

Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і механотроніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему:

«Удосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу»

Виконав: студент 6 курсу, групи 601МЕ
спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Жабський Віталій Володимирович

(прізвище та ініціали)

Керівник Лєві Л.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2021 року

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ШАХТНОГО ВОДОВІДЛИВУ	
1.1 Огляд існуючої апаратури автоматизації шахтних водовідливних установок	8
1.2 Способи заливки насосів при автоматизації водовідливу	
1.3 Засоби технологічного контролю і керування автоматизованих водовідливів	18
1.4 Вимоги до автоматизації водовідливу	21
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНИМИ СИСТЕМАМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ШАХТНОГО ВОДОВІДЛИВУ	
2.1 Технологічний процес водовідливу як об'єкт автоматизації	27
2.2 Вибір двигуна	31
2.3 Вибір перетворювача частоти	32
2.4 Визначення параметрів схеми асинхронного заміщення двигуна за каталожними даними	35
2.5 Природні механічні та електромеханічні характеристики АД	40
2.6 Математичний опис узагальненої асинхронної машини	42
2.7 Структурна схема силового каналу електроприводу	46
2.8 Розрахунок та побудова штучних механічних та електромеханічних характеристик розімкнутої системи «Перетворювач частоти - Асинхронний двигун»	49
2.9 Розрахунок втрат в асинхронному двигуні під час роботи на штучних характеристиках вентиляторним навантаженням	58

РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ УДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШАХТНИМ ВОДОВІДЛИВОМ

3.1 Розрахунок перехідних процесів швидкості та моменту для режиму пуску при вентиляторному навантаженні на валу двигуна системи «Перетворювач частоти – асинхронний двигун»	61
3.2 Система моніторингу та керування водовідливом	66
3.3 Функції, що виконуються апаратурою автоматизації водовідливу	69
3.4 Робота функціональної схеми апаратури автоматизації	70

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Техніко-економічне обґрунтування	71
4.2 Визначення витрат на удосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу	72
4.3 Розрахунок річного фонду роботи системи автоматизації шахтного водовідливу	73
4.4 Розрахунок річної експлуатаційної системи автоматизації шахтного водовідливу	74
4.5 Розрахунок поточних річних витрат	75
4.6 Розрахунок вартості машино–години роботи системи автоматизації шахтного водовідливу	78
4.7 Розрахунок вартості технологічної операції на одиницю продукції	78
4.8 Розрахунок економічного ефекту від проведення модернізації	78

ВИСНОВКИ	81
-----------------	----

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	82
-------------------------	----

ДОДАТКИ	
----------------	--

ВСТУП

Актуальність. Переважна більшість механізмів на різних видах виробництва сьогодні є автоматизованими. Стрімкий розвиток вищого рівня розвитку машинної техніки, коли регулювання та керування виробничими процесами здійснюється без участі людини, а лише під її контролем, не минув і шахти. Найважливішим та найвагомішим об'єктом у структурі шахти є водовідливні установки. Водовідливні установки призначені для забезпечення надійного відкачування води з підземних виробок при найменших експлуатаційних витратах. Функціонування установки без постійної присутності обслуговуючого персоналу є головним завданням автоматизованої водовідливної установки. Схемою автоматизації установки передбачено два види керування – автоматичне та ручне. При досягненні встановленого верхнього, підвищеного або аварійного рівня води, схема автоматично виключає насосні агрегати. Відключення насосних агрегатів відбувається автоматично після відкачування води до заданого нижнього рівня.

Автоматизована водовідливна установка має механізми блокування, які забезпечують:

- пуск агрегату при не залитому насосі;
- включення моторного приводу засувки до пуску насосного агрегату;
- зупинку агрегату до моменту повного закриття засувки;
- запуск агрегату при відсутності води в водозбірнику;
- повторне включення та відключення насосу до усунення причини,

що викликали його аварійне відключення.

Автоматизовані водовідливні установки оснащені механізмами захистів, що викликають аварійну зупинку при зниженні або втраті продуктивності, при перегріванні підшипників, при зникненні напруги або короткого замикання в ланцюгах керування. Продуктивність кожного

насосного агрегату, температура підшипників та положення засувки на відповідному трубопроводі контролюється постійно.

Метою магістерської роботи є удосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу.

Для досягнення мети магістерської роботи необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити існуючі схеми автоматизації водовідливних установок, а також вивчити види та типи водовідливних установок.

- розглянути апаратуру автоматизації шахтного водовідливу ААВ.

До складу апаратури автоматизації шахтного водовідливу ААВ входять: вибухозахищене джерело живлення, пульт оператора водовідливу іскробезпечний, датчик струму, датчик температури підшипників, датчик температури статора, датчик тиску та датчик рівня.

Пульт оператора оснащений промисловим програмованим контролером ППК, блоком введення та виведення БВВ, кнопками керування КК та інформаційними індикаторами І.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ШАХТНОГО ВОДОВІДЛИВУ

1.1 Огляд існуючої апаратури автоматизації шахтних водовідливних установок

Сьогодні існує безліч автоматизованої апаратури, яка охоплює усі технологічні схеми шахтного водовідливу. У гірській промисловості найчастіше використовується апаратура автоматизації одиночного насоса АВО-3. Така апаратура застосовується для автоматичного керування шахтної водовідливної установкою, яка має один насос з асинхронним електродвигуном потужністю до 120 кВт. Широкого розповсюдження набуло використання комплексу автоматизації прохідницького водовідливу АВ-7 для автоматичного керування прохідницькими підвісними водовідливними установками (з одного або двох насосів з електродвигунами потужністю до 120 кВт).

Апаратура автоматизації низьковольтного водовідливу АВН-1М використовується для автоматичного керування водовідливними установками з трьома насосами [2].

Уніфікована апаратура УАВ, вибухобезпечна апаратура ВАВ з високовольтними та низьковольтними асинхронними електродвигунами застосовується для автоматичного керування водовідливними установками рудних та вугільних шахт.

Найбільш уживаним на практиці варіантом гідравлічної схеми автоматизованих водовідливних установок є схема, яка зображена на рисунку 1.1. За допомогою допоміжного зануреного заливного насоса здійснюється заливка насосів за цією схемою.

На практиці доведено, що найбільш досконалою є уніфікована апаратура УАВ та ВАВ.

Апаратура УАВ призначена для автоматичного керування водовідливними установками шахт гірничорудної та вугільної промисловості. Вона може управляти водовідливними установками з числом насосних агрегатів до шістнадцяти, з високовольтними та низьковольтними асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором. Апаратура УАВ чітко відповідає вимогам автоматизації для водовідливних установок, що відносяться до II та III груп [3].

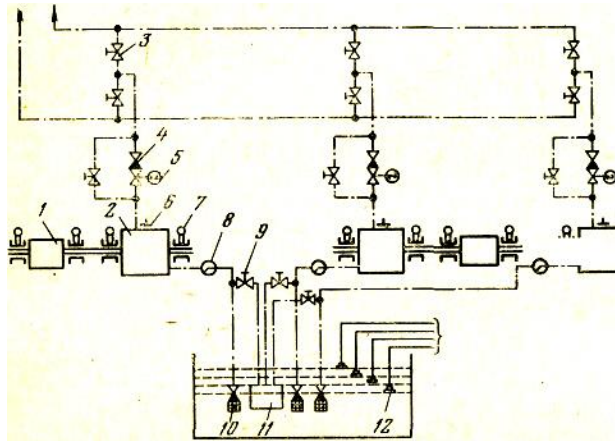


Рисунок 1.1 – Гідравлічна схема автоматизованої гідравлічної установки
 1 – електродвигун головного насоса; 2 – головний насос; 3 – засувка з ручним приводом; 4 – зворотний клапан; 5 – електропривод засувки; 6 – реле тиску; 7 – датчики контролю температури підшипників насоса і електродвигуна; 8 - реле продуктивності; 9 – річний вентиль; 10 – зворотний всмоктуючий клапан; 11 – допоміжний заливний насос; 12 – електродний датчик рівня

Види апаратури. Розглянемо основні види апаратури, які використовуються для автоматичного керування водовідливними установками. До таких видів можна віднести [13]:

– ВАВ для установок, що обладнані насосами (максимальною кількістю до дев'яти) з високовольтними та низьковольтними асинхронними короткозамкненими електродвигунами. Апаратура є вибухозахищеною та може використовуватися в шахтах з великою кількістю газу або пилу.

- АВО-3 для установок, обладнаних одним насосом з короткозамкненим асинхронним електродвигуном до 120 кВт;
- УАВ для установок, обладнаних насосами з високовольтними та низьковольтними асинхронними короткозамкненими електродвигунами. Уніфікована апаратура УАВ може укомплектовуватися для автоматизації 16 насосів;
- АВН-М для установок з трьома насосами з низьковольтним та асинхронними короткозамкненими електродвигунами.

Можливості апаратури ВАВ-1М [23].

Розглянемо детально можливості апаратури ВАВ-1М. До таких можливостей відносяться, в першу чергу, автоматичне, місцеве та дистанційне керування роботою насосів. Також, апаратура ВАВ-1М оснащена автоматичною заливкою насоса та заміною насоса, відключеного через несправність резервного насоса. У апаратурі ВАВ-1М насос працює в циклічному режимі, має послідовність запуску та зупинки насосів при паралельній роботі, відбувається заборона запуску насоса при максимальному енергоспоживанні. ВАВ-1М має можливість заборони пуску несправного насоса та обліку часу роботи насосів, відображення сигналів диспетчеру про рівень води, роботі насосів, несправності установки, часу початку та закінчення максимумів енергоспоживання.

До складу комплекту апаратури ВАВ-1М входить:

- 1) блок керування насосами БУН-1М–1шт.;
- 2) табло сигнальне водовідливу СТВ-1М – 1шт.;
- 3) термодатчики ТДЛ-1М – 12 шт.;
- 4) реле продуктивності насоса 1ПН-М – 3шт.;
- 5) реле тиску РДВ-1м; –6 шт.;
- 6) датчик електродний ЕД-1м – 8 шт.;
- 7) блок розв'язки іскробезпечних кіл БРЦ–1шт.;
- 8) насос заливний занурювальний НПЗ – 1шт.;
- 9) привід засувки ПЗ-1М – 3 шт.;

- 10) пускач приводу ПРА – 3 шт.;
- 11) ящик кабельний КЯ.1.1Н-2шт.;
- 12) ящик кабельний ЯРВ.1М–1шт.;
- 13) блок живлення БП-5-12 з уставкою 2,3–1шт.

В залежності від сигналів, що надходять від датчиків рівня ЕД-1М, реле продуктивності РПН- 1М, реле тиску РДВ-1М, датчиків температури ТДЛ-1М та кінцевих вимикачів приводу засувки ПЗ- 1М, апаратура ВАВ-1М призначена для автоматичного керування водовідливними установками шахт.

Опис апаратури ВАВ-1М. Апаратура є системою автоматичного керування водовідливної установкою, схема якої приведена на рисунку 1.2.

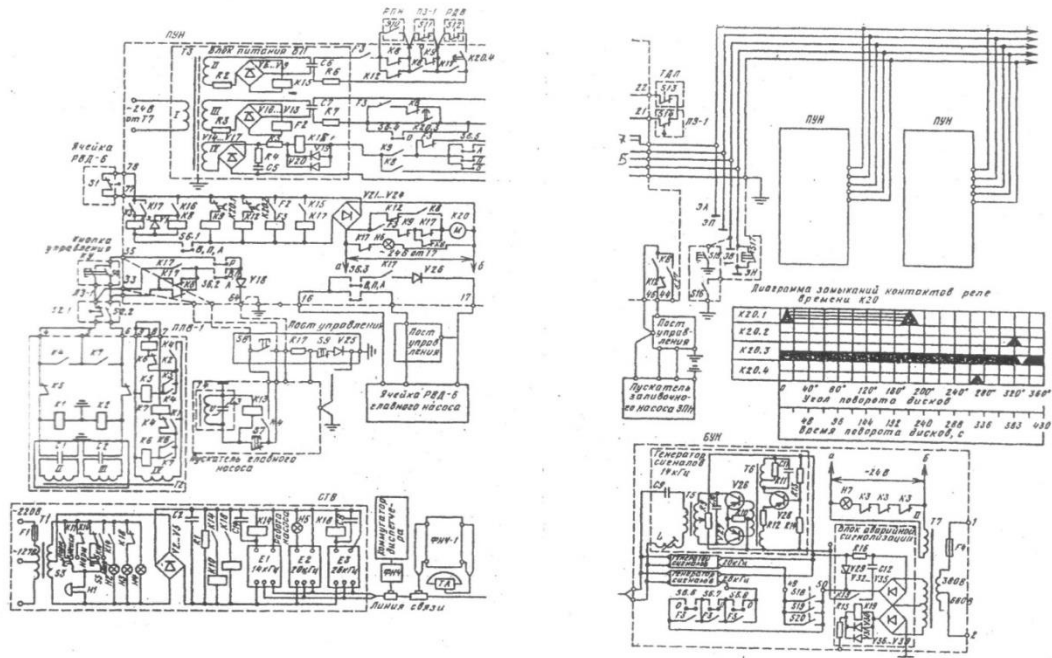


Рисунок 1.2 – Принципова електрична схема ВАВ-1М

Система містить блоки керування насосом 1, на входи яких надходять сигнали з датчиків тиску 2, продуктивності 3, температури підшипників 4, закриття 5 і заклинювання 6 приводів засувок, включення високовольтного осередку 7, а з виходу блоку 1 надходять сигнали на включення заливного насоса 13, головного насоса 15, приводу засувок 14, блок формування імпульсів запуску і зупинки роботи насосів 3, на входи якого поступають сигнали з датчиків нижнього 9, верхнього 10 і аварійного 11 рівнів, блок

прийому і передачі сигналів на входи якого поступають сигнали з датчиків проміжних рівнів 16, а також з датчиків нижнього 9, верхнього 10 і аварійного 11 рівнів, лінійні вузли 17 і 19, з'єднані між собою лінією зв'язку 13, блок передачі і прийому інформації 2, блок подання інформації 21, блок поза пікового керування електродвигунами 22, блок звукової сигналізації 23, блок обліку машинного часу роботи насосів 24, блок програмованого таймера 25, блок формування імпульсів запуску та заборони роботи насосів 26, блок завдання програми 27 «індикатор поточного часу та набору програм» 28, блок ручного керування водовідливної установкою 29, який складається з комутаторів 30, 31, 32 і 33, кнопок 34, 35 і 36, діодів 37 і 38.

Для прийому та відображення інформації про стан водовідливної установки, призначене сигнальне табло водовідливу СТВ-1М, що встановлюється в диспетчерському пункті шахти [2].

Передня панель СТВ-1М оснащена елементами, що генерують диспетчеру інформацію про стан водовідливної установки та дають можливість своєчасного керування насосами.

Інформацію про злагоджену роботу або несправність насосів, про вид несправності надають, для визначення кожного насосу на панелі, світлодіоди. На панелі відображається інформація про відсутність продуктивності, відсутність тиску, перегрів підшипників, заклинювання засувки тощо. Якщо блок поза пікового споживання електроенергії працює не в автоматичному режимі, коли він сам включає водовідливну установку, а в режимі порадника, на панелі є два світлодіоди, що сигналізують про необхідність включення одного або двох насосів водовідливної установки. Для пуску насосів призначені кнопки «Пуск 1» та «Пуск 2». Для динамічної зупинки служить кнопка «Стоп».

Світлодіод сигналізує «немає зв'язку», якщо несправна лінія зв'язку між БУН-1М та СТВ-1М [3].

Окрім світлової індикації також передбачена звукова система сповіщення при аварійному відключенні насосного агрегату. Звукова

індикація є переривчастою високої тональності при аварійному відключенні насосного агрегату, а при аварійному рівні води в водозбірнику – безперервна низької тональності. Звукові сигнали при включених світло діодах, здійснюється за допомогою тумблерів. Кнопка «Перевірено», при натисканні світитися та видає звукові сигнали при перевірці справності світлодіодів та звукових телефонів. На передній панелі СТД-1М встановлені також три лічильника обліку часу роботи кожного з насосів, індикатор поточного часу та клавіатура введення в пам'ять блока ВП, коригування показань індикатора поточного часу [18].

Реле продуктивності насоса РПН-1М. Реле продуктивності складається з двох основних частин корпусу і плати, з'єднаних між собою болтами. При обтіканні прапорця потоком рідини повертається жорстко пов'язаний з ним валик.

Зусилля потоку передає закріплений на валику кронштейн. Пружинка створює протидію та повертає прапорець з магнітом в початкове положення при зникненні потоку. Напруга пружини регулюється гвинтом.

Реле тиску РДВ-1М. Чутливим елементом реле тиску є діафрагма. Реле має дві дискретні ступені регулювання тиску. Це здійснюється за допомогою малого та великого «поршнів», що аналогічно зменшенню або збільшенню діафрагми. Сила тиску стовпа води сприймається діафрагмою і передається через поршень на шток. Шток, в свою чергу, впливає на кронштейн з магнітом. Попередній натяг пружини регулюється гвинтом та необхідний для подолання сил тертя та чіткого відключення.

Датчик електродний типу ЕД-1М. Свинцевий диск зі склянкою, на який нагвинчений кабельний ввід, є електродним датчиком. Контактним з водою елементом є свинцевий диск. Після приєднання кабелю стакан заливається кабельною масою [23].

Схематичний опис роботи системи автоматичного керування.

Гідравлічна схема апаратури ВАВ-1М з заливкою, що оснащена допоміжним занурювальним насосом НЗП та керованими засувками зображена на рисунку 1.3.

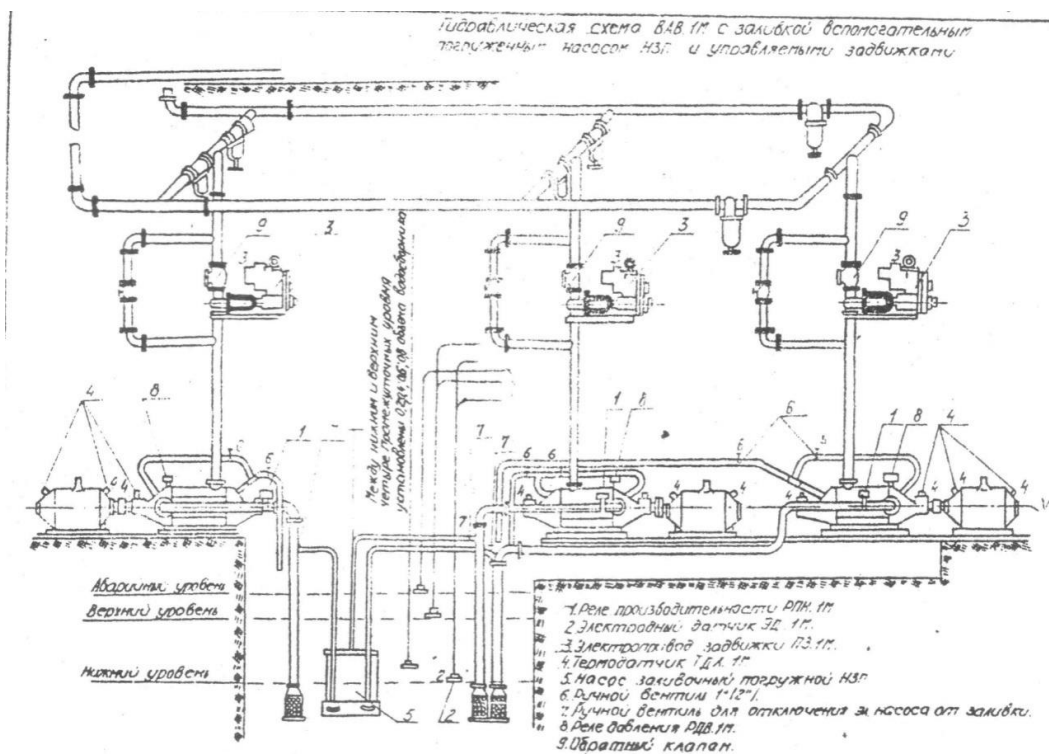


Рисунок 1.3 – Гідравлічна схема системи автоматичного керування водовідливною установкою ВАВ-1М

При досягненні води в водозбірнику датчика верхнього рівня 10 сигнал з нього надходить в блок, формування імпульсів запуску та зупинки роботи насосів 8. У блоці формується сигнал, який надходить в блок керування насосом 1, де формується сигнал на включення в роботу заливного насоса 13. Заливний насос подає воду в головний насос в плинні часу достатнього для створення в ньому необхідного тиску для спрацьовування датчика 2 (цей час регулюється резистором «Таймер» на передній панелі субблока РП) [2].

Після закінчення заданого часу заливки з іншого виходу блоку 8 в блок 1 надходить сигнал, який призводить до фазування сигналів в блоці 1 на включення головного насоса 15; приводу засувки 14, на не відкриття при відсутності продуктивності. При цьому сигнал з першого виходу блоку 8

знімаються. Якщо на включеному насосі не спрацював датчик тиску 2 до моменту видачі сигналу на його включення, то з даного блоку 1 до блоку 8 видає сигнал на включення на інший блок 1, відповідний іншому насосу. з блоку 1 відповідного несправного насоса до блоку прийому та передачі інформації 12 надійде 2 сигналу «Загальною несправності і виду несправності».

Проводиться контроль включення високовольтного осередку, контроль набору продуктивності насосом, контроль заклинювання засувки з моменту видачі сигналу на включення головного насоса блоком 1. Блок 1 видає сигнал загальної аварії в блок 8 для формування сигналу запуску іншого насоса за допомогою іншого блоку 1, після подачі сигналу на включення головного насоса, датчик 7 високовольтного осередку подаватися не буде, в блок 12 з блоку 1 надійде сигнал загальної несправності і виду несправності, звідки вони через лінійні вузли 17, 19 і лінію 18 надійдуть у блок прийому і передачі сигналів 20 [3].

Одночасно блоком 1 знімаються сигнали на включення головного насоса приводу засувки. Надсилається сигнал на її відкриття та закриття. Час регулюється резистором «Уст.Т2» на передній панелі субблока УМ. Якщо через заданий час 60-120 секунд, достатній для набору продуктивності головним насосом не спрацює датчик продуктивності 3, то станеться аварія насоса по продуктивності, що схожа з аварією високовольтного осередку. Аналогічно відбувається вихід насоса на аварію по заклинюванню засувки та перегріву підшипників.

Інформація наявності рівнів 9, 10 і 16 про роботу головних насосів, про аварії із зазначенням їх причин через блок 12, де вона перетворюється з паралельного в послідовний код, лінійні вузли 17,19 двухпроводна лінія зв'язку 18 надходить в блок 20. У цьому блоці інформація з послідовного коду перетворюється в паралельний [13].

З блоку 20 інформація про роботу насосного агрегату надходить в блок машинного часу 24 та блок поз пікового керування насосами 22, в блок

звуковий сигналізації 23 – інформація про аварійний рівень і про загальну аварію. У блок 22с блоку 20 надходить інформація про всі рівнях води в водозбірнику і роботі насосів 15. У блоці 24 фіксується час роботи насосів шляхом пуску лічильника за сигналами-дозволами від працюючих насосів.

Сигнал для видачі в блок 1 подається при зниженні води в водозбірнику нижче датчиків нижнього рівня 9 сигнал з нього надходить в блок 3, де з інтервалом в 10 секунд, у блоці 1 формується сигнал включення приводу засувки 14 на закриття за 1,5–2 обороту до повного закриття засувки спрацьовує контакт 5, який розриває ланцюг керування головного насоса 15 і система по закінченню 160 с система повертається в початковий стан. Цей час регулюється від 0 до 300 с резистором на передній панелі субблоку УМ. У разі не відключення з будь-яких причин високовольтного осередку, блоком 1 видається сигнал загальної аварії. Осередку ці сигнали надходять на СТВ-1м та диспетчер вживає заходів по відключенню високовольтної осередки.

При необхідності пуск насосів можна було здійснити з блоку ручного керування 29 шляхом переключення перемикача 33 (при необхідності і 32) в положення «Ручне» і натисканні кнопки «Пуск 1» «3» (при необхідності і 35). У блок 10 надходить сигнал «Пуск 1» («Пуск 2»), який через лінійні вузли 17,19 і лінію зв'язку 18 і блок 12 надходить в блок 8, де формується сигнал аналогічний сигналу від датчика верхнього рівня [23].

Шляхом натискання кнопки 36 «Стоп» відбувається дистанційна зупинка роботи насосів з блоку 29. При цьому сигнал з блоку 29 через діод 38 надходить в блок 20 і через 17,19 і 18 в блок 12, з блоку 12 сигнал надходить до блоку 8, де формується сигнал, аналогічний сигналу від датчика нижнього рівня.

Режим позапікового керування. Розглянемо детально принцип роботи системи в режимі позапікового керування електродвигуном [3].

За допомогою блоку завдання програми 27 відбувається програмування часу позапікового включення та заборона роботи насосної установки. З цього блоку програма вводиться в пам'ять програмованого таймера 25.

Таймер – це однокристалний програмований пристрій, який записує та зберігає 16-цять тимчасових програм з дискретністю 1 хв. Для забезпечення протягом однієї доби 4-х сигналів позапікового включення та 4-х сигналів «заборони» роботи насосної установки цього об'єму пам'яті вистачає.

За допомогою індикатора часу та набору програми 28, відбувається візуальний контроль введеної програми. Після завдання програми індикатор часу використовується у якості поточного астрономічного часу. У програмований час сукупність сигналів з виходу програмованого таймера 25 надходить на вхід блоку формування імпульсу запуску і заборони роботи насосів 26 і на його виході формується імпульс запуску. Цей сигнал надходить на вхід блоку позапікового споживання електроенергії 22, який вступає в роботу. Сигнал аналізує стан датчиків проміжних рівнів 16 відповідно до часу, що залишився до початку часу максимуму споживання електроенергії. У разі потреби видає сигнал «Пуск 1», якого через комутатор 33, блоку ручного управління насосною установкою 29 проходить в блок передачі і прийому сигналів і далі в блок 8, аналогічно описаному вище. Формування сигналу «заборона» роботи насосів здійснюється за програмою, закладеною в 25, аналогічно сигналу імпульсу запуску. На вхід блоку ручного керування насосною установкою 29, проходить сигнал «заборона» роботи насосів, ручний і автоматичний, та виробляють дії аналогічні сигналу «Стоп» [2].

Блок керування насосом. Субблок УМ в апаратурі ВАВ-1М виконує функції блоку керування насосом. Відповідно до кількості керованих насосів можна виокремити в апаратурі три субблока. Функції блоку 8 виконують субблоки РН, РП, ПФ. Функції лінійного вузла 17 та блоку 12 виконують субблоки КУ і КІ. Субблоком ВВ здійснюється узгодження вхідних сигналів від датчиків і вихідних сигналів на виконавчі механізми за рівнем напруги з сигналами перерахованих блоків. Таким чином, електрична принципова схема апарату БУН-1М складається з усіх субблоків, що були перераховані вище. Апарат БУН-1М встановлюється в шахтах безпосередньо у

водовідливній установці. Функції лінійного вузла 19 виконує субблок ЛВ, блоку 29–субблок ПУ і два субблока ПІ, блоку 22– субблок ВП, блоку 25 і блоку 26 – субблок УВ. Функціонально блоку 23 та 24 – субблок УВ та передня панель. На передній панелі встановлені лічильники часу роботи насосів, а також телефони для видачі звукових сигналів. До складу передньої панелі функціонально включається блок подання інформації 21, блок завдання програми 26, індикатор поточного часу та набору програм 28, блок ручного керування водовідливної установкою 29 [18].

Отже, електрична принципова схема сигнального табло водовідливу СТВ-1м складається з перерахованих вище субблоків ПІ, ПУ, ЛВ, ВП, УВ, передньої панелі, а також ж до його складу входить субблок живлення СП та субблок виведення інформації ВІ. Електрична принципова схема сигнального табло водовідливу СТВ-1м встановлюється в диспетчерській шахти. Лінія зв'язку Л8 є вільною парою телефонного кабелю, що об'єднують ПУ та КП. Лінія зв'язку Л8 забезпечує зв'язок між БУН-1М та СТВ-1м з максимальною тривалістю передачі 10 км.

Система з тимчасовим поділом елементів сигналу та синхронізацією з шахтою призначена для максимально оперативної передачі інформації. Повідомлення передаються в чітко заданій послідовності, тобто, можна стверджувати, що метод передачі є циклічний. Один цикл передачі триває 1 секунду та складається з 64 тактів (від 0 до 63-го). Кожен такт триває 15 мс. До такого такту входить два напівперіода, що відповідають позитивному та негативному імпульсам двомірного сигналу [23].

1.2 Способи заливки насосів при автоматизації водовідливу

Сьогодні широкого застосування у гірничодобувній промисловості знайшли відцентрові насоси, що використовуються для транспортування рідин шляхом перетворення кінетичної енергії обертання в гідродинамічну енергію потоку рідини. Відцентровий насос, по суті, це лопатевий насос.

Відцентрові насоси перед пуском необхідно заливати. Правильно обраний спосіб заливки насосу це запорука злагодженої та безвідмовної роботи автоматизованих насосних установок [2].

Розглянемо детально способи заливки насосів. На способи заливки насосів в більшій мірі впливають гідрогеологічні умови, а також тип насосу.

Таким чином, виокремимо наступні способи заливки насосів: розміщенням насосів нижче рівня води в водозбірнику (з негативною висотою всмоктування), з бакових акумуляторів, допоміжними зануреними або не зануреними насосами, сифонним способом та з напірного трубопроводу [3].

Баковий акумулятор БАВ доречний для насосів з максимальною висотою всмоктування 5 м. Максимальна границя ємності підвідного трубопроводу не повинна перевищувати 80 л. Для заливки відцентрових насосів перекачувального водовідливу, а також для заливки насосів малої та середньої продуктивності дільничного і головного водовідливів використовують бакові акумулятори.

Візуально схема заливки насоса за допомогою бакового акумулятора зображена на рисунку 1.4 показана. При запуску насосу вода з бакового акумулятора, що знаходиться в ньому, з повітрям з трубопроводу підвідного 4, надходить в насос 2. Вода переміщується за допомогою дроселя. У бачку акумулятора виникає розрідження, тому вода з водозбірника 3 заповнює підвідний трубопровід. У бачковому акумуляторі залишається вода у разі зупинки насоса [18].

На рис 1.4 видно, що заливають насос з напірного трубопроводу за допомогою трубки, на якій встановлено керований вентиль 2, який призначений для дистанційного відкривання або перекривання трубки. Ця трубка призначена для з'єднання напірного та підвідного трубопроводів.

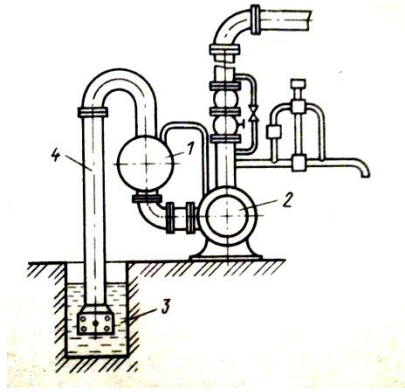


Рисунок 1.4 – Заливка насоса за допомогою бакового акумулятора

Вентиль необхідний для заливки насосів при тиску в напірному трубопроводі до 3 МПа у схемах автоматизації водовідливних установок. Також, він виконує функцію пускового пристрою для видалення водяної та повітряної сумішей при заливці насосів баковими акумуляторами. З огляду на те, що спосіб заливки з напірних трубопроводів є досить ненадійним, він не набув масового використання у гірничодобувній промисловості [23].

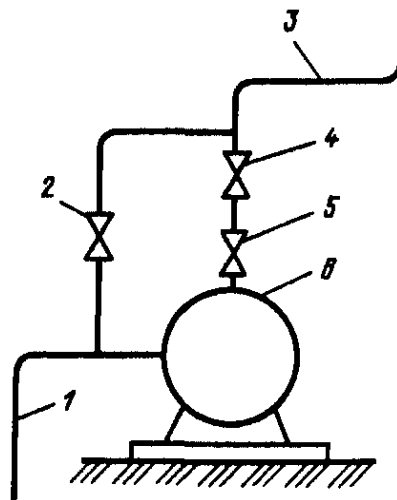


Рисунок 1.5 – Схема заливки насоса з напірного трубопроводу

Сучасною успішною практикою є заливка насосів головних водовідливних установок за допомогою занурених насосів. Такі насоси розміщуються безпосередньо у водозбірнику.

Одночасну заливку трьох насосів головного водовідливу здатен забезпечити відцентровий заливний насос з вертикальним приводним валом

та одним робочим колесом. На великих глибинах у шахтах є сенс використовувати бустер-насосні агрегати, які подають воду в головний насос під час активних розробок рудних та вугільних родовищ. У якості бустер-насосу можна використовувати одноступінчастий вертикальний насос ВП-340 з подачею 340 м³/год та тиском 0,23 МПа, що автономно підкачується.

1.3 Засоби технологічного контролю і керування автоматизованих водовідливів

Розглянемо засоби автоматичного керування та контролю водовідливних установок. До таких засобів можна віднести реле рівня, продуктивності, температури та контролю заливки насосів по тиску.

Реле рівня можуть бути пневматичні, поплавкові та електродні. Температурні реле муть бути різними, але основними є біметалеві, напівпровідникові, термометричні, з легкоплавким сплавом тощо. Реле продуктивності виокремлюють мембранні, поршневі та прапорцеві. Поршневими та мембранними можуть бути реле контролю заливки насосів по тиску [2].

Електродні датчики ЕД опору контролюють рівень води в водозбірниках. Електродний датчик зображений на рисунку 1.6 та являє собою сталевий диск 3 з стаканом 5 і свинцевою обкладкою 4 для захисту диска від корозії. На стакан нагвинчується кабельний ввід 1. Елементом, що контактує з водою є диск.

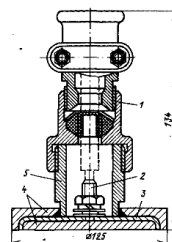


Рисунок 1.6– Електродний датчик ЕД

Наступним кроком є приєднання жили кабелю до контактної шпильки. Це призводить до того, що стакан заливається кабельною масою. Електродний датчик підвішують на кабелі на тому рівні води, який необхідний для включення або відключення насоса [3].

З різними схемами пристроїв контролю рівня електродні датчики працюють сумісно. Ланцюги контролю рівня згідно вимог безпеки мають бути іскробезпечними. Напруга на обмотці виконавчого реле не є сталою. Вона змінюється стрибкоподібно, в залежності від наступних величин: опір – електрод – рідина – «земля». Таким чином забезпечується релейність характеристик. Слід зазначити, що схеми контролю рівня, що побудовані з використанням транзисторних та тиристорних підсилювачів є найбільш надійними та безперебійними. До надійних схем контролю рівня також можна віднести реле на герконах [18].

Струменеві реле типу прапорця РПН та РПФВ-1К доречним буде застосовувати для контролю продуктивності насосів в схемах автоматизації водовідливних установок. Слід зазначити, що ці реле нескладні за конструкцією та досить прості у налагодженні. На роботу струменевих реле типу прапорця РПН та РПФВ-1К майже не впливають забруднені рудні води. Отже, приходимо до висновку, що такі реле заслуговують активного використання в гірській промисловості [23].

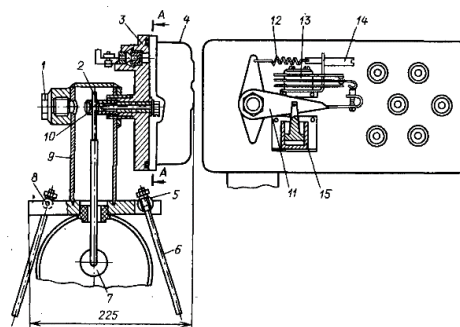


Рисунок 1.7 – Реле продуктивності РПФВ-1К

На рисунку 1.7 схематично зображене реле продуктивності РЛФВ-1К. До складу цього реле входить корпус 9 та плати 3. У верхній частині корпусу є два отвори: один для введення валика 2, другий – заглушений пробкою 1, для ключа під спеціальну гайку 10, що кріпить шток з гумовим прапорцем 7. Плита з двома вушками для поворотних валиків 5, за допомогою яких шпильками 6, 8 реле зміцнюється на трубопроводі є нижньою частиною корпусу. Кришка 4 закриває робочу камеру реле, де розташована контактна група 13. При впливі потоку рідини на прапорець 7 поворотно рухається жорстко пов'язаний з ним валик 2 та важіль 11, що перемикає контактну групу 13. Налаштувати реле на спрацьовування при певній швидкості потоку рідини можна шляхом зміни попереднього натягу пружини 12 за допомогою гвинта 14. Відбудеться замикання або розімкнення електричних ланцюгів, при зниженні швидкості рідини в трубопроводі. Це відбудеться через те, що прапорець під дією пружини повернеться в початкове положення. Демпфер 15 призначений для зменшення швидкості коливань рухомої системи реле.

На рисунку 1.8 схематично зображене реле тиску РДВ, що використовується для контролю заливки насосів. Діафрагма 6 є чутливим елементом реле тиску. Реле оснащено двома регулюваннями спрацьовування по тиску. Вибір ступені здійснюється при введенні в дію за допомогою гвинта 4 малого поршня 7 або малого та великого 5 поршнів разом, що відповідає зменшенню або збільшенню робочої площі діафрагми. Через поршень на шток 9, який впливає на мікроперемикач 1, передається сила тиску води, що сприймається чутливою діафрагмою [2].

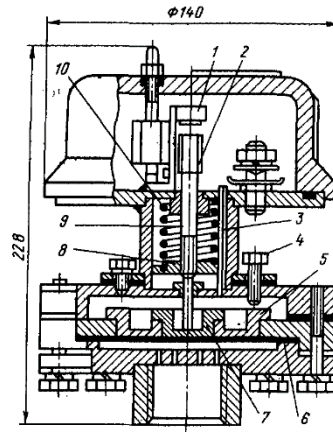


Рисунок 1.8 – Реле контролю тиску РДВ

Зазначимо, що для чіткого спрацьовування реле, яке регулюється штоком 9, у верхній частині якого є ділянка шестигранного перетину, необхідний попередній натяг пружини 10. Шток вкручують в спеціальну гайку 8 під час регулювання. Гайка 8 фіксується шпилькою 3. Зазор між штоком та мікроперемикачем встановлюється регулювальною гайкою 2.

Розглянемо рисунок 1.9, де схематично наведені термодатчики ТДЛ-2. Такі термодатчики необхідні для контролю температури підшипників в насосних установках. У цьому процесі використовується сплав, температура плавлення якого $70\text{--}72\text{ }^{\circ}\text{C}$, для безперервного контролю температури підшипників. Коли підшипник перегрівається, то сплав 5 в наконечнику датчика розплавляється, що призводить до звільнення валика 4. Валик 4 під дією пружини 3 повертається та перемикає контактну систему 2. Повернути його у вихідне робоче можливо лише вручну, шляхом повернення рукоятки, після кожного спрацьовування датчика [3].

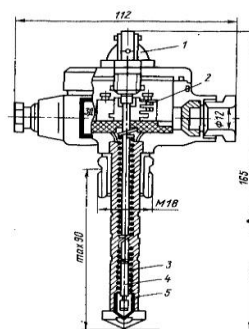


Рисунок 1.9 – Термодатчик ТДЛ-2

Моторне реле часу або моторний комутатор це пристрій, який задає програму роботи автоматизованої водовідливної установки. Моторний комутатор створює потрібну затримку між окремими вузлами автоматичних пристроїв для забезпечення певної послідовності роботи елементів схеми. Моторний комутатор складається з зубчастої пари, синхронного двигуна типу СД-2, та десяти контактних дисків, які впливають на контактні групи. Такі диски набираються на вісі. При обертанні вони перемикають контакти.

1.4 Вимоги до автоматизації водовідливу

В залежності від призначення існують вимоги до автоматизації водовідливних установок. Водовідливи в залежності від технології вуглевидобутку бувають дільничні, головні та допоміжні. Допоміжні, в свою чергу, розділяють на зумпфові, прохідницькі та перекатні. Зумпфові допоміжні водовідливи обладнують одним або двома насосами з подачею, що не перевищує $50 \text{ м}^3/\text{год}$, з низьковольтним асинхронним двигуном. Дільничні оснащують двома або трьома агрегатами з насосами подачею $100 - 150 \text{ м}^3/\text{год}$ та низьковольтними асинхронними двигунами потужністю до 120 кВт . Головні водовідливи оснащені трьома та більше агрегатами з насосами подачею, зазвичай перевищує $150 \text{ м}^3/\text{год}$ з високовольтними електродвигунами [18]. Схеми автоматизації та апаратура усіх видів допоміжних установок мають забезпечувати ряд функцій, серед яких:

- 1) автоматичне та ручне керування;
- 2) автоматичну послідовність роботи насосних агрегатів;
- 3) сигналізацію про стан установки та повідомлення про аварійний рівень води в водозбірнику;
- 4) захист гідравлічного характеру від різкого зниження або втрати подачі насоса, що наразі працює;
- 5) автоматичний пуск або зупинка насоса (насосів) в залежності від рівня води в водозбірнику;

- 6) автоматичну заливку насоса (насосів) перед пуском;
- 7) теплових захист від перегріву підшипників;
- 8) електричний захист.

Схеми автоматизації та апаратура дільничних та головних водовідливів мають забезпечувати усе вище перелічене, та додатково забезпечувати функції, серед яких:

- 1) паралельно включати в роботу декілька агрегатів одночасно;
- 2) дистанційно керувати від диспетчера;
- 3) автоматично відключати насос, який включив диспетчер при досягненні водою нижнього рівня;
- 4) можливість дистанційно відключити насос при рівні води нижче верхнього;
- 5) чітке дозування заливки за часом;
- 6) можливість блокування, що виключають пуск незалитого насоса;
- 7) можливість включення електроприводу засувки до пуску головного насоса, що, в свою чергу, зупиняє його при відкритій засувці;
- 8) дистанційний пуск насоса при відсутності верхнього рівня води в водозбірнику;
- 9) можливість повторного пуску, що відключить електричне до усунення причин зупинки;
- 10) автоматичне включення резервних насосних агрегатів при виході з ладу працюючих;
- 11) автоматичне керування засувками на нагнітальному ставці труб;
- 12) світлову сигналізацію на диспетчерський пункт про наявність живлення в ланцюгах керування та роботі насосних агрегатів;
- 13) звукову та світлову сигналізацію про аварійне відключення будь-якого агрегату, аварійний рівень води в водозбірниках, несправності сигнальних ланцюгів;
- 14) звукову та світлову сигналізацію в камеру водовідливу про наявність живлення в ланцюгах керування та аварійному відключенні насоса.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНИМИ СИСТЕМАМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ШАХТНОГО ВОДОВІДЛИВУ

2.1 Технологічний процес водовідливу як об'єкт автоматизації

Технологічна схема автоматизованої головної насосної установки водовідливу приведена на рисунку 2.1.

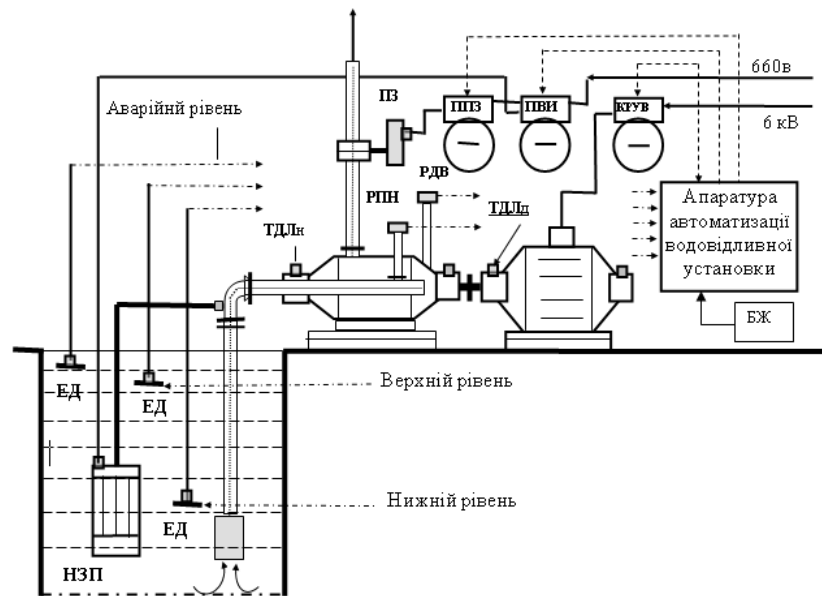


Рисунок 2.1– Технологічна схема автоматизованої насосної установки водовідливу

На рисунку позначено [23]:

- 1) НЗП – занурений заливний насос;
- 2) ЕД – електродні датчики рівня води в водозбірнику;
- 3) ТДЛ – датчики температури підшипників;
- 4) РПН – реле подачі;
- 5) РДВ – реле тиску для контролю заливки водою насоса перед пуском;
- 6) ПЗ – привід засувки;
- 7) ППЗ – пускач приводу засувки;
- 8) ПВІ – пускачі приводу заливного насоса;

9) КРУВ – високовольтний осередок приводу насосу;

10) БЖ – блок живлення.

Робочий режим насоса графічно визначається точкою (точка 1 на рис. 2.2) на перетину робочих характеристик насоса і трубопровідної мережі.

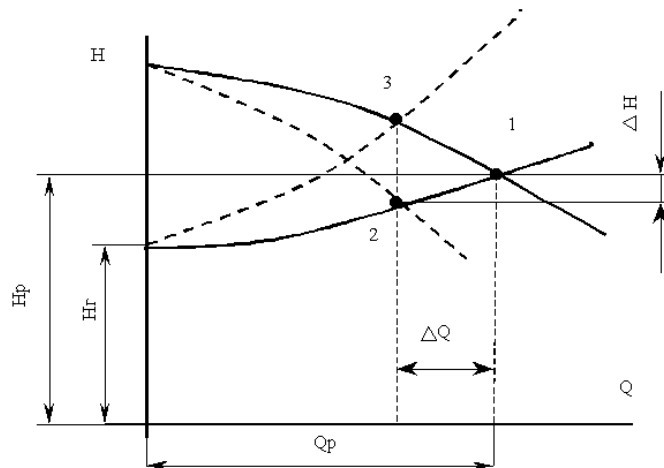


Рисунок 2.2 – Робочі режими насосної установки водовідливу

Режимам роботи головної насосної установки водовідливу, як наступний технологічний процес: пуск – робочий режим – зупинка характеризується відкачування води на поверхню шахти.

Етап пуску починається при досягненні водою в водозбірнику верхнього допустимого рівня. Водовідливну установку необхідно ретельно підготувати до роботи. Обов'язковою є заливка усмоктувального трубопроводу та насоса водою перед включенням насосного агрегату. Жорсткого контролю потребує закінчення процесу заливки насоса. Після заливки включається насосний агрегат на закриту засувку на напірному трубопроводі, яка відкривається після набору насосом номінальних оборотів. Насос утворює оптимальний тиск води в нагнітальному трубопроводі, забезпечує необхідну подачу та режим пуску завершується. Така ситуація приманна нормальному класичному пуску.

Для забезпечення загального всеохоплюючого контролю процесу відкачування води у робочому режимі необхідно контролювати подачу

насоса, рівень води в водозбірнику, коефіцієнт корисної дії водовідливної установки та витрати електроенергії приводним електродвигуном.

Рівень води буде поступово знижуватися до нижнього рівня, якщо процес відкачування йде нормально. При досягненні нижнього рівня потрібно зачинити та відключити насосний агрегат, а також закрити засувку на нагнітаючому трубопроводі.

Якщо приплив води до водозбірника перевищив нормальний, це означає що рівень води підвищується та досягає аварійного рівня, а це, в свою чергу, означає, що подачі одного насоса недостатньо. У такому разі паралельно в роботу долучають резервний насосний агрегат.

Про можливість виникнення аварійної ситуації сигналізує нам будь-яке відхилення від нормального режиму роботи водовідливної установки.

Наприклад, обставинами аварійної ситуації можуть бути перегрів підшипників насоса або приводного електродвигуна, прорив трубопроводу, зниження продуктивності насоса або досягнення водою аварійного рівня в водозбірнику [16].

Якщо виникає одна із вище перелічених аварійних ситуацій, то насосний агрегат повинен відключитися, а в роботу включиться резервний насос.

В процесі пуску також може виникнути аварійна ситуація. Якщо після включення приводного електродвигуна насос не розвиває номінального тиску і подачі, то засувка закривається і електродвигун відключається від мережі, після чого проводиться пуск другого насосного агрегату.

Через мінливість робочих параметрів функціонування водовідливної установки, а саме подачі, напору, коефіцієнту корисної дії тощо, в процесі експлуатації виникає ряд особливостей. До таких можна віднести, наприклад, складні умови експлуатації особливо при перекачуванні кислих та забруднених вод. У водозбірнику передбачається освітлення води від твердих суспендованих частинок, але на практиці по факту, більше 40% твердої суспензії видаляється насосами, що призводить до їх швидкого зносу.

Досліджено, що ресурс машинного часу насосів становить в середньому 500...700 годин. Згідно з паспортними даними на чистій воді вони можуть працювати до 6000 годин. В процесі експлуатації поступово знижується і пропускна здатність трубопроводу, через забруднені води. Швидкий знос насосів призводить до перевитрати електроенергії на водовідливі. Це відбувається в результаті спільного впливу факторів, таких як подача, напір та коефіцієнт корисної дії [17].

Виявлено, що потужність приводного електродвигуна може досягати 1600 кВт, отже він є великим електроспоживачем. Тому потрібен контроль за витратою електроенергії приводним електродвигуном насоса для керування електропостачанням шахти.

Можливий кавітаційний режим роботи насосів.

Відповідно до вище викладеного апаратура автоматизації насосної станції водовідливу повинна забезпечувати:

- 1) автоматичне керування насосами за рівнем води в водозбірнику;
- 2) автоматичну заливку насосів;
- 3) автоматичне включення паралельно працюючого насосу резервного при досягненні аварійного рівня води в водозбірнику;
- 4) автоматичну заміну насоса, відключеного через несправність, резервним насосом;
- 5) заборона пуску насоса на час максимуму енергоспоживання;
- 6) облік часу роботи насосів;
- 7) роботу насоса з керованими засувками і без них;
8. Наступні види захистів:
 - 1) від кавітації;
 - 2) від перегріву підшипників;
 - 3) гідравлічний захист по витраті води;
 - 4) заклинювання засувки;
 - 5) неможливість повторного пуску несправного насосного агрегату без втручання обслуговуючого персоналу;

9. Подачу звукової та світлової сигналізації про параметри насосного агрегату (про рівень води, витрати електроенергії, роботі насосів, несправності установки, часу початку і закінчення максимумів енергоспоживання) та режимах роботи насоса.

2.2 Вибір двигуна

Потужність двигуна вибираємо відповідно до виразу:

$$P_{ED} = \frac{g \cdot Q \cdot H}{\eta_H \cdot 3600}; \quad (2.1)$$

де: $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$Q = 6 \text{ м}^3/\text{год}$ – необхідна витрата системи;

$H = 1800 \text{ м}$ – необхідний тиск;

$\eta_H = 0,795$ – ККД насоса.

$$P_{ED} = \frac{9,81 \cdot 6 \cdot 1800}{0,795 \cdot 3600} = 37 \text{ кВт.}$$

Відповідно до ISO 5199 забезпечується запас потужності двигуна. Тому потужність двигуна має бути не менше 40 кВт. Паспортні дані двигуна ПЕД 40-103 наведено у таблиці 2.1. Режим роботи електродвигуна тривалий – S1.

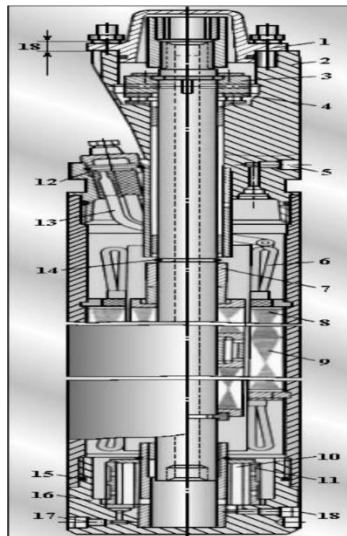


Рисунок 2.3– Електродвигун односекційний

Таблиця 2.1 – Паспортні дані двигуна ПЕД 40-103

Найменування	Значення
Тип	ПЕД 40-103
Номінальна потужність, кВт	40
Номінальна напруга, В	1000
Номінальна фазна напруга, В	578
Кратність мінімального моменту	0,9
Номінальна частота обертання, об/хв.	2745
ККД, %	72
Коефіцієнт потужності	0,78
Кратність пускового моменту	2,5
Кратність максимального моменту	3,2
Кратність пускового струму	7,2
Коефіцієнт завантаження двигуна	0,75

2.3 Вибір перетворювача частоти

Плавний контрольований запуск двигуна, при обмеженні пускових струмів, при постійній швидкості, дають можливість регуляторам частоти обертання. Через зменшення електричного навантаження на кабелі та обмотку при запуску електродвигуна, підвищується надійність УЕЦН. Можливість підтримувати динамічний рівень у свердловині дає система телеметрії [19].

Можливість в широких межах змінювати добувні можливості обладнання установок ЕЦН, дає регулювання частоти обертання валу відцентрового насоса. Наприклад, подача насоса пропорційна частоті обертання валу, напір насоса залежить від частоти обертання у квадраті, потужність – у кубі ($Q=f(n)$, $H = f(n^2)$, $N = f(n^3)$). Регулятор частоти

обертання дозволяє забезпечити поступовий контрольований плавний пуск асинхронного ПЕД при цьому обмежуючи пусковий струм.

Зміна частоти струму, що живить двигун, є першим методом регулювання частот обертання ротора УЕЦН.

При виборі перетворювача частоти необхідно врахувати ряд особливостей, обумовлених фізичними параметрами.

Зауважимо, що необхідно керуватися параметрами двигуна та свердловини, при виборі станції керування. Від потужності двигуна та глибини його розташування у свердловині, залежить потужність перетворювача частоти. Зазвичай вибирають на типорозмір вище, ніж потужність двигуна, для номінальної роботи перетворювача частоти. Не гарантовано, що привід запуститься та нормально працюватиме, якщо перетворювач частоти поставити на двигун більшої потужності, ніж сам перетворювач. Для роботи приводу поза критичних параметрів, кожен перетворювач частоти має свій внутрішній захист. Вихідний струм не повинен перевищувати допустимого значення, адже це вважається критичним. Перетворювач частоти, в принципі, може запустити двигун, але він не відомо, чи буде він працювати стабільно та не вийде з ладу взагалі.

Враховавши вище наведені особливості і те, що ПЧ для живлення обмотки статора АД КЗ вибирається з умов:

$$I_{н.пч} \geq I_{н.дв.}, U_{н.пч} \geq U_{н.дв.};$$

то вибираємо перетворювач частоти E.NEXT e.f-drive.45 з такими паспортними даними:

Характеристика E.NEXT e.f-drive.45

Номінальна напруга живлення.....380 В, 50±1 Гц

Діапазон відхилення живильного

Напруги від номінального.....25 %

Номінальний струм первинного силового ланцюга.....не більше 63 А

Номінальна потужність перетворювача.....120 кВт

Потужність електродвигуна, що підключається.....	75 кВт
Температурний діапазон.....	-60 °С...+40 °С
Ступінь захисту.....	IP43
Схема керування.....	контролер «Електон»
Діапазон зміни частоти.....	0,5...60 Гц
Габаритні розміри.....	1735×700×600
Маса.....	160 кг

Схема підключення ПЧ представлено на рисунку 2.4.

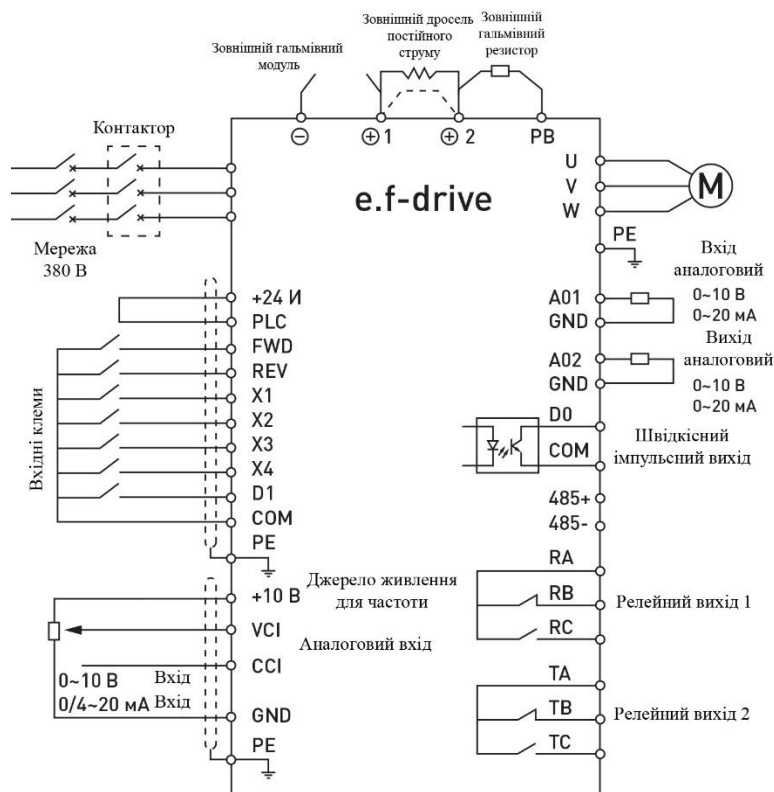


Рисунок 2.4 – Схема підключення E.NEXT e.f-drive.45

Перетворювач E.NEXT e.f-drive.45 служить для регулювання частоти обертання асинхронного трьох-фазного електродвигуна з коротко-замкненим ротором.

Визначено, що система керування має такі режими:

а) зміна частоти обертання вручну за допомогою вбудованого пульта (ε дистанційно за допомогою пульта керування);

- б) автозапуск після втрати живлення;
- в) розгін із заданим темпом забезпечуючи плавний пуск;
- г) розгін електродвигуна за граничним (заданим) значенням струму фаз;
- д) плавна зупинка електродвигуна;
- е) зміна чергування фаз на виході (реверс);
- ж) зупинка електродвигуна за граничним значенням напруги у ланці постійного струму
- з) автоматична підтримка значень технологічних властивостей;
- і) компенсацію коливань ковзання при роботі АД на механізм великими моментами інерції;
- к) режим автоматичного керування технологічним параметром залежно від часу доби;
- л) робота під керуванням каналом RS-232.

2.4 Визначення параметрів схеми асинхронного заміщення двигуна за каталожними даними

Математична модель, що представляється різними схемами заміщення, необхідна для розрахунку електромеханічних та механічних характеристик асинхронного двигуна. Найбільш простою та зручною для розрахунків асинхронного двигуна є Т-подібна схема заміщення математичної моделі [21].

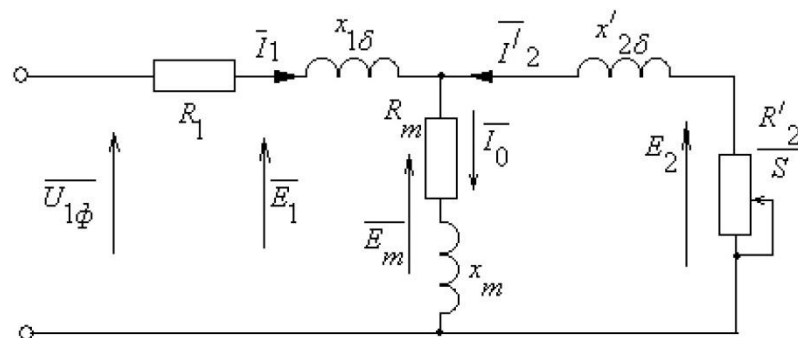


Рисунок 2.5 – Схема заміщення асинхронного двигуна

Основні рівняння асинхронного двигуна, що відповідають даній схемі:

$$\bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0; \quad (2.2)$$

$$\bar{E}_m + j \cdot X_2' \cdot \bar{I}_2' + R_2' \cdot \bar{I}_2' / s = 0; \quad (2.3)$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_0 = 0; \quad (2.4)$$

Векторна діаграма струмів, ЕРС та напруги зображена на рисунку 2.6.

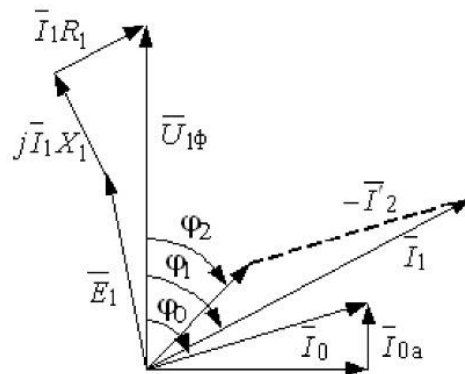


Рисунок 2.6 – Векторна діаграма асинхронної машини

Номінальний струм статора двигуна [11]:

$$I_{1н} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \phi_n \cdot \eta_n}; \quad (2.5)$$

$$I_{1н} = \frac{40000}{3 \cdot 578 \cdot 0,78 \cdot 0,72} = 41,076 \text{ A.}$$

Струм статора при частковому завантаженні:

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_n}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \phi_{p_*} \cdot \eta_{n*}}; \quad (2.6)$$

$$I_{11} = \frac{0,75 \cdot 40000}{3 \cdot 378 \cdot 0,772 \cdot 0,72} = 31,118 \text{ A.}$$

Коефіцієнт потужності при частковому завантаженні:

$$\cos \phi_{p_*} = 0,99 \cdot \cos \phi_n; \quad (2.7)$$

$$\cos \phi_{p_*} = 0,99 \cdot 0,78 = 0,772 \text{ o.e.}$$

Визначається з рисунку 2.7.

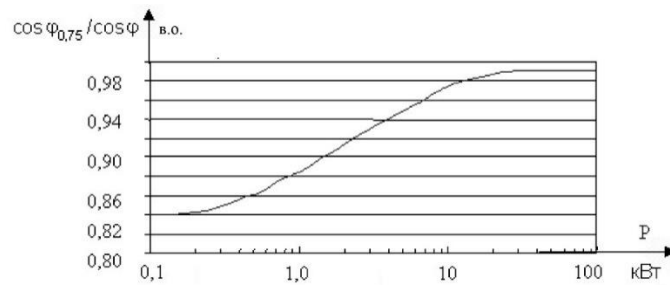


Рисунок 2.7 – Залежність $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_n$ від потужності асинхронного двигуна

Коефіцієнт завантаження двигуна:

$$p_* = \frac{P}{P_n}; \quad (2.8)$$

$$p_* = \frac{30000}{40000} = 0,75.$$

ККД при номінальному навантаженні та навантаженні $p^*=0,75$ практично рівні між собою, тобто [16]:

$$\eta_n \approx \eta_{0,75}; \quad (2.9)$$

Знаходимо струм холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1H} \left(\frac{1-s_H}{1-p_*s_H} \right))^2}{1 - (p_* \cdot \left(\frac{1-s_H}{1+p_*s_H} \right))^2}}; \quad (2.10)$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{31,118^2 - (0,75 \cdot 41,076 \left(\frac{1-0,085}{1-0,75 \cdot 0,085} \right))^2}{1 - (0,75 \cdot \left(\frac{1-0,085}{1+0,75 \cdot 0,085} \right))^2}} = 11,562 \text{ A.}$$

Приймаємо $\beta = 1$.

$$S_k = s_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)}; \quad (2.11)$$

$$S_k = 0,085 \cdot \frac{3,2 + \sqrt{3,2^2 - (1 - 2 \cdot 0,085 \cdot 1 \cdot (3,2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,085 \cdot 1 \cdot (3,2 - 1)} = 0,856.$$

де:

$$\beta = \frac{R_1}{C_1 \cdot R_2}; \quad (2.12)$$

$$\beta = \frac{0,62}{1,02 \cdot 1,589} = 1.$$

Визначимо коефіцієнти [17]:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}}; \quad (2.13)$$

$$C_1 = 1 + \frac{11,562}{2 \cdot 7,2 \cdot 41,076} = 1,02.$$

$$A_1 = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H}; \quad (2.14)$$

$$A_1 = \frac{3 \cdot 578^2 \cdot (1 - 0,085)}{2 \cdot 1,02 \cdot 3,2 \cdot 40000} = 3,514.$$

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k} \right) \cdot C_1}; \quad (2.15)$$

$$R_2' = \frac{3,514}{\left(1 + \frac{1}{0,856} \right) \cdot 1,02} = 1,589 \text{ Ом.}$$

Знаходимо активний опір обмотки ротора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta; \quad (2.16)$$

$$R_1 = 1,02 \cdot 1,589 \cdot 1 = 1,62 \text{ Ом.}$$

Знаходимо γ , яке дасть змогу знайти індукційний опір короткого замикання:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_k^2 - \beta^2}}; \quad (2.17)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{0,856 - 1^2}} = 0,605.$$

Тоді:

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2'; \quad (2.18)$$

$$X_{KH} = 0,605 \cdot 1,02 \cdot 1,589 = 0,98 \text{ Ом.}$$

Знаходимо індуктивний опір роторної обмотки:

$$X_{2H}' = \frac{0,58 \cdot X_{KH}}{C_1}; \quad (2.19)$$

$$X_{2H}' = \frac{0,58 \cdot 0,98}{1,02} = 0,558 \text{ Ом.}$$

Знаходимо індуктивний опір статора:

$$X_{1H} = 0,42 \cdot X_{KH}; \quad (2.20)$$

$$X_{1H} = 0,42 \cdot 0,98 = 0,412 \text{ Ом.}$$

За розрахованими значеннями C_1 , R_2' , R_1 і X_k визначаємо критичне ковзання [19]:

$$S_k = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\pm \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}}; \quad (2.21)$$

$$S_k = \frac{1,02 \cdot 1,589}{\pm \sqrt{1,62^2 + 0,98^2}} = 0,856.$$

Електрорушійну силу для гілки намагнічування E_1 , яка наводиться потоком повітряного зазору в статорній обмотці при номінальному режимі, дорівнює індуктивний опір намагнічування:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1j} \cos \varphi_{1H} - R_1 I_{1H})^2 + (U_{1j} \sin \varphi_{1H} - X_1 I_{1H})^2}; \quad (2.22)$$

$$E_1 = \sqrt{(0,578 \cdot 0,78 - 1,62 \cdot 41,076)^2 + (578 \cdot 0,626 - 0,412 \cdot 41,076)^2} = 516,297 \text{ В.}$$

тоді індуктивний опір намагнічування:

$$X_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0}; \quad (2.23)$$

$$X_{\mu H} = \frac{516,297}{11,562} = 44,654 \text{ Ом.}$$

2.5 Природні механічні та електромеханічні характеристики АД

Розрахуємо та побудуємо природні механічні та електромеханічні характеристики асинхронного двигуна ПЕД 40-103.

Знайдемо синхронну кутову швидкість:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}; \quad (2.24)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314,159.$$

Розрахуємо та побудуємо природну електромеханічну характеристику:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2'(\omega))^2 + I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \phi_2(\omega)}; \quad (2.25)$$

$$\sin \phi_2(\omega) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2}}; \quad (2.26)$$

$$I_2'(s) = \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}; \quad (2.27)$$

За наведеними вище формулами розраховується природна електромеханічна характеристика, наведена на рисунку 2.8.

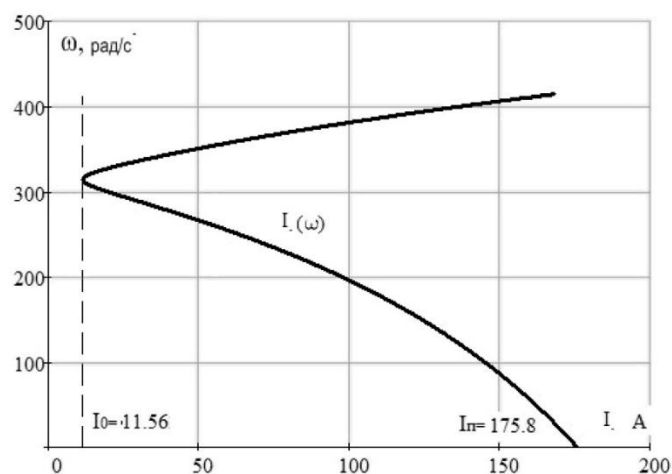


Рисунок 2.8 – Природна механічна характеристика асинхронного двигуна

Розрахуємо та побудуємо природну механічну характеристику за такою формулою [19]:

$$M = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R_2'}{S \cdot \omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}; \quad (2.28)$$

$$\omega = (1 - S) \omega_0; \quad (2.29)$$

За вище наведеними формулами будемо природну механічну характеристику, наведену на рисунку 2.9.

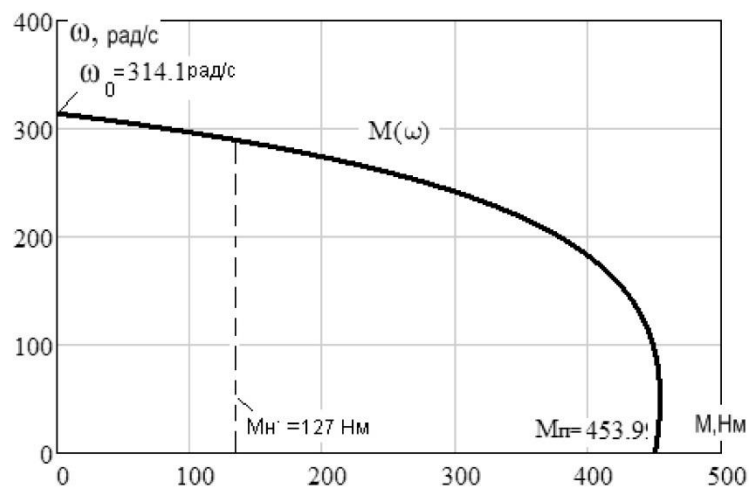


Рисунок 2.9 – Природна механічна характеристика $M = f(\omega)$ асинхронного двигуна

Розрахункова характеристика.

Номінальний момент [20]:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_0 (1 - S_n)}; \quad (2.30)$$

$$M_{ном} = \frac{40000}{314 \cdot (1 - 0,085)} = 127 \text{ Нм.}$$

Момент мінімальний:

$$M_{мин} = M_{ном} \cdot k_{мин}; \quad (2.31)$$

$$M_{\text{мин}} = 127 \cdot 0,9 = 114 \text{ Нм.}$$

Момент критичний:

$$M_{\text{кр}} = M_{\text{ном}} \cdot k_{\text{max}}; \quad (2.32)$$

$$M_{\text{кр}} = 127 \cdot 3,2 = 406 \text{ Нм.}$$

Момент пусковий [23]:

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{ном}} \cdot M_n; \quad (2.33)$$

$$M_{\text{пуск}} = 127 \cdot 2,5 = 317 \text{ Нм.}$$

Даними методами можна побудувати електромеханічну характеристику, але механічна характеристика виходить не точною, так як враховуються багато факторів і прийняті припущення магнітні та механічні втрати $0,02 P_n$.

Отже, паспортні дані наведені для двигуна насиченою магнітною системою, де не враховані насичення двигуна, що викликало розбіжності у побудованих графіках через розбіжності у розрахункових даних з паспортними.

Цим пояснюється відмінність отриманих графіків та розрахункових даних із наведеними у паспорті.

2.6 Математичний опис узагальненої асинхронної машини

Рівняння для знаходження рівноваги ЕРС на обмотках статора та ротора на другому законі Кірхгофа [5].

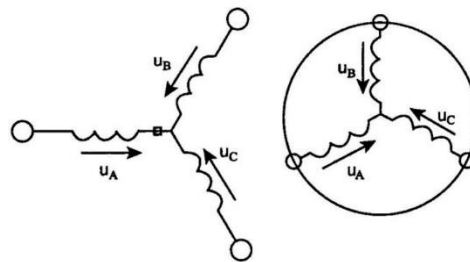


Рисунок 2.10 – Узагальнена асинхронна машина

Для статора

Для ротора

$$\left\{ \begin{array}{l} U_A = R_A \cdot i_A \cdot \frac{d\psi_A}{dt} \\ U_B = R_B \cdot i_B \cdot \frac{d\psi_B}{dt}; \\ U_C = R_C \cdot i_C \cdot \frac{d\psi_C}{dt} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} U_a = R_a \cdot i_a \cdot \frac{d\psi_a}{dt} \\ U_b = R_b \cdot i_b \cdot \frac{d\psi_b}{dt}; \\ U_c = R_c \cdot i_c \cdot \frac{d\psi_c}{dt} \end{array} \right. \quad (2.34)$$

Для статора:

$$\left. \begin{array}{l} \psi_A = L_{AA} \cdot i_A + L_{AB} \cdot i_B + L_{AC} \cdot i_C + L_{Aa} \cdot i_a + L_{Ab} \cdot i_b + L_{Ac} \cdot i_c \\ \psi_B = L_{BA} \cdot i_A + L_{BB} \cdot i_B + L_{BC} \cdot i_C + L_{Ba} \cdot i_a + L_{Bb} \cdot i_b + L_{Bc} \cdot i_c \\ \psi_C = L_{CA} \cdot i_A + L_{CB} \cdot i_B + L_{CC} \cdot i_C + L_{Ca} \cdot i_a + L_{Cb} \cdot i_b + L_{Cc} \cdot i_c \end{array} \right\}; \quad (2.35)$$

Для ротора:

$$\left. \begin{array}{l} \psi_a = L_{aA} \cdot i_A + L_{aB} \cdot i_B + L_{aC} \cdot i_C + L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c \\ \psi_b = L_{bA} \cdot i_A + L_{bB} \cdot i_B + L_{bC} \cdot i_C + L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c \\ \psi_c = L_{cA} \cdot i_A + L_{cB} \cdot i_B + L_{cC} \cdot i_C + L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c \end{array} \right\}; \quad (2.36)$$

За симетричним рівнянням ми можемо побачити, що потокозчеплення кожної обмотки залежить від струмів у всіх обмотках і ці залежності виявляються через взаємодукцію [4]:

$$J_{\Sigma} \cdot \frac{d\bar{\omega}_m}{dt} = \bar{M} - \bar{M}_H; \quad (2.37)$$

$$\bar{M} = k \cdot (\bar{\psi} \cdot \vec{i}); \quad (2.38)$$

$$\vec{i} = \frac{2}{3} \cdot (i_A + \vec{a} \cdot i_B + \vec{a}^2 \cdot i_C); \quad (2.39)$$

де: $\vec{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$; $\vec{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$; – це вектори, що враховують просторове зміщення обмоток.

$$i_a = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t); i_B = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right); i_C = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right); \quad -$$

трифазна симетрична система струмів статора.

Знаходимо математичний опис просторового вектора статорного струму:

$$\vec{i}_s = \frac{2}{3} \cdot \left(\cos \omega t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right) = I_m \cdot e^{j\omega t}; \quad (2.40)$$

На рисунку 2.11 представлена геометрична інтерпретація просторового вектора струму – це вектор на комплексній площині з модулем (довжиною) I_m , що обертається з кутовою швидкістю ω в позитивному напрямку. Проекції вектора \vec{i}_s на фазні вісі А, В, С визначають миттєві струми у фазах. Аналогічно просторовими векторами можна представити всі напруги, струми і потокозчеплення, що входять до рівнянь (1), (2).

Переходимо до спрощення рівнянь [11].

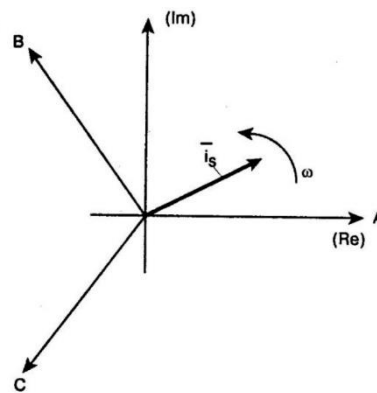


Рисунок 2.11 – Просторовий вектор струму

Крок перший. Для перетворення рівнянь (2.35) у миттєвих значеннях до рівнянь у просторових векторах помножимо їх на вирази: перші рівняння на $\frac{2}{3}$ другі на $\frac{2}{3} \cdot \vec{a}$ треті на $\frac{2}{3} \cdot \vec{a}^{-2}$ і складемо роздільно для статора та ротора. Тоді отримаємо:

$$\begin{cases} \vec{u}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} \\ \vec{u}_r = R_r \cdot \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} \end{cases} ; \quad (2.41)$$

$$\begin{cases} \vec{\psi}_s = L_s \cdot \vec{i}_s + L_m(\Theta) \cdot \vec{i}_r \\ \vec{\psi}_r = L_r \cdot \vec{i}_r + L_m(\Theta) \cdot \vec{i}_s \end{cases}$$

де: L_s, L_r – власні індуктивності статора та ротора;

$L_m(\Theta)$ – взаємна індуктивність між статором та ротором.

Таким чином, замість дванадцяти рівнянь (2.34) – (2.35) отримано лише чотири рівняння (2.41).

Крок другий [16].

$$\begin{cases} \vec{u}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \vec{\psi}_s \\ \vec{u}_r = R_r \cdot \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \cdot \vec{\psi}_r; \\ \vec{\psi}_s = L_s \cdot \vec{i}_s + L_m(\Theta) \cdot \vec{i}_r \\ \vec{\psi}_r = L_r \cdot \vec{i}_r + L_m(\Theta) \cdot \vec{i}_s \end{cases} \quad (2.42)$$

де: $\omega = z_p \cdot \omega_m$, z_p – число пар полюсів у машині.

У рівняннях (2.42) всі коефіцієнти є постійними величинами, мають чіткий фізичний зміст і можуть бути визначені за паспортними даними двигуна, або експериментально.

Крок третій.

Цей крок пов'язаний із визначенням моменту. Момент у рівнянні (2.38) є векторним добутком будь-якої пари векторів. З рівняння (2.42) випливає, що таких пар може бути шість $(\vec{i}_s, \vec{i}_r); (\vec{\psi}_s, \vec{\psi}_r); (\vec{i}_s, \vec{\psi}_s); (\vec{i}_s, \vec{\psi}_r); (\vec{i}_r, \vec{\psi}_r); (\vec{i}_r, \vec{\psi}_s)$.

Часто на розгляд вводиться потокозчеплення взаємної індукції $\vec{\psi}_m = L_m \cdot (\vec{i}_s + \vec{i}_r)$. В цьому випадку з'являється ще чотири можливості

представлення електромагнітного моменту машини через такі пари:

$(\vec{i}_s, \vec{\psi}_m); (\vec{i}_r, \vec{\psi}_m); (\vec{i}_r, \vec{\psi}_m); (\vec{\psi}_r, \vec{\psi}_m)$ після вибору тієї чи іншої пари рівняння

моменту набуває визначеності, а кількість рівнянь у системі (2.42)

скорочується до двох. Крім того, в рівняннях (2.37) та (2.38) векторні

величини моменту та швидкості можуть бути замінені їх модульними

значеннями. Це є наслідком того, що просторові вектори струмів та

потокозчеплень розташовані у площині, перпендикулярній осі обертання, а

вектори моменту та кутової швидкості збігаються з віссю. Як приклад покажемо запис рівнянь моменту через деякі пари змінних станів машини.

$$\begin{cases} M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Mod}(\vec{i}_s \times \vec{i}_r) \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_s \times \vec{i}_s); \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_r \times \vec{i}_s) \end{cases} \quad (2.43)$$

2.7 Структурна схема силового каналу електроприводу

Наведено, математичний опис силового каналу системи перетворювача – асинхронний електродвигун, в нерухомій системі координат α , β , орієнтованої вектором потокозчеплення ротора [17].

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = R_E \cdot (T_E p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2' \cdot L_\mu}{L_2^2} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta} \\ U_{1\beta} = R_E \cdot (T_E p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2' \cdot L_\mu}{L_2^2} \cdot \psi_{2\beta} - \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha} \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \psi_{2\alpha} - L_\mu \cdot I_{1\alpha} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta} \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \psi_{2\beta} - L_\mu \cdot I_{1\beta} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha} \\ M_{EM} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}) \\ \omega = \frac{1}{Jp} \cdot (M_{EM} - M_c) \end{cases} ; \quad (2.44)$$

З даної системи рівнянь було складено структурна схема рисунку 2.12 [19].

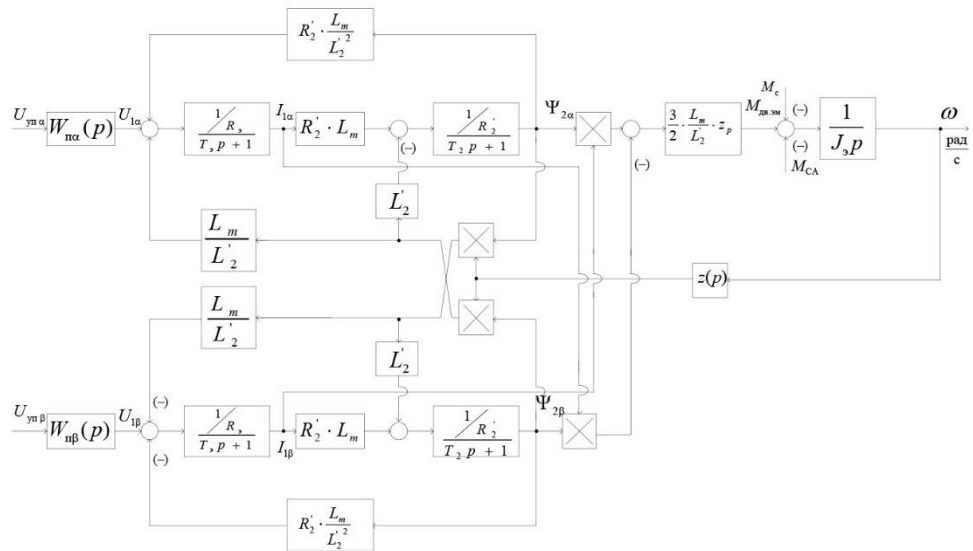


Рисунок 2.12 – Структурна схема силового канала системы перетворювач-асинхронний електродвигун у нерухомій двофазній системі координат

За структурною схемою рисунка 2.12 у пакеті MATLAB розроблено імітаційна модель силового каналу системи перетворювач – асинхронний електродвигун у нерухомій системі координат [8], представлена рисунку 2.13.

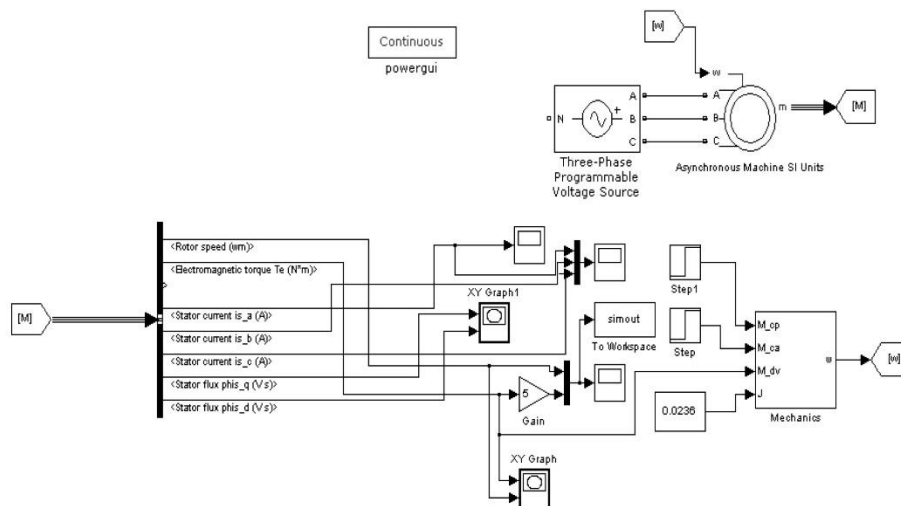


Рисунок 2.13 – Імітаційна модель силового каналу системи перетворювач – асинхронний електродвигун

На моделі отримані динамічні механічні та перехідні характеристики швидкості ротора та електромагнітного моменту АД при прямому пуску на частоті перетворювача частоти 50Гц, що представлені на рисунках 2.14–2.16.

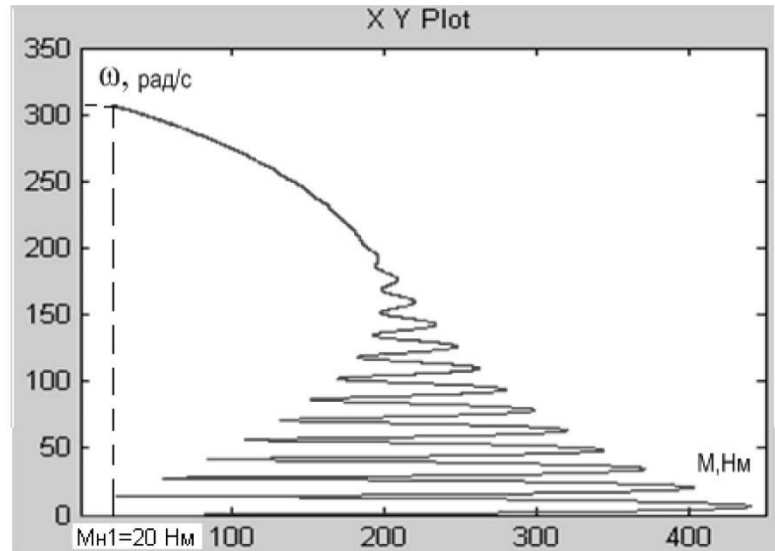


Рисунок 2.14 – Динамічна механічна характеристика ПЕД

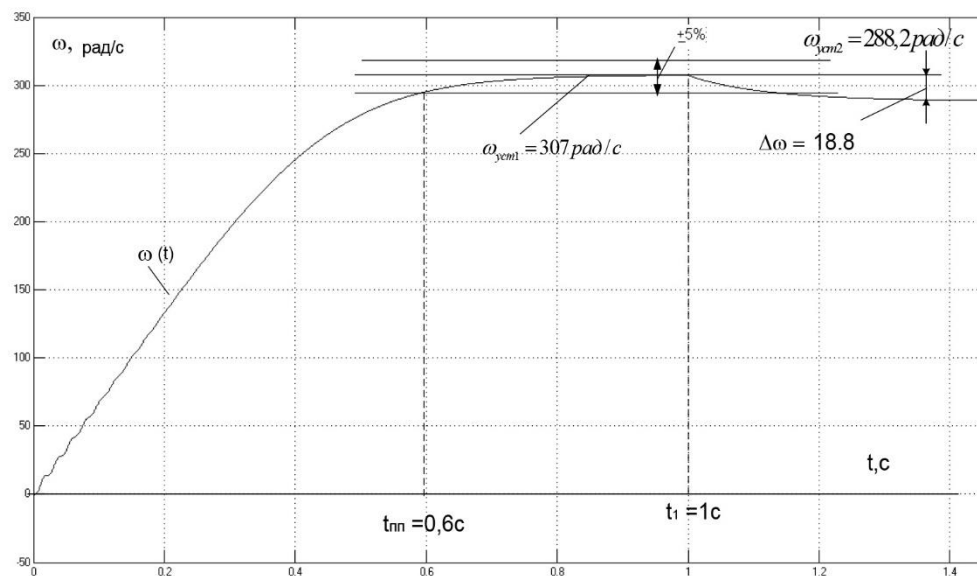


Рисунок 2.15 – Графік перехідного процесу швидкості ПЕД під час накидання навантаження $M_{H2} = 70\text{Нм}$

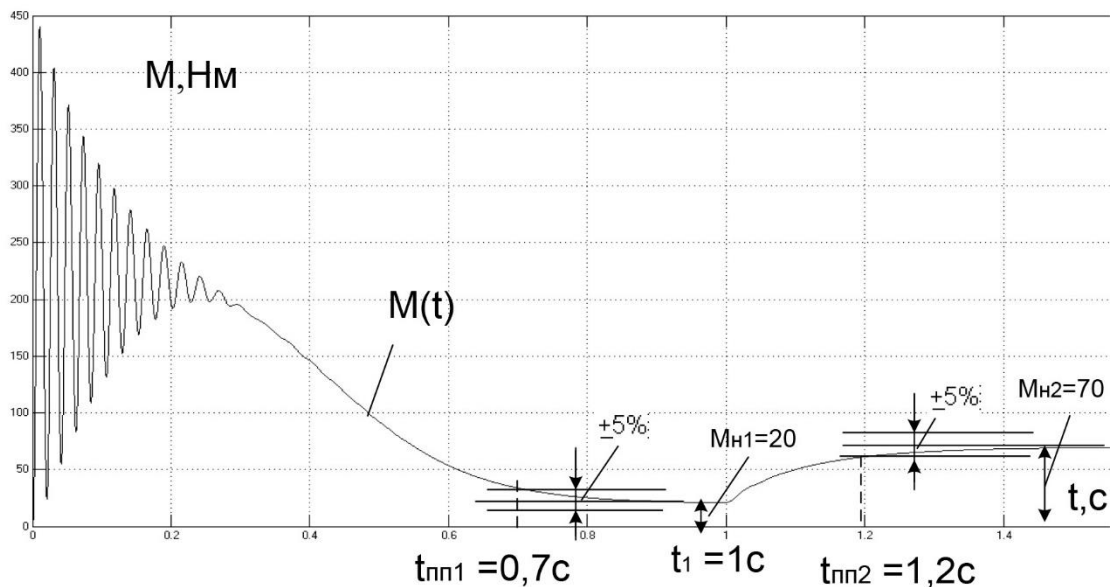


Рисунок 2.16 – Графік перехідного процесу моменту ПЕД під час накидання навантаження $M_{н2} = 70\text{Нм}$

З рисунків видно, що з навантаженням $M_{н1} = 20\text{Нм}$ двигун розвинув швидкість рівну $\omega_{уст} = 307\text{ рад/с}$, а при накиданні навантаження $M_{н2} = 70\text{Нм}$ швидкість знизилася на величину $\Delta\omega = 18,8\text{ рад/с}$ і стала рівною $\omega_{уст2} = 288,2\text{ рад/с}$.

2.8 Розрахунок та побудова штучних механічних та електромеханічних характеристик розімкнутої системи «Перетворювач частоти - Асинхронний двигун»

Розрахунок показників робимо для частот $f_1 = 50; 40; 30; 20\text{ Гц}$.

За закону регулювання [5]:

$$Z_p = U_{1\phi} / f^3; \quad (2.45)$$

$$Z_p = 578 / 50^3 = 0,0046.$$

Знайдемо відносні значення частот напруги живлення:

$$\text{при } f_{1н1} = 50\text{ Гц} \quad f_{1*i} / f_{1i}; \quad (2.46)$$

$$50 / 50 = 1$$

$$\begin{aligned} \text{при } f_{1н2}=40 \text{ Гц} \quad f_{1*2} &= f_{2i} / f_{1i}; \\ &(2.47) \end{aligned}$$

$$f_{1*2} = 40 / 50 = 0,8.$$

$$\begin{aligned} \text{при } f_{1н3}= 30 \text{ Гц} \quad f_{1*3} &= f_{3i} / f_{1i}; \\ &(2.48) \end{aligned}$$

$$f_{1*3} = 30 / 50 = 0,6.$$

$$\begin{aligned} \text{при } f_{1н4}=20 \text{ Гц} \quad f_{1*4} &= f_{4i} / f_{1i}; \\ &(2.49) \end{aligned}$$

$$f_{1*4} = 20 / 50 = 0,4.$$

Знайдемо фазну напругу обмотки статора асинхронного двигуна [4]:

$$U_{1i1} = Z_p \cdot f_1^3; \quad (2.50)$$

$$U_{1i1} = 0,0046 \cdot 50^3 = 578 \text{ В.}$$

$$U_{1н2} = Z_p \cdot f_{1н2}^3; \quad (2.51)$$

$$U_{1н2} = 0,0046 \cdot 40^3 = 294,4 \text{ В.}$$

$$U_{1н3} = Z_p \cdot f_{1н3}^3; \quad (2.52)$$

$$U_{1н3} = 0,0046 \cdot 30^3 = 124,2 \text{ В.}$$

$$U_{1н4} = Z_p \cdot 20^3 = 37 \text{ В.}$$

Відповідно до представлених частот напруги живлення зробимо розрахунок значень швидкості ідеального холостого ходу:

$$\omega_{01} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1i1}}{\partial}; \quad (2.53)$$

$$\omega_{01} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314,159 \text{ рад / с.}$$

$$\omega_{02} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1i2}}{\partial}; \quad (2.54)$$

$$\omega_{02} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 40}{1} = 251,2 \text{ рад / с.}$$

$$\omega_{03} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1i3}}{\partial}; \quad (2.55)$$

$$\omega_{03} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30}{1} = 188,5 \text{ рад / с.}$$

$$\omega_{04} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1i}}{\partial}; \quad (2.56)$$

$$\omega_{04} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 20}{1} = 125,6 \text{ рад / с.}$$

Визначимо струми холостого ходу даних частотах регулювання:

$$I_{01} = \frac{U_{1n1}}{X_{\mu n}}; \quad (2.57)$$

$$I_{01} = \frac{578}{44,654} = 10,5 \text{ A.}$$

$$I_{02} = \frac{U_{1n2}}{X_{\mu n} \cdot f_{1*2}}; \quad (2.58)$$

$$I_{02} = \frac{294,4}{44,65 \cdot 0,8} = 6,7 \text{ A.}$$

$$I_{03} = \frac{U_{1n3}}{X_{\mu n} \cdot f_{1*3}}; \quad (2.59)$$

$$I_{03} = \frac{124,2}{44,65 \cdot 0,6} = 3,77 \text{ A.}$$

$$I_{04} = \frac{U_{1n4}}{X_{\mu n} \cdot f_{1*4}}; \quad (2.60)$$

$$I_{04} = \frac{37}{44,65 \cdot 0,4} = 1,68 \text{ A.}$$

Будуємо електромеханічні характеристики $I_2(\omega)$ для вибраних частот виразам [24]:

$$I_2'(s, f) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f) + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}\right)^2}}; \quad (2.61)$$

де: $\omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s)$.

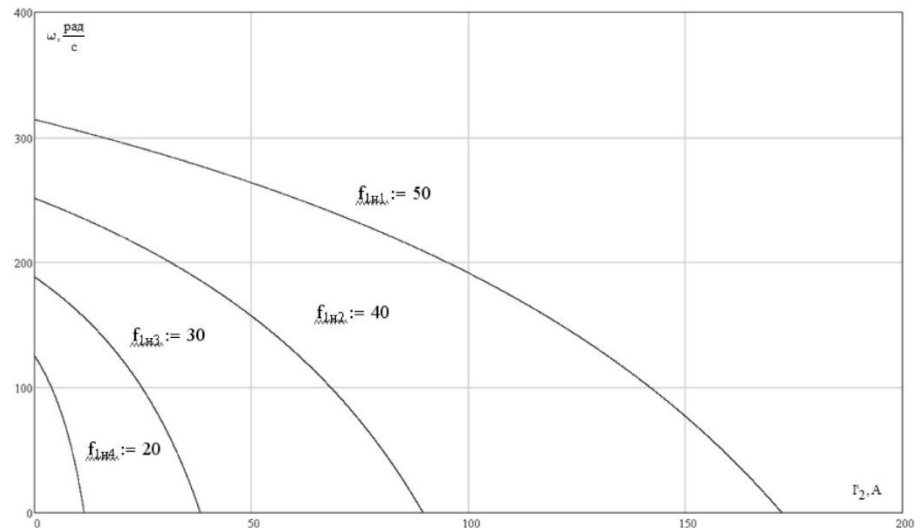


Рисунок 2.17 – Штучні електромеханічні характеристики $I_2'(\omega)$ при частотному регулюванні швидкості

Також будуюмо електромеханічні характеристики $I_1(\omega)$ для вибраних частот за виразами:

$$I_1(s, f) = \sqrt{(I_0(f))^2 + (I_2'(s, f))^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I_2'(s, f) \cdot \sin \varphi_2(s, f)}; \quad (2.62)$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s); \quad (2.63)$$

де:

$$\sin \varphi_2(s, f) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f)}}; \quad (2.64)$$

$$I_0(f) = \frac{U_1(f)}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} - \text{струм холостого ходу асинхронного двигуна в}$$

залежності від частоти.

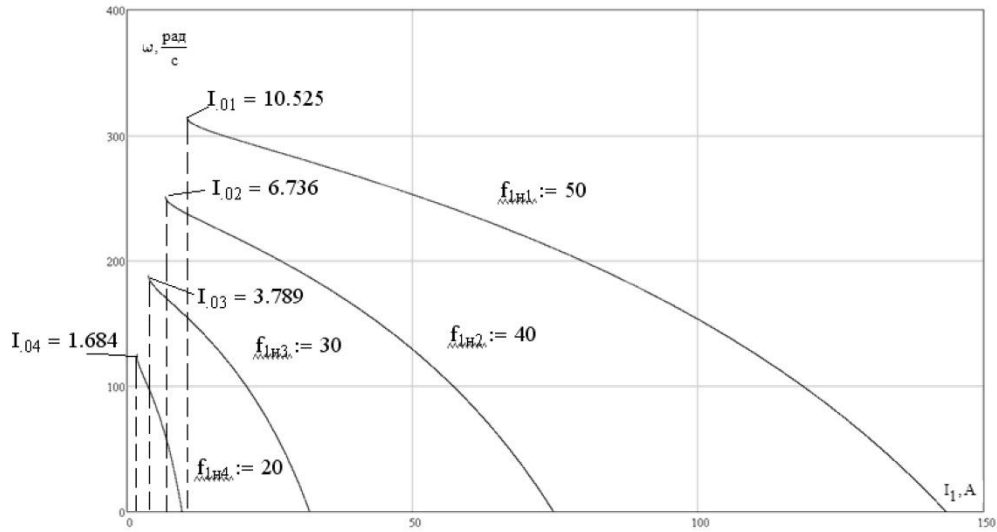


Рисунок 2.18 – Штучні електромеханічні характеристики $I_1(\omega)$ при частотному регулюванні швидкості

Механічні характеристики АД $M(\omega)$ розраховуємо для вибраних частот, за виразами [21]:

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2}{\omega_0(f) \cdot s \left[X_{ei}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2 \right]}; \quad (2.65)$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s).$$

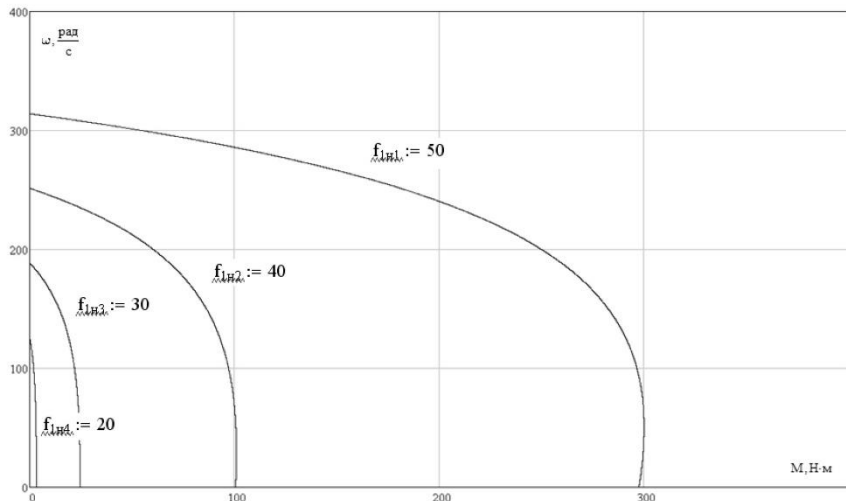


Рисунок 2.19 – Штучні механічні характеристики $M(\omega)$ при частотному регулюванні швидкості

Модель системи перетворювач частоти – асинхронний електропривод/
Структурну схему системи скалярного частотного керування з IR-компенсацією наведено на рисунку 2.21.

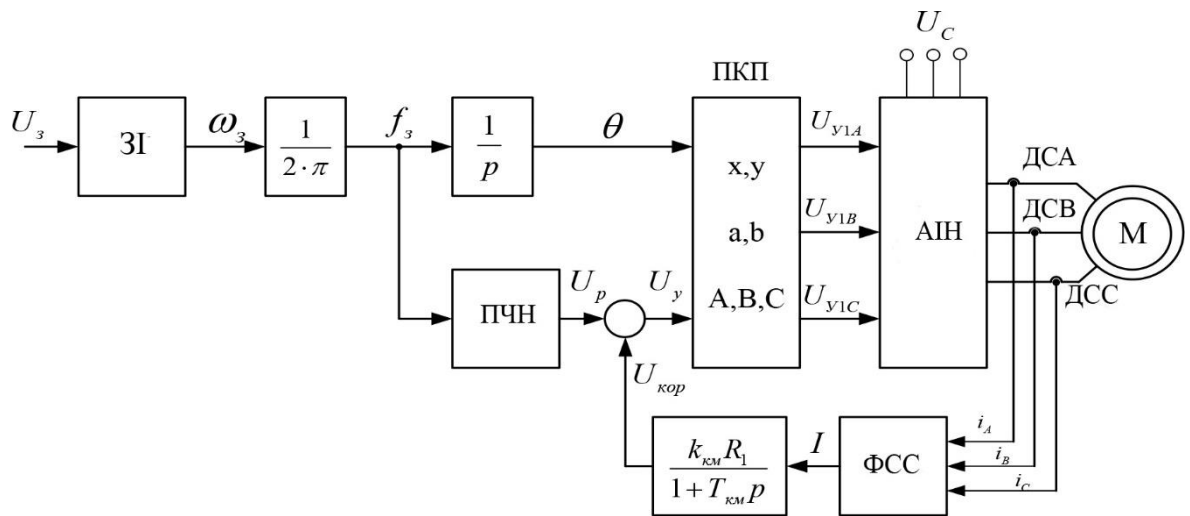


Рисунок 2.20 – Структурна схема системи скалярного частотного керування з IR-компенсацією

Формування кривої та темп розгону двигуна є основною функцією задатчика інтенсивності

При дистанційному керуванні електроприводом сигналом завдання швидкості є напруга, що задає U_3 . Йому відповідає частота, що задає f_3 місцевого керування, в цьому випадку керування пуском та зупиненням двигуном проводиться з панелі перетворювача. Блок – «перетворювач частота-напруга» ПЧН формує необхідну залежність скалярного керування між частотою та напругою перетворювача, чим і встановлюється прийнятий закон частотного регулювання $U_{10} / f_1^3 = const.$

При скалярній IR-компенсації сигнал керування U_y є сумою сигналів регулювання U_p та позитивного зворотного зв'язку по струму $U_{кор}$.

$$U_y = U_p + U_{кор} = U_p + k_{км} \cdot R_1 \cdot I; \quad (2.66)$$

де: $k_{км}$ – коефіцієнт позитивного зворотного зв'язку по струму;

R_1 – активний опір фази обмотки статора АД;

I – сигнал пропорційний діючим значенням струмів i_a, i_b, i_c обмоток статора АД.

Сигнал керування є вхідним для прямого координатного перетворювача (ПКП), на виході якого формується три синусоїдальні напруги керування $U_{1yA}, U_{1yB}, U_{1yC}$ зсунуті відносно друг друга на кут $\pm 2\pi/3$, з амплітудами пропорційними до напруги керування. Сигнали $U_{1yA}, U_{1yB}, U_{1yC}$ формують фазну напругу на виході автономного інвертора напруги (АІН) [20].

Зробимо розрахунок статичних показників.

Прийmemo коефіцієнти компенсації: $K_{KM}=0,25; 0,5; 0,75$.

Знайдемо еквівалентний опір ротора з урахуванням ІR – компенсації:

$$R_{1EKB1} = R_1 \cdot (1 - K_{KM1}); \quad (2.67)$$

$$R_{1EKB1} = 1,62 \cdot (1 - 0,25) = 1,215 \text{ Ом.}$$

$$R_{1EKB2} = R_1 \cdot (1 - K_{KM2}); \quad (2.68)$$

$$R_{1EKB2} = 1,62 \cdot (1 - 0,5) = 0,81 \text{ Ом.}$$

$$R_{1EKB3} = R_1 \cdot (1 - K_{KM3}); \quad (2.69)$$

$$R_{1EKB3} = 1,62 \cdot (1 - 0,75) = 0,405 \text{ Ом.}$$

Будуємо електромеханічні характеристики $I_2'(\omega)$ для обраних частот та коефіцієнтів K_{KM} за виразами [19]:

$$I_2'(s, f, K_{KM}) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left(R_{1EKB}(K_{KM}) + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f) + \left(\frac{R_{1EKB}(K_{KM}) \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}\right)^2}}; \quad (2.70)$$

де: $R_{1EKB1}(K_{KM}) = R_1 \cdot (1 - K_{KM})$ – еквівалентний активний опір статорного ланцюга.

$$\omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s); \quad (2.71)$$

$f_{1*}(f) = \frac{f}{f_{1H}}$ – відносна частота напруги живлення;

$\omega_0(f) = \omega_{0H} \cdot f_{1*}(f)$ – швидкість ідеального холостого ходу при даній частоті напруги живлення;

у діапазоні швидкості $\omega = 0 \div \omega_0$.

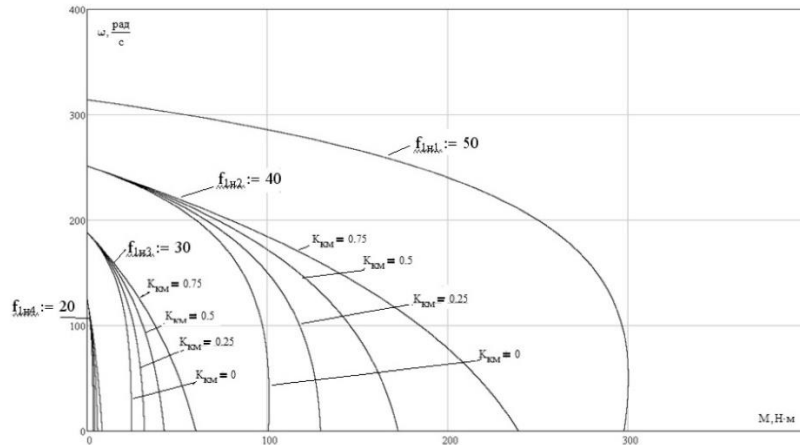


Рисунок 2.21 – Штучні електромеханічні характеристики $I_2'(\omega)$ при частотному регулюванні швидкості з IR-компенсацією

Також будуюмо електромеханічні характеристики $I_1(\omega)$ для вибраних частот та коефіцієнтів K_{KM} за виразами:

$$I_1(s, f, K_{KM}) = \sqrt{(I_0(f))^2 + (I_2'(s, f, K_{RM}))^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I_2'(s, f, K_{KM}) \cdot \sin \varphi_2(s, f, K_{KM})}; \quad (2.72)$$

де:

$$\sin \varphi_2(s, f, K_{KM}) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_{1EKV}(K_{KM}) + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f)}}; \quad (2.73)$$

Струм холостого ходу асинхронного двигуна в залежності від частоти:

$$I_0(f) = \frac{U_1(f)}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}; \quad (2.74)$$

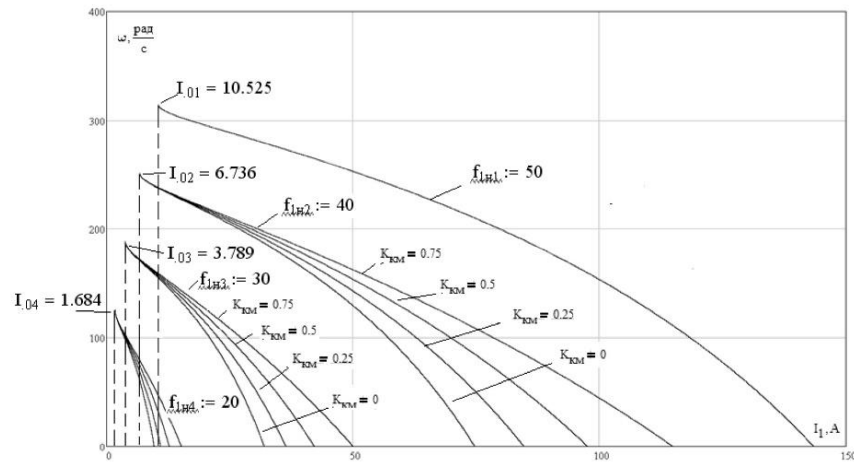


Рисунок 2.22 – Штучні електромеханічні характеристики $I_1(\omega)$ при частотному регулюванні швидкості з IR-компенсацією

Механічні характеристики асинхронного двигуна $M(\omega)$ розраховуємо для вибраних частот та коефіцієнтів K_{KM} за виразами [11]:

(2.75)

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot U_1(f)^2 \cdot R_2'}{\omega_0(f) \cdot s \left[X_{KH}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left(R_{1EKB}(K_{KM}) + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_{1EKB}(K_{KM}) \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2 \right]};$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(-s)\sqrt{2}; \quad (2.76)$$

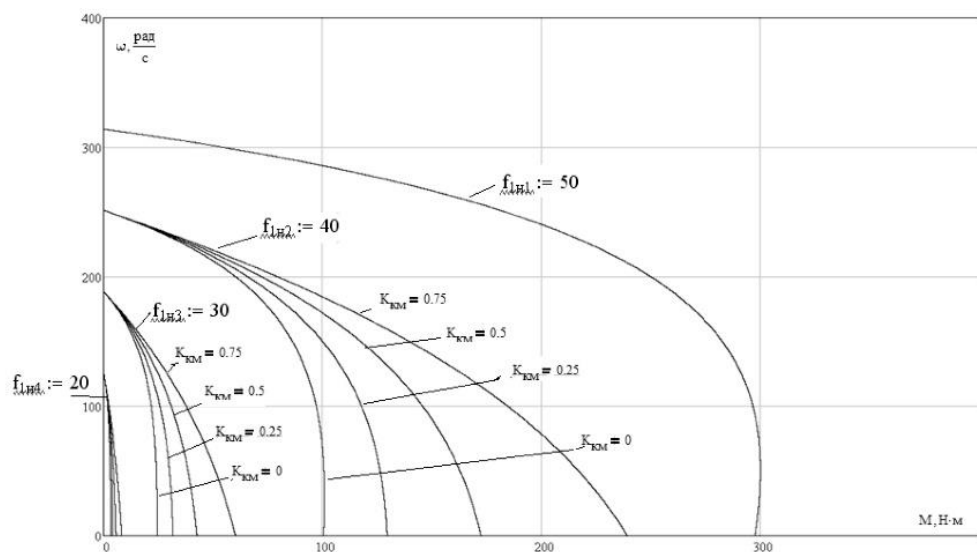


Рисунок 2.23 – Штучні механічні характеристики $M(\omega)$ при частотному регулюванні швидкості з IR-компенсацією

При роботі на природній характеристиці ($f=50$ Гц) IR-компенсація не застосовується, так як фазна напруга підвищується вище за номінальну що неприпустимо.

- електромеханічні характеристики;
- збільшенням коефіцієнта компенсації моменту K_{KM} струми короткого замикання I_{K3} мають значення, причому ці відмінності тим більше, ніж менше частота статора обмоток f_1 . Це пояснюється тим, що при малих частотах більша частка падіння напруги на активному опорі R_1 , отже, більша частка компенсації;
- механічні характеристики;
- збільшенням коефіцієнта компенсації моменту K_{KM} критичний момент збільшується, а характеристики стають жорсткішими [20].

На графіку відмінності у критичному та пусковому моментах при різних K_{KM} майже не помітні. Це можна пояснити тим, що потужність двигуна велика, опір обмотки статора малий. Отже, відповідно падіння напруги є невеликим.

2.9 Розрахунок втрат в асинхронному двигуні під час роботи на штучних характеристиках вентиляторним навантаженням

Визначимо втрати в роторі під час роботи з вентиляторним навантаженням. Задамо функцію навантаження. Прийmemo момент тертя $M_0 = 2 \cdot I_t$. Прийmemo, що за частотою $f_{1H}=50$ Гц навантаження проходить через точку номінального режиму двигуна. Розрахуємо коефіцієнт k [21]:

$$k = \frac{M_{aai} - M_0}{\omega_{aai}^3}; \quad (2.77)$$

$$M = \frac{127 - 2}{287^3} = 5,26 \cdot 10^{-6}.$$

Вентиляторне навантаження описується функцією:

$$M_{n.aeio} = M_0 + k \cdot \omega^3; \quad (2.78)$$

$$M_{n.aeio} = 2 + 5,26 \cdot 5,26 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_3.$$

Побудуємо механічні характеристики двигуна та навантаження.

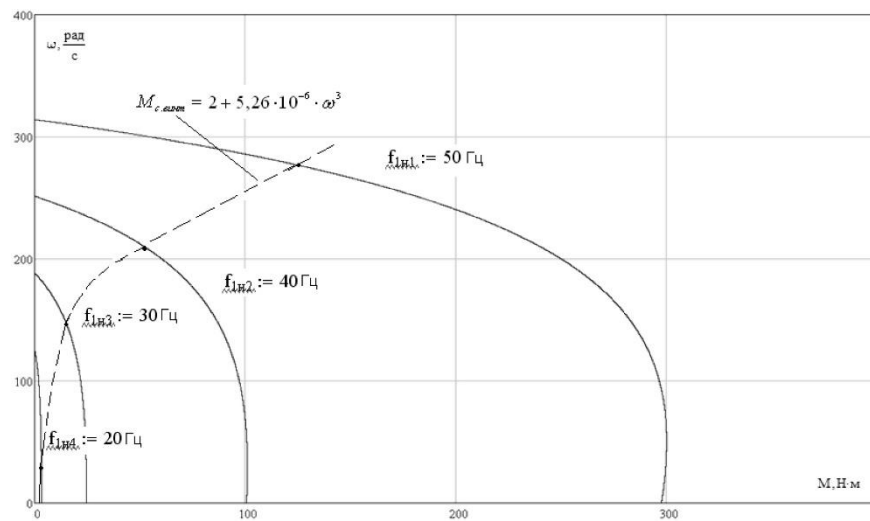


Рисунок 2.24 – Штучні механічні характеристики $M(\omega)$ при частотному регулюванні швидкості з вентиляторним навантаженням

Знайдемо частоти обертання, при яких відбувається перетин механічних характеристик навантаження та двигуна:

1. $f_{1н1} = 50$ Гц – $\omega_{р1} = 287$ рад/с;
2. $f_{1н2} = 40$ Гц – $\omega_{р2} = 209$ рад/с;
3. $f_{1н3} = 30$ Гц – $\omega_{р3} = 147,5$ рад/с;
4. $f_{1н4} = 20$ Гц – $\omega_{р4} = 44$ рад/с;

Визначимо момент навантаження та ковзання для кожної частоти обертання [24]:

$$1. \quad M_{n.aeio1} = M_0 + k \cdot \omega_{\partial 1}^3; \quad (2.79)$$

$$M_{n.aeio1} = 2 + 5,26 \cdot 10^{-6} \cdot 287^3 = 127 I_1.$$

$$s_{\partial 1} = \frac{\omega_0 - \omega_{\partial 1}}{\omega_0}; \quad (2.80)$$

$$s_{\partial 1} = \frac{317,16 - 287}{314,16} = 0,085.$$

$$2. M_{n.aeio2} = M_0 + k \cdot \omega_{\partial 2}^3; \quad (2.81)$$

$$M_{n.aeio2} = 2 + 5,26 \cdot 10^{-6} \cdot 209^3 = 50,3 I_i.$$

$$s_{\partial 2} = \frac{\omega_{02} - \omega_{\partial 2}}{\omega_{02}}; \quad (2.82)$$

$$s_{\partial 2} = \frac{251,2 - 209}{251,2} = 0,168.$$

$$3. M_{n.aeio3} = M_0 + k \cdot \omega_{\partial 3}^3; \quad (2.83)$$

$$M_{n.aeio3} = 2 + 5,26 \cdot 10^{-6} \cdot 147,5^3 = 19 I_1.$$

$$s_{\partial 3} = \frac{\omega_{03} - \omega_{\partial 3}}{\omega_{03}}; \quad (2.84)$$

$$s_{\partial 3} = \frac{125,6 - 44}{125,6} = 0,65.$$

Втрати в роторі розрахуємо за **виразом:**

$$\Delta D = \omega_0 \cdot s_p \cdot M_{n.aeio}; \quad (2.85)$$

$$\Delta D_{21} = \omega_{01} \cdot s_{p1} \cdot M_{n.aeio1}; \quad (2.86)$$

$$\Delta D_{21} = 314,16 \cdot 0,085 \cdot 127 = 3391,4 A_o.$$

$$\Delta D_{22} = \omega_{02} \cdot s_{p2} \cdot M_{n.aeio2}; \quad (2.87)$$

$$\Delta D_{22} = 251,22 \cdot 0,168 \cdot 50,3 = 2122,7 A_o.$$

$$\Delta D_3 = \omega_{03} \cdot s_{p3} \cdot M_{n.aeio3}; \quad (2.88)$$

$$\Delta D_3 = 188,5 \cdot 0,277 \cdot 19 = 992,1 A_o.$$

$$\Delta D_4 = \omega_{04} \cdot s_{p4} \cdot M_{n.aeio4}; \quad (2.89)$$

$$\Delta D_4 = 125 \cdot 0,65 \cdot 2,45 = 199 A_o.$$

Аналізуючи втрати у роторі можна сказати, що зменшення частоти перетворювача призводить до їхнього зменшення. Це можна пояснити тим, що момент навантаження прямо пропорційний частоті обертання [5].

РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ УДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШАХТНИМ ВОДОВІДЛИВОМ

3.1 Розрахунок перехідних процесів швидкості та моменту для режиму пуску при вентиляторному навантаженні на валу двигуна системи «Перетворювач частоти – асинхронний двигун»

Складемо імітаційну модель приводу відповідно до функціональної схеми, що зображена на рисунку 2.25.

Для цього визначимо передавальні функції блоків, що входять до неї.

Представимо математично розраховану та апроксимовану ламаними лініями криву залежності $U_{1\phi} = 0,0046 \cdot f_1^3$.

Крива задається в блоці ПЧН шістьма точками:

1. $f = 5$ Гц, $U = 5,78$ В; 2. $f = 10$ Гц, $U = 8$ В; 3. $f = 15$ Гц, $U = 15,6$ В; 4. $f = 25$ Гц, $U = 72,5$ В; 5. $f = 35$ Гц, $U = 197$ В; 6. $f = 50$ Гц, $U = 578$ В.

Інвертор напруги представимо аперіодичним ланкою. Його передатна функція [16]:

$$W_{ин}(p) = \frac{k_{ин}}{T_{ин} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,0002p + 1}; \quad (3.1)$$

де: $k_{ин}=1$ – коефіцієнт передачі інвертора;

$$T_{ин} = \frac{1}{f_{нч}}; \quad (3.2)$$

$$T_{ин} = \frac{1}{5000} = 0,0002.$$

постійна часу запізнення автономного інвертора напруги, де $5000 f_{нч} = 5000$ Гц – несуча частота інвертора.

Позитивний зворотний зв'язок по струму є аперіодичною ланкою:

$$W_{км}(p) = \frac{k_{км}}{T_{км} p + 1} = \frac{0,1}{0,02p + 1}; \quad (3.3)$$

де: k_{KM} – коефіцієнт позитивного зворотного зв'язку по струму,
прийемо $k_{KM} k_{KM} = 0,1$;

T – постійна часу затримки вимірювання струму.

Час достатній для визначення миттєвого значення струму статора асинхронного двигуна для сучасних контролерів становить $T = 0,02$ с.

Імітаційну модель зображено на рисунку 3.1. Моделі вхідних до неї блоків представлені на рисунках 3.2–3.3.

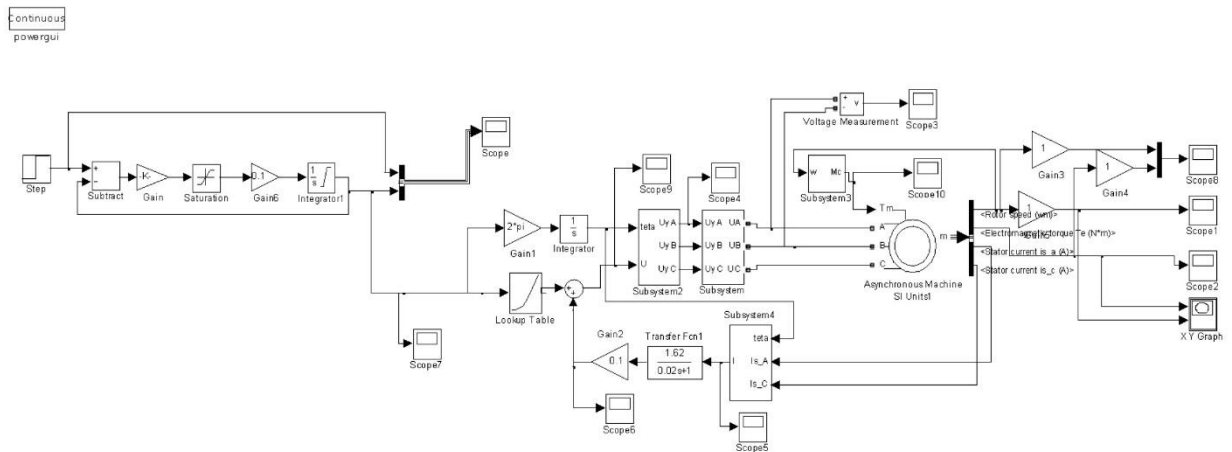


Рисунок 3.1 – Імітаційна модель замкнутої системи ПЧ-АД з IR-компенсацією

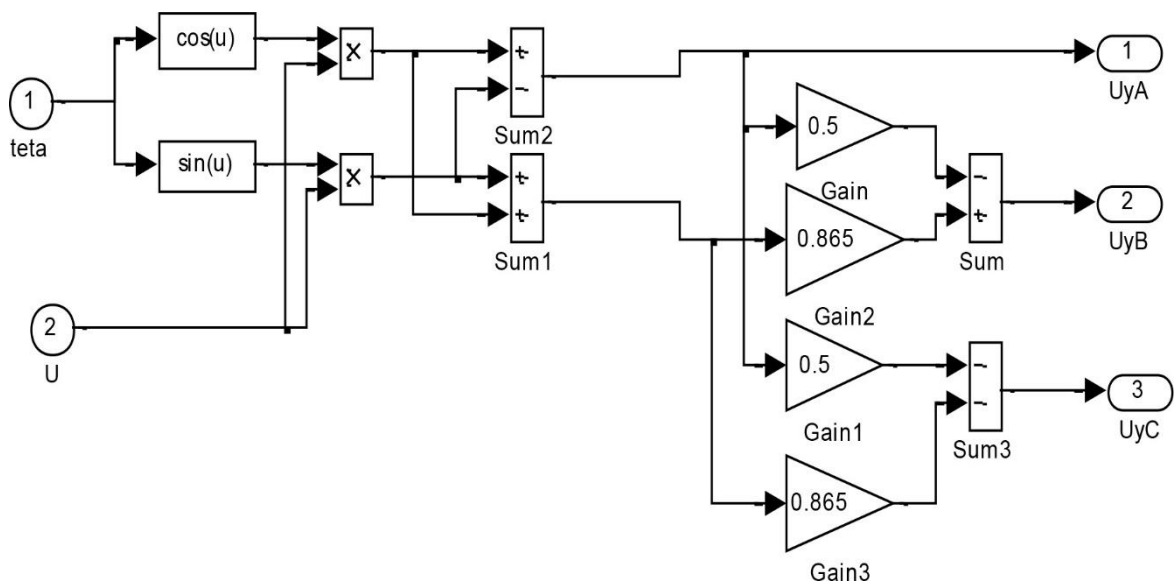


Рисунок 3.2 – Імітаційна модель прямого координатного перетворювача

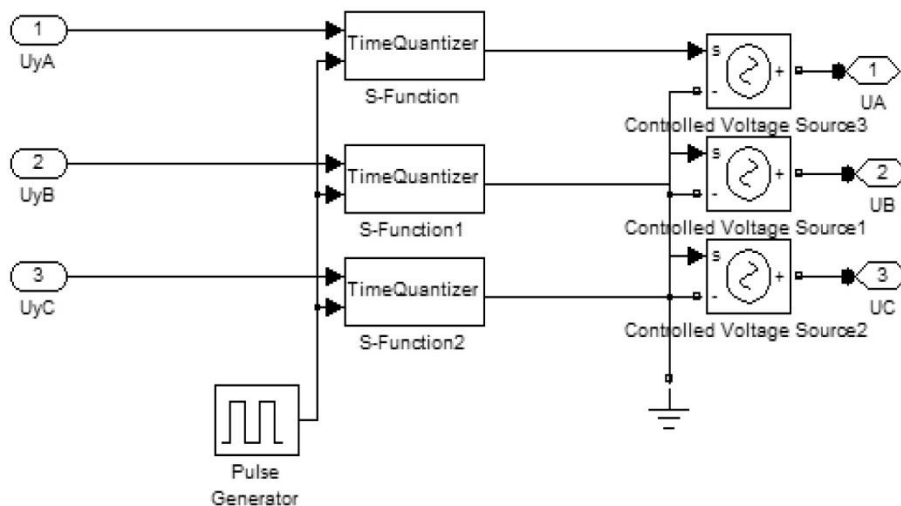


Рисунок 3.3 – Імітаційна модель перетворювача частоти

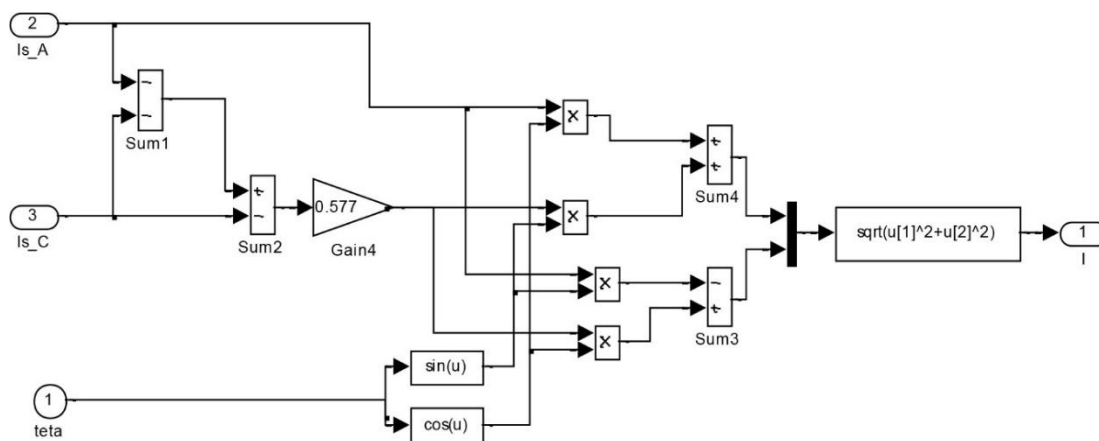


Рисунок 3.4 – Імітаційна модель зворотного координатного перетворювача

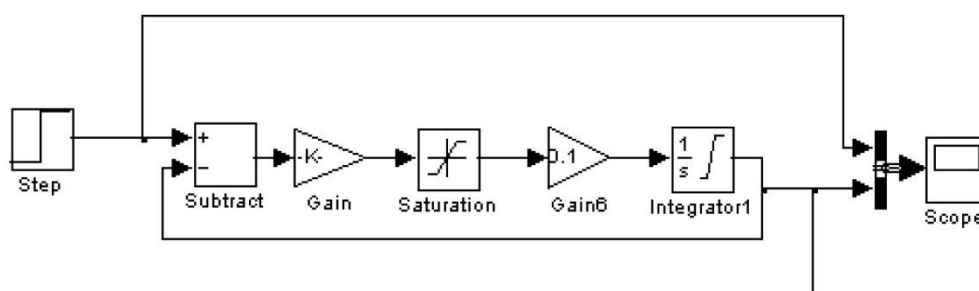


Рисунок 3.5 – Імітаційна модель задатчика інтенсивності

На вході електроприводу встановлено лінійний задатчик інтенсивності (ЗІ) імітаційну модель, наведену на рисунку 2.30. Постійна часу ЗІ за технологією дорівнює $T_{зІ}=10$ с. З його застосуванням вхідний ланцюг

керування електроприводу може бути досягнуто обмеження моменту і струму двигуна в пускових режимах [17].

Динамічні механічні та перехідні характеристики швидкості ротора та електромагнітного моменту АД при пуску від ЗІ при частотах перетворювача частоти 50Гц, 30Гц та 20Гц при коефіцієнті ІР-компенсації $k_{\text{КМ}}=0,1$ отримані моделі представлені на рисунках 3.6–3.10.

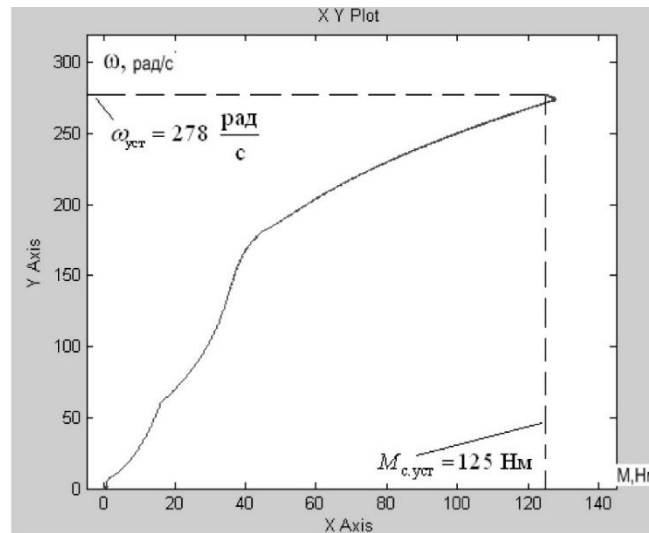


Рисунок 3.6 – Динамічна механічна характеристика при пуску із ЗІ при завданні частоти перетворювача $f = 50$ Гц та з $k_{\text{КМ}}=0,1$

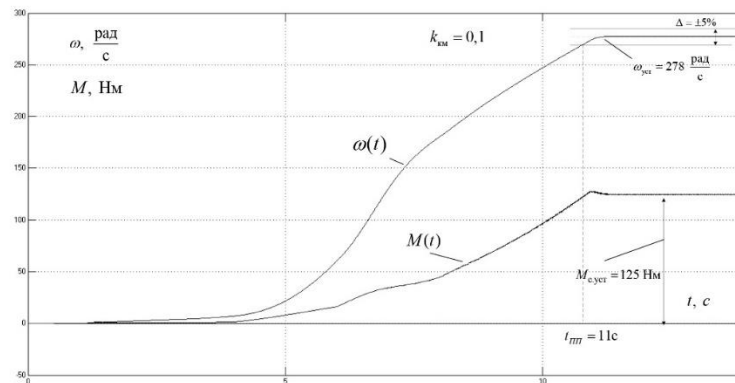


Рисунок 3.7 – Перехідна характеристика швидкості ротора та електромагнітного моменту АД при пуску при пуску із ЗІ при завданні частоти перетворювача $f = 50$ Гц і з $k_{\text{КМ}}=0,1$

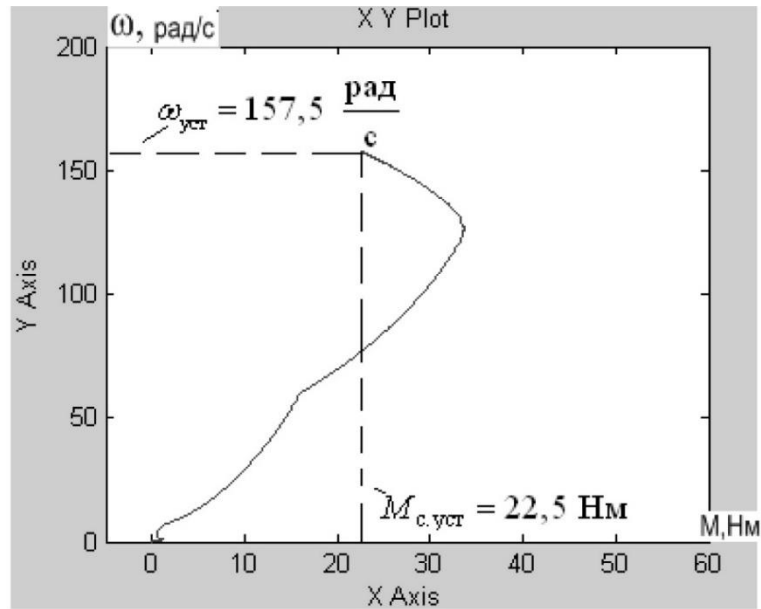


Рисунок 3.8 – Динамічна механічна характеристика під час пуску із ЗІ при завданні частоти перетворювача $f = 30 \text{ Гц}$ та з $k_{км}=0,1$

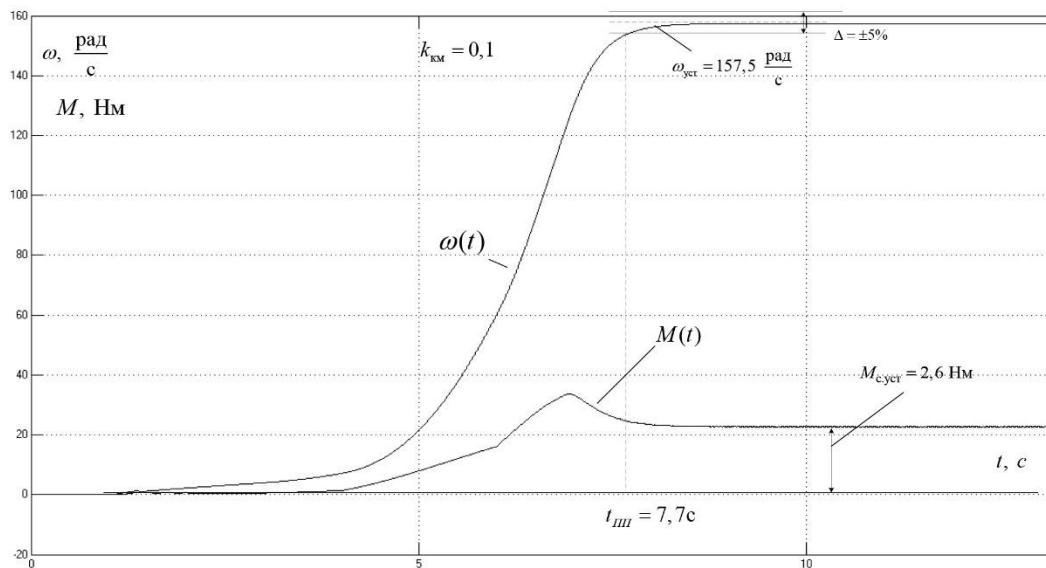


Рисунок 3.9 – Перехідна характеристика швидкості ротора та електромагнітного моменту АД при пуску при пуску із ЗІ при завданні частоти перетворювача $f = 30 \text{ Гц}$ і з $k_{км}=0,1$

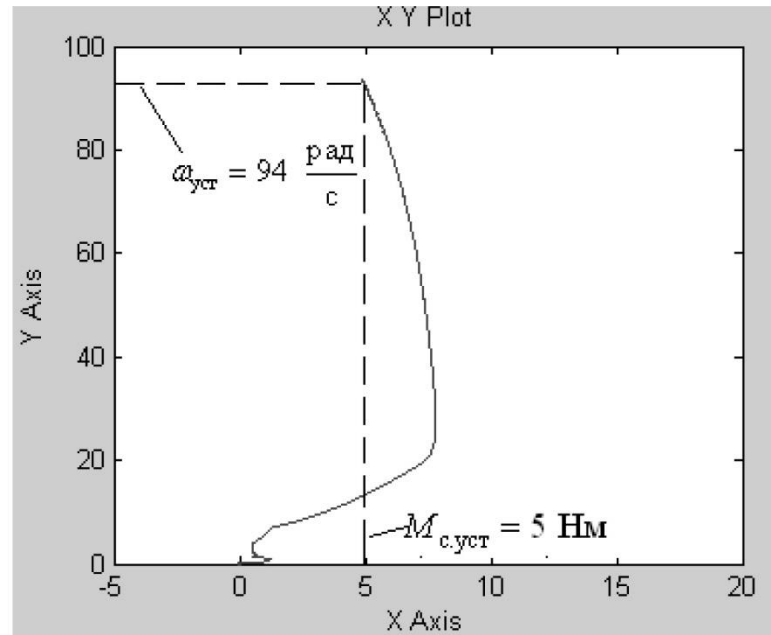


Рисунок 3.10 – Динамічна механічна характеристика при пуску із ЗІ при завданні частоти перетворювача $f = 20$ Гц та з $k_{\text{км}}=0,1$

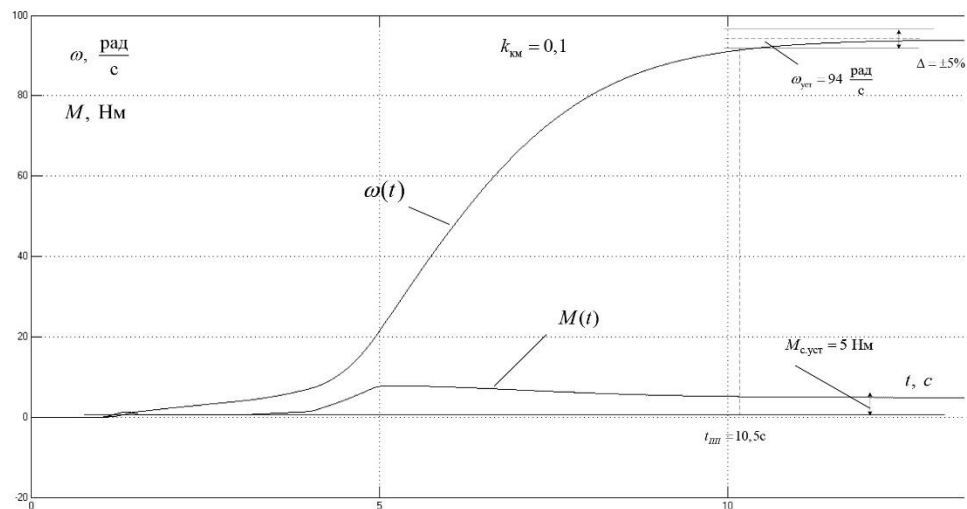


Рисунок 3.11 – Перехідна характеристика швидкості ротора та електромагнітного моменту АД при пуску при пуску із ЗІ при завданні частоти перетворювача $f = 20$ Гц і с

3.2 Система моніторингу та керування водовідливом

Система моніторингу та керування водовідливом (СМУВ) забезпечує:

- 1) автоматичне керування технологічним обладнанням водовідливу без участі оперативного персоналу за сигналами датчиків рівня води в водозбірнику;
- 2) автоматизоване керування обладнанням водовідливу по команді оператора (диспетчера);
- 3) автоматичний контроль стану електрообладнання, роботи механізмів з архівацією параметрів;
- 4) досягнення проектної продуктивності;
- 5) запобігання розвитку аварійних ситуацій;
- 6) скорочення термінів усунення аварійних ситуацій;
- 7) поліпшення умов роботи експлуатуючого і обслуговуючого персоналу;
- 8) диспетчерський контроль роботи;
- 9) технологічний облік мотогодин насосних агрегатів і запірно-регулюючої апаратури;
- 10) зниження питомих норм витрат електроенергії;
- 11) відповідність вимогам правил безпеки і вимогам системи стандартів безпеки в частині керування машинами, виробничими процесами і електроустаткуванням.

6 Призначення, маркування і склад апаратури автоматизації водовідливу ААВ.

Апаратура автоматизації водовідливу ААВ призначена для автоматизації та оптимізації технологічного процесу водовідливу на підприємствах усіх рівнів небезпеки, а також в підземних умовах і на підприємствах підвищеної небезпеки.

Маркування:

ААВ – ХХ У 5;

А – апаратури;

А – автоматизації;

В – водовідливу;

X – кількість насосів;

X – «А» – автоматичне керування засувками,

«Р» – ручне керування засувками;

У – кліматичне виконання по ГОСТ 15150-69;

5 – категорія розміщення по ГОСТ 15150-69;

Приклад замовлення пристрою для 3 насосів з автоматичним керуванням засувками: «ААВ-3А У 5, ДІГ.656131.037».

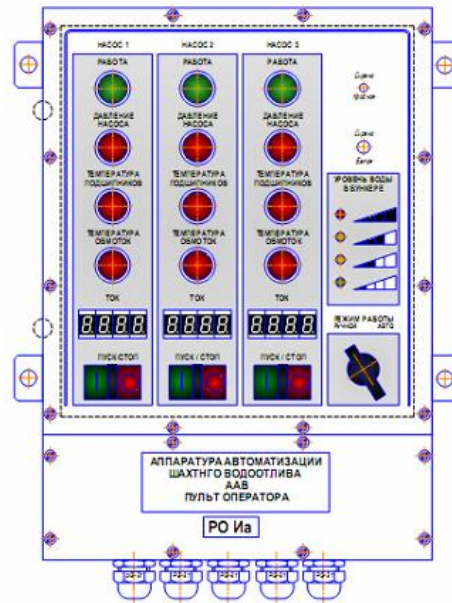


Рисунок 3.12 – Пульт оператора

Апаратура одного горизонту водовідливу складається:

Джерело живлення вибухозахищеним з іскробезпечним виходом ІПВІ - 12-1,5 ДІГ .645243.016;

Пульт оператора водовідливу іскробезпечний ПОВІ-1.1 ДІГ.656623.005.

Датчики (опціонально):

- 1) датчик струму;
- 2) датчик температури підшипників;
- 3) датчик температури статора;
- 4) датчик тиску;
- 5) датчик рівня.

3.3 Функції, що виконуються апаратурою автоматизації водовідливу ААВ

На апаратуру автоматизації водовідливу ААВ покладено виконання наступних функцій:

- 1) включення і вимикання комплектних розподільних пристроїв КРУВ в ручному і автоматичному режимах;
- 2) керування засувками трубопроводу;
- 3) контроль рівня води в резервуарі;
- 4) контроль струму двигунів;
- 5) контроль тиску в вихідному трубопроводі насосів;
- 6) контроль температури підшипників електродвигунів;
- 7) контроль температури обмоток статора електродвигунів;
- 8) контроль положення засувок;
- 9) індикацію рівня води в резервуарі;
- 10) індикацію струму двигунів;
- 11) індикацію перевищення тиску в вихідному трубопроводі насосів, попереджувальне і аварійне;
- 12) індикацію аварійного перевищення температури підшипників електродвигунів;
- 13) індикацію аварійного перевищення температури обмоток статора електродвигунів;
- 14) індикацію положення засувок;
- 15) подачу попереджувальних і аварійних звукових сигналів при досягненні порогових значень технологічних параметрів;
- 16) передачу інформації по іскробезпечній лінії зв'язку RS-485 протокол Modbus диспетчеру;
- 17) реєстрація та зберігання режимів роботи водовідливу і технологічних параметрів на флеш карті функція «чорного ящика».

3.4 Робота функціональної схеми апаратури автоматизації

Напруга 127 В подається на джерело ППВІ, яке служить для живлення пульта оператора іскробезпечною напругою 12 В. В пульті оператора встановлені: програмований контролер ПЛК, універсальний пристрій введення/виведення УПВВ, кнопки керування КR і інформаційні індикатори П. Інформація від датчиків надходить на входи (AI1-AI14, DI1-DI3) універсального пристрою вводу-виводу УУВВ. Датчики струму ДС встановлені в комплектних розподільних пристроях КРПВ і дають інформацію про силу струму двигунів М1, М2, М3, яка надходить на аналогові входи (AI3, AI7, AI11). Датчики тиску ДТ контролюють тиск у вихідних трубопроводах насосів Н1, Н2, Н3 (AI4, AI8, AI12). Датчики температури підшипників ДТП і температури статора ДТЗ встановлені на двигунах М1, М2, М3 (AI1, AI2, AI5, AI6, AI9, AI10). Сигнал положення засувки надходить на цифрові входи DI1-DI3. Кнопки керування КК підключені до цифрових входів (DI4-DI6), а інформаційні індикатори – до цифрових виходів (DO4-DO16). Інформація про рівень води реєструється датчиками рівня ДР і надходить на аналогові входи універсального пристрою введення-виведення (AI13, AI14). Програмований логічний контролер ПЛК послідовно опитує стан входів універсального пристрою УПВВ. За заданим алгоритмом показники датчиків обробляються та відображаються на інформаційних індикаторах П. У разі аварійного значення контрольованого параметра автоматично відключається несправний насос Н. В автоматичному режимі ПЛК в залежності від миттєвих показників датчиків рівня води ДР, а також від швидкості зміни рівня та часу доби керує включенням і відключенням КРУВ, відкриттям і закриттям засувок.

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Техніко-економічне обґрунтування

Основна ідея магістерського дослідження полягає в удосконаленні системи автоматизації шахтного водовідливу. Схемою автоматизації водовідливної установки передбачені такі види захисту, що викликають аварійний зупинку:

- при зниженні або втраті продуктивності;
- при перегріві підшипників;
- при зникненні напруги чи короткого замикання в ланцюгах керування.

Продуктивність кожного насосного агрегату, температура підшипників, а також положення засувки на трубопроводі, що підводить, контролюються безперервно.

Можливості частотно регульованого насоса:

- робота на постійній характеристиці (частковій).
- робота для підтримання постійного тиску або перепаду тиску (потрібний датчик тиску, датчик перепаду тиску).
- робота для підтримки постійної витрати (потрібний електронний витратомір).
- робота для підтримки постійної температури або перепаду температур (потрібний датчик температури, датчик перепаду температур).

Основними перевагами після удосконалення водовідливної установки:

- покращення якості керування технологічним процесом водовідливу;
- підвищена надійність та міцність (послідовність та узгодженість) процесів;
- зниження витрат на електроенергію.

4.2 Визначення витрат на удосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу

Для удосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу закуплені комплектуючі, перелік яких зведений у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Перелік необхідних комплектуючих

Найменування	Тип	Од.виміру	К-ть	Ціна за одиницю грн.	Ціна грн.
Двигун	ПЕД 40-103	шт.	3	50000	150000
ПЧ	E.f-drive.45	шт.	3	25000	75000
Автоматизація шахтного водовідливу	ABB	шт.	1	497000	497000
					722000

Таким чином, витрати на придбання комплектуючих для удосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу дорівнюють:

$$Z_k = 722\,000 \text{ грн.}$$

Розрахунок заробітної платні з нарахуваннями.

Для встановлення системи необхідно виконати роботи по встановленню, монтажу системи керування, демонтажу старого обладнання, наладці та пуску системи. Вказані роботи будуть проводити бригада з 2-х слюсарів 5-го розряду протягом 5-ти днів.

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначимо за формулою:

$$S_{\text{ЗПМ}} = K_{\text{нз}} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{i=1}^m C_{ti} (1 + H); \quad (4.1)$$

де: $K_{\text{нз}}$ – коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату, $K_{\text{нз}} = 1,3$;

λ – коефіцієнт, який враховує премії, $\lambda = 1,25$;

t – час виконання робіт, год;

$C_{\text{і}}$ – часова тарифна ставка працівника і-го розряду.

H – норма нарахування на заробітну плату, $H = 0,22$;

m – кількість робочих, чол.

$$S_{\text{зпм}} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 5 \cdot (37,87 \cdot 2) \cdot (1 + 0,22) = 6006,18 \text{ грн.}$$

Визначення загальної суми витрат.

Витрати на удосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу як суму витрат на купівлю комплектуючих та витрат на заробітну плату з нарахуваннями робітникам, які проводять модернізацію:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{к}} + Z_{\text{зпм}}; \quad (4.2)$$

$$Z_{\text{м}} = 722\,000 + 6006,18 = 728\,006,18 \text{ грн.}$$

4.3 Розрахунок річного фонду роботи системи автоматизації шахтного водовідливу

Розрахунок річного фонду часу роботи системи автоматизації шахтного водовідливу проведемо за формулою:

$$T_{\text{р}} = \frac{T_{\text{ф}}}{\frac{1}{t_{\text{см}} \cdot K_{\text{см}}} + D_{\text{р}}}; \quad (4.3)$$

де: $T_{\text{ф}}$ – річний фонд робочого часу, $T_{\text{ф}} = 251$ днів;

$t_{\text{см}}$ – тривалість зміни в машино-годинах, $t_{\text{см}} = 8$;

$K_{\text{см}}$ – коефіцієнт змінності роботи устаткування, $K_{\text{см}} = 2$;

$D_{\text{р}}$ – простой в машино-днях у всіх видах технічного обслуговування і ремонту, який приходить на одну машино-годину, визначимо за формулою:

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^n d_{pi} \cdot a_i}{T_{\pi}}; \quad (4.4)$$

де: n – число різновидів технічних обслуговувань та ремонтів за міжремонтний період;

d_{pi} – тривалість перебування в i -му ремонті чи технічному обслуговуванні;

До та після модернізації час міжремонтного циклу складає 8760 годин. До удосконалення САК проводилось 14 оглядів впродовж 1,0 години, а після 6 оглядів впродовж 1,0 години. Враховуючи наведене, розраховуємо простой в машино-днях при всіх видах технічного обслуговування до і після модернізації:

$$D_{p1} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 15}{8760} = 0,0017 \frac{\text{маш.днів}}{\text{маш.год}};$$

$$D_{p2} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 6}{8760} = 0,0007 \frac{\text{маш.днів}}{\text{маш.год}};$$

Тоді річний фонд часу роботи системи автоматизації шахтного водовідливу дорівнюватиме відповідно:

$$T_{p1} = \frac{251}{\frac{1}{8 \cdot 2} + 0,0016} = 3915,76 \text{ год},$$

$$T_{p2} = \frac{251}{\frac{1}{8 \cdot 2} + 0,0007} = 3971,52 \text{ год},$$

4.4 Розрахунок річної експлуатаційної системи автоматизації шахтного водовідливу

Річна експлуатаційна продуктивність системи автоматизації шахтного водовідливу визначається за формулою:

$$V = V_{\text{Е.Г.П}} \cdot T_{\text{P}} \cdot K_{\text{ПР}}; \quad (4.5)$$

де: $V_{\text{Е.Г.П}}$ – годинна експлуатаційна продуктивність, ($6 \text{ м}^3/\text{год}$),

$K_{\text{ПР}}$ – коефіцієнт, що враховує простій, не враховане в годинній експлуатаційній продуктивності.

Після вдосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу продуктивність самої станції не зміниться.

Таким чином, до та після удосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу складає:

$$V_1 = 6.3915,76 \cdot 0,97 = 22789,72 \text{ м}^3/\text{рік}.$$

Після модернізації:

$$V_2 = 6.3971,52 \cdot 0,97 = 23114,25 \text{ м}^3/\text{рік}.$$

4.5 Розрахунок поточних річних витрат

Поточні річні експлуатаційні витрати визначаються для системи автоматизації шахтного водовідливу до та після модернізації.

За процесом роботи системи автоматизації шахтного водовідливу спостерігає два оператори 5-го розряду, після удосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу їх склад не змінився.

Витрати на заробітну плату до та після модернізації складають:

$$S_{\text{ЗП}} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 3915,76 \cdot 37,87 \cdot 2 \cdot (1+0,22) = 587969,18 \text{ грн.}$$

$$S_{\text{ЗП}} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 3971,52 \cdot 37,87 \cdot 2 \cdot (1+0,22) = 596341,80 \text{ грн.}$$

Визначення витрат на технічне обслуговування і поточний ремонт системи автоматизації шахтного водовідливу.

Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт системи автоматизації шахтного водовідливу визначимо за формулою:

$$S_{\text{ТО}} = S_{\text{ТОЗ}} + S_{\text{ТОМ}}; \quad (4.6)$$

де: $S_{\text{ТОЗ}}$ – витрати на заробітну плату ремонтників з нарахуваннями;

$S_{\text{ТОМ}}$ – витрати на матеріали та запасні частини.

Витрати на заробітну плату ремонтних робітників з нарахуваннями визначаються за формулою:

$$S_{\text{ТОЗ}} = \frac{T_{\text{Р}}}{T_{\text{Ц}}} \cdot K_{\text{НЗ}} \cdot \lambda \cdot C_{\text{Р}} \cdot \sum_{i=1}^m a_{\text{Рi}} \cdot \text{ч}_{\text{Рi}} \cdot (1 + \text{Н}); \quad (4.7)$$

де: $C_{\text{Р}}$ – середня тарифна ставка ремонтного робітника, що обслуговують установку, грн/год;

$a_{\text{Рi}}$ – кількість техобслуговувань і поточних ремонтів без капітального ремонту;

$\text{ч}_{\text{Рi}}$ – трудоемкість i -го технічного обслуговування та поточного ремонту, до i після – $\text{ч}_{\text{Рi}} = 21,26$, після модернізації – $15,20$.

Витрати на матеріали та запасні частини визначаються за формулою:

$$S_{\text{ТОМ}} = K_{\text{ІІ}} \cdot \frac{S_{\text{ТОЗ}} \cdot (1 - \text{Н})}{K_{\text{НЗ}}} \cdot K_{\text{ЗР}}; \quad (4.8)$$

де: $K_{\text{ІІ}}$ – норма накладних розходів за всіма видами витрат, крім заробітної плати, $K_{\text{ІІ}} = 1,1$;

$K_{\text{ЗР}}$ – коефіцієнт переходу від витрат на заробітну плату до витрат на матеріали та запасні частини, $K_{\text{ЗР}} = 1,25$.

До модернізації для технічного огляду та поточного ремонту необхідно один слюсар КВПіА 5-того розряду. Після модернізації їх склад не змінився. Огляд проводиться 14 разів на рік до модернізації та 6 після.

$$S_{\text{ТОЗ1}} = \frac{3915,76}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 14 \cdot 21,26 \cdot 37,87 \cdot (1 + 0,22) = 9988,76 \text{ грн.}$$

$$S_{\text{ТОЗ2}} = \frac{3971,52}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 15,2 \cdot 37,87 \cdot (1 + 0,22) = 3104,24 \text{ грн.}$$

Витрати на матеріали та запасні частини до модернізації складають:

$$S_{\text{ТОМ1}} = 1,1 \cdot \frac{9988,76 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 8240,73 \text{ грн.}$$

Витрати на матеріали та запасні частини після модернізації:

$$S_{\text{ТОМ2}} = 1,1 \cdot \frac{3104,24 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 2561,00 \text{ грн.}$$

Таким чином, витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт системи автоматизації шахтного водовідливу до модернізації склали:

$$S_{\text{ТО1}} = 9988,76 + 8240,73 = 18229,49 \text{ грн.}$$

після модернізації:

$$S_{\text{ТО2}} = 3104,24 + 2561,00 = 5665,24 \text{ грн.}$$

Величину витрат на електроенергію визначимо за формулою:

$$S_{\text{ЕЛ}} = K_{\text{Ш}} \cdot W_{\text{ЕЛ}} \cdot B_{\text{ЕЛ}} \cdot T_{\text{р}}; \quad (4.9)$$

де: $B_{\text{ЕЛ}}$ – ціна 1 кВт/год електроенергії – 5,5 грн;

$W_{\text{ЕЛ}}$ – витрата за годину енергії, кВт/год.

Енергообладнання системи автоматизації шахтного водовідливу споживало 40 кВт/год, після удосконалення шахтного водовідливу кількість енергоспоживачів зменшилось на 20% до 32 кВт/год.

Виходячи з цього витрати на електроенергію до модернізації склали:

$$S_{\text{ЕЛ1}} = 1,1 \cdot 40 \cdot 5,5 \cdot 3915,76 = 947613,92 \text{ грн.}$$

після модернізації:

$$S_{\text{ЕЛ2}} = 1,1 \cdot 32 \cdot 5,5 \cdot 3971,52 = 768886,27 \text{ грн.}$$

Розрахунок суми річних витрат на експлуатацію системи автоматизації шахтного водовідливу зведений у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Сума річних витрат на експлуатацію

Найменування статті витрат	Величина витрат	
	До впровадження САК, грн.	Після впровадження САК, грн.
Зарплата з нарахуваннями	587969,18	596341,80
ТО та поточний ремонт	18229,49	5665,24
Електроенергія	947613,92	768886,27
Разом	1553812,59	1370893,31

4.6 Розрахунок вартості машино–години роботи системи автоматизації шахтного водовідливу

Розрахунок вартості машино–годин розраховуємо за формулою:

$$S_{\text{МГ}} = \frac{S}{T_p}. \quad (4.10)$$

До модернізації вартість однієї машино-години складала:

$$S_{\text{МГ1}} = \frac{1553812,59}{3915,76} = 396,81 \text{ грн. / год}$$

Після модернізації вартість однієї машино-години змінилась і складає:

$$S_{\text{МГ2}} = \frac{1370893,31}{3971,52} = 345,18 \text{ грн. / год}$$

4.7 Розрахунок вартості технологічної операції на одиницю продукції

Вартість технологічної операції визначається за формулою:

$$S_{\text{П}} = \frac{S}{B}. \quad (4.11)$$

До модернізації вартість складала:

$$S_{\text{П1}} = \frac{1553812,59}{22789,72} = 68,18 \text{ грн. / м}^3.$$

Після модернізації вартість складає:

$$S_{\text{П2}} = \frac{1370893,31}{23114,25} = 59,31 \text{ грн. / м}^3.$$

4.8 Розрахунок економічного ефекту від проведення модернізації

Річний економічний ефект від проведення модернізації визначається за формулою:

$$E = (S_{\text{II1}} - S_{\text{II2}}) \cdot B; \quad (4.12)$$

$$E = (68,18 - 59,31) \cdot 23114,25 = 205023,40 \text{ грн / рік.}$$

Термін окупності витрат по модернізації розрахуємо за формулою:

$$T = \frac{Z_M}{E}; \quad (4.13)$$

$$T = \frac{728006,18}{205023,40} = 3,55 \text{ років.}$$

Отже, термін окупності приблизно 3,55 років.

Висновки за розділом

1. Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт електрообладнання зменшились на 68,92%.
2. Витрати на електроенергію електропривода збільшились на 18,86%.
3. Вартість машино-години роботи електропривода зменшились на 13,01%.
4. Вартість технічної операції для одиниці продукції після модернізації знизилась на 13,01 %.
5. Економічна ефективність від проведеної автоматизації склала 205023,40 грн.
6. Строк окупності витрат складає 3,55 років.

Таблиця 4.3 – Техніко-економічні показники удосконалення системи автоматизації шахтного водовідливу

Показники	Одиниці виміру	Значення		
		до модернізації	після модернізації	абсолютне відхилення
1. Капітальні витрати на модернізацію	грн.	х	728006,18	х
2. Річний фонд часу роботи	год.	3915,76	3971,52	-55,76
3. Річна експлуатаційна продуктивність	м ³	22789,72	23114,25	-324,53
4. Річні експлуатаційні витрати, усього:	грн.	1553812,59	1370893,31	+182919,28
у тому числі: витрати на оплату праці	грн.	587969,18	596341,80	-8372,62
витрати на ТО та ТР	грн.	18229,49	5665,24	+12564,25
витрати на електроенергію	грн.	947613,92	768886,27	+178727,65
5. Вартість однієї машино-години роботи	грн./год.	396,81	345,18	+51,63
6. Вартість технологічної операції	грн./ м ³	68,18	59,31	+8,87
7. Річний економічний ефект	грн.	х	205023,40	х
8. Строк окупності капітальних вкладень	років	х	3,55	х

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра досліджено існуючу автоматизацію водовідливних установок. Розглянуті види і типи водовідливних установок. Запропоновано апаратуру автоматизації шахтного водовідливу ААВ, яка призначена для автоматизації та оптимізації технологічного процесу водовідливу.

Конструкція апаратури автоматизації шахтного водовідливу ААВ складається з вибухозахищеного джерела живлення з іскробезпечним виходом, з пульта оператора водовідливу, а також датчиків струму, температури підшипників та статора, тиску та рівня.

У пульті оператора вбудовані промисловий програмований контролер ППК, блок введення-виведення БВВ, кнопки керування КУ та інформаційні індикатори П.

Також була розроблена та досліджена за допомогою програми Matlab математична модель асинхронного електродвигуна насоса водовідливної установки, імітаційна модель замкнутої системи ПЧ-АТ з ІР-компенсацією. У ході розробки та виконання проекту було здійснено вибір устаткування, вибір та розрахунок параметрів електродвигуна насоса водовідливної установки. Запропоновано використовувати сучасний асинхронний частотно-регульований електропривод. Вибрано електродвигун серії ПЕД 40-103.

Отримано механічні та електромеханічні характеристики обраного асинхронного двигуна, побудовані за розрахунковими та каталожними значеннями.

Також проведено моделювання перехідних процесів при пуску двигуна у програмному середовищі Matlab. З використанням імітаційних моделей побудовано динамічні характеристики. Було реалізовано задатчик інтенсивності, досвідченим шляхом встановлено оптимальне значення часу розгону та закону регулювання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Алиев Р.А. Методы и алгоритмы координации в промышленных системах управления / Р.А. Алиев, М.И. Либерзон. — М.: Радио и связь, 1987. — 208 с.
2. Батицкий В.А., Куроедов В.И., Рыжков А.А. «Автоматизация процессов и АСУ ТП в горной промышленности»: Учеб. Для техникумов. 2-й изд., перераб. И доп. — М.:Недра 1991. — 303 с.
3. Бухгольц В.П. «Основы автоматизации производства на горных предприятиях»: учебник для техникумов. — М.:Недра, 1981, 264с.
4. Виноградов А. Б. Исследование систем управления моментом асинхронного электропривода без датчика скорости / А. Б. Виноградов, Н. А. Глебов // Труды международной семнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», [г. Екатеринбург], 26-30 марта 2018 г. — Екатеринбург: [УрФУ], 2018. — С. 34-39.
5. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. — Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. — 298 с.
6. Галай В. М. Теорія оптимальних систем автоматичного керування технологічними процесами: (Зеленський К. Х., Сільвестров А. М.) навчальний посібник з грифом МОН–Полтава: – ПолтНТУ, –2009. – 153 с.
7. Галай В.М. Автоматизація комплексу технологічних процесів кварцового заводу: монографія: Полтава, ПолтНТУ, – 2009. – 310 с.
8. Галай В.М. Теорія цифрових систем автоматичного керування: навчальний посібник: Полтава, ПолтНТУ, 2009. – 131 с.
9. Голуб А. П. Системи керування електроприводами : навч. посібник / А. П. Голуб, Б. І. Кузнецов, І. О. Опришко, В. П. Соляник. – К. : НМК ВО, 1992. – 352 с.

10. Мещеряков, В.Н. Системы частотного асинхронного электропривода с оптимальным управлением / В.Н. Мещеряков. Липецк. ЛФ МИКТ. - 2010. 118 с.

11. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В.– Кременчук, 2001. – 410 с.

12. Ніколаєнко А.М. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації [Текст]: навчальний посібник / А.М. Ніколаєнко, Н.О. Міняйло. – Запоріжжя, ЗДІА, –2011. – 444 с.

13. Овсяников Ю.А., Караблєв А.А., Топорков А.А. «Автоматизация подземного оборудования»: Справочник рабочего. – М.:Недра, 1990. – 287 с.

14. Онушко В. В., Шефер О. В., Скрильник О. М. Асинхронні машини: посібник із модуля «Асинхронні машини»: – Полтава, ПолтНТУ, –2008. – 183 с.

15. Онушко В. В., Шефер О. В. Електричні машини: Навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ, –2015. – 536 с.

16. Павленко Т. П. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів. Конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / Т. П. Павленко, О. В. Донець, О. М. Петренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 132 с.

17. Півняк Г. Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтноімпульсною модуляцією : монографія / Г. Г. Півняк, О. В. Волков. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2006. – 470 с.

18. Поспелов Л.П. «Основы автоматизации производства»: Учебник для техникумов. – М.:Недра, 1988. – 232 с.

19. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. – Расчёт характеристик электроприводов переменного тока. Ч1.Асинхронный двигатель.: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005 – 136с.

20. Чернышев А.Ю., Ланграф С.В. Исследование систем векторного управления асинхронным двигателем. Методические указания к выполнению лабораторных работ. – Томск: Изд. ТПУ, 2002. – 22с.

21. Червінська Н.В. Алгоритм управління позапиковим електроспоживанням комплексу шахтного водовідливу / Н.В. Червінська, В.І. Бессараб, В.В. Червинський // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування» (МАП–2011). – 2011. – Вип. 9 (179). – С. 246–254.

22. Червинский В.В. Иерархическая двухуровневая система управления дискретно–непрерывным объектом / В.В. Червинский, В.И. Бессараб, Н.В. Червинская // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. — 2008. — Вип. 1 (25). — С. 176–183.

23. Червинский В.В. Многоуровневая система управления комплексом водоотлива горнодобывающего предприятия / В.В. Червинский, В.И. Бессараб, Н.В. Червинская // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2008. – Вип. 15(130). – С. 53–58.

24. Шульга О. В. Навчальний посібник із грифом МОН «Автоматизоване керування електроприводами» з дисципліни «Системи керування електроприводами» для студентів вищих навчальних закладів: – Полтава: ПолтНТУ, – 2007. – 352 с.