькочастотна, $f_{нч}$	$f_{нч} < n_{ном}$, $k_f < 1$ Частота імпульсів зміни частоти обертання менше частоти обертання бурової коронки (долота)

При високочастотному режимі імпульсного обертання

$$f_{вч} = N n_{ном}, \qquad (5.23)$$

де $N = 2,3, ...$

Рисунок 5.4, в показує співвідношення T і $t_{об}$ характерне для низькочастотного імпульсного обертання. У цьому випадку, як і при високочастотному режимі, $T = k_t t_{об}$, але $k_t > 1$

При низькочастотному режимі імпульсного обертання $f_{нч} = \frac{n_{ном}}{N}$. Крім амплітуди, частоти імпульсів зміни частоти обертання при імпульсному русі бурового інструменту важливою характеристикою є форма імпульсу. Форму імпульсу зміни частоти обертання інструменту визначає закономірність її зміни в часі за період. При цьому графік залежності може складатися з окремих ділянок, що представляють собою лінійні і нелінійні функції (рис. 5.5).

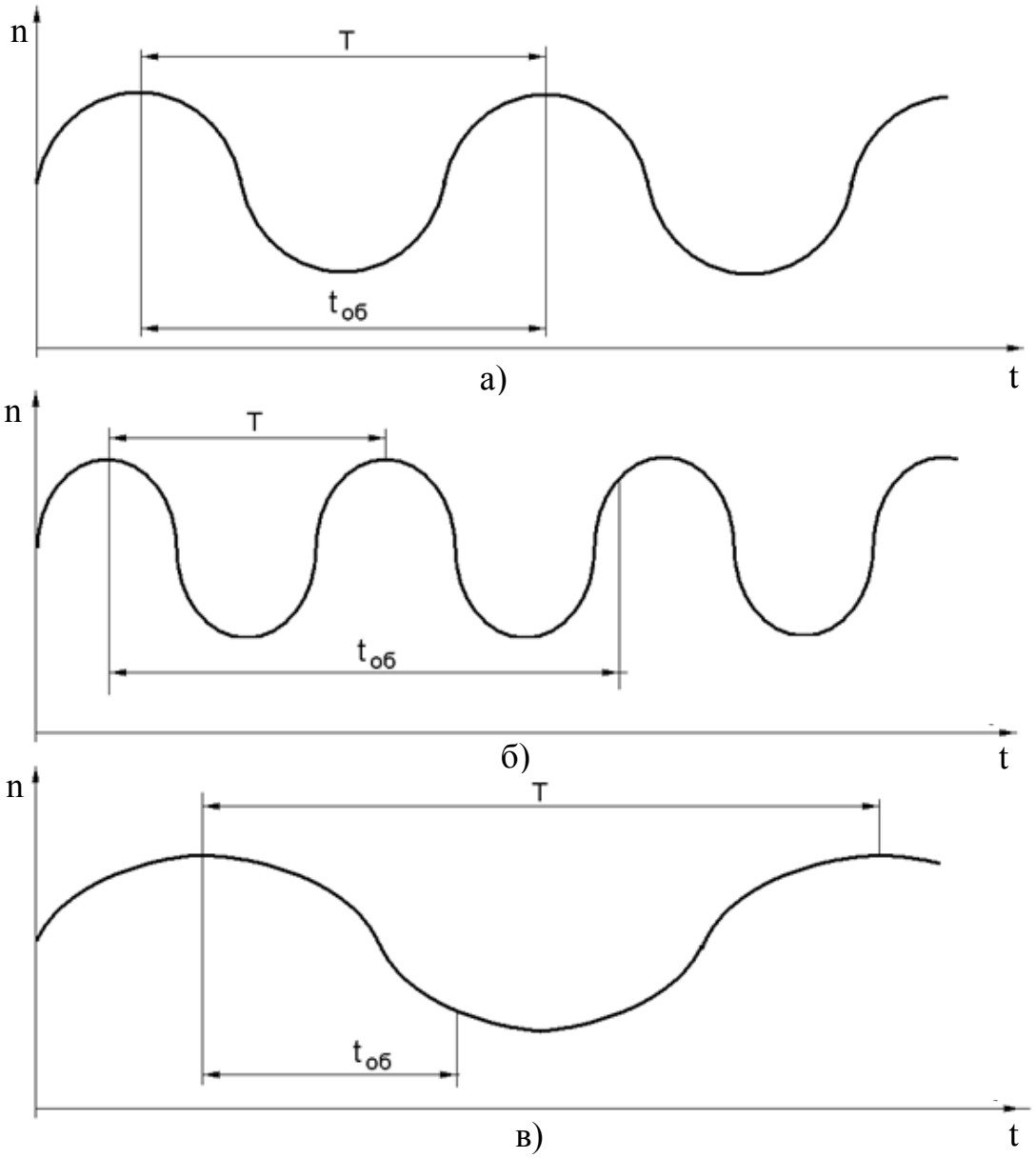


Рисунок 5.4 – Графіки імпульсного обертання за частотою:
а - рівноважне; б - високочастотне; в - низькочастотне

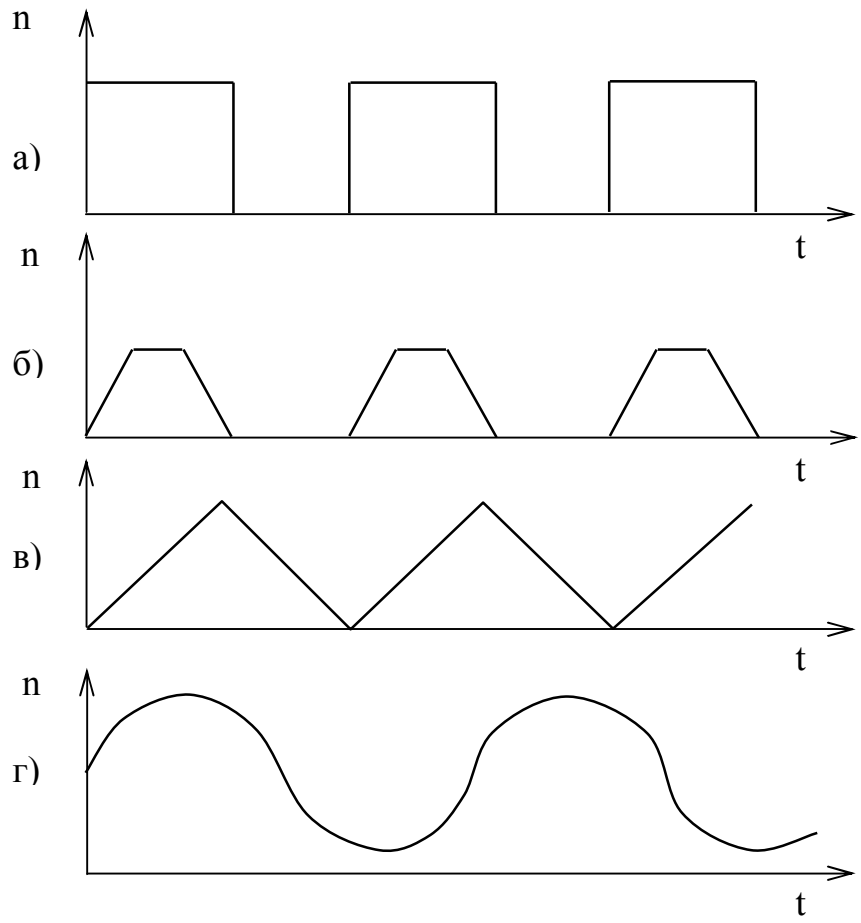


Рисунок 5.5 – Формули імпульсів зміни частоти обертання інструменту при імпульсному русі:
а- прямокутний, б - трапецеїдальний, в - трикутний, г – синусоїдальний

Імпульси зміни частоти обертання інструменту можуть бути симетричними і асиметричними.

5.2.2 Визначення характеру зміни частоти обертання бурового інструмента в часі

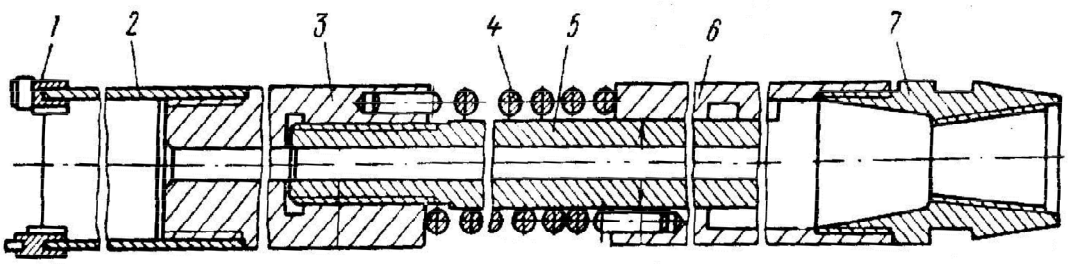
Колонкове буріння

Значний інтерес представляє заглибний вібробур, що встановлюється безпосередньо на породоруйнівний інструмент [59].

У Криворізькому басейні був випробуваний буровий вібраційно-обертальний колонковий снаряд ВКС-1 (рис. 5.6), що використовує власні, мимовільні коливання бурової колони.

Снаряд ВКС-1 підсилює вібрації, збільшуючи швидкість буріння на 25-30%, одночасно знижує навантаження на бурильну колону [62].

Як показали спостереження за роботою снаряда ВКС-1, основними джерелами крутильних коливань є: неоднорідність механічних властивостей породи на забої свердловини, наявність залишкових деформацій породи, неоднозначність коефіцієнта тертя залежно від швидкості руху зв'язаних поверхонь.



1-різці; 2-колонковий снаряд;, 3-обважнювач; 4-робочі пружини;
5- стержні; 6-циліндр; 7- перехідник

Рис. 5.6 – Вібраційно-обертальний колонковий снаряд ВКС-1

При цьому при передачі крутильного моменту через пружний елемент від обертача, який рухається з постійною кутовою швидкістю, до породоруйнівного інструменту останній здійснюватиме пульсуючі рухи. При цьому змінюється характер дії різців на забій. Реактивний момент сил опору забою викликає спочатку крутильну деформацію пружної ланки з накопиченням в ній потенційної енергії. Внаслідок крихкого руйнування забою ріжуча кромка в початковий період ковзатиме по забою з кутовою швидкістю, більшою, ніж кутова швидкість обертача. В міру наростання сил опору швидкість її зменшуватиметься. Як показали досліди, навіть при змочених поверхнях твердого сплаву і породи між силою тертя і відносною швидкістю переміщення існує нелінійна залежність, із збільшенням швидкості сила тертя зменшується. Після переходу положення рівноваги швидкість різця почне зменшуватися, а крутильний момент збільшуватися за рахунок зростання сил опору і сил тертя при зменшенні швидкості. Пружна ланка почне закручуватися, накопичуючи потенційну енергію, після чого процес повториться і снаряд здійснюватиме крутильні коливання.

Експериментальна перевірка вібросилового режиму при бурінні порід міцністю f=10-12 із застосуванням віброколонкового снаряда ВКС-1 на верстаті з гвинтовою подачею ВСЗ, що розвивав осьове зусилля до 30 кН, була встановлена можливість підвищення швидкості буріння мінімум в два рази, а стійкості бурової коронки – в півтора рази в порівнянні з силовим режимом буріння [59].

У Дніпропетровському гірничому інституті (зараз Національний гірничий університет) розроблено пристрій для гасіння вібрацій бурильної колони [60]. Він є забійним гумометалевим амортизатором (ЗГМА) – рис 5.7.

Цей амортизатор призначено для гасіння крутильних, подовжніх і поперечних віброколивань колони.

Демфуючим елементом служать гумові втулки, що привулканіровані до зовнішнього і внутрішнього корпусів амортизатора і передають крутильний момент і осьове навантаження породоруйнівпому інструменту.

Амортизатор складається з набору гумометалевих елементів. Багато елементів підвищує надійність роботи, і що найголовніше, збільшує працездатність конструкції за рахунок зменшення жорсткості системи. Надійність роботи його конструкції, досягається ще і тим, що нижня частина амортизатора забезпечена трільчатими (від осьових навантажень) і радіальними (від тангентальних перевантажень) упорами.

Відмінність пристрою ЗГМА від снарядів ВКС-1 полягає в тому, що пружний елемент виконаний не у вигляді пружини, а у вигляді гумових втулок. Механізм роботи обох пристроїв однаковий.

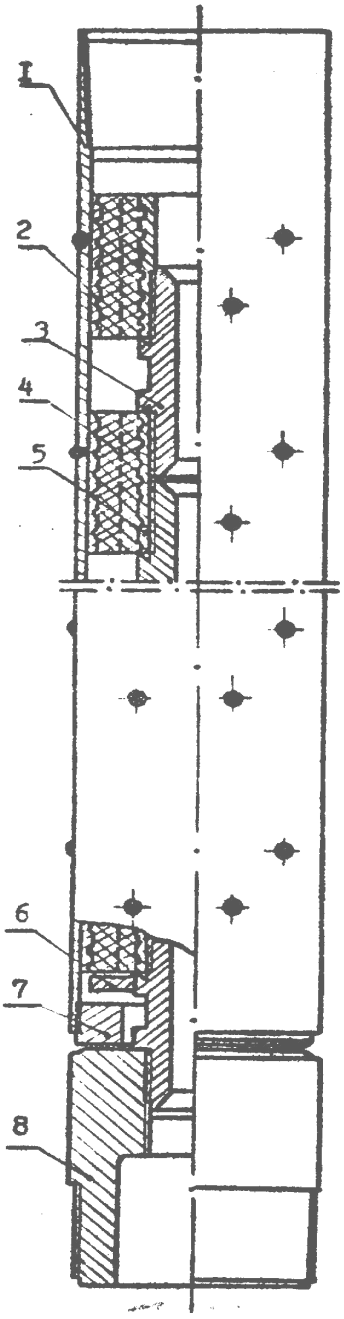


Рисунок 5.7 − Забійний гумометалевий амортизатор (ЗГМА)

1 − корпус; 2 − зовнішня обойма; 3 − ніпель;

4 – пружний елемент; 5 − внутрішня обойма; 6 – запобіжне

кільце; 7 − стопорне кільце; 8 − перехідник

Виробничі випробування дослідної партії забійних гумометалевих амортизаторів проводилися в Донбасі [61].

Буріння планових свердловин проводилося в інтервалі глибин 50-1200 метрів. Як порівняння був прийнятий обертальний спосіб буріння алмазними і

твердосплавними коронками. Вживання забійних амортизаторів різко скоротило кількість аварій, поломок бурового інструменту, дозволило збільшити механічну швидкість буріння:

– твердосплавними коронками на 25%;
– алмазними коронками на 30%.

В процесі випробувань гумометалевих амортизаторів збільшилася проходка за рейс:

– твердосплавними коронками на 15%;
– алмазними коронками на 12%.

Буріння неглибоких свердловин і шпурів

У Кузбасівському політехнічному інституті [62] зроблено обґрунтування нових конструктивних схем бурильних машин для буріння шпурів і неглибоких свердловин.

Спосіб буріння з пульсуючим обертанням інструменту був випробуваний, а потім і упроваджений на Уралі при бурінні свердловин діаметром 0,135 м з денної поверхні на глибину 3,5 м в породах міцнісю f = 8-10.

Буріння здійснювалося установкою УГБ-50М, забезпеченою фрикційною муфтою, що дозволяє періодично переривати обертання.

Режим буріння: осьове навантаження P_0=50 кН, частота обертання n=120 мін-1, час буріння $T_б$=5-10 с з, час паузи T_0=1-2 с. Паралельно бурилися свердловини з постійним обертанням інструменту. Всього було пробурено під час випробування 5600 свердловин.

Аналіз отриманих даних показав, що не дивлячись на те, що буріння велося не в оптимальному режимі (замість 120 робилося 10 зупинок в хвилину без наявності ударних навантажень) проте час буріння однієї свердловини скоротився, і економічний ефект склав 42 тис. крб. в цінах 1991 року. Комісія,що проводила випробування, рекомендувала даний спосіб для буріння порід III-IV категорії міцності

Буріння глибоких свердловин на нафту і газ

У Полтавському відділенні Українського державного геологорозвідувального інституту розроблено спосіб буріння і пристрій для його здійснення [63].

Спосіб буріння свердловин з обертанням породоруйнівного інструменту відрізняється тим, що обертання породоруйнівного інструменту переводять за допомогою перетворювачів обертання в імпульсно-обертальне від стану спокою при поглибленні озброєння інструменту в породу до прискореного обертання при її сколюванні, а час впровадження озброєння регулюється міцністю породи на зрушення.

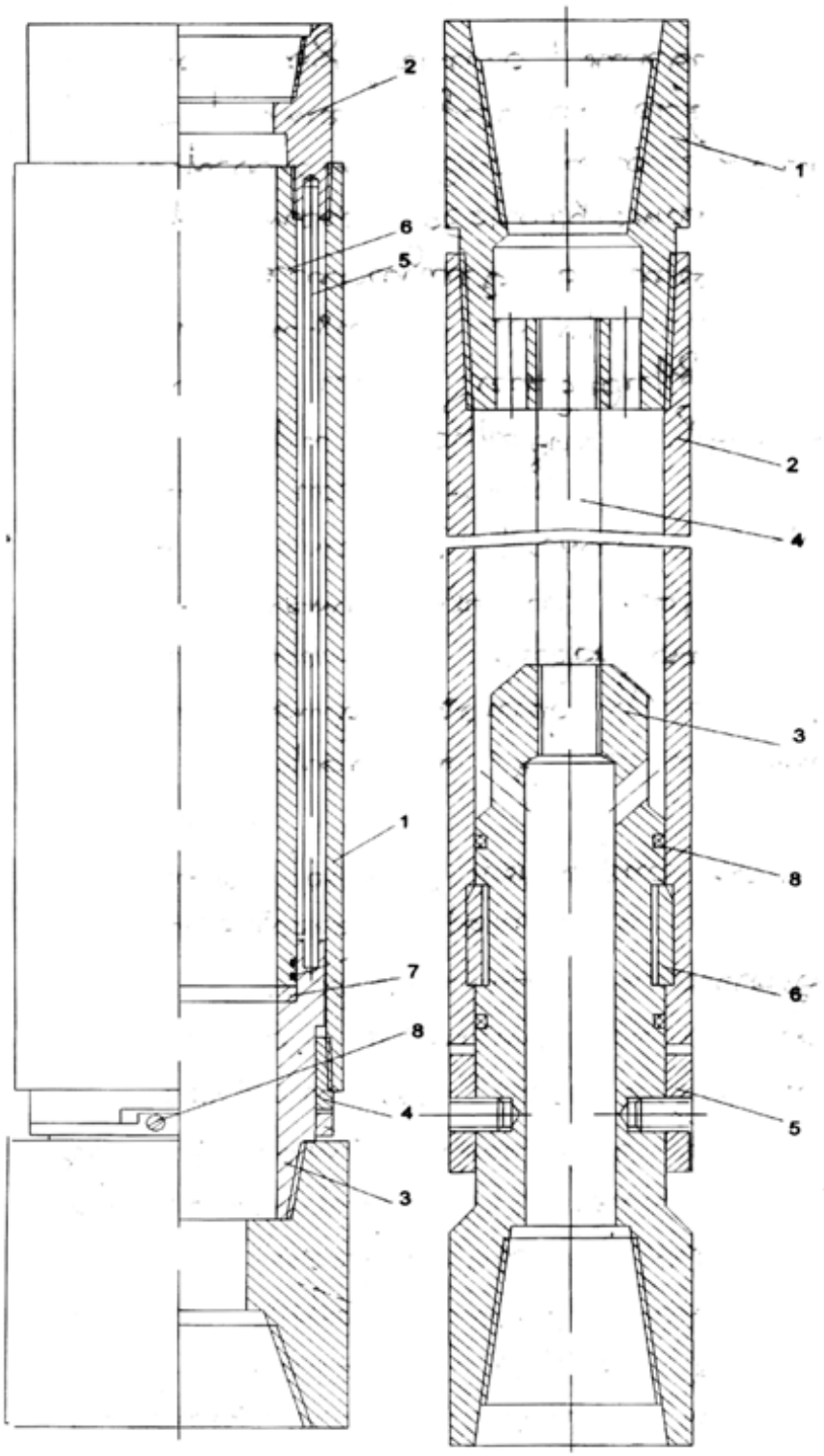
Пристрій для здійснення цього способу буріння свердловин включає порожнистий корпус із сполучним перевідником, центральний патрубок з перевідником і пружний елемент, розміщений в кільцевій порожнині між корпусом і патрубком, і відрізняється тим, що в перевідниках виконано гнізда, в які встановлені пружні елементи у вигляді стержнів, а перевідник центрального корпусу розміщений в корпусі з можливістю проворота і зафіксований від осьових переміщень фасонною гайкою, внизу якої встановлений обмежувач проворота нижнього перевідника відносно корпусу..

Полтавським відділенням УкрДГРІ запропоновано декілька варіантів конструкцій наддолотників (рис 5.8).

Наддолотники, розроблені УкрДГРІ, пройшли стендові і промислові випробування і показали високі результати [64, 65].

Використання наддолотника забезпечує підвищення показників відпрацювання доліт, зокрема:

- збільшення механічної швидкості – на 71,1%;
- збільшення проходки на долото – на 126,4%;
- збільшення стійкості долота – на 10,5%;
- економія доліт – 124,3%.



а) б)

1 − захисний кожух; 2 − вал; 3 − нижній вал; 4 − втулка;

5 − стержні; 6 − центральна опора; 7 − гумове кільце 8 − стопори;

Рисунок 5.8 – Наддолотні перетворювачі енергії обертання бурильної колони в енергію руйнування гірських порід :

а, б – варіанти конструкції наддолотників

Буріння свердловин гідроударниками

На підставі результатів експериментальних і теоретичних досліджень [66] показано, що при ударно-обертальному бурінні під дією подовжнього ударного імпульсу породоруйнівний інструмент загальмовується аж до його повної зупинки, тобто кутова швидкість його стає рівною нулю. Зупинці інструменту відповідає різке підвищення моменту, що крутить, яке називають крутильним ударом. Крутильний удар може бути викликаний збільшенням кута закручування колони бурильних труб за час зупинки інструменту і переходом кінетичної енергії снаряда, що обертається, в потенційну енергію скручування загальмованого снаряда.

Таким чином, при ударно-обертальному бурінні кутова швидкість породоруйнівний інструменту змінюється від номінальної (для заданої частоти обертання) до мінімальної, аж до нуля. Отже, ударно-обертальне буріння може бути віднесене до імпульсної технології, коли $n = var$. Для реалізації ударно-обертального буріння застосовують ударні механізми – гідравлічні, пневматичні і механічні. Крім того гідроударники є механізмами для буріння із змінним осьовим навантаженням – імпульсна монопараметрична технологія, коли

Слід зазначити, що окрім цього гідроударники при своїй роботі створюють імпульси тиску промивальної рідини, тобто вони є пристроями для реалізації біпараметричної імпульсної технології, коли $n = var$, $F = var$.

На підставі викладеного витікає, що гідроударний механізми є пристроями для здійснення трипараметричної імпульсної технології, коли всі три параметри режиму буріння змінні $F = var$, $Q = var$, $n = var$.

Представлений матеріал дозволяє зробити наступні рекомендації:

1. Застосування забійних пристроїв, що забезпечують змінну частоту обертання, при бурінні глибоких свердловин шарошковими долотами створює зростання механічної швидкості буріння на 36,6% − 131%, в середньому на 71,1% і стійкість доліт на 15% − 280,5%, в середньому на 126%.

2. У зв'язку з невеликою глибиною вибухових свердловин, які бурять на кар'єрах верстатами СБШ, є можливість реалізувати імпульсну технологію буріння

зі змінною частотою обертання бурового інструменту за рахунок використання регулюючого електроприводу змінного струму.

3. Задавач імпульсного обертання електромеханічної системи повинен відповідати наступним вимогам:

– амплітуда – від нуля до номінальної частоти обертання;

– частота імпульсів від 1÷2 імпульсу за один оберт інструмента, до 5÷10 імпульсів на хвилину;

– форма імпульсу − трапецеїдальна.

5.2.3 Дослідження аплітудно-частотних характеристик способів буріння з імпульсним обертанням бурового інструменту

Раніше проведені дослідження показали, що імпульсне обертання інструмента сприяє кращому руйнуванню гірської породи породоруйнуючим інструментом – зростає механічна швидкість буравлення й проходка на бурову коронку, бурове долото [57]. Авторами вперше наведені способи буравлення з імпульсним обертанням інструмента стосовно до симетричних імпульсів обертання, для яких характерна сталість за часом параметрів циклів обертання [58]. Згідно із цією класифікацією способи буравлення з імпульсним обертанням інструмента можуть бути реалізовані зі змінн, що пульсує, переривчастим і імпульсним обертанням.

Дотепер немає встановлених парамеров, які однозначно характеризували б конкретні способи буравлення з імпульсним обертанням і встановлювали б зв'язок між ними й умови переходу одного способу в інший. Також не встановлені конкретні характеристики обертання інструмента при різних способах буравлення й ступінь їх впливу на його ефективність. Без цього неможливо системно досліджувати імпульсне обертання інструмента при буравленні шпар і вибирати актуальні напрямки вдосконалювання технології й технічних засобів для його реалізації.

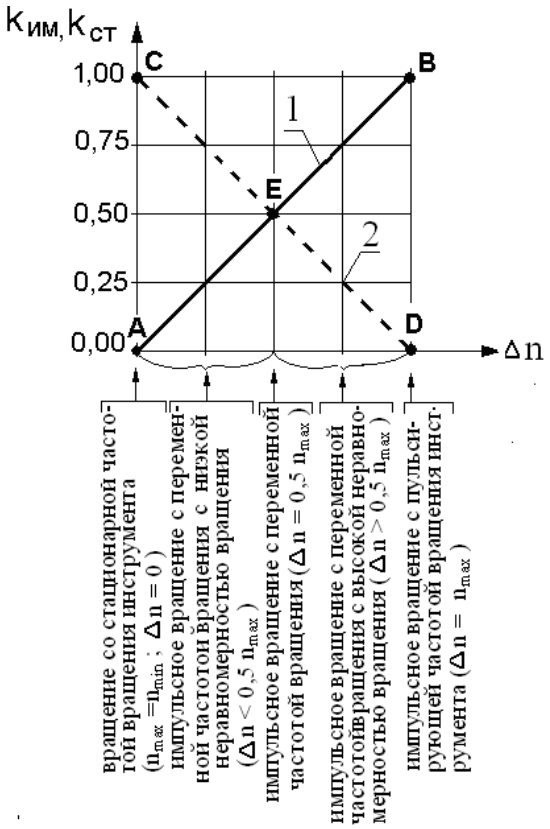


Рисунок 5.9 – Залежності $k_{им}$ и $k_{ст}$ от Δn

Мета запропонувати параметри, що описують характерні риси обертання бурового інструмента при симетричних імпульсах обертання й досліджувати амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) кожного його способу.

Уведемо наступні коефіцієнти, що характеризують імпульсне обертання бурового інструмента.

1. Коефіцієнт імпульсності $k_{им}$ – це відношення амплітуди зміни частоти обертання бурового інструмента Δn до максимальної частоти обертання nmax.

$$k_{им} = \Delta n / n_{max} .$$

2. Коефіцієнт стаціонарності $k_{ст}$. Він показує значення відносини мінірисьної частоти обертання бурового інструмента nmin до максимальної.

$$k_{ст} = n_{\min} / n_{\max} .$$

Коефіцієнт импульсности й коефіцієнт стаціонарності – взаємозалежні між собою параметри, оскільки

$k_{им}$ = Δn/nmax =(nmax - nmin)/ nmax= 1- nmin/ nmax= 1- $k_{ст}$

Звідки $k_{им} + k_{ст} = 1.$

Коефіцієнт стаціонарності також функціонально пов'язаний з амплітудою зміни частоти обертання бурового інструмента Δn, тому що

$$k_{ст} = n_{min} / n_{max} = (n_{max} - \Delta n) / n_{max} = 1 - \Delta n / n_{max} ..$$

На рис. 5.9 наведена залежність зміни $k_{ст}$ і $k_{им}$ від Δn.)

При Δn = 0 маємо $k_{им}$ = 0/nmax = 0. При Δn = nmax значень $k_{им}$ = nmax/nmax =1. Зміна $k_{им}$ від 0 до 1 характеризується графіком 1 $k_{им}$ = f(Δn)на рис. 5.9.

Досліджуємо формулу. При nmin = 0 значення $k_{ст}$ = 0/nmax = 0. При nmin = nmax значень $k_{ст}$ = nmax/nmax=1. Зміна $k_{ст}$ від 1 до 0 ілюструється графіком 2 $k_{ст}$ = f(Δn) на рис. 5.9.

Крапка А на графіку 1 (у ній $k_{им}$ = 0) і крапка З на графіку 2 (у ній $k_{ст}$ = 1) характеризують обертання бурового інструмента зі стаціонарною частотою обертання.

Зі зростанням $k_{им}$ від 0 до 0,5 (ділянка між крапками А и Е на графіку 1) і убуванням $k_{ст}$ від 1 до 0,5 (ділянка між крапками С и Е на графіку 2) обертання інструмента зі стаціонарною частотою обертання переходить в обертання зі змінною частотою з низькою нерівномірністю обертання правого – за годинниковою стрілкою (рис. 5.10, а) або лівого – проти годинникової стрілки (рис. 5.10, б) напрямку руху. При цьому $\Delta n < 1/2\, n_{max}$ або $-\Delta n < -1/2\, n_{max}$ відповідно при правом або левом обертанні.

У крапці Е залежності 1 і 2 перетинаються. Ця крапка характеризує імпульсне обертання зі змінною частотою обертання з однаковим значенням $k_{им}$ і $k_{ст}$, рівним 0,5. При цьому $\Delta n = 1/2\, n_{max}$ для правого обертання (рис. 5.10, в) і $-\Delta n = -1/2\, n_{max}$ для лівого обертання (рис. 5.10, г).

для правого обертання (рис. 5.10, в) і $-\Delta n = -1/2\, n_{max}$ для лівого обертання (рис. 5.10, г).

Зі зростанням $k_{им}$ від 0,5 до 1,0 (ділянка між крапками Е и В на графіку 1) і убуванням $k_{ст}$ від 0,5 до 0 (ділянка між крапками Е и D на графіку 2) (рис. 5.9) обертання переходить в обертання зі змінною частотою з високим ступенем нерівномірності обертання правого (рис. 5.10, д) або лівого (рис. 5.10, е) напрямку руху. Висока нерівномірність обертання буде за умови, коли $\Delta n > 1/2\, n_{max}$ (праве обертання) або за умови, коли $-\Delta n = -1/2\, n_{max}$ (ліве обертання).

На рис. 5.10 крім типів імпульсного обертання зі змінною частотою показані також його фази за цикл обертання, наприклад: $t_{нб}^{пр}$ – фаза найбільшої частоти обертання при правім обертанні; $t_{нм}^{лев}$ – фаза найменшої частоти обертання при лівім обертанні; $t_{ув}^{пр}$ – фаза збільшення частоти обертанні при правім обертанні; $t_{ум}^{лев}$ – фаза зменшення частоти обертанні при лівім обертанні.

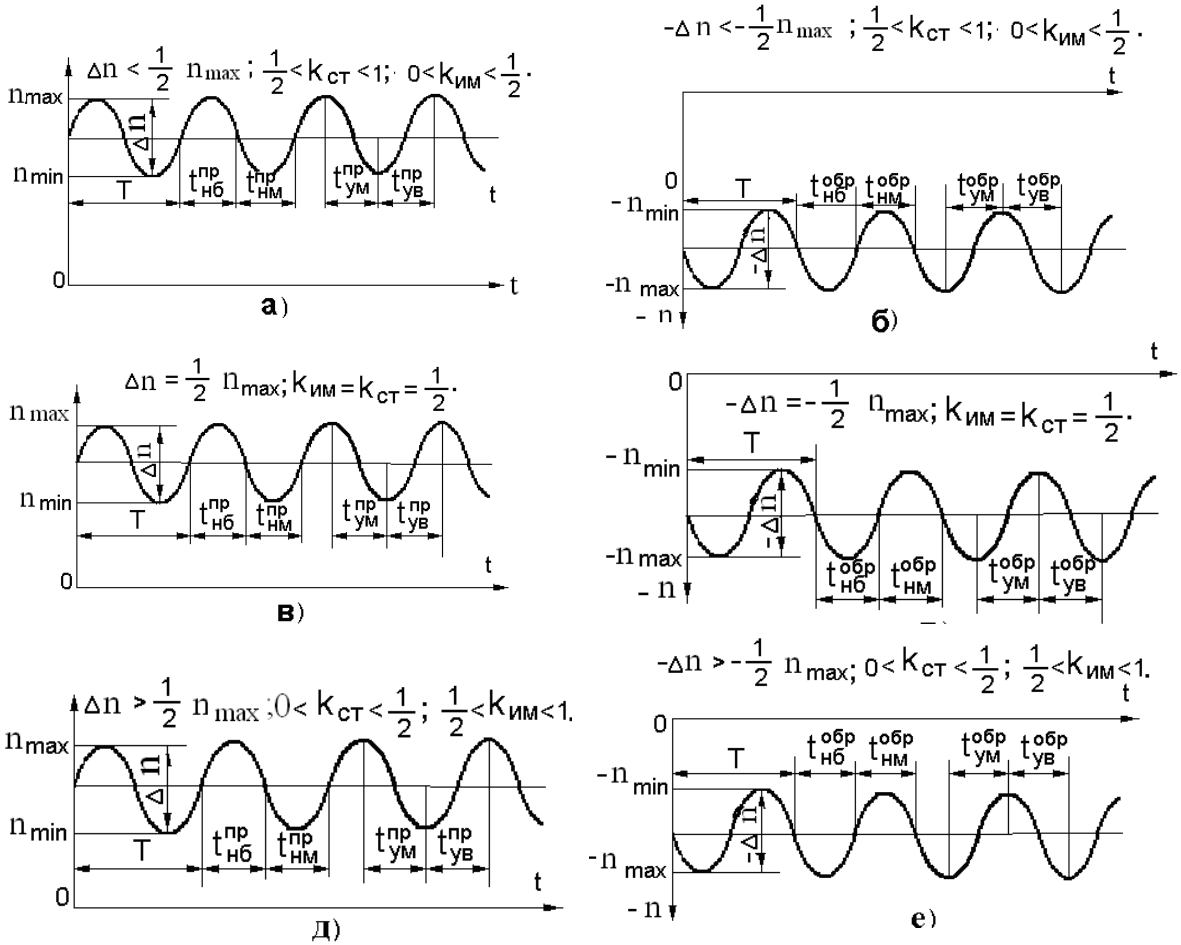


Рисунок 5.10 – Імпульсне обертання бурового інструмента:

а − праве з низькою нерівномірністю обертання;

б − ліве з низькою нерівномірністю обертання ;

в − праве з рівною величиною $k_{им}$ і $k_{ст}$;

г − ліве з рівною величиною $k_{им}$ і $k_{ст}$;

д − праве з високою нерівномірністю обертання;

е − ліве з високою нерівномірністю обертання.

Зі зростанням $k_{им}$ від 0,5 до 1,0 (ділянка між крапками Е и В на графіку 1) і убуванням $k_{ст}$ від 0,5 до 0 (ділянка між крапками Е и D на графіку 2) (рис. 5.9) обертання переходить в обертання зі змінною частотою з високим ступенем нерівномірності обертання правого (рис. 5.10, д) або лівого (рис. 5.10, е) напрямку руху. Висока нерівномірність обертання буде за умови, коли $\Delta n > 1/2\, n_{max}$ (праве обертання) або за умови, коли $-\Delta n = -1/2\, n_{max}$ (ліве обертання).

На рис. 5.10 крім типів імпульсного обертання зі змінною частотою показані також його фази за цикл обертання, наприклад: $t_{нб}^{пр}$ – фаза найбільшої частоти обертання при правім обертанні; $t_{нм}^{лев}$ – фаза найменшої частоти обертання при лівім обертанні; $t_{ув}^{пр}$ – фаза збільшення частоти обертанні при правім обертанні; $t_{ум}^{лев}$ – фаза зменшення частоти обертанні при лівім обертанні.

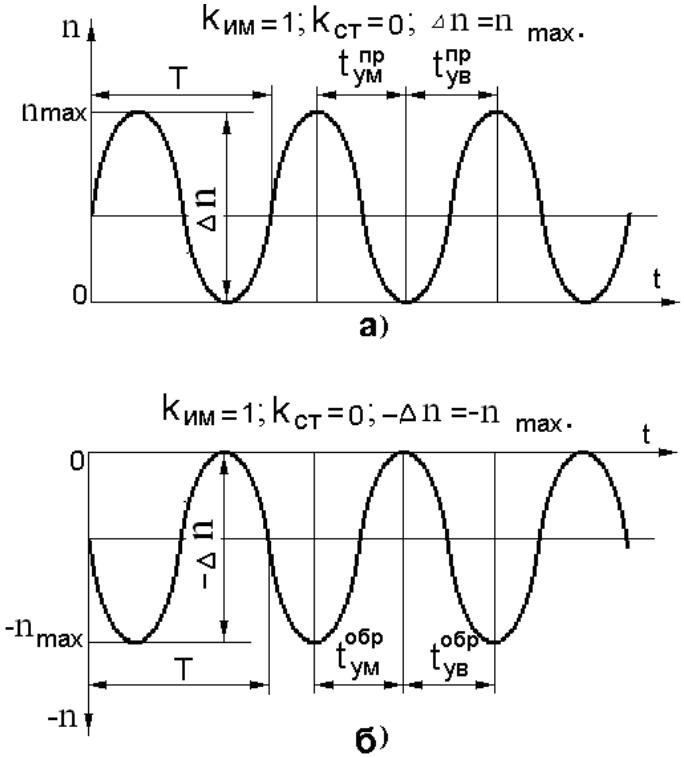


Рисунок 5.11 – Пульсуюче обертання бурового інструмента:

а - праве; б - ліве.

В точке В на графике $k_{им}=f(\Delta n)$ (рис. 5.9) $k_{им}$ = 1, а в точке Д на графике $k_{ст}=f(\Delta n)$ $k_{ст}$ = 0.

У крапці В на графіку $k_{им}=f(\Delta n)$ (рис. 5.9) $k_{им}$ = 1, а в крапці Д на графіку $k_{ст}=f(\Delta n)$ $k_{ст}$ = 0.

Таким чином, крапки В и Д характеризують перехід правого або лівого імпульсного обертання зі змінною частотою відповідно в праве пульсуюче ($\Delta n = n_{max}$ (рис. 5.10, а)) або ліве пульсуюче обертання ($-\Delta n = -n_{max}$ (рис. 5.10, б)).

З появою пауз між імпульсами обертання імпульсне обертання інструмента стає переривчастим. Уведемо коефіцієнт, що характеризує імпульсне переривчасте обертання бурового інструмента.

3. Коефіцієнт переривчастості $k_{пр}$. показує значення відносини тривалості паузи між імпульсами обертання $t_{паузы}$ до тривалості самого імпульсу обертання часу $t_{вр}$.

$$k_{пр} = t_{паузы} / t_{вр} .$$

На рис. 5.12. показана залежність зміни $k_{пр}$ від $t_{паузы}$.

У крапці А на графіку $k_{пр}=f(t_{паузы})$ значення $k_{пр}$ рівне 0, оскільки $t_{паузы} = 0$. Це характеризує перехід переривчастого обертання в пульсуюче праве (рис. 5.11,а) або ліве (рис. 5.11,б) обертання.

Зі зростанням $k_{пр}$ від 0 до 1,0 (ділянка від крапки А до крапки В на графіку $k_{пр} = f(t_{паузы})$) (рис. 5.12) обертання інструмента переходить від пульсуючого в праве малопереривчасте (рис. 5.13, а) або ліве малопереривчасте (рис. 5.13, б). На цій ділянці $t_{паузы}<t_{вр}$.

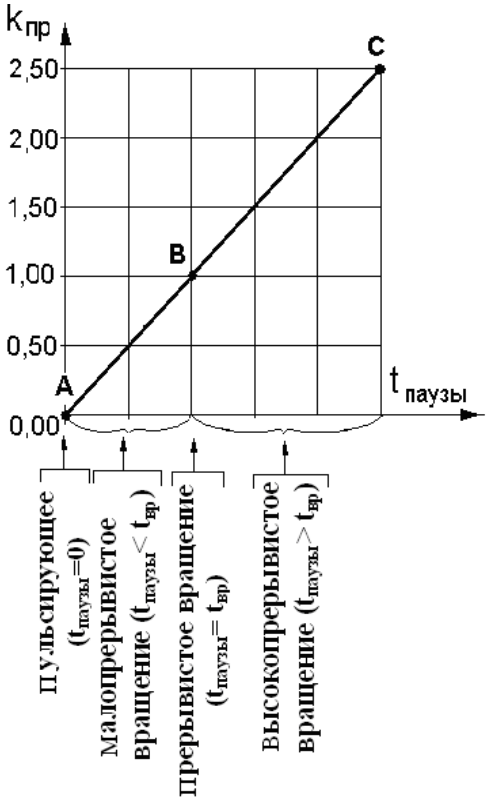


Рисунок 5.12 – Залежність $k_{пр} = f(t_{паузы})$

У крапці В (рис. 5.12) $k_{пр} = 1$, оскільки $t_{паузы}=t_{вр}$.. Ця крапка відповідає переходу рисопрерывистого обертання в переривчасте праве (рис. 5.13,в) або ліве (рис. 5.13,г) з рівним значенням $t_{паузы}$ й $t_{вр}$.

При подальшім зростанні $k_{пр}$ від 1,0 (ділянка від крапки В до крапки З (слід зазначити, що крапка Із зі значенням $k_{пр} = 2.50$, на прямій, що відбиває $k_{пр} = f(t_{паузы})$, не обмежує значення $k_{пр}$ (рис. 5.12)) обертання стає або високопереревчастим

правим (рис. 5.13, д) або високоперерев'частим лівим (рис. 5.13, е).

Наступний з аналізованих способів імпульсного обертання бурового інструмента – реверсивний. Характеристика імпульсного реверсивного обертання показана на рис. 5.13.

При наявності імпульсного способу буравлення з реверсивним обертанням бурового інструмента остання протягом періоду зміни частоти обертання T від nmax до −nmax змінює свій напрямок на протилежне. Відсутність паузи між реверсуванням обертання інструмента характерно для безупинно - реверсивного обертання (рис. 5.13, а).

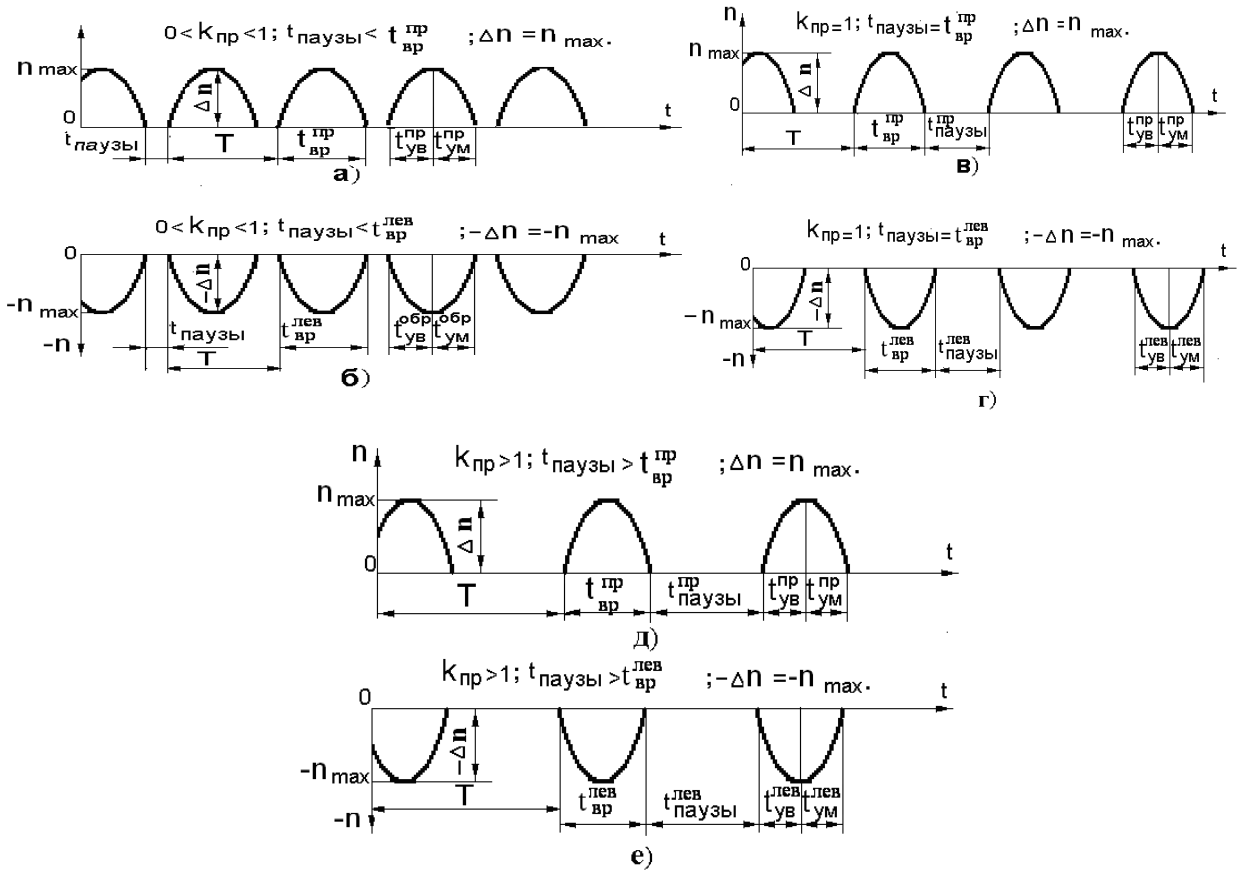


Рисунок 5.13 – Переривчасте обертання бурового інструмента:

а − праве малоперерев'частие;

б − ліве малоперерев'часте;

в − праве переривчасте з рівними $t_{паузы}$ й $t_{вр}$;

г − ліве переривчасте з рівними $t_{паузы}$ й $t_{вр}$;

д – праве високоперерев'частие;

е − ліве переривчасте.

На цій ділянці $t_{паузы} > t_{вр}$.

У тому випадку, коли після циклу обертання (праве-ліве) випливає пауза, те це ознака реверсивно-переривчастого обертання (рис. 5.14, б).

Якщо пауза випливає між імпульсами обертання в правом і левом напрямку, то таке обертання називається переривчасто-реверсивним (рис. 5.14, в).

Уведемо параметри, які характеризують реверсивне обертання бурового інструмента.

4. Коефіцієнт реверсивності за часом

$k^t_{рев.}$ − це відношення тривалості обертання інструмента в правом $t^{пр}_{вр}$ і левом $t^{лев}_{вр}$ напрямках.

$$k^t_{рев} = t^{пр}_{вр} \big/ t^{лев}_{вр} .$$

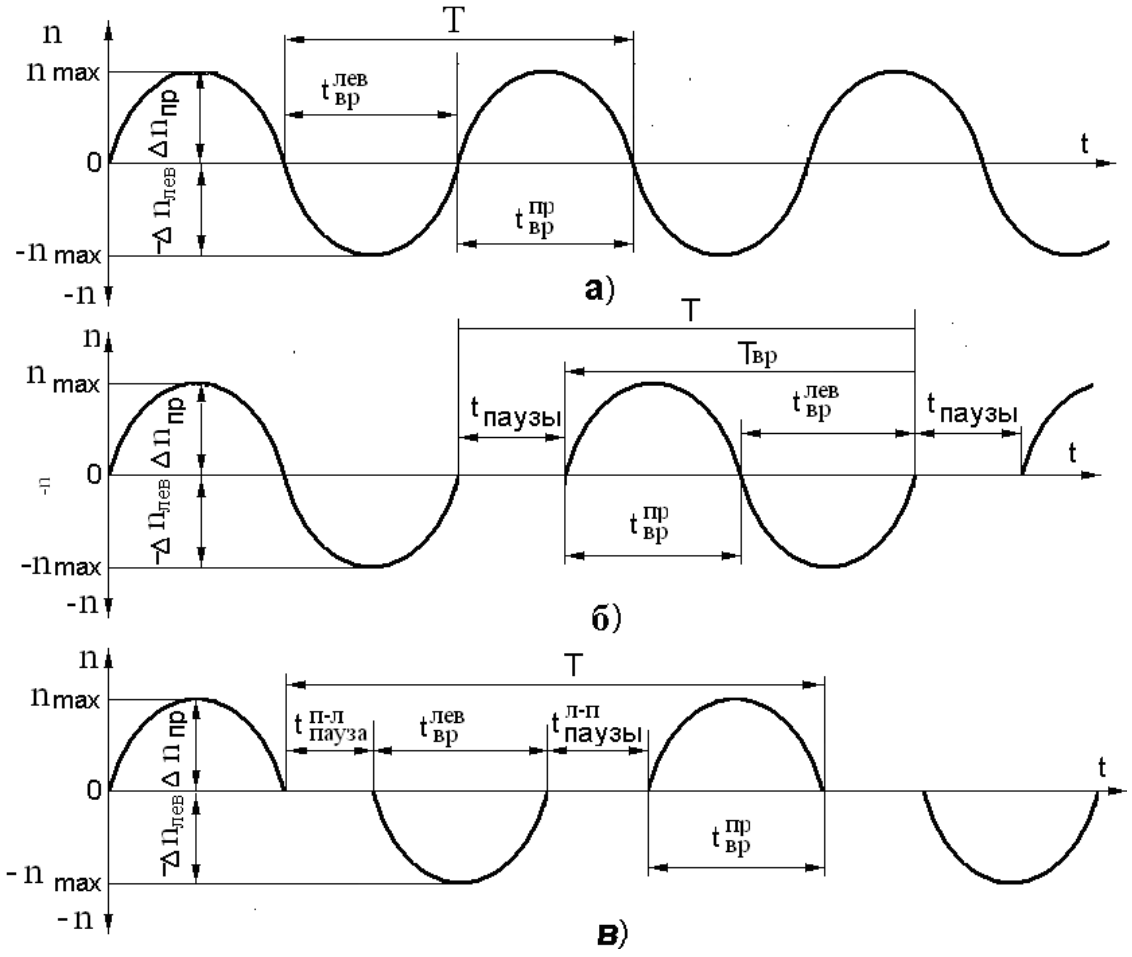


Рисунок 5.14 – Характеристика імпульсних реверсивних обертань бурового інструмента: а − безперервно-реверсивне; б − реверсивно-переривчасте ; в − переривчасто-реверсивне.

На рис. 5.15 показана залежність зміни $k_{рев}^{t}$ від $t_{вр}^{пр}$.

Крапка А на графіку $k_{рев}^{t}$=f($t_{вр}^{пр}$) характеризує переривчасте ліве обертання $k_{рев}^{t}$=0, тому що $t_{вр}^{пр}$ =0.Зі збільшенням $k_{рев}^{t}$ від 0 до 1,0 (ділянка між крапками А и В на прямій, що відбиває $k_{рев}^{t}$=f($t_{вр}^{пр}$)) обертання переходить від переривчастого лівого в реверсивне з домінуванням лівого напрямку обертання. На цій ділянці $t_{вр}^{лев} > t_{вр}^{пр}$.У крапці В на графіку $k_{рев}^{t}$=f($t_{вр}^{пр}$) (рис. 5.15) значення $k^{t}_{рев}$ стає рівним одиниці, оскільки $t_{вр}^{пр} = t_{вр}^{лев}$, що характерно для реверсивного обертання інструмента з рівністю тривалості обертання в правом і левом напрямках.

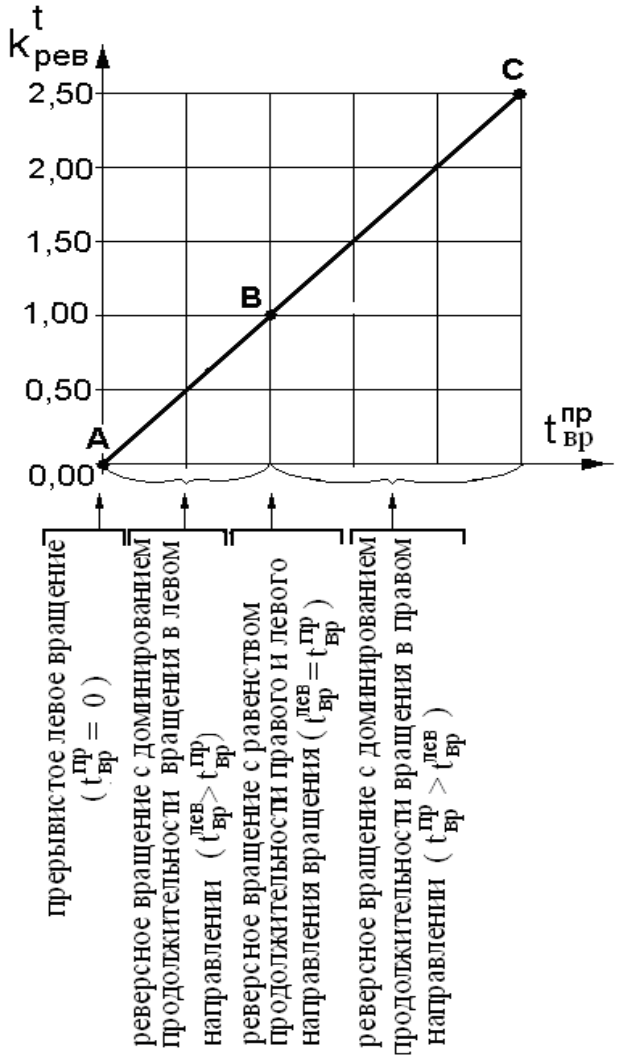


Рисунок 5.15 − Зависимость = f(tпр)

При подальшім зростанні $k_{рев}^{t}$ від 1,0 (ділянка від крапки В до крапки З (крапка З на прямій, що відбиває $k_{рев}^{t}$ f ($t_{вр}^{пр}$), не обмежує значення $k^{t}_{рев}$)) у реверсивнім обертанні домінує правий напрямок обертання інструмента.При дальнейшем возрастании $k_{рев}^{t}$ от 1,0 (участок от точки В до точки С (точка С на прямой, отражающей $k_{рев}^{t}$ f ($t_{вр}^{пр}$), не ограничивает значение $k^{t}_{рев}$)) в реверсивном вращении доминирует правое направление вращения инструмента.

Коефіцієнт реверсивності по частоті обертання $k_{рев}^{n}$. Він показує відносини частоти обертання в правому напрямку $n_{пр}$ і лівому напрямку $n_{лев}$.

$$k_{рев}^{n} = n_{пр} / n_{лев} .$$

На рис. 5.15. показана залежність зміни $k_{рев}^{n}$ від $n_{пр}$.

Крапка А в залежності $k^n_{рев}$=f($n_{пр}$) відповідає переривчастому лівому обертанню. У ній $k^n_{рев}$ = 0 оскільки $n_{пр}$ =0. Зі збільшенням $k^n_{рев}$ від 0 до 1,0 (ділянка від крапки А до крапки В на графіку $k^n_{рев}$ = f($n_{пр}$)) переривчасте ліве обертання переходить у реверсивне з домінуванням частоти обертання інструмента в лівому напрямку. На цій ділянці $n_{лев} > n_{пр}$.У крапці В (рис. 5.15) $k^n_{рев}$ = 1 оскільки $n_{лев}= n_{пр}$ і обертання стає реверсивним з рівністю частоти обертання в правом і левом напрямку.

При подальшім зростанні $k^n_{рев}$ від 1,0 (ділянка від крапки В до крапки З (крапка З на графіку $k^n_{рев}$ = f($n_{пр}$) не обмежує значення $k^n_{рев}$)) у реверсивнім обертанні інструмента домінує частота обертання в правому напрямку ($n_{пр} > n_{лев}$).У такий спосіб реверсивність реверсивного обертання інструмента характеризують два параметри: $k^t_{рев}$ і $k^n_{рев}$. На рис. 5.16 показані типи реверсивного обертання бурового інструмента.

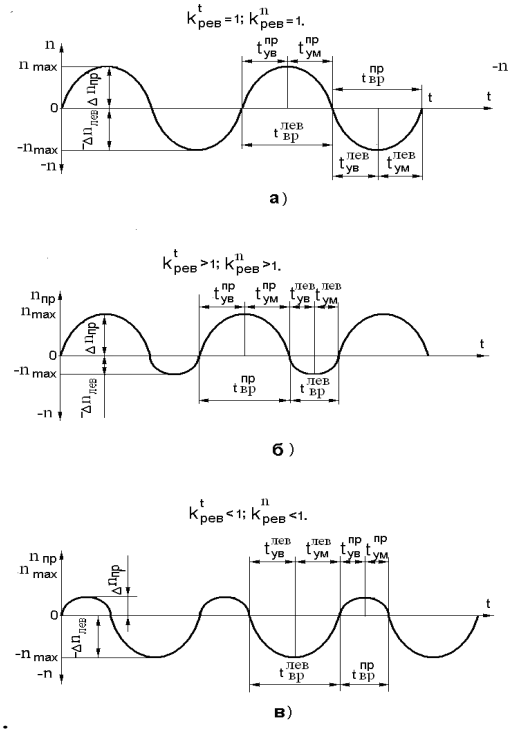


Рисунок 5.16 – Реверсивне обертання бурового інструмента:

а − з рівністю часу й частоти обертання в правом і левом напрямку;

б − з домінуванням часу й частоти обертання в правому напрямку ;

в − з домінуванням часу й частоти обертання в лівому напрямку.

У табл. 5.4 наведені схеми й параметри імпульсного обертання бурового інструмента

Таблиця 5.4 – Способи, схеми й параметри імпульсного обертання бурового інструмента

Спосіб обертання	Схема обертання	Параметры вращения
1	2	3
Змінне з низькою нерівномірністю частоти обертання	праве	$0<k_{им}<1/2$; $1/2<k_{ст}<1$; $\Delta n<0{,}5n_{max}$.
	ліве	$0<k_{им}<1/2$; $1/2<k_{ст}<1$; $-\Delta n<-1/2n_{max}$.
Змінне з рівним значенням $k_{им}$ і $k_{ст}$	праве	$k_{им}=k_{ст}=1/2$; $\Delta n=1/2n_{max}$.
	ліве	$k_{им}=k_{ст}=1/2$; $-\Delta n=-1/2n_{max}$.
Змінне з високою нерівномірністю частоти обертання	праве	$1/2<k_{им}<1$; $0<k_{ст}<1/2$; $\Delta n>0{,}5n_{max}$.
	ліве	$1/2<k_{им}<1$; $0<k_{ст}<1/2$; $-\Delta n>-1/2n_{max}$.
Пульсуюче	праве	$k_{ст}=0$; $k_{им}=1$; $\Delta n=n_{max}$.
	ліве	$k_{ст}=0$; $k_{им}=1$; $-\Delta n=-n_{max}$.
Рисопреры вистое	праве	$0<k_{пр}<1{,}0$; $t_{паузы}<t_{вр}^{пр}$; $\Delta n=n_{max}$.
	ліве	$0<k_{пр}<1{,}0$; $t_{паузы}<t_{вр}^{лев}$; $-\Delta n=-n_{max}$.
Переривчасте з рівним значенням $t_{паузы}$ й $t_{вр}$	праве	$k_{пр}=1{,}0$; $t_{паузы}=t_{вр}^{пр}$; $\Delta n=n_{max}$.
	ліве	$k_{пр}=1{,}0$; $t_{паузы}=t_{вр}^{лев}$; $-\Delta n=-n_{max}$.
Высокопрерывистое	праве	$k_{пр}>1{,}0$; $t_{паузы}>t_{вр}^{пр}$; $\Delta n=n_{max}$.
	ліве	$k_{пр}>1{,}0$; $t_{паузы}>t_{вр}^{лев}$; $-\Delta n=-n_{max}$.
Реверсивное с равенством времени и частоты вращения в правом и левом направлении		$k_{рев}^{t}=k_{рев}^{n}=1{,}0$; $t_{вр}^{пр}=t_{вр}^{лев}$; $n_{пр}=n_{лев}$.

продовження таблицы 5.4

1	2	3
Реверсивное с доминированием времени и частоты вращения в правом направлении		$k_{рев}^{t}>1$; $k_{рев}^{n}>1,0$; $t_{вр}^{пр} > t_{вр}^{лев}$; $n_{пр} > n_{лев}$..
Реверсивное с доминированием времени и частоты вращения в левом направлении		$k_{рев}^{t}<1$; $k_{рев}^{n}<1,0$; $t_{вр}^{пр} < t_{вр}^{лев}$; $n_{пр} < n_{лев}$.

5.3 Розробка задавача імпульсного обертання електромеханічної системи

5.3.1 Обґрунтування алгоритму роботи задавача імпульсного обертання електромеханічної системи

Алгоритм, що задає характер зміни швидкості бурового верстата, є одним з основних і найбільш відповідальних алгоритмів функціонування системи регулювання. Це обумовлює високі вимоги до розроблювального алгоритму.

Вхідним параметром алгоритму є задана швидкість. Її значення використовується як вхідний сигнал для функціонування контуру швидкості, тобто алгоритм задавача частоти обертання задає тахограму (темп розгону й гальмування, тривалість паузи, тривалість імпульсу) роботи бурового верстата. Параметри сигналу завдання швидкості будуть визначатися технологічними вимогами й обмеженнями, що накладаються технічними характеристиками електромеханічної системи бурового верстата. Крім того, виходячи з конструктивних параметрів елементів механічної частини бурового верстата, повинне бути обмежене найбільше значення швидкості, прискорення, ривка. Зокрема передбачається, що буде задаватися: темп наростання й спаду, максимальне значення швидкості, скваженість імпульсу.

Алгоритм задавача частоти обертання бурового ставу повинен формувати уніфіковану програму обертання бурового інструмента в часі з генерацією сигналу необхідної форми з урахуванням накладених обмежень.

Основою для побудови алгоритму функціонування задавача частоти обертання бурового ставу є результати експериментальних досліджень режимів буріння з імпульсною частотою обертання, реалізованих з використанням

наддолотних перетворювачів енергії обертання бурильної колони в енергію руйнування гірських порід [61].

Для забезпечення точності й надійності завдання швидкості обертання бурового ставу доцільне здійснення контролю наростання й спаду швидкості відповідно до необхідних параметрів процесу буріння.

Таким чином, алгоритм задавач частоти обертання бурового поставу повинен забезпечувати:

– необхідні технологічні параметри режиму буріння;

– перетворення стрибка сигналу завдання на вході в послідовність імпульсів із заздалегідь заданими параметрами;

– обмеження величини максимального прискорення при зміні швидкості;

– обмеження величини максимального ривка при переході від одного прискорення до іншого.

Величина максимальної швидкості підйому обмежується номінальною частотою обертання вала двигуна від мінімального до максимального значення частота обертання поставу може бути будь-якою залежно від необхідної швидкості проходки. При цьому повинні забезпечуватися наступні параметри регулювання:

– завдання швидкості;

– завдання прискорення.

Для роботи алгоритму задатчика частоти обертання бурового ставу необхідно задавати сигнал максимальної й мінімальної величини швидкості, тривалість паузи, час наростання й час спаду сигналу.

5.3.2 Розробка алгоритму роботи задавача імпульсного обертання електромеханічної системи

Для одержання бажаної частоти обертання бурового поставу застосовується задавач, що реалізує вищенаведені вимоги. Сигнал завдання повинен відтворюватися системою керування приводного двигуна постійного струму привода обертання. Алгоритм задавача призначений для формування сигналу що дозволяє реалізувати заданий технологічний цикл.

На першому етапі залежно від властивостей породи, яку бурять, встановлюються значення максимальної й мінімальної швидкості обертання бурового інструмента. Далі виконується порівняння заданої й дійсної швидкості обертання бурового інструмента. Якщо ці швидкості не збігаються, то виробляється сигнал на збільшення або зменшення швидкості обертання інструмента відповідно до наперед заданого темпу зміни швидкості. При досягненні дійсною швидкістю заданого рівня виконується підтримка заданої швидкості обертання бурового інструмента до наступного циклу роботи. Зменшення й збільшення швидкості повинне виконуватися з різними прискореннями.

З появою стартового імпульсу схема повинна вибрати один із двох блоків завдання швидкості. Вибір виконується шляхом почергового підключення цих блоків. Один блок повинен задавати максимальну швидкість обертання бурового інструмента, а другий блок мінімальну. Схема повинна робити порівняння заданої й дійсної швидкості обертання бурового інструмента. Якщо ці швидкості не збігаються, то виробляється сигнал на збільшення або зменшення швидкості обертання інструмента відповідно до наперед заданого темпу зміни швидкості. При досягненні дійсною швидкістю заданого рівня схема повинна підтримувати задану швидкість обертання бурового інструмента до моменту часу поки не з'явиться стартовий імпульс на зміну швидкості. Зменшення й збільшення швидкості повинне виконуватися з різними прискореннями. Спочатку визначаються пристрої, що включаються для завдання максимальної (мінімальної) швидкості після, чого необхідно порівняти сигнали з виходу завдання швидкості й сигнал на виході блоку інтегрування. При рівності цих сигналів вихідний сигнал блоку інтегрування підтримується на постійному рівні. Якщо сигнали не рівні на вході блоку порівняння, то при їхній позитивній неузгодженості вихідний сигнал блоку порівняння підсилюється й обмежується блоком обмеження через дискрементатор який підключається на блок інтегратора. Інтегратор починає збільшувати завданим темпом свій вихідний сигнал. При негативній неузгодженості на виході блоку порівняння він підсилюється й обмежується блоком обмеження й розпізнаються дискрементатором як сигнал завдання і подається на вхід інтегратора. Інтегратор

починає зменшувати свій вихідний сигнал відповідно до заданого темпу доти поки сигнал на виході інтегратора не зрівняється із сигналом блоку завдання швидкості або не надійде стробуючий сигнал на підключення іншого блоку завдання швидкості.

У такий спосіб інтегро-задаючий пристрій обмежує мінімальну й максимальну швидкість породоруйнівного інструмента а також різні темпи наростання й убування його швидкості обертання

5.3.3 Розробка блок-схеми алгоритму функціонування задавача імпульсного обертання електромеханічної системи

На підставі алгоритму роботи задавача частоти обертання складемо блок схему. Математична модель задавача частоти обертання описується диференціальними рівняннями другого порядку зі змінними коефіцієнтами (завдяки зміні прискорення на різних циклах розгону й гальмування, а також обмеженню сигналу X_1).

У блок-схемі (рис. 5.17) прийняті наступні позначення:

K − коефіцієнт пропорційності;

T − стала часу обмеження прискорення вихідного сигналу задатчика частоти обертання;

$U_{зс1}$, $U_{зс2}$ – сигнал завдання максимальної (мінімальної) швидкості;

$U_{зг}$ – сигнал генератора, що задає;

X_1 – вхідний сигнал інтегратора;

Y_1 – вихідний сигнал інтегратора ;

ΔX – обмеження сигналу.

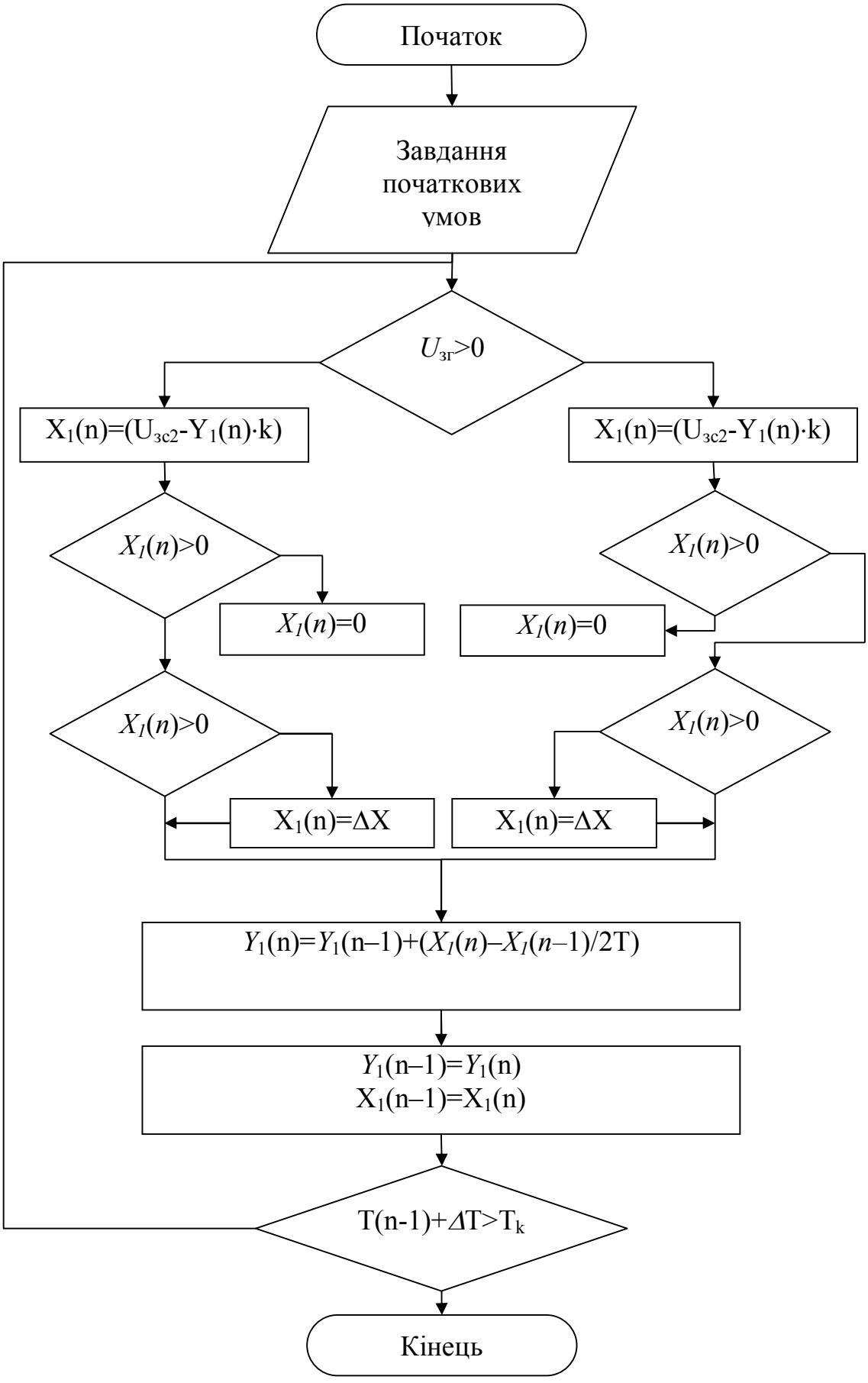


Рисунок 5.17 – Блок-схема алгоритму

На початку процесу відбувається присвоєння початкових значень параметрів. Значення вихідного сигналу стартового генератора порівнюється з нульовим значенням. Якщо рівність вірна, то від значення завдання сигналу $U_{зс1}$ віднімається значення $Y_1(n)$, у противному випадку вирахування виконується від $U_{зс2}$. Після цього отримане значення $X_1(n)$ порівнюється з нулем і в першому випадку, якщо воно менше нуля ,то $X_1(n)$ присвоюється нульове значення, у другому випадку присвоюється нуль якщо $X_1(n)$ більше нуля. Далі перевіряється – перевищує чи ні координата величину ΔX , якщо перевищує в першому випадку, або не перевищує в другому випадку, то вона обмежується на рівні ΔX. Після визначення координати $X_1(n)$ інтегруємо її й одержуємо значення величини $Y_1(n)$. Для подальшого процесу інтегрування у відповідному блоці виконується переприсвоювання початкових умов. В останньому блоці відбувається перевірка на завершення алгоритму функціонування задатчика частоти обертання.

Виходячи з технологічних вимог до тахограми швидкості обертання бурового інструмента, що забезпечує ефективне руйнування породи в процесі буріння, було розроблено алгоритм роботи задавача частоти обертання для привода обертання, блок-схема якого зображена на рис. 5.17. Встановлено залежності між регульованими величинами, завдяки впливу на які інтегро-задаючий пристрій обмежує мінімальну й максимальну швидкість породоруйнуючого інструмента а також дозволяє отримати різні темпи наростання й убування його швидкості обертання.

5.3.4 Розробка структурної, функціональної й принципової схеми задавача імпульсного обертання електромеханічної системи

Розробка структурної схеми

Ґрунтуючись на алгоритмі роботи й блок-схемі створюємо структурну схему. По сигналу пуску стартового генератора G на вхід суматора подається сигнал із блоку завдання швидкості ЗС1. Цей сигнал підсилюється й обмежується блоком обмеження БО1 і позитивна величина подається на вхід інтегратора, що розвертає стрибок завдання в часі. При досягненні рівня вихідного сигналу інтегратора величини сигналу завдання із блоку завдання ЗС1 вихідна напруга інтегратора

залишається незмінною у часі. По приходу наступного сигналу стартового генератора до першого входу суматора підключається блок завдання швидкості ЗС2, причому сигнал завдання швидкості із блоку ЗС2 повинен бути менше ЗС1.

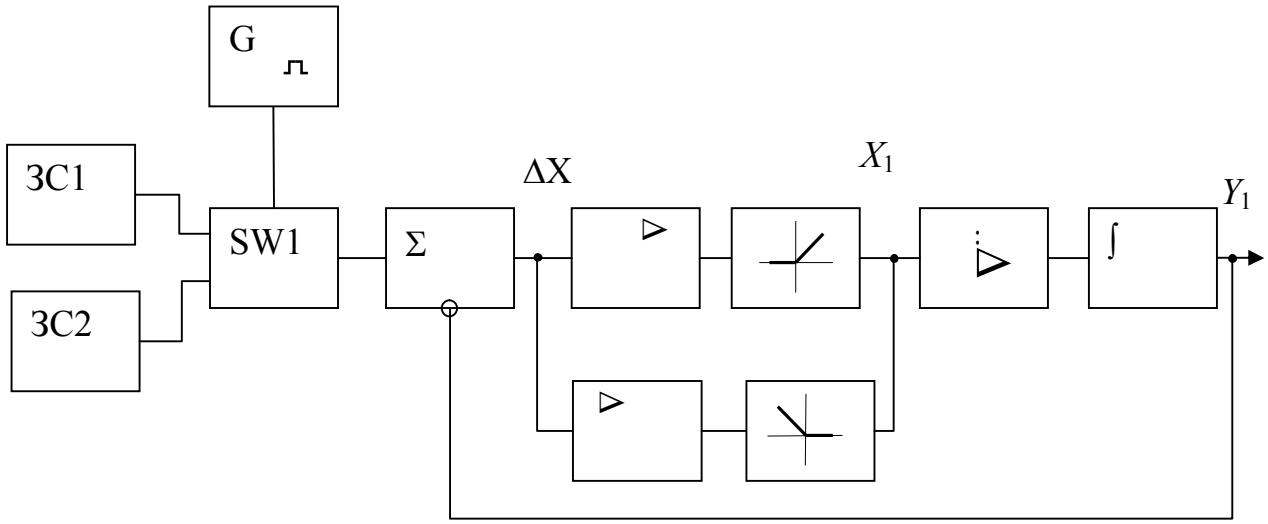


Рисунок 5.18 – Структурна схема задавача

У цьому випадку сигнал на виході суматора стає негативним Цей сигнал підсилюється й обмежується блоком обмеження БО2 і негативна величина подається на вхід інтегратора, що зменшує свій вихідний сигнал. При досягненні вихідним сигналом інтегратора рівня завдання блоку ЗС2 напруги на виході інтегратора стабілізується. Роблена структурна схема задавача наведена на рис. 5.18.

Розробка функціональної схеми задавача частоти обертання

На підставі структурної схеми задавача частоти обертання породорунівого інструмента була розроблена функціональна схема з використанням пакета MATLAB. У даній схемі як генератор завдання використаний генератор прямокутних імпульсів, вихід якого з'єднаний з керуючими входами комутаторів (Switch і Switch1, відповідно), призначених для підключення ланцюжка, що формує сигнал завдання максимальної швидкості − уставки максимальної швидкості (Constant), комутатора (Switch), суматора, блоку підсилення (Gain), блоку обмеження (Saturation), блоку підсилення (Gain1),комутатора (Switch1) і

інтегратора; або сигнал завдання мінімальної швидкості, що складається з: уставки мінімальної швидкості (Constant1), комутатора (Switch), суматора, блоку підсилення (Gain), блоку обмеження (Saturation), блоку підсилення (Gain2),комутатора (Switch1) та інтегратора. Дана схема реалізує наростання або зменшення сигналу на виході задавача частоти обертання до тих пір, поки сигнал зворотного зв'язку не стане дорівнювати сигналу завдання. Причому можуть бути реалізовані різні закони зміни сигналу - пилкоподібний, трапецієподібний, прямокутний. Також є можливість змінювати шпаруватість імпульсів і час роботи з постійною швидкістю. Це, в свою чергу, обумовлює можливість реалізації різних тахограм роботи приводного двигуна з урахуванням технологічних вимог та технічних можливостей електромеханічної системи та бурового поставу. Модель задавача частоти обертання породоруйнуючого інструмента представлена на рис. 5.19 Результати моделювання різних сигналів показані на рис. 5.20 і 5.21

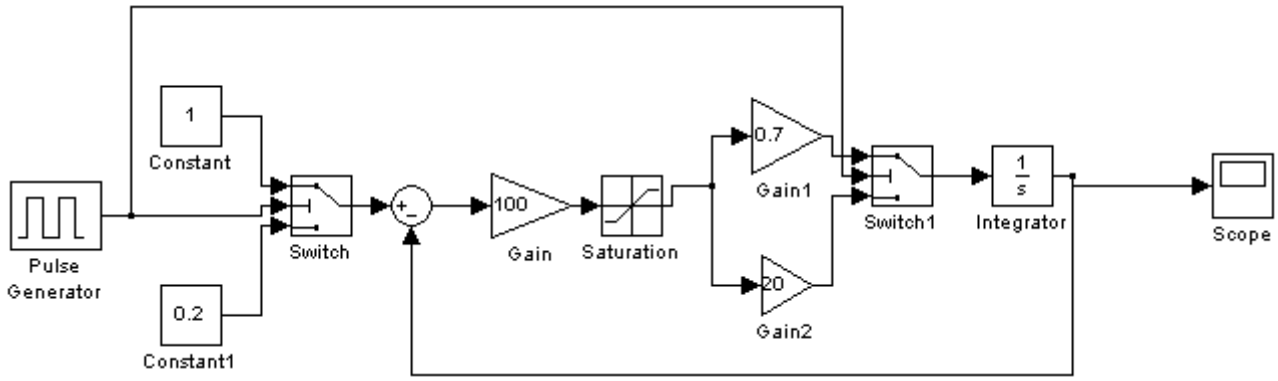


Рисунок 5.19 – Функціональна схема задавача

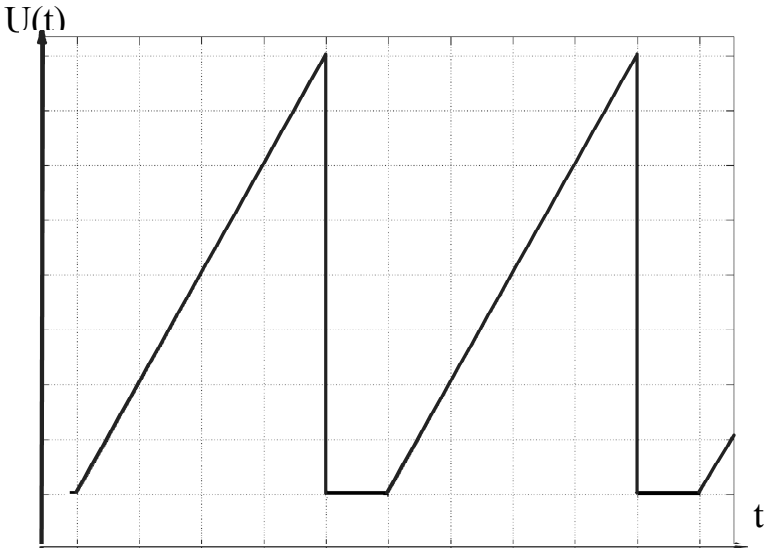


Рисунок 5.20 – Часові діаграми роботи функціональної схеми

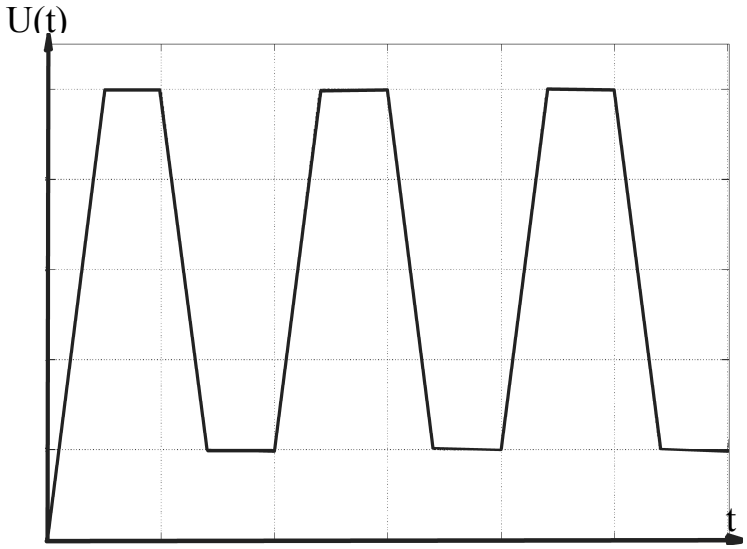


Рисунок 5.21 – Часові діаграми роботи функціональної схеми

5.3.5 Моделювання процесів в замкненому електроприводі постійного струму з задавачем імпульсного обертання електромеханічної системи

Оцінка можливості застосування імпульсної технології буріння на бурових верстатах з електроприводами постійного струму проводиться на імітаційній моделі з використанням засобів ЕОТ. Система керування двигуном – двозонна. Регулювання швидкості нижче від номінальної здійснюється регулюванням напруги якоря (I зона), а вище від номінальної – зниженням величини магнітного потоку (II зона). Перехід від режиму регулювання напруги до регулювання струму збудження забезпечується за рахунок того, що на швидкостях вище номінальної за допомогою регулятора збудження підтримується постійність ЕРС на рівні номінальної. Таким чином, подібна система повинна мати два тиристорних перетворювача: один призначений для живлення якірного кола, другий − для обмотки збудження.

Двозонну систему керування швидкістю ДПТ умовно можна розділити на дві підсистеми:

– підсистема регулювання швидкості з підлеглим контуром регулювання струму якоря;

– підсистема регулювання ЕРС двигуна з регулятором ЕРС і підлеглим контуром регулювання магнітного потоку.

Система містить відповідні датчики струму якоря, струму збудження і ЕРС або швидкості двигуна. Доки двигун працює на швидкості нижче основної, ЕРС двигуна менша номінальної і вихідна напруга регулятора ЕРС має обмеження, яке забезпечує номінальний магнітний потік двигуна. При досягненні двигуном швидкості, коли його ЕРС номінальна, напруга зворотного зв'язку і завдання на вході регулятора ЕРС порівняються, регулятор підготовлений до виходу з обмеження і контур регулювання при подальшому зростанні швидкості підтримуватиме ЕРС на заданому (номінальному) рівні.

Синтез регулятора струму якоря

Для моделювання системи застосовується апарат передаточних функцій. У такому випадку замкнений контур регулювання струму якоря має вигляд рис. 5.22.

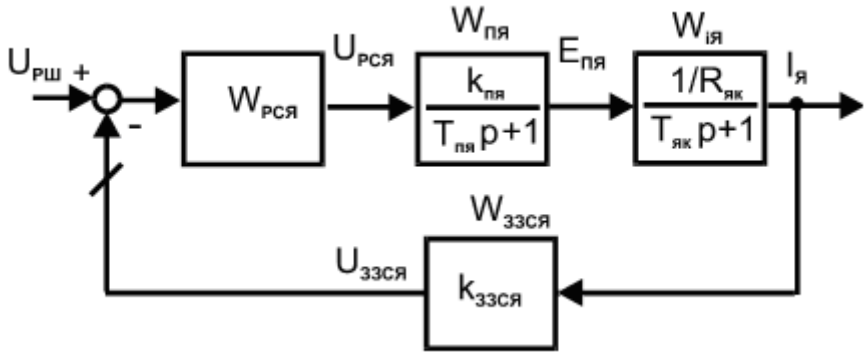


Рисунок 5.22 – Замкнений контур регулювання струму якоря

До нього входять:

– обмотка якоря з передаточною функцією $W_{ія}$;

– тиристорний перетворювач напруги з передаточною функцією $W_{пя}$;

– датчик струму якоря – $W_{ззся}$;

– регулятор струму якоря – $W_{рся}$.

Позначення, що використовуються на рис.3.5 мають наступні значення:

– $R_{як}$ – опір якірного кола, приведений до робочої температури двигуна;

– $T_{як}$ – постійна часу якоря. Визначається як $L_{як}/R_{як}$;

– $k_{пя}$ - коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача якірного кола;

– $T_{пя}$ – постійна часу перетворювача. Для тиристорного перетворювача $T_{пя}$ = 0,005 с;

– $k_{ззся}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом. Визначається виходячи із величини максимального струмообмеження двигуна при запуску «під відсічку» (λ=2,5).

$$k_{ззся} = \frac{U_{кер}}{2{,}5 \cdot I_{як}},$$

де $U_{кер}$ – максимальна напруга керування;

$I_{як}$ – номінальний струм якоря.

У даному випадку в контурі присутня одна велика постійна часу, яку слід компенсувати – $T_{як}$. Бажана передаточна функція розімкнутого контуру при налагоджені його на модульний оптимум має вигляд:

$$W^{б}_{розся}(p) = \frac{1}{2T_{\mu ся}p(T_{\mu ся}p+1)}$$

де $T_{\mu ся}$ – некомпенсована постійна часу ($T_{\mu ся} = T_{пя}$ =0,005).

Тоді передаточна функція регулятора струму якоря визначиться як:

$$W_{рся}(p) = \frac{W^{б}_{розся}}{W_{пя} \cdot W_{із} \cdot W_{ззся}} = \frac{R_{як}(T_{як}p+1)}{2T_{\mu\,ся}k_{пя}k_{ззся}p},$$

Регулятор струму отриманий у вигляді ПІ-структури забезпечує наступні показники перехідного процесу:

– час першого узгодження – $4{,}7T_{\mu}$;

– перерегулювання – 4,3 %;

– час входження в зону похибки ±2 % – $8{,}4T_{\mu}$.

Синтез регулятора швидкості

При підвищених вимогах до регулювання вихідної координати застосовують оптимізацію за симетричним критерієм. В такому випадку бажана передаточна функція розімкненої системи має вигляд:

$$W_{роз}^{б}(p)=\frac{1}{2pT_{\mu}(pT_{\mu}+1)}\cdot\frac{4pT_{\mu}+1}{4pT_{\mu}}$$

Для синтезу регулятора швидкості слід прийняти наступні спрощення:

– замкнений контур струму представлений у вигляді:

$$W_{замся}(p)=\frac{1/k_{ззся}}{2T_{\mu ся}p(T_{\mu ся}p+1)+1}\cong\frac{1/k_{ззся}}{2T_{\mu ся}p+1},$$

– некомпенсована постійна часу для контуру швидкості $T_{\mu ш}$ приймається рівною 2 $T_{\mu ся}$.

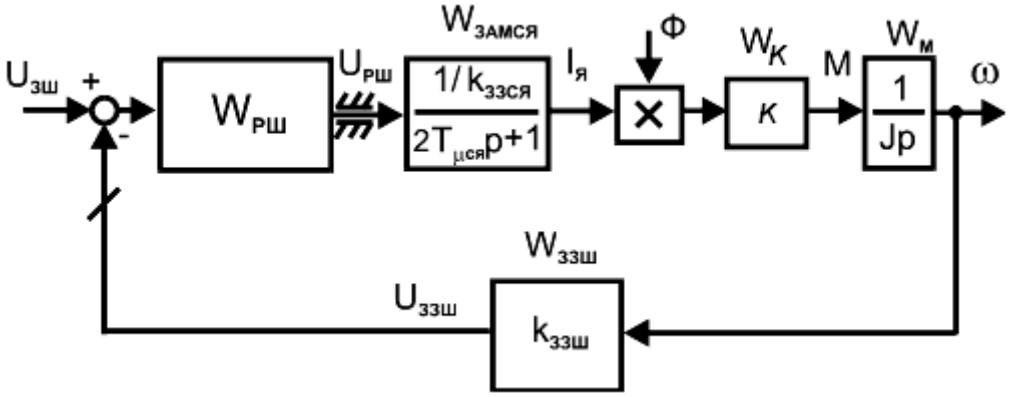


Рисунок 5.23 – Замкнений контур регулювання швидкості

Замкнена система регулювання швидкості зображена на рис. 5.23.

До контуру входять наступні структурні блоки:

– $W_{рш}$ – регулятор швидкості;

– $W_{замся}$ - замкнений контур струму;

– W_M – передаточна функція механічної частини. Тут J – сумарний момент інерції двигуна і механічної частини електробура;

– $W_{ззш}$ – зворотній зв'язок за швидкістю.

Момент на валу двигуна отримується шляхом множення струму якоря на конструктивний коефіцієнт машини ***K***, який визначається наступним чином:

$$K=\frac{pN}{2\pi a},$$

де p – кількість пар полюсів машини;

N – число активних провідників якоря;

$2a$ – число паралельних віток якоря.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю $k_{\text{ззш}}$ розраховується виходячи із максимальної швидкості двигуна ω_{max} :

$$k_{\text{ззш}} = \frac{U_{\text{кер}}}{\omega_{max}},$$

Передаточна функція регулятора швидкості знаходиться із виразу:

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{W^{\delta}_{\text{розш}}(p)}{W_{\text{зам св}}(p) \cdot W_K(p) \cdot W_M(p) \cdot W_{\text{ззш}}(p) \cdot \Phi} = \frac{(4T_{\mu\text{ш}}p+1)}{4T_{\mu\text{ш}}p} \cdot \frac{Jk_{\text{ззся}}}{2T_{\mu\text{ш}}Kk_{\text{ззш}}\Phi},$$

Таким чином, регулятор швидкості буде мати ПІ-структуру для того, щоб замкнутий контур швидкості був інваріантний до зовнішніх збурень. Вихід регулятора швидкості обмежується на рівні ±10 В. Це зроблено з метою відповідності математичної моделі реальній елементній базі, на якій виготовляється система керування. Перехідний процес у замкненому контурі швидкості при використанні ПІ-регулятора буде характеризуватися наступними показниками:

– час першого узгодження – $6{,}3T_{\mu\text{ш}}$;

– перерегулювання – 43,4%;

– час входження в зону похибки ±2 % – $16{,}5T_{\mu\text{ш}}$.

Покращання якості процесу досягають введенням в канал завдання фільтру у вигляді інерційної ланки з постійною часу $4T_{\mu\text{ш}}$. При цьому перерегулювання зменшується до 8,1%, а термін досягнення першого максимуму сягає 13,31 $T_{\mu\text{ш}}$.

Оскільки завдання на швидкість $U_{\text{зш}}$ планується подавати на вхід регулятора через задавач інтенсивності, то інерційну ланку з постійною часу $4T_{\mu\text{ш}}$ слід виключити з системи.

Синтез регулятора струму збудження

Контур струму збудження включає в себе тиристорний перетворювач обмотки збудження – $W_{пз}$, регулятор струму збудження – $W_{РФ}$, датчик струму збудження – $W_{д\,сз}$, обмотку збудження – $W_з$ (рис. 5.24).

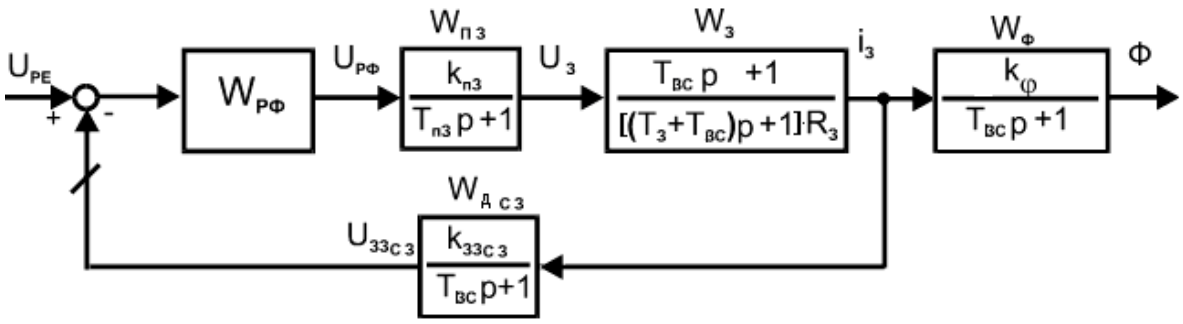


Рисунок 5.24 – Замкнений контур струму збудження

На схемі прийняті наступні позначення:

– $k_{пз}$ – коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача обмотки збудження. Приймається $k_{пз}$= $k_{пя}$=44;$T_{пз}$ – постійна часу тиристорного перетворювача обмотки збудження ($T_{пз}$ = 0,005 с); $T_з$ – постійна часу обмотки збудження:

$$T_з = \frac{2p\xi W_з^2 k_\phi}{R_з},$$

де p – кількість пар полюсів машини; $\xi = 1 + (0{,}5 \ldots 0{,}7)(\delta - 1); \delta = 1{,}12 \ldots 1{,}18$ - коефіцієнт розсіювання; $W_з$ – кількість витків обмотки збудження на полюс; k_φ – коефіцієнт взаємозв'язку між приростом струму та потоком збудження двигуна на кривій намагнічування (kφ = ΔФ/ΔIз); $R_з$ – активний опір кола збудження; $T_{вс}$ – постійна часу вихрових струмів. Приймається 0,1$T_з$; $k_{зсз}$ – коефіцієнт передачі датчика струму збудження ($k_{зсз}$=$U_{кер}/I_{зн}$).

Передаточна функція регулятора струму збудження знаходиться аналогічно регулятору струму якоря. Бажана передаточна функція розімкненого контуру збудження має вигляд:

$$W^{б}_{розф}(p) = \frac{1}{2T_{\mu ф}p(T_{\mu ф}p+1)},$$

де $T_{\mu\phi}$ – некомпенсована постійна часу контуру збудження ($T_{\mu\phi}$= T_{μ}=0,005 с).

Передаточна функція регулятора струму збудження визначиться як:

$$W_{\text{рсз}}(p) = \frac{W^{\delta}_{\text{роз}\,\phi}}{W_{\text{пз}} \cdot W_{\text{з}} \cdot W_{\text{дзс}}} = \frac{R_{\text{з}}[(T_{\text{вс}}+T_{\text{з}})p+1]}{2T_{\mu\,\phi}\,k_{\text{пз}}k_{\text{ззсз}}p},$$

Отримана передаточна функція представляє собою ПІ-регулятор. В цьому випадку перехідний процес в контурі збудження буде характеризуватися тими ж показниками як і в контурі струму.

Замкнений контур регулювання магнітного потоку має передаточну функцію:

$$W_{\text{зам}\ \Phi}(p) = \frac{1/k_{\text{ззсз}}}{2T_{\mu\Phi}\,p(T_{\mu\Phi}p+1)+1} \simeq \frac{1/k_{\text{ззсз}}}{2T_{\mu\Phi}p+1}.$$

Визначення передаточної функції регулятора ЕРС

Вихідна схема для визначення передаточної функції регулятораЕРС наведена на рис. 5.25.

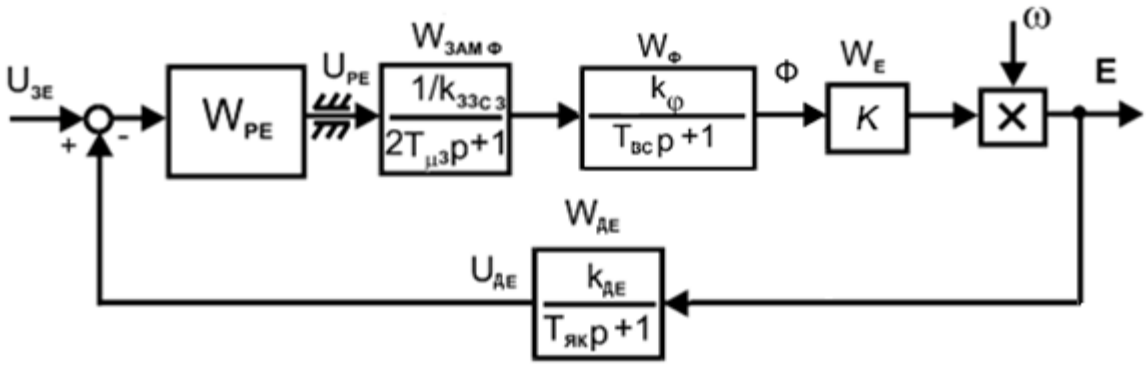


Рисунок 5.25 – Схема для визначення передаточної функції регулятора ЕРС

На схемі позначені:

– W_{PE} – регулятор ЕРС; $W_{\text{зам}\ \Phi}$ – замкнений контур регулювання струму збудження; $k_{\text{де}}$ – коефіцієнт передачі інерційного датчик ЕРС ($k_{\text{де}}$=$U_{\text{кер}}/E_{\text{ном}}$).

Вносимо постійні часу $T_{\text{ЯК}}$ і $T_{\text{ВС}}$ в сумарну некомпенсовану постійну часу контуру ЕРС

$$T_{\mu E} = 2T_{\mu\Phi} + T_{\text{як}} + T_{\text{ВС}} = 2T_{\mu} + T_{\text{як}} + T_{\text{ВС}},$$

і приймаємо за бажану передаточну функцію розімкненого контуру ЕРС

$$W_{\text{роз Е}}(p) = W^{б}_{\text{роз Е}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu Е}p(T_{\mu Е}p+1)},$$

Виходячи із рис. 5.25 отримаємо передаточну функцію регулятора ЕРС:

$$W_{РЕ}(p) = \frac{W^{б}_{\text{роз Е}}(p)}{W_{\text{зам Ф}}(p)\cdot W_{Ф}(p)\cdot W_{Е}\cdot\omega\cdot W_{ДЕ}(p)} = \frac{k_{\text{зас}}}{2T_{\mu Е}\cdot k\cdot k_{\varphi}\cdot\omega\cdot k_{ДЕ}\cdot p},$$

Одержаний регулятор ЕРС має І-структуру, оскільки в об’єкті керування відсутні некомпенсовані постійні часу. Оскільки в реальній системі керування величина швидкості оцінюється виходячи із рівності

$$\omega = \frac{U_{\text{зош}}}{k_{\text{зош}}},$$

то передаточна функція регулятора ЕРС остаточно матиме вигляд:

$$W_{РЕ}(p) = \frac{k_{\text{зас}}\cdot k_{\text{зош}}}{2T_{\mu Е}\cdot k\cdot k_{\varphi}\cdot U_{\text{зош}}\cdot k_{ДЕ}\cdot p}.$$

Вихід регулятору ЕРС має обмеження на рівні +10…+5 В.

Імітаційне моделювання електромагнітних процесів в електроприводі постійного струму при імпульсному керуванні процесом буріння

З метою перевірки працездатності електроприводу постійного струму при імпульсному завданні на швидкість виконаємо його моделювання в середовищі Simulink математичного пакету Matlab. Схема буде містити у собі наступні складові частини:

– безпосередньо модель двозонного регульованого електроприводу постійного струму;

– модель пружних крутильних коливань бурового ставу. Механічна частина приводу представлена двомасовою системою. Тут J_d – момент інерції валу двигуна, J_m – момент інерції механічної частини, C12 – коефіцієнт жорсткості;

– ZI – задатчик інтенсивності, який реалізує завдання на імпульсний алгоритм буріння;

– модель зміни реактивного моменту опору на породоруйнівному інструменті залежно від частоти обертання шарошки Sign1, Gain_1, product_1, product_2, Fcn1, Mn.

– Модель системи і результати моделювання наведені на рис. 5.25 і 5.26 відповідно. Максимальна величина завдання, що подається на вхід контуру регулювання швидкості (рис. 5.26, а), відповідає номінальному значенню кутової швидкості двигуна постійного струму. На рис. 5.26, б наведено результат відпрацювання вхідної тахограми.

На рис. 5.25 прийняті наступні скорочення:

– $U_{зш}$ – напруга завдання на швидкість;

– $W_{дв}$ – швидкість на валу двигуна;

– $W_{дв}$ – швидкість шарошкового долота.

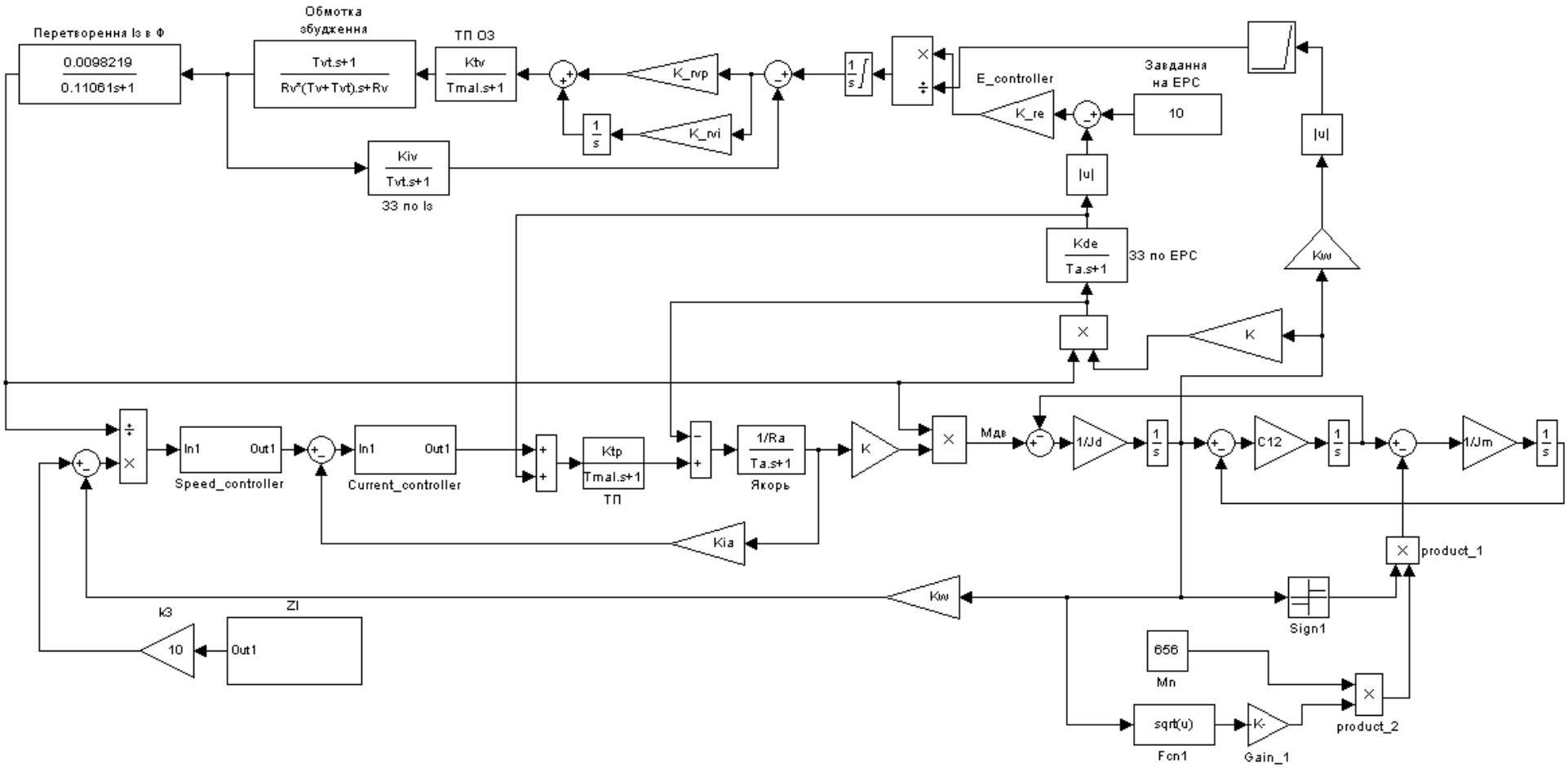


Рисунок 5.25 – Модель двозонного електроприводу постійного струму із задавачем інтенсивності в пакеті Simulink

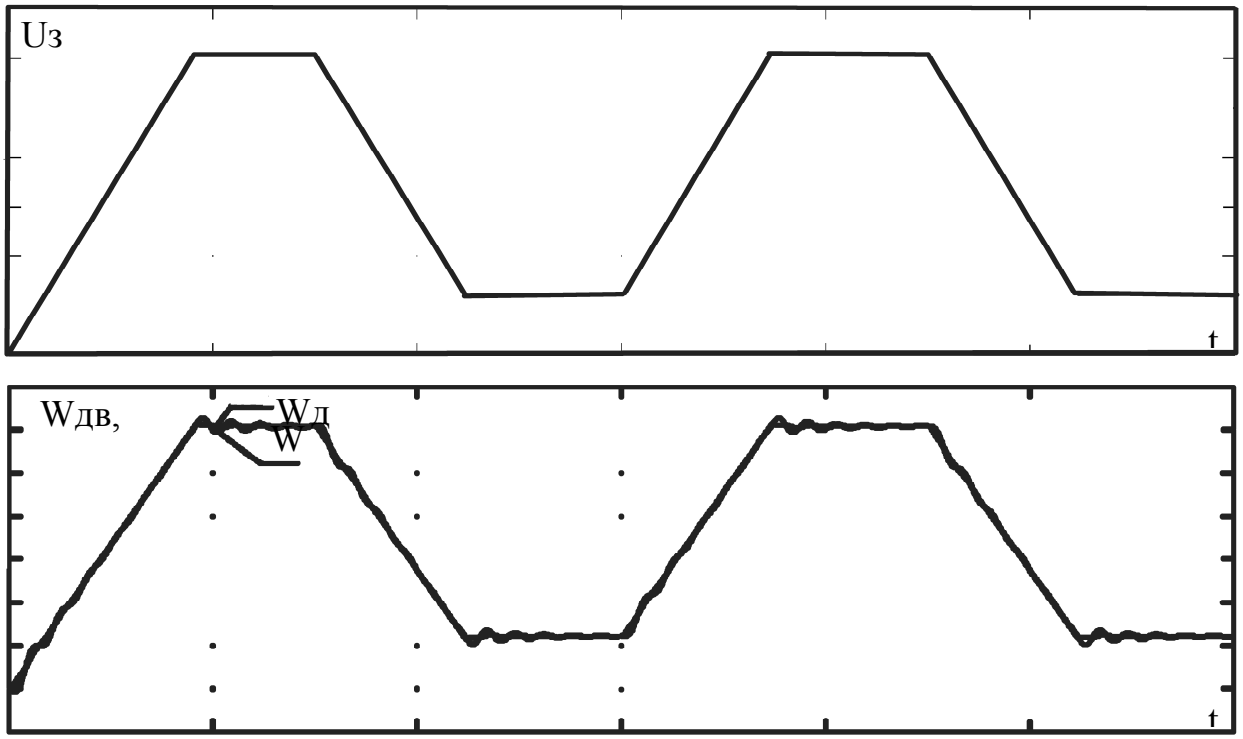


Рисунок 5.26 – Перехідні процеси в системі тиристорний перетворювач – двигун постійного струму

На рис. 5.26 прийняті наступні скорочення:

– $U_{зш}$ – напруга завдання на швидкість;

– $W_{дв}$ – швидкість на валу двигуна;

– $W_{дв}$ – швидкість шарошкового долота.

Усі змінні приведені до максимально-можливої напруги завдання – 10 В.

5.4 Розробка рекомендацій на створення задавача імпульсного обертання електромеханічної системи

Результати випробувань задавача імпульсного обертання електромеханічної системи, наведені на рисунку 5.26, дають змогу стверджувати, що задавач імпульсного обертання, представлений на рисунку 5.18, який реалізує імпульсної технології буріння може бути використаний для підтримання оптимального режиму імпульсної технології буріння с точки зору енергоспоживання. Враховуючи, що оцінити сумарну питому енергію можна тільки по закінченню процесу буріння, в якості критерію, було обрано швидкість проходки.

Також слід відзначити, що при моделюванні різних параметрах сигналу на виході задавача регулятора було встановлено, що при різних значеннях $t_і$ та $t_п$, а також різних формах сигналу можливо отримати різні значення швидкості буріння. Тобто для порід різної міцності потрібно експериментальним шляхом визначати допустимі зачинення параметрів сигналу на виході задавача щоб отримати найбільше значення швидкості буріння.

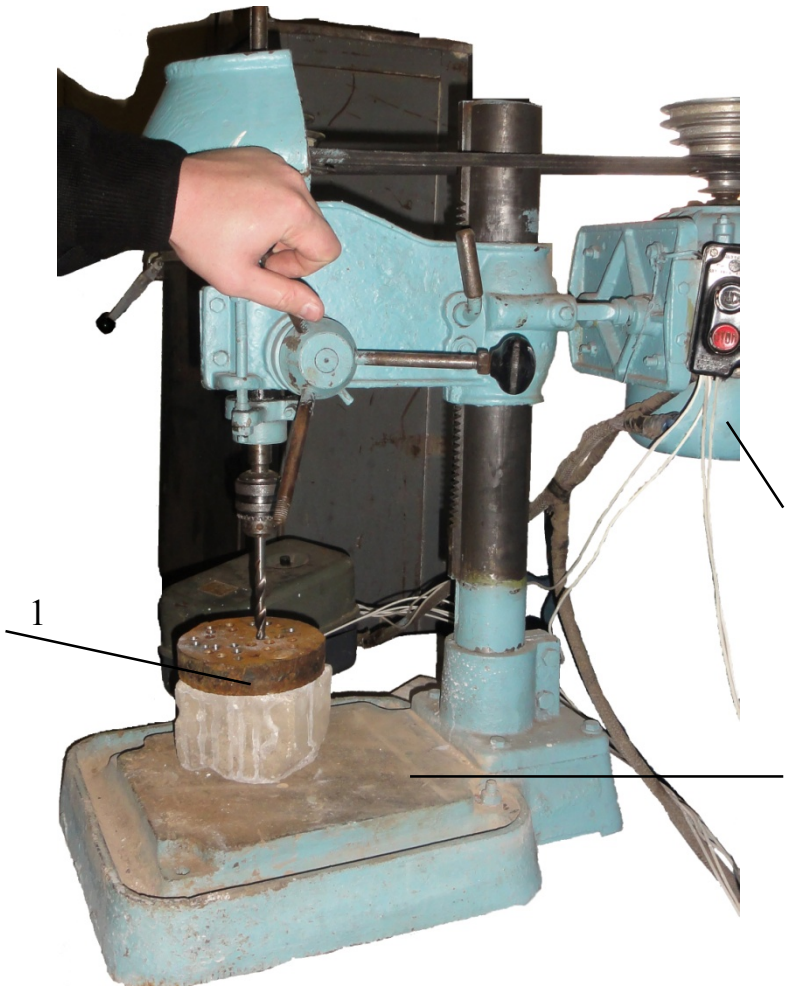
В граничному режимі спостерігається коливання швидкості двигуна рис. 3.30, що може викликати навантаження на буровий верстат та механічну частину приводу.

При використанні в контурі регулювання бурового верстата задавача імпульсного обертання було досягнуто більшу продуктивність порівняно з його відсутністю. Для остаточного вибору параметрів сигналу завдання, який має бути використаний потрібно знати необхідну швидкодію та обмеження за ударними навантаженнями на механічну частину приводу та бурового верстата.

Виходячи із наведених результатів моделювання перехідних процесів в електромеханічній системі на базі двигуна постійного струму можна зробити висновок, що система даного типу відпрацьовує сигнал завдання трапецеїдальної форми розробленого задавача частоти обертання

5.5 Макет задавача імпульсного обертання електромеханічної системи

Для виконання експериментальних дослідження задавача імпульсного обертання електромеханічної системи був виготовлено експериментальну установку яка складається з свердлильного станка рис. 5.27 та перетворювача частоти Altivar 18 (1) та задавача імпульсного обертання (3) рис. 5.28. У дослідах використовували привід змінного струму, а не постійного у зв’язку з неможливістю провести багато дослідів на ньому. Це не вплине на результати досліджень так як принципово не важливо який привод буде створювати обертальній рух бурового інструмента.



1. Дослідний матеріал
2. Установка свердління отворів
3. Двигун

Рисунок 5.27 – Дослідна установка

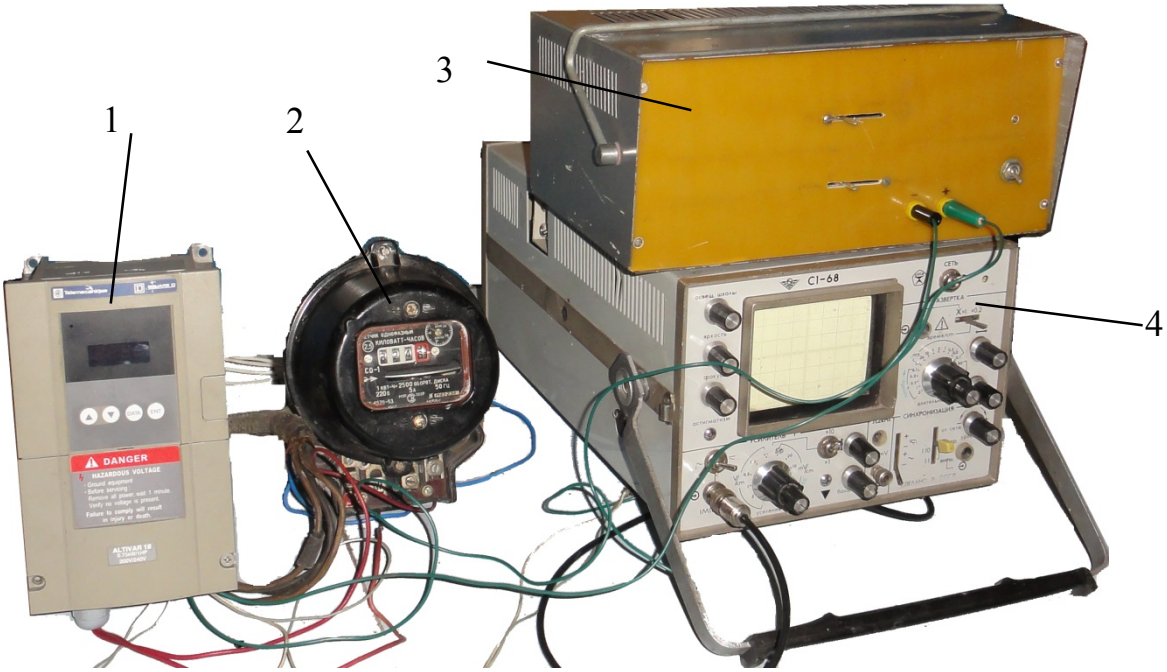


Рисунок 5.28 – Дослідна установка

5.6 Дослідження імпульсно-регульованого електроприводу бурового верстату

Для визначення оптимальних параметрів імпульсу завдання розглянемо профіль кривих розгону й гальмування, які реалізують поступова зміна вихідної частоти перетворювача відповідно до заданої швидкості по лінійному або попередньо заданому закону.

Можна реалізувати просте лінійне наростання завдання, а також U-Образну, S-Образну або індивідуальну криву.

Застосування S-образних кривих для транспортувального встаткування, пакувальних ліній, ліфтів дозволяє вибрати механічний зазор, усунути удари й обмежує розбіжність швидкості із завданням під час швидких перехідних процесів у випадку великого моменту інерції рис. 5.30.

Вибір лінійних, S- або U-Образних кривих ставиться як до розгону, так і до гальмування.

Розглянемо функцію перемикання двох темпів розгону й гальмування, що настроюються роздільно. Робота функції пояснюється рис. 5.29.

Перемикання темпів може здійснюватися за допомогою:

- дискретного входу;
- рівня частоти;
- комбінації дискретного входу (або біта слова керування) і рівня частоти;
- біта слова керування.

Застосування:

- транспортувальне встаткування із плавним пуском і підведенням;
- механізми з корекцією швидкої швидкості в режимі, що встановився.

Функція автоматична адаптація темпу затримки забезпечує автоматичну адаптацію темпу затримки, якщо початкова уставка часу занадто мала для даного моменту інерції навантаження. Ця функція дозволяє уникнути блокування перетворювача при різкім гальмуванні.

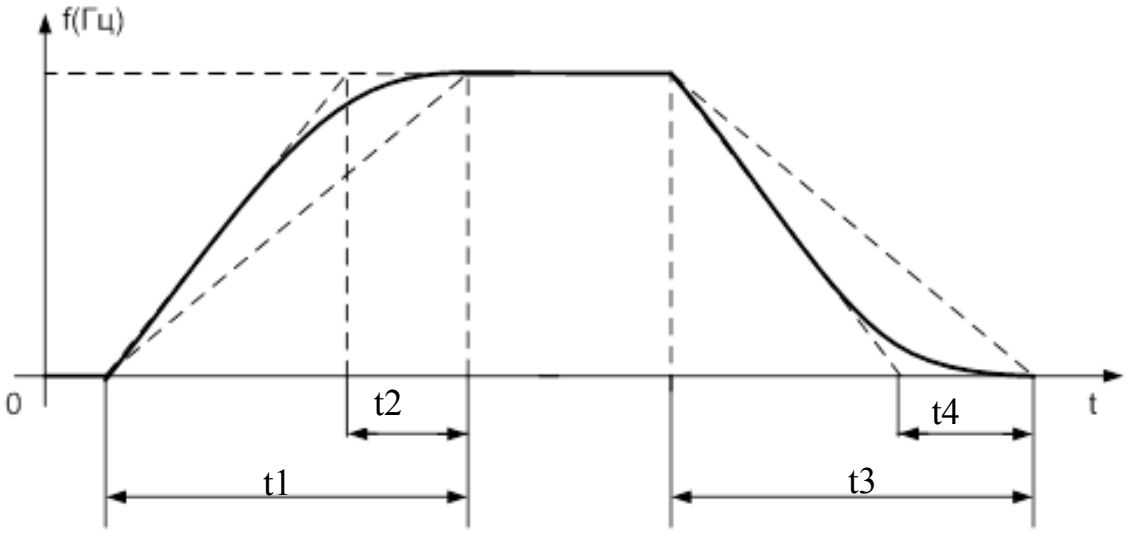


Рисунок 5.29 – Приклад формування U- Образної кривої розгону й гальмування

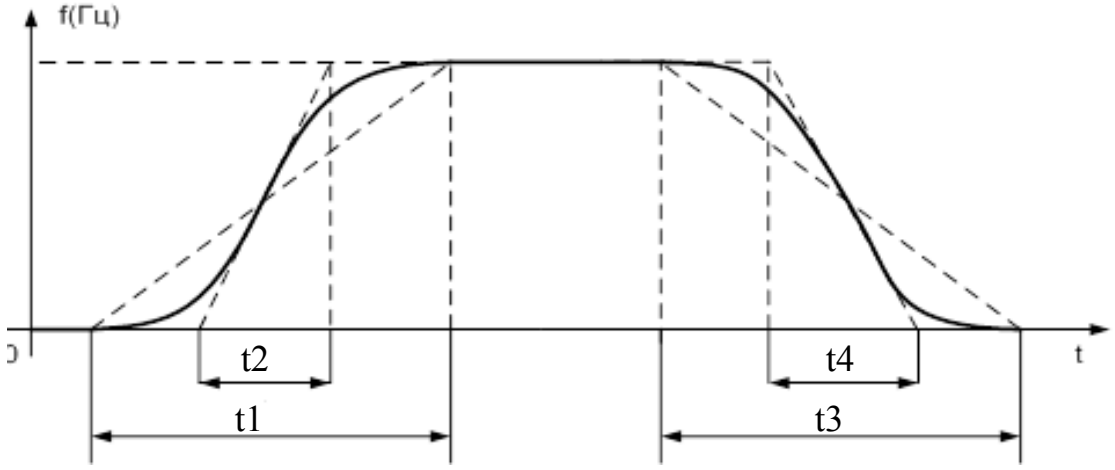


Рисунок 5.30 – Приклад формування S- Образної кривої розгону й гальмування

При всіх видах застосування, де не потрібна точна зупинка й не застосовуються гальмові опори. Автоматична адаптація повинна бути відключена у випадку позиціонування механізму при гальмуванні із заданим темпом і використання гальмового опору.

У випадку бурового верстату необхідно забезпечення точності й надійності завдання швидкості обертання бурового інструменту, а також для зменшення динамічних перевантажень не збільшувати швидкість наростання й спаду швидкості відповідно до необхідних параметрів процесу буріння. Другою необхідною умовою є зменшення часу роботи привода з мінімальною швидкістю обертання для зменшення втрат.

Виходячи з цього вибираємо основні значення параметрів імпульсу завдання t_1, t_3 =3 с., t4=0,5 с., t2=7 с., f=1/ t2=0,14Гц для визначення потужності та

енергоємності процесу руйнування гірських порід при бурінні з імпульсної частотою обертання бурового інструменту і відобразимо його на рис. 5.31. Значення $t_{паузи}$ будимо змінювати у дослідах з метою визначення его оптимального значення.

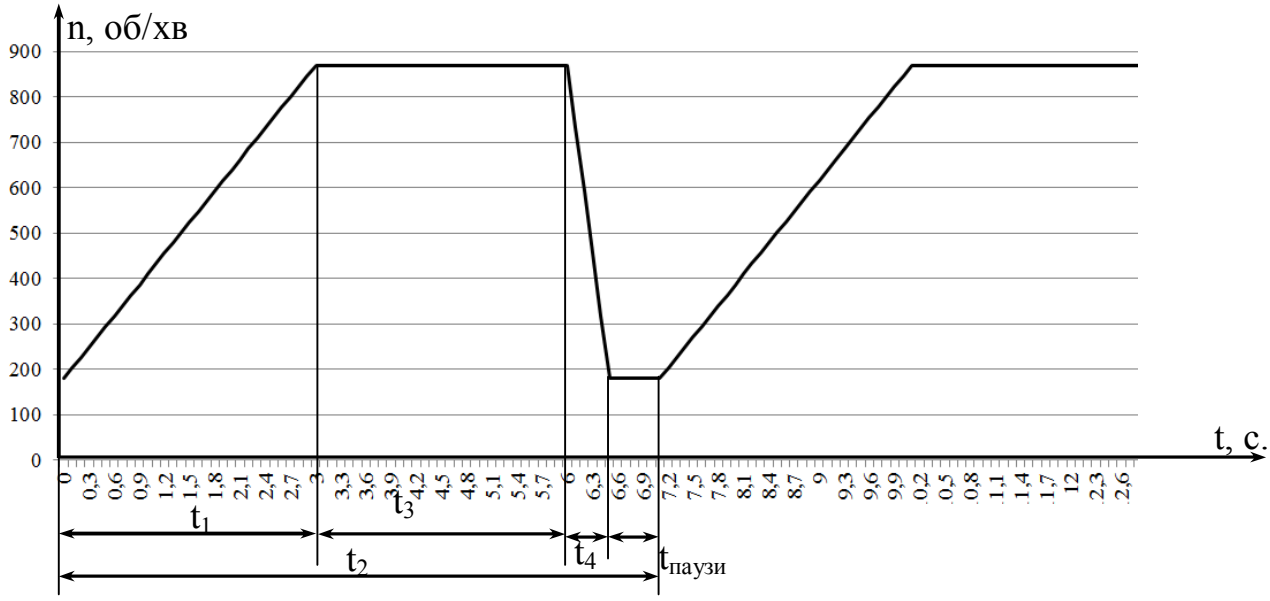


Рисунок 5.31 – Імпульс завдання швидкості обертання бурового інструменту для виконання дослідження

5.7 Експериментальне визначення потужності та енергоємності процесу руйнування гірських порід при бурінні з імпульсної частотою обертання бурового інструменту

Для визначення потужності та енергоємності процесу буріння процесу руйнування гірських порід використовується експериментальна установка рис. 5.28 Вимірювання енергії виконувалось за допомогою лічильника СО-1 (2), вимір часу секундоміром форма сигналу завдання осцилографом С1-68 (4).

Розрахунок енергоємності процесу буріння виконаємо за формулою:

$$A = \frac{W}{V},$$

де W – витрати енергії на свердління отвору в дослідному матеріалі; V – об’єм.

Об’єм обчислимо за формулою

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h,$$

де d – діаметр отвору, h – глибина свердління.

Швидкість буріння обчислимо за формулою:

$$\nu = \frac{h}{t}.$$

Досліди проводилися на різних матеріалах: мармур, силікат, сталь, деревина з вимірюванням значень навантаження, а також витраченої енергії. Для співставлення результатів виконувались контрольні досліди з постійною швидкістю обертання. Для отримання повної картини і встановлення закономірностей залежності енергетичних та часових параметрів досліди виконувались для різними значень $t_{паузи}$ імпульсу завдання.

Дослід проводився на мармуровому блоці товщиною 30 мм, навантаження складало 42 дН.

Таблиця 5.5 – Результати досліду на мармуровому блоці

Дослід зі імпульсною швидкістю обертання								
Глибина свердління h, мм	n, об/хв	Час, t, с	Енергія W, кВт·г	$t_{паузи}$, с	P, кВТ	ν, мм/с	V, $м^3$	A, кВт·г/ $м^3$
32	870-427	73	0,018	0,2	0,886	0,44	$2{,}51\cdot10^{-6}$	7046
32	870-427	74	0,017	0,4	0,827	0,43	$2{,}51\cdot10^{-6}$	6980
32	870-427	68	0,016	0,5	0,847	0,47	$2{,}51\cdot10^{-6}$	6374
32	870-427	74	0,0172	0,9	0,836	0,43	$2{,}51\cdot10^{-6}$	6930
32	870-427	78	0,01776	1	0,819	0,41	$2{,}51\cdot10^{-6}$	7070
Дослід зі постійною швидкістю обертання								
32	870	87	0,0188	-	0,779	0,36	$2{,}51\cdot10^{-6}$	7490

Отримані результати наведені у табл. 5.5. В результаті досліду встановлено що максимальний приріст швидкості свердління становить 30%, а зменшення енергоємності 17%.

Дослід проводився на силікатному блоці товщиною 32 мм навантаження складало 42 кг. Досліди зі імпульсною швидкістю обертання виконувались для трьох значень $t_{паузи}$. Отримані результати наведені у табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Результати досліду на силікатному блоці

Дослід зі імпульсною швидкістю обертання								
Глибина свердління h, мм	n, об/хв	Час, t, с	Енергія W, кВт·г	$t_{паузи}$, с	P, кВТ	ν, мм/с	V, $м^3$	A, кВт·г/ $м^3$
32	870-427	51	0,014	0,1	0,98	0,62	$2{,}51\cdot10^{-6}$	5812
32	870-427	45	0,0132	0,5	1,05	0,71	$2{,}51\cdot10^{-6}$	5175
32	870-427	50	0,0138	1	0,99	0,64	$2{,}51\cdot10^{-6}$	5772
Дослід зі постійною швидкістю обертання								
32	870	60	0,015	-	0,9	0,53	$2{,}51\cdot10^{-6}$	5971

В результаті досліду встановлено що максимальний приріст швидкості свердління становить 34%, а зменшення енергоємності 15%.

Дослід виконувався на сталевій пластині товщиною 30 мм, навантаження складало 28кг. Отримані результати наведені у табл. 5.7.

Дослід проводився на бруску граба товщиною 30 мм навантаження складало 22 кг. Досліди зі імпульсною швидкістю обертання виконувались для одного значення $t_{паузи}$. Отримані результати наведені у табл. 5.8.

Таблиця 5.7 – Результати досліду на сталевій пластині

Дослід зі імпульсною швидкістю обертання								
Глибина свердління h, мм	n, об/хв	Час, t, с	Енергія W, кВт·г	$t_{паузи}$, с	P, кВТ	ν, мм/с	V, $м^3$	A, кВт·г/ $м^3$
30	870-427	175	0,0189	0,5	0,388	0,17	$2,35 \cdot 10^{-6}$	8025
Дослід зі постійною швидкістю обертання								
30	870	225	0,0192	–	0,3	0,13	$2,35 \cdot 10^{-6}$	8152

В результаті досліду встановлено що приріст швидкості свердління становить 30%, а зменшення енергоємності 1,6%.

Таблиця 5.8 – Результати досліду на бруску граба

Дослід зі імпульсною швидкістю обертання								
Глибина свердління h, мм	n, об/хв	Час, t, с	Енергія W, кВт·г	$t_{паузи}$, с	P, кВТ	ν, мм/с	V, $м^3$	A, кВт·г/ $м^3$
30	870-427	22	0,0126	0,5	0,88	1,36	$2,35 \cdot 10^{-6}$	5350
Дослід зі постійною швидкістю обертання								
30	870	43	0,013	-	0,8	0,69	$2,35 \cdot 10^{-6}$	5520

Результаті досліду встановлено що приріст швидкості свердління становить 97%, а зменшення енергоємності 3,07%.

В результаті проведених експериментальних досліджень та аналітичних розрахунків енергетичного параметру можливо зробити наступні висновки:

– запропонований задавач імпульсного обертання електромеханічної системи є робото спроможним,

– енергоємність процесу буріння (свердління) імпульсною швидкістю обертання на різних матеріалах зменшується порівняно з постійною швидкістю обертання.

5.8 Розробка рекомендацій для створення регульованого привода з задавачем імпульсного обертання електромеханічної системи

Особливості розвитку електромеханічних комплексів на даному етапі є розширення області застосування регульованих приводів в основному за рахунок кількісного і якісного росту електроприводів змінного струму. Досягнуті за останні роки успіхи в удосконалюванні напівпровідникових перетворювачів частоти дають підставу припускати, що в найближчі роки розвиток регульованих приводів змінного струму, що використовують короткозамкнені асинхронні двигуни більш простої конструкції й меншої металоємності, приведе до інтенсивного витиснення регульованих приводів постійного струму.

Розвиток регульованого електропривода за останні роки нерозривно пов'язане із принципово новими досягненнями в області силової й інформаційної електроніки. Створення силових повністю керованих напівпровідникових приладів дозволило здійснити перетворення електричної енергії у формах, найбільш зручних для електричної машини, що відкрило широкі можливості для створення технічно сучасних регульованих електроприводів. Використання досягнення мікропроцесорної техніки принципово змінило елементну базу й функціональні можливості систем керування електроприводами.

Іншою особливістю є створення об'єктно-орієнтованого привода, що веде до ускладнення й розширенню його функцій, пов'язаних з керуванням технологічного процесу зростання, що й відповідає, складності систем керування.

Переважна більшість регульованих приводів обертання бурових верстатів у цей час оснащене регульованими приводами постійного струму. Низький рівень використання електроприводів змінного струму пояснюється відсутністю до останнього часу надійних перетворювачів частоти, придатних для тяжких умов експлуатації.

У зв'язку з постійним збільшенням вартості енергоносіїв, у тому числі й електроенергії, стає економічно й технічно доцільним застосування регульованих енергозберігаючих приводів змінного струму.

Поява на ринку повністю керованих силових напівпровідникових приладів (IGBT, IGCT, GTO) з високими значеннями припустимих струмів і напруг привело до радикальних змін у схемотехніці пристроїв силової електроніки, що дозволяє створити частотно-регульовані електроприводи на значну потужність. З'явилися об'єктивні можливості створення недорогих, простих і надійних в експлуатації перетворювачів частоти з високими значеннями КПД і коефіцієнта потужності.

Перші спроби створення регульованого електропривода змінного струму для обертання бурового ставу шарошечного верстата були здійснені на ЦГОКЕ (г. Кривій Ріг, Україна). Однак використання для перетворювача частоти напівкерованих напівпровідників (традиційні тиристори) не дозволили сформувати на статорі асинхронного двигуна криву напруги досить близьку до синусоїди. Крім того, використання регульованого джерела струму обмежило моментную характеристику замкненої по частоті обертання приводної системи. Тому надалі використовувалися приводні системи змінного струму з регульованим джерелом напруги. На сьогоднішній час на кар'єрах Кривого Рогу вже впроваджено 6 приводів змінного струму для обертання бурового верстату.

Частотно-регульований привод забезпечує: плавний пуск, тривалу роботу в заданому діапазоні зміни швидкості й навантаження, реверсування, гальмування й останов, захист електричного й механічного встаткування від аварійних режимів.

Частотно-регульований привод є не тільки пристроєм економічного перетворення електричної енергії в механічну, але й ефективним засобом керування технологічним процесом буріння. У тому числі й у замкнених системах автоматичного керування по технологічних параметрах, таким як вібрація става й імпульсне керування обертанням ставу.

Ефективність застосування цифрових частотно-регульованих електроприводів обумовлена високими енергетичними показниками, гнучким настроюванням програмними засобами параметрів і режимів настроювання електропривода,

розвиненим інтерфейсом і пристосовуваємостю до різних систем керування автоматизації. У тому числі й систем керування високого рівня, простотою й зручністю керування й обслуговування в експлуатації, високою якістю статичних і динамічних характеристик, що забезпечують високу продуктивність керованих машин.

Тому на етапі модернізації існуючого електроустаткування шарошечних верстатів, а тим більше на етапі розробки приводних систем для створюваних бурових верстатів нового покоління доцільно розглядати не тільки традиційні електроприводи постійного струму, але й сучасні приводні системи змінного струму для імпульсного обертання ставу шарошечного верстата.

Стосовно до шарошечного буріння знаходження структури регулювання, при якій забезпечуються оптимальні показники процесу руйнування гірської породи, є основним завданням при автоматизації бурового верстата. Верстат оснащено двома автоматизованими приводами для операції буріння: обертання й подачі ставу. Привода є взаємозалежними в процесі проходки шпари, через буровій ставши, збройний шарошечним долотом. Реактивний статичний момент привода обертання пропорційний осьовому зусиллю, прикладеному до ставу, створюваному приводом подачі. Статичний момент, крім гладкої, містить пульсуючу складову, яка виникає при перекочуванні шарошок по хвильовій поверхні вибою. Зі зменшенням осьового навантаження на вибій і частоти обертання долота змінюється не тільки момент опору руйнування породи, але й лінійна швидкість проходки, амплітуда й частота змінної складової моменту опору. Такий електромеханічний процес є складним, взаємозалежним процесом.

Різноманітні технологічні процеси, виконувані при буравленні свердловин (спускопідємні операції, продувка свердловини, забурювання, руйнування твердих порід, буріння м'яких порід, вивільнення ставу при зашламуванні або при заклинюванні шарошки), визначають вимоги до характеристик приводів.

Вимоги, у комбінації з даними техніко-економічного аналізу, що враховує можливості створення нового електроустаткування, визначають технічні розв'язки, прийняті при розробці електроприводів бурового верстата.

Знаходження структури системи регулювання приводів, при якій забезпечуються найвигідніші показники процесу буріння, є основним завданням на етапі створення приводів обертання й подачі ставу. Система керування повинна робити вибір імпульсного режиму роботи приводної системи частоти обертання шарошечного долота при мінливім значенні міцності разбурюваної породи й моменту опору на шарошці. Автоматичне знаходження цих величин, без участі оператора буріння, в умовах перемежованих по міцності гірських порід, забезпечить збільшення швидкості руйнування гірської породи, що приведе до зниження вартості бурових робіт. Питома вага буро-вибухових робіт у загальній собівартості видобутку корисної копалини становить 30% і більш.

Система регулювання повинна дозволяти управляти верстатом у двох режимах: ручного й автоматичного керування.

Причому при автоматичнім керуванні необхідно реалізувати режими забурювання, буріння із захистами від зашламювання, перевантаження й заклинювання, а так само буріння у твердих породах з підтримкою імпульсного обертання шарошечного долота.

У ручному режимі керування машиніст контролює частоту обертання ставу й осьовий тиску на буровий снаряд і тим самим самостійно вибирає режими роботи верстата, опираючись на наявний досвід бурових робіт і власну інтуїцію, що не завжди відповідає раціональним режимам роботи встаткування у зв'язку із заздалегідь невідомими міцністю й тріщинуватістю гірських порід.

Інформація з датчиків повинна надходити на монітор і аналізуватися машиністом, по яких він і ухвалюється розв'язок про вибір режиму буріння, впливаючи на завдання частоти обертання ставу й осьового тиску.

В автоматичному режимі керування система повинна аналізувати вимірювані параметри: тиск на ставши, глибину буріння, шпаруватості імпульсів, частоту обертання ставу, рівень вібрацій, лінійну швидкість переміщення долота, тиск повітря, величину струму якоря двигуна.

При автоматичному забурюванні (контролюється тиск на ставі, частота обертання й глибина проходки):

– буровій став повинен забурюватись на знижених обертах – 80 про/хв;

– при досягненні тиску масла 15 атм у системі подачі або глибини 1 м, система регулювання повинна перейти в режим імпульсного буріння, підвищуючи частоту обертання ставу до заданого значення.

Автоматичне буріння (підтримується максимальними тиск на ставши і його частота обертання, контролюється шпаруватість імпульсів, обмежується максимальне й мінімальне значення частоти обертання ставу, контролюється тиск повітря) повинне проводиться з максимальним тиском на ставши й частотою його обертання на твердій механічної характеристики приводної системи й обмеженням вібрації.

При перевищенні рівня вібрацій у будь-якому режимі роботи припустимого рівня необхідно автоматично знижувати задані частоти обертання, що приведе до зменшення частоти обертання й вібрації става, у свою чергу зменшення рівня вібрації повинне автоматично приводити до збільшення потужності на долоті до заданого рівня.

Система повинна забезпечити автоматичну продувку, яка запобігає зашламування свердловини зруйнованою породою. При перевищенні тиску повітря 6 атм у системі подачі повітря, необхідно знижувати осьове зусилля, при нульовім значенні якого робити підйом обертаючого ставу й продувку шпари. Якщо при виконанні кожної з перерахованих операції тиск повітря стане менше 6 атм, то контролер повинен переходить до операції опускання ставу й автоматичного буріння.

З ростом частоти обертання долота, збільшується як частота, так і амплітуда динамічних навантажень, при цьому вони змінюються пропорційно частоті обертання. На один оберт долота, незалежно від частоти обертання й осьового навантаження, доводиться близько трьох періодів низькочастотних коливань ставу. Коливання статичного моменту збуджують примушені коливання ставу, які при збігу із власними частотами коливання става, можуть привести до втрати його несучої здатності.

Для електропривода обертання необхідно прийняти принцип керування шарошечним верстатом при буравленні твердих порід, згідно з яким процес буріння забезпечується з максимально можливою механічною швидкістю при припустимому рівні порушуваних вібрацій ставу, що в остаточному підсумку приведе до підвищення ефективності роботи пордоруйнуючого інструмента. Регулювання процесом буріння у твердих породах необхідно здійснювати шляхом зміною уставок на шпаруватість імпульсів з постійним контролем вібрацій ставу, при одночаснім контролюванні тиску в гідросистемі. Величина осьового тиску визначається міцністними властивостями шарошечних доліт, з урахуванням технічних можливостей бурового верстата, пропорційна тиску в гідросистемі. З обліків особливостей бурового верстата, система керування електроприводом постійного струму обертання ставу з реверсивним тиристорним перетворювачем у якірному ланцюзі, у режимі буріння твердих порід, повинна являти собою двоконтурну систему з активною послідовною корекцією динамічних параметрів струму якоря, частоти обертання ставу. Для контролювання рівня припустимих коливань ставу система керування оснащується «затриманою» зворотним зв'язком по частоті вібрацій ставу, яка вступає в дію тільки при перевищенні вібрацій заданого рівня коливань ставу.

Коливання ставу приводять до появи низькочастотних динамічних навантажень, які оцінюються за значенням змінної складової струму якоря двигуна обертання бурового ставу. Використання струму якоря двигуна як непрямого параметра дозволяє розробити систему регулювання режимами буріння, вхідний сигнал якого найбільше точно відповідає характеру вібрацій.

Функціональна схема електропривода обертання на постійному струмі, побудована відповідно до сформульованих принципів керування, представлена на рис. 5.32, на якім позначено: РЕ, РС, РВ - регулятори ЕРС, струму, вібрацій; ДЕ, ДН, ДС – датчики електрорушійної сили, напруги, струму; Д, Ф – двигун, фільтр; ДУ, В, НЕ – пристрій, що диференціює, випрямляч, нелінійний елемент із характеристикою «мертва зона»; ІП – імпульсний пристрій.

Контури регулювання струму якоря, ЕРС – настроєні на модульний оптимум. При цьому регулятор ЕРС − пропорційної, регулятор струму – пропорційно-інтегральної, регулятор вібрацій – нелінійний негативний зворотний зв'язок за рівнем вібрацій на вхід регулятора частоти обертання.

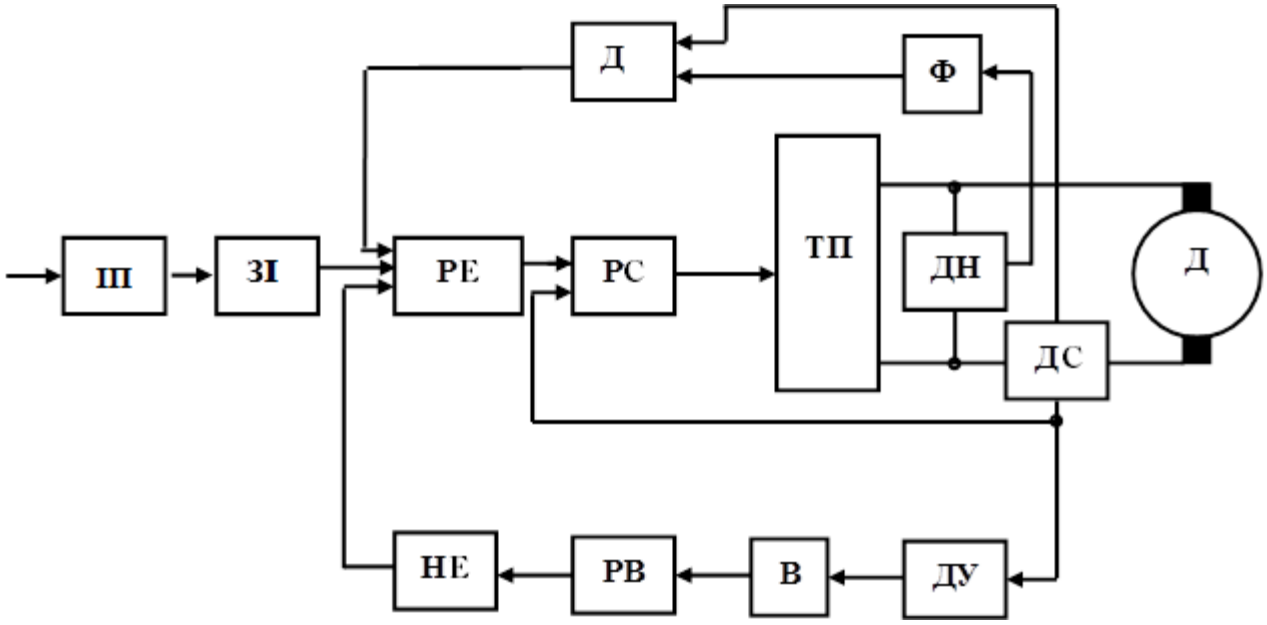


Рисунок 5.32 – Функціональна схема привода обертання постійного струму

При такій побудові системою контролюються поточні й гранично припустимі параметри процесу буріння шпари. Так, привод допускає розгін при максимальнім значенні осьового тиску на ставши, що приводить до максимального реактивного моменту на шарошці. Розгін проводиться під «відсічення» із гранично припустимим крутним моментом на валу двигуна. Коли відсутній статичний момент на шарошці (пуск із піднятим над вибоєм долотом), розгін двигуна так само відбувається з обмеженням припустимого крутного моменту, що технологічними умовами припустиме. При будь-якім статичнім навантаженні відбувається пуск привода при насиченні регулятора частоти обертання, наслідком чого є залежність часу розгону привода від навантаження.

5.9 Висновки до розділу 5

1. Стаціонарна технологія буріння, тобто технологія буріння з постійними в часі параметрами режиму буріння (осьові навантаження F=const, частота обертання n=const, кількість очисного агента Q=const), навіть за умови оптимізації параметрів

для конкретних геолотехнічних умов буріння не може забезпечувати постійне зростання техніко-економічних показників буріння. Існує межа чисельних значень параметрів режиму, яка обмежується межею міцності породоруйнівного інструменту, бурильних труб, потужністю приводу верстата.

2. Формування енерго- та ресурсозберігаючої технології буріння свердловин можливо за рахунок переходу зі стаціонарної технології на нестаціонарну - імпульсну технологію, коли один або декілька параметрів режиму змінні в часі.

3. Реалізація імпульсних технологій буріння вимагає застосування забійних або поверхневих пристроїв для створення змінного в часі параметра.

4. Застосування забійних пристроїв, що забезпечують змінну частоту обертання, при бурінні глибоких свердловин шарошковими долотами створює зростання механічної швидкості буріння на 36,6% -131%, в середньому на 71,1% і стійкість долот на 15% -280,5%, в середньому на126%.

5. У зв'язку з невеликою глибиною вибухових свердловин, які бурять на кар'єрах верстатами СБШ, можливо реалізувати імпульсну технологію буріння зі змінною частотою обертання бурового інструменту за рахунок використання регулюючого електроприводу постійного струму.

6. Завдавач імпульсного обертання електромеханічної системи повинен відповідати наступним вимогам:

– амплітуда – від нуля до номінальної частоти обертання;

– частота імпульсів від 1÷2 імпульсу за один оберт інструмента, до 5÷10 імпульсів на хвилину;

– форма імпульсу трапецеїдальна.

7. Виходячи з технологічних вимог до тахограми частоти обертання бурового інструмента, що забезпечує ефективне руйнування породи в процесі буріння розроблено, алгоритм роботи задавача частоти обертання для привода обертання. Розроблено блок-схему задавача частоти обертання. Встановлено залежності, при яких інтегро-задаючий пристрій обмежує мінімальну й максимальну частота обертання породоруйнівного інструмента а також дозволяє отримати різні темпи наростання й убування частоти обертання.

8. Базуючись на алгоритмі роботи задавача частоти обертання породоруйнуючого інструменту розроблено структурну, функціональну та принципову схему задавача. Основною метою при розробці ставилося досягнення якомога більш компактного, надійного та простого у експлуатації пристрою. Розроблено функціональну схему задавача частоти обертання у пакеті MATLAB, за допомогою якої встановлено можливі форми тахограм. Розроблено математичну модель, яка реалізує задані закони керування.

9. Виходячи із наведених результатів моделювання перехідних процесів в електромеханічній системі на базі двигуна постійного струму можна зробити висновок, що система даного типу відпрацьовує сигнал завдання трапецеїдальної форми розробленого задавача частоти обертання.

10. В результаті проведених досліджень отримане збільшення швидкості буріння та зменшення імпульсною швидкістю обертання енергоємності порівняно з постійною швидкістю обертання таблицю.

Матеріал	ν %	A %
Мармур	30	17
Силікат	34	15
Сталь	30	1,6
Граб	97	97

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бабокин, Г. И. Энергосбережение в насосных станциях водоотлива средствами регулируемого электропривода // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2005. – №11. – С. 305 – 306.

2. Бешта, А.С. Выбор рационального способа регулирования подачи воды насосным агрегатом / А.С. Бешта, А.А. Азюковский // Технічна електро¬динаміка. – 2009. – № 3. – С. 65 – 72.

3. Бешта, А.С. Эффективность работы электропривода шахтного водоот¬лива / А.С. Бешта , А.Н. Зубко, В.А. Новик и др. // Матери¬алы семинара «Электрификация и энергосбережение в горной промышленности». – Москва : МАИ, 2009. – 8 с.

4. Гидроэнергетические установки (гидроэлектростанции, насосные станции и гидроаккумулирующие электростанции) / под ред. Д.С. Щавелева. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 517 с.

5. Данильчук, Г.И. Автоматизация электропотребления водоотливных установок / П.К. Василенко, С.П. Шевчук. – К. : Техника, 1981. – 102 с.

6. Дроздова, Л.Г. Стационарные машины: учеб. пособие. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. – 157 с.

7. Заика, В.Т. Комплексная оценка и повышение энергоэффективности работы шахтных водоотливных установок / В.Т. Заика, В.Г. Разводов // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2000. –№ 64. – С. 17 – 26.

8. Закладний, О.М. Енергозбереження засобами промислового електропри-вода: навч. посібник / О.М. Закладний, А.В. Праховник, О.І. Соловей. – К. : Кондор, 2005. – 408 с.

9. Кривченко, Г.И. Насосы и гидротурбины / Г.И. Кривченко. – М. : Энергия, 1970. – 488 с.

10. Попов, В. М. Водоотливные установки: справочное пособие / В. М. Попов. – М. : Недра, 1990. – 254 с.

11. Разумний, Ю.Т. Режими електроспоживання вугільних шахт : навч. посібник / Ю.Т. Разумний. – Дніпропетровськ : НГА України, 2002. – 126 с.

12. Стационарные установки шахт / под общей ред. Б.Ф. Братченко. – М. : Недра, 1977. – 440 с.

13. Худолій, С.С. Вимоги до електропривода вентиляторів в умовах роботи на загальну мережу / С.С. Худолій, О.В. Михайленко, А.Ю. Безручко // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. –2009. – № 82. – С.149 – 151.

14. Черкасский, В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры : учебник для теплоэнергетических специальностей вузов / В.М. Черкасский. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.

15. Бухтояров, В. Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров / В. Ф. Бухтояров , А. В. Маврицын . – М. : Недра, 1986. – 184 с.

16. Лихачев, Ф. В. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф. В. Лихачев. – М. : Энергия, 1972. – 151 с.

17. Пивняк, Г. Г.Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: справочное пособие / Г. Г. Пивняк, Ф. П. Шкрабец. – М. : Недра, 1993. – 192 с.

18. Серов, В.И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоко-вольтных системах горных предприятий / В.И. Серов, В.И. Щуцкий, В.М. Ягудаев. – М. : Наука, 1985. – 136 с.

19. Микрюков, В.И. Устранение ложных отключений линий защитами от замыканий на землю в распределительных сетях разрезов и карьеров / В.И. Микрюков // Промышленная энергетика. – 1981. – № 9. – С. 41–43.

20. Пивняк, Г.Г. Релейная защита электроустановок на открытых горных работах / Г.Г. Пивняк, Ф.П. Шкрабец, Я.С. Горбунов: Справочное пособ. – М. : Недра, 1992.– 240 с.

21. Попов, Т.Н. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов / Т.Н. Попов, В.Ф. Пачугин, Г.В. Соколова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.

22. Колосюк, В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В.П. Колосюк. – М. : Недра, 1980. – 334 с.

23. Колосюк, В.П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электро-установок / В.П. Колосюк. – М. : Недра, 1987. – 407 с.

24. Бикфорд, Дж. П. Основы теории перенапряжений в электрических сетях / Бикфорд Дж. П. и др.; [пер. с англ]. – М.: Энергоиздат, 1981. – 168 с.

25. Вильгейм, Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгейм, М. Уотерс. – М.; – Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 415 с.

26. Самойлович, И.С. Защита от перенапряжений мобильных электроустановок карьеров / И.С. Самойлович. – М. : Недра, 1980. – 161 с.

27. Самойлович, И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров / И.С. Самойлович. – М. : Недра, 1976. – 175 с.

28. Лихачев, Ф.В. Повышение надежности распределительных сетей 6-10 кВ / Ф.В. Лихачев // Электрические станции. – 1981. – № 11. – С. 51–56.

29. Бургедорф, В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургедорф, А.И. Якобс. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 399 с.

30. Режимы нейтрали в электрических сетях напряжением до 35 кВ: Сб. тезисов и докладов научно-технической конференции. – К. : 1980. – 256 с.

31. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М.Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – К. : Наукова думка, 1985. – 264 с.

32. Остапчук, А.В. Вопросы повышения надежности и электробезопасности карьерных сетей / А.В.Остапчук, Д.В.Цыпленков, А.И.Ковалев // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2007. – № 79. – С. 40-44.

33. Шкрабец, Ф. П. Пути повышения надежности карьерных распределительных сетей / Ф.П.Шкрабец, А.И.Ковалев // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2008. – № 80. – С. 3-8.

34. Шкрабец, Ф.П. Оптимизация режимов работы нейтрали распределительных сетей / Шкрабец Ф.П., Ковалев А.И. : материалы II Межд. науч.-практ. конф. [“Электрификация железнодорожного транспорта ТРАНСЭЛЕКТРО-2008”]. – Днепропет-ровск: ДНУЖЕ, 2008. – 66 с.

35. Волков, А. В. Анализ электромагнитных процессов и совершенствование регулирования активного фильтра / А.В. Волков // Электротехника, 2002, № 12. – С. 40 – 48.

36. Колб, А. А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем /А. А. Колб // Вестник Кременчугского государствен-ного политехнического университета. – Кременчуг : 2003. № 1. – С. 135 – 139.

37. Белов, И.П. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов / И.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов, А.А. Сумников // Электротехника, 2003, № 5, С. 12 – 16.

38. Воробьев, А.А. Групповое питание электроприводов с общин накопителем энергии как новое направление энергосбережения / А. А. Воробьев, А. А. Колб// Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ, 2003. – № 10. – С. 224 – 228.

39. Колб, А. А. Пространственно-векторное управление групповым IGBT преобразователем для коррекции качества электроэнергии в системах электропривода с общими шинами постоянного тока / А. А. Колб // Гірнича електромеханіка та автоматика: – Наук. – техн. зб. – 2004. Вип. № 71. – С. 46 – 53.

40. Колб, А. А. Релейно-векторное управление силовым активным фильтром в режиме компенсации мощности искажения / А. А. Колб // Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 3. – С. 68 – 74.

41. Тонкаль, В.Е. Баланс энергий в электрических цепяхм / В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др. Под ред. И.В. Волкова. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.

42. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац: пер. с нем., – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 774 с.

43. H. Akagi Теория мгновенной мощности и ее применение для повышения качества электроэнергии / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes // IEEE Press Series on Power Engineering, New York, Wiley, 2007.

44. V. Soares An instantaneous active and reactive current component method of active filters / V. Soares, P. Verdelho, G.D. Marques // IEEE Trans. Power Electr., vol.15, p.p.660-669, july,2000.

45. Перельмутер, В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В.М. Перельмутер. – Х. : Основа, 2004. – 210 с.

46. Malesani L., Rossetto L., Tenti P. AC/DC/AC PWM Converterwith Reduced Energy Storageinthe DC Link. IEEE Trans. Ind. Applicat, №2, 1985, p. 287 – 292.

47. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под. ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

48. Преобразователи частоты Altivar 71. Каталог. // Schneider Electric. – 2011.

49. Обоснование и исследование законов управления электроприводами с широтно-импульсной модуляцией: Отчет по НИР / Национальный горный университет /НГУ/; Руководитель А.С. Бешта. – № ГР 0104U000782; – Днепропетровск, 2005. – 236 с.

50. Якупов, Д.В. Обоснование алгоритма векторного релейного регулятора тока трехфазных автономных инверторов напряжения // Науковий вісник НГУ, 2004. № 1. – С. 95 – 98.

51. Казачковский, Н. Н. Способ управления векторным релейным регулятором тока в электроприводах переменного тока с ШИМ / Н. Н. Казачковский, Д. В. Якупов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 3/2004 (26). – Кременчук: КДПУ, 2004. – С. 46 – 49.

52. Ковач, К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. Пер. с нем. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 735 с.

53. Дацковский, Л. Х., Тарасенко Л. М. Выбор структур асинхронного двигателя ля систем подчиненного регулирования параметров / Л. Х. Дацковский, Л. М. Тарасенко. – Электротехническая промышленность. Электропривод. 1974.– № 2 (28).– С. 3 – 6.

54. Дацковский, Л. Х. Синтез систем подчиненного регулирования параметров в асинхронных электроприводах на основе непосредственных преобразователей / Л. Х. Дацковский, Л. М. Тарасенко, И. С. Кузнецов и др. – Электричество, 1975.– № 9.– С. 48 – 56.

55. Слежановский, О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / Слежановский О.В., Дацковский Л.Х., Тарасенко Л.М. – М.:Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

56. Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.

57. Кожевников, А.А. Иследование процесов разрушения горных пород при колонковом бурении твердосплавными коронками: автореф. дис. … канд. тех. наук / А. А. Кожевников; ДГИ. – Днепропетровск., 1975. – 12 с.

58. Исследование термомеханического разрушения горных пород при разведочном бурении с генерированием тепловой энергии трения: отчет о НИР (заключительный) / Днепропетровский горный институт; рук. А. А. Кожевников. – № ГР01850043527. – Днепропетровск., 1986. – 132 с.

59. Воздвиженский, В. И. Современные способы бурения скважин / В. И. Воздвиженский, А. К. Сидоренко, А. Л. Скорняков. – М. : Недра, 1978. – 342 с.

60. А. с. 649820. Устройство для гашения вибраний бурильной колоны / Эпштейн Е.Ф., Шепель А. И., Кожевников А. А. и др.

61. Эпштейн, Е. Ф. Результаты отработки алмазных и твердосплавных коронок с использованием забойних резинометаллических амортизаторов / Е. Ф. Эпштейн, А. И. Шепель, А. А. Кожевников и др. // тез. докл. Всесоюз. н-тконф. "Пути совершенствования твердосплавного и алмазного бурового инструмента и расширенияе областей его применения". – Самарканд. С. 184 – 189.

62. Якунин, М. К. Разработка теории и способа бурения пород с пульсирующей подачей инструмента: автореф. дисс. … д-ра техн наук / М. К. Якунин; Кузбаський политехнический институт, типография КузПИ. – 1989.

63. Спосіб буріння свердловин та пристрій для його здійснення: патент України: П. І. Світалка. № 17447. Бюл. № 5. 31.10.1997.

64. Войтович, А. Ф. О возможности повышения эффективности отработки алмазних долот в процессе бурения скважин на нефть и газ / А. Ф. Войтович, П. И. Свиталка, Г. В. Виноградов // тез. докл. V междунар. конф. "Породоразрушающий и металлообрабатывающий інструмент – техника и технологи его изготовления и применения". – Киев, 2002. С. 72 – 75.

65. Свиталка, П. И. Влияние применения наддолотника на технико-экономические показатели бурения скважин / П. И. Свиталка, З. Н. Дуда, В. В. Невежин, В. В. Соловьев. Наук.-техн. аб. ІФТУПГ. Івано-Франківськ, 2001. – Т.2, № 38. – С. 29 – 34.

66. Вибрационное и ударно-вращательное бурение / Ф. Ф. Воскресенс-кий , А. В. Кичигин и др. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 244 с.

67. Пивняк, Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронне электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк, А. А. Волков. – Днепропетровск. : НГУ, 2006. – 470 с.

68. Хилов, В. С. Способ управления приводом вращения станка шарошечного бурения / В. С. Хилов // Гірнича електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ : НГУ. – 2004. – Вип. 72. – С. 116 – 119.

69. Комплектные тиристорне электроприводы: справочник / И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович и др.; под. общ. ред. В.М. Перельмутера. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.

70. Хилов, В.С. Способ управления приводом вращения станка шарошечного бурения // Гірнича електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ, НГУ. – 2004. – Вип. 72. – С. 116 – 119.

71. Евзеров, И.Х. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник/ И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович идр.; Под. ред. к.т.н. В.М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319с.

72. Бешта, А.С. Розробка задавача імпульсного обертання електропривода бурового верстата А.С. Бешта, А.А. Кожевников, В.С. Хилов, А.А. Борисевич, А.П.

Бельчицкий, И.И .Журко// Науковий вісник національного гірничого університету № 5 (125). – Д.: ДВНЗ «НГУ», 2011. – С. 103 – 107.

73. Разработка задатчика частоты вращения става бурового станка: Горнаелектромеханіка та автоматика НГУ, № 6 – Д.: ДВНЗ «НГУ», 2009. – С. 80–90.

74. Бешта, А.С. Способы бурения с импульсным вращением инструмента А.С. Бешта, А.А. Кожевников, В.С. Хилов, А.А. Борисевич, А.П. Бельчицкий, И.И. Журко // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2010». – Д.: НГУ Україна. 2010 г. – С. 131 – 137.

Міністерство освіти та науки, молоді та спорту України
Державний вищий навчальний заклад
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи

_____ О.С. Бешта
"____" _____ 2011 р.

ЗВІТ
ПРО ПАТЕНТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

_____ № _____
(дата)

ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК ЕНЕРГОЄМНИХ ВИРОБНИЦТВ
ГП-437
(найменування, шифр теми)

Начальник НДЧ Р.О.Дичковський

Керівник підрозділу-виконавця,
керівник НДР М.М.Казачковський

Зав. ПЛВ О.О. Філонова

Нормоконтролер Л.С. Шломина

2011

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник теми,
головний науковий співробітник, О.С. Бешта
д-р техн. наук, професор каф. електропривода

Провідний науковий співробітник,
к.т.н, професор каф. електропривода М.М. Казачковський

Провідний науковий співробітник,
д.т.н., доцент каф. метрології та інформаційно-вимірювальних технологій В.С. Хілов

Старший науковий співробітник,
к.т.н., доцент каф. електропривода О.В. Балахонцев

ЗАГАЛЬНІ ДАНІ ПРО ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом досліджень роботи є енергетично ємні установки гірничо-переробної галузі: бурові верстати та комплекс шахтного водовідливу. Розглядаються процеси перетворення енергії і залежність питомих енерговитрат від параметрів технологічного процесу.

Комплекси водовідливу споживають 15-25% електроенергії, що витрачається в процесі експлуатації шахт. Характерною ознакою цієї ділянки є суворі вимоги щодо режиму роботи, які диктуються фактичним рівнем добового водопритоку. Між тим, наявність проміжних накопичувачів і запасу щодо продуктивності водовідливних установок дозволяють перевести комплекс водовідливу в розряд споживачів-регуляторів електроенергії. Попередня оцінка потенціалу енергозбереження при експлуатації комплексу водовідливу свідчить про те, що за допомогою оптимального планування графіку включення насосних агрегатів можливо досягти приблизно 10% економії річних витрат на електроенергію.

Бурові верстати відносяться до відповідального обладнання відкритих гірничих робіт. Невизначеність режиму роботи механізму, непередбаченість властивостей гірських порід в процесі буріння зумовлюють часті виходи з ладу робочого органу. Це пов'язано із прямими матеріальними витратами (ремонт верстату, вартість шарошкового буру і т.д.) і опосередкованими збитками, обумовленими затримкою технологічного процесу.

ЗМІСТ

Регламент пошуку
Форма Г.1.4
Форма Г.1.5
Форма Г.2.4
Довідка про пошук
Довідка про оцінку НТР
Висновки

РЕГЛАМЕНТ ПОШУКУ № _____

Найменування теми: Покращення показників енергоефективності та якості систем електропостачання та електроприводу технологічних установок енергоємних виробництв

Шифр теми: ГП-437

Етап Дослідження енергетичних та електромагнітних процесів та розробка методів і технічних рішень з покращення показників енергоефективності систем електропостачання та електромеханічних систем технологічних установок енергоємних виробництв

Початок пошуку 02.01.2010 Закінчення пошуку 31.12.2010

Таблиця Б.1

Предмет пошуку (ОГД)	Мета пошуку інформації	Держава пошуку	Класифікаційні індекси: МПК, НПК, МКПЗ, МКТП, УДК	Ретро-спектив-ність пошуку	Джерела інформації
1	2	3	4	5	6
Спосіб керування комплексом шахтного водовідливу	Оцінка енергетичних показників за відомими способами	Україна, Росія	МПК: F04D15/00	10 років	Держ. департамент інтелектуальної власності України «Промислова власність»; База данных Федерального института промышленной собственности (ФГУ ФИПС)
Спосіб керування процесом буріння	Оцінка показників надійності за відомими способами	Україна, Росія	МПК: E21B45/00	10 років	

Керівник підрозділу-виконавця робіт проф. М.М.Казачковський

(дата)

Зав. ПЛВ О.О.Філонова

(дата)

Форма Г.1.4. Техніко-економічні показники ОГД та об’єктів аналогічного призначення

Найменування та одиниці виміру	Техніко-економічні показники			
	об’єкта за стандартом або технічними умовами	об’єкта-аналога (держава, фірма, організація, модель, рік освоєння)	ОГД	перспек-тивного зразка
1	**2**	**3**	**4**	**5**
Питомі енерговитрати на 1 куб. метр відкачуваних шахтних вод, перераховані на глибину відкачування 300м	**2,6**	**2,38** Росія, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский Государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)" *(19)RU(11)2375606(13) C1*, 2008	**2,0**	**2,0**
Надійність (ймовірність безвідмовної роботи) шарошкового долота бурового верстату впродовж одного року	**0,65**	**0,75** СССР, №1 332 004, *клE21B 44/00*, 1987.	**0,8**	**0,8**

Форма Г.1.5 Аналіз новизни, винахідницького рівня та промислової придатності ОГД

ОГД, його складові частини		Прототип		Очікуваний результат	Можливості використання у промисловості або іншій сфері діяльності	Номер поданої заявки, дата подачі заявки
Назва	Сукупність ознак	Бібліографічні дані	Сукупність ознак			
1	2	3	4	5	6	7
Спосіб керування комплексом шахтного водовідливу	В основу покладені принципи сполучення насосних агрегатів та автоматизованого предпікового вмикання. Використання цих принципів дозволяє розрахувати оптимальну кількість і сполучення насосних агрегатів, за якими забезпечується мінімальне енергоспоживання при відкачуванні добового водопритоку.	Способ регулирования режима работы водоотливной установки / патент РФ // Боченков Д.А, Сташинов Ю.П, Волков В.В, Волков Д.В. МПК F04D15/00 (2006.01) Россия, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский Государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)" *RU 2375606 C1*, 2008	Спосіб регулювання режиму роботи водовідливної установки здійснюється зміною частоти обертання робочого колеса насоса, що підкачує	Зниження питомих енерговитрат на відкачування шахтних вод	може бути використаним в АСУ ТП водовідливу шахт та рудників	Технічне рішення «НОУ-ХАУ»
Спосіб керування процесом буріння	Спосіб керування процесом буріння, що включає дії на приводи подачі і обертання, який відрізняється тим, що попередньо виконують завдання потужності руйнування породи, граничного обертового моменту на долоті, припустимих вібраційних коливань поставу, частоти обертання долота, контролюють поточні значення цих параметрів, порівнюють з відповідними заданими, а при відхиленні коректують до досягнення заданих значень.	Система автоматического регулирования бурового механизма / а.с. СССР *№1 332 004 E21B 44/00 От 27.03.1986, опубл. 23.08.1987 Бюл. №31*	Способ управления бурением основанный на определении текущего значения производительности бурения и стойкости долота	Підвищення надійності роботи шарошкового долота	може бути використаним при автоматизації процесу вибухового буріння свердловини	UA 61648 A 7 E21B45/00, E21B41/00, 17.11.2003

Форма Г.2.4 Аналіз можливості застосування в ОГД відомих об’єктів промислової власності

ОГД, його складові частини	**Документи на об’єкти промислової власності (бібліографічні дані)**	**Суть об’єкта промислової власності**	**Очікуваний результат від застосування**
1	**2**	**3**	**4**
Спосіб керування комплексом шахтного водовідливу	Способ регулирования режима работы водоотливной установки / патент РФ // Боченков Д.А, Сташинов Ю.П, Волков В.В, Волков Д.В. МПК F04D15/00 (2006.01) Россия, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский Государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)" *RU 2375606 C1*, 2008	Спосіб регулювання режиму роботи водовідливної установки здійснюється зміною частоти обертання робочого колеса насоса, що підкачує	Зниження питомих енерговитрат на відкачування шахтних вод при використанні технічних рішень НОУ-ХАУ
Спосіб керування процесом буріння	Система автоматического регулирования бурового механизма / а.с. СССР *№1 332 004 E21B 44/00* *От 27.03.1986, опубл. 23.08.1987 Бюл. №31*	Способ управления бурением основанный на определении текущего значения производительности бурения и стойкости долота	Удосконалений спосіб керування процесом буріння дозволяє автоматично переходити від одного режиму роботи до іншого при бурінні перемежованих по фізико-механічним властивостям гірських порід, що дозволить значно збільшити стійкість озброєння долота.

ДОВІДКА ПРО ПОШУК № _____

Завдання на проведення патентних досліджень _____
(номер, дата)

Етап Дослідження енергетичних та електромагнітних процесів та розробка методів і технічних рішень з покращення показників енергоефективності систем електропостачання та електромеханічних систем технологічних установок енергоємних виробництв

Номер, дата регламенту пошуку _____

Початок пошуку 02.01.2010 Закінчення пошуку 31.12.2010

Таблиця В.1 Джерела інформації, використані під час проведення пошуку

Предмет пошуку (ОГД)	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Інформаційна база, використана під час пошуку	Бібліографічні дані першого та останнього за хронологією джерела інформації	
				Патентна інформація	Інша науково-технічна інформація
1	2	3	4	5	6
Спосіб керування комплексом шахтного водовідливу	Росія, Україна, СРСР	C1 МПК F04D15/00	Держ. департамент інтелектуальної власності України; База данных Федерального института пром. собственности (ФГУ ФИПС)	Первший: «Открытие и изобретения» №3 2009 г. Останній: «Промислова власність», №11, 2003.	Технічна електродинаміка. – 2009. - № 3. Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук. -техн. зб. - 2009. - Вип. 83.
Спосіб керування процесом буріння		C1 МПК 7 E21B045/00			

В.2 Висновки про виконання регламенту пошуку

Керівник підрозділу-виконавця робіт проф. М.М.Казачковський
(дата)

Зав. ПЛВ О.О.Філонова
(дата)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
д-р техн. наук, проф.
О.С. Бешта
"_____"_____2011 р

ДОВІДКА
про оцінку науково-технічного рівня результатів НДР

Найменування теми: Покращення показників енергоефективності та якості систем електропостачання та електроприводу технологічних установок енергоємних виробництв

Шифр теми: ГП-437

ТЕХНІКО-ЕКОНОМИЧНІ ПОКАЗНИКИ

Найменування та одиниця виміру	Значення техніко-економічних показників	
	кращого аналога	розробленого об'єкту
Питомі енерговитрати на 1 куб. метр відкачуваних шахтних вод, перераховані на глибину відкачування 300м	**2,38**	**2,0**
Ймовірність безвідмовної роботи шарошкового долота бурового верстату впродовж одного року	**0,75**	**0,80**

Патент UA № 61648 А «Спосіб керування процесом буріння»

Перелік патентів (заявок) (назва, номер, дата, автори)
(авт. Хілов В.С.) Опубл. 17.11.2003, бюл. №11

Відомості НОУ-ХАУ методика вибору технологічних параметрів

ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ НДР
відповідає сучасному рівеню науки і техніки
(відповідає сучасному рівню науки і техніки, перевищує, не відповідає)

Керівник підрозділу-виконавця робіт — проф. М.М.Казачковський

(дата)

Зав. ПЛВ — О.О.Філонова
(дата)

ВИСНОВКИ

Розроблені наукові підходи керування комплексом водовідливу за мінімальними витратами енергії, а також спосіб керування буровим верстатом, що забезпечує підвищення надійності виконавчого органу.

Технічні рішення захищені патентом №61648 А Україна, МПК 7 Е21В45/00, Е21В41/00. Спосіб керування процесом буріння / В.С. Хілов – №2003021777; Заявлено 28.02.2003; Опубл. 17.11.2003, Бюл. №11, 2003 р.

Відомості «ноу-хау», які містять принципи та способи керування технологічними установками гірничо-металургійного комплексу.

Науково-технічний рівень НДР відповідає сучасному світовому рівню науки і техніки.

ВИТЯГ

з протоколу № 3 засідання секції Науково-технічної ради університету за напрямком
«Проблеми гірничої та металургійної електроенергетики, енергозбереження»

м. Дніпропетровськ “ 12 ” грудня 2011 р.

ПРИСУТНІ: голова ради, професор Іванов О.Б., професори: Шкрабець Ф.П., Казачковський М.М., Випанасенко С.І., Корсун В.І., доценти Балахонцев О.В., Рухлов А.В.

СЛУХАЛИ: старшого наукового співробітника теми **ГП-437** «Покращення показників енергоефективності та якості систем електропостачання та електроприводу технологічних установок енергоємних виробництв» Балахонцева О.В. про виконану роботу по темі. Він повідомив, що роботу виконано в повному обсязі, згідно з календарним планом та технічним завданням.

Основними результатами НДР є:

- розроблені алгоритми енергоефективного керування комплексом шахтного водовідливу, основані на оптимальному сполученні за мінімумом негативного взаємного впливу та автоматизованого предпікового вмикання насосних агрегатів;
- отриманий новий принцип керування виконавчим органом бурової установки на основі імпульсного задавача інтенсивності, що забезпечує максимальну ефективність технологічного процесу;
- розроблені технічні рішення та пристрої для мінімізації негативних наслідків несиметричних аварійних режимів в системах електропостачання енергоємних виробництв.

За результатами досліджень опубліковані три статті у фахових виданнях.

ВИСТУПИЛИ: професори Корсун В.І., Випанасенко С.І., які дали позитивну оцінку результатам поточного етапу та всієї науково-дослідної роботи. Відмітили, робота виконана в повному обсязі, результати роботи відповідають календарному плану та технічному завданню на НДР.

УХВАЛИЛИ:

- робота по НДР відповідає календарному плану та технічному завданню в повному обсязі.
- науково-технічний рівень розробок відповідає сучасному рівню науки та техніки, робота має високе теоретичне та практичне значення.
- матеріали, що викладені в звіті, не містять відомості, які можуть бути віднесені до державної таємниці.
- заключний звіт схвалити та рекомендувати до затвердження.

Голова ради,
професор О.Б. Іванов

Вчений секретар,
доцент А.В. Рухлов

РЕЦЕНЗІЯ

на науково-дослідну роботу

«Покращення показників енергоефективності та якості систем електропостачання та електроприводу технологічних установок енергоємних виробництв»

Впредставленій роботі розглянуті питання енергозбереження при експлуатації потужних установок гірничо-металургійного комплексу. Механізми цієї галузі є найвагомішими споживачами електроенергії в країні, тому кожен відсоток зекономленої енергії зумовлює суттєвий економічний ефект у великому масштабі.

Одними з ключових споживачів електроенергії в шахтному виробництві водовідливні установки. Виконавцями НДР розроблені спеціальні закони керування комплексом водовідливу, що забезпечують мінімальне енергоспоживання. Надані рекомендації щодо організації автоматизованої системи управління із функціями моніторингу стану насосних агрегатів.

В роботі здійснений аналіз особливостей перехідних режимів, що виникають внаслідок однофазних замикань на землю. Надані рекомендації щодо зменшення шкідливих наслідків цих аварійних режимів. Визначені закономірності енергетичних процесів в системах електроприводів із груповим живленням від перетворювачів із широтно-імпульсною модуляцією.

Таким чином, в роботі представлені результати, що мають наукову новизну та практичну цінність для вітчизняної економіки.

Головний науковий співробітник НТЦ АТП ГМВ,
д-р техн. наук, проф. В.М. Куваєв

ООО НПП «Центр Электромеханической Диагностики»

49064, Украина, г. Днепропетровск, ул. Мичурина, 9
Тел./факс (0562) 36 01 03, (056) 372 79 90
e-mail: info@ced.dp.ua, http://ced.dp.ua
Р/с 2600 90 50 50 21 76 в Петровском отделении ЗАО КБ «ПриватБанк», г. Днепропетровск, МФО 305299.
Р/с 2600 92 07 33 01 в филиале «Днепропетровское РУ» ОАО «Банк»Финансы и кредит», МФО 307231.
ЕГРПОУ 33718468, ИНН 337184604676, Свид. № 100152062.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
директор ТОВ НВП «ЦЕД»
_____ І.І. Пельтек
«01» грудня 2011 р.

АКТ

про впровадження результатів наукової роботи ГП-437
«ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК ЕНЕРГОЄМНИХ ВИРОБНИЦТВ»

В процесі діагностичних та дослідницьких робіт інженерами ТОВ НВП «ЦЕД» використовують наступні наукові та практичні методи, розроблені у НДР ГП-437:

1. алгоритм визначення поточного технічного стану насосних агрегатів;
2. алгоритм групування насосних агрегатів за мінімумом негативного взаємного впливу;
3. алгоритм автоматизованого предпікового включення.

Інженери ТОВ НВП «ЦЕД» керуються рекомендаціями, які були представлені в НДР ГП-437, щодо організації автоматизованої системи управління із функціями моніторингу стану насосних агрегатів.

Використання наукових підходів, розроблених в НДР ГП-437, дозволило підприємству ТОВ НВП «ЦЕД» розширити спектр послуг та покращити якість діагностики стану електромеханічних систем.

Заст. директора Р.В. Джур