

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра електротехніки та енергоефективності  
(повна назва кафедри)

## Пояснювальна записка

до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Аналіз можливості зниження витрат електричної енергії  
насосних агрегатів в умовах ПрАТ «Мотор Січ».

Виконав: студентка 2 курсу, групи 8.1410-3

Грядун О.Ю.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Керівник

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запорізький національний університет

Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра електротехніки та енергоефективності

(по

овна назва кафедри)

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

(повна назва кафедри)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма

141.00.11 Електроенергетика,

електротехніка

(шифр і назва)

та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри В.Л. Коваленко

“ 08 ” 12 2021 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Грядун Ользі Юріївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи Аналіз можливості зниження витрат електричної енергії насосних агрегатів в умовах ПрАТ «Мотор Січ»

керівник магістерської роботи Артемчук В.В., д.т.н., професор

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «30» 06 2021 року № 975-с

2. Строк подання студентом магістерської роботи 01 грудня 2021 року

3. Вихідні дані роботи Загальне річне споживання електроенергії -

890050 кВт; номінальна потужність двигуна – 5500 Вт; кількість двигунів паливної насосної станції – 6 штук; тариф на електроенергію – поточний.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендується розробити):

Вступ. Загальні відомості про підприємство ПрАТ «Мотор Січ». 2) Аналіз

напрямів можливого зниження втрат насосних агрегатів. 3) Розробка заходів

зі зменшення електричних втрат насосних агрегатів. 4) Охорона праці. 5) Техніко-

економічне обґрунтування розроблених заходів

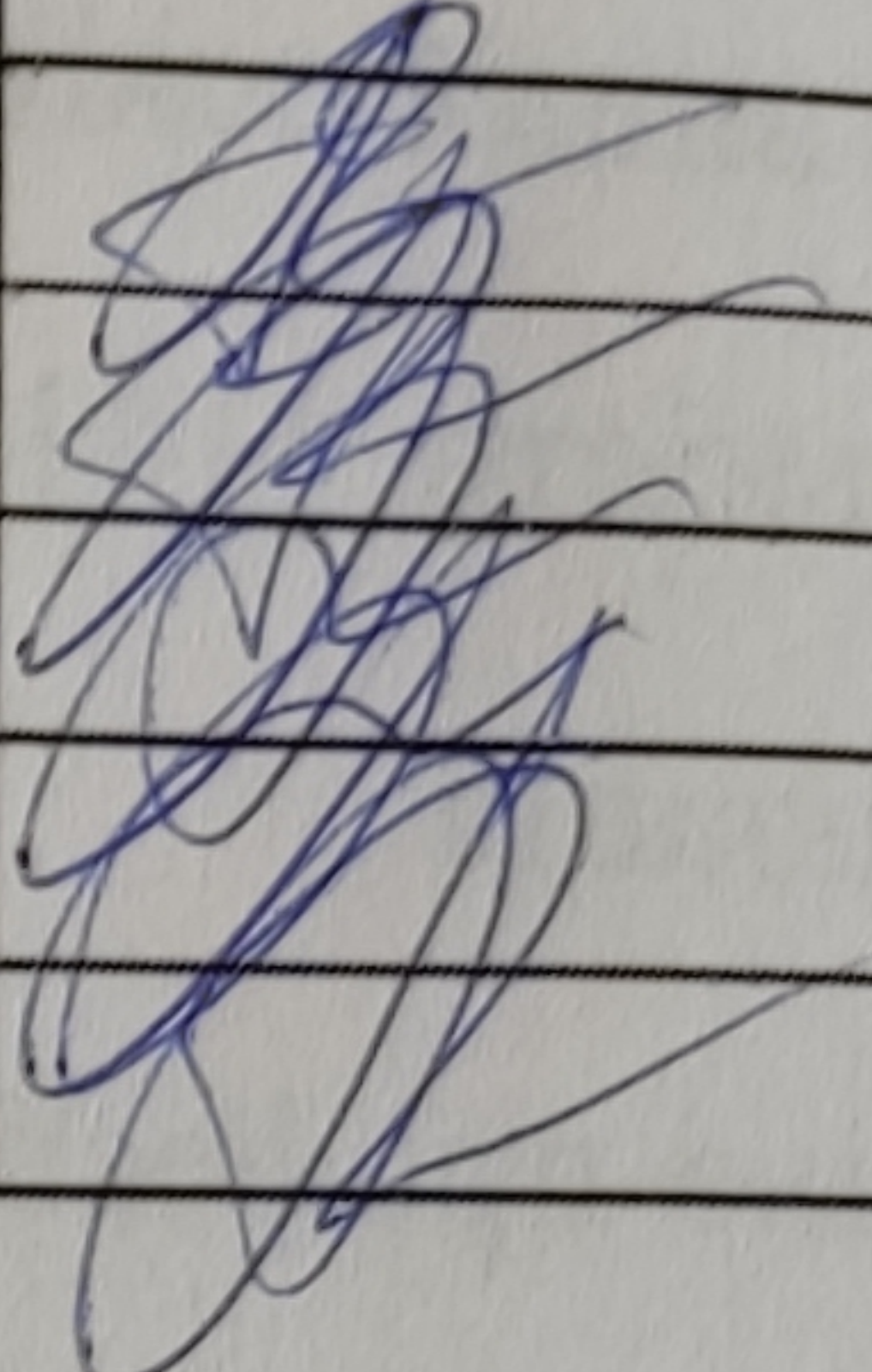
5. Перелік графічного матеріалу (пропонується): Аналіз споживання електроенергії

підприємством; підключення насосних агрегатів; аналіз роботи елементів обладнання;

схеми підключення двигунів електроприводів; конструктивні елементи обладнання;

схеми перетворювачів для електроприводів; схеми моделей системи ПЧ-АД

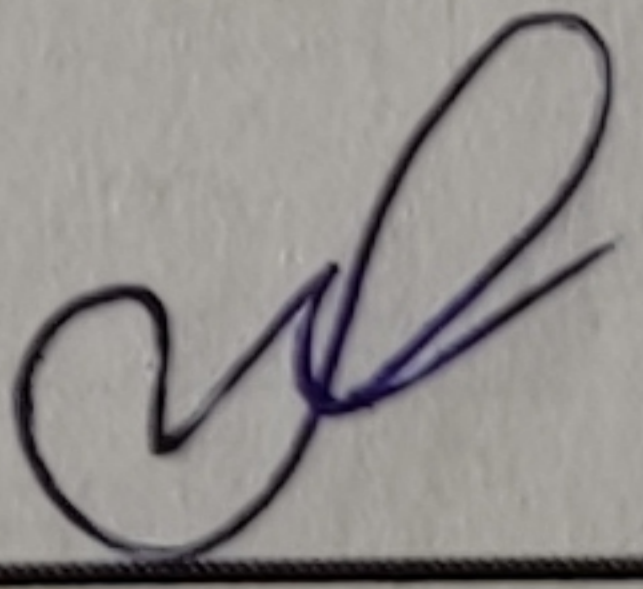
### 6. Консультанти розділів магістерської роботи

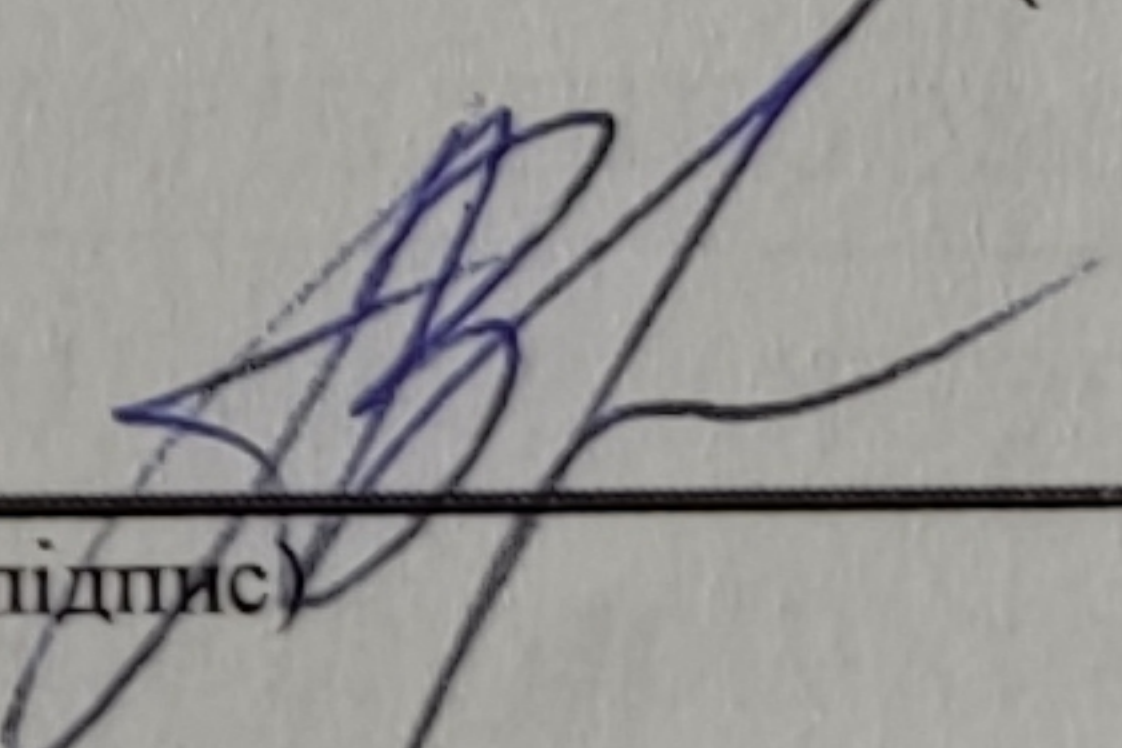
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
		
Розділ 1	Артемчук В.В., професор	
Розділ 2	Артемчук В.В., професор	
Розділ 3	Артемчук В.В., професор	
Розділ 4	Артемчук В.В., професор	
Розділ 5	Артемчук В.В., професор	

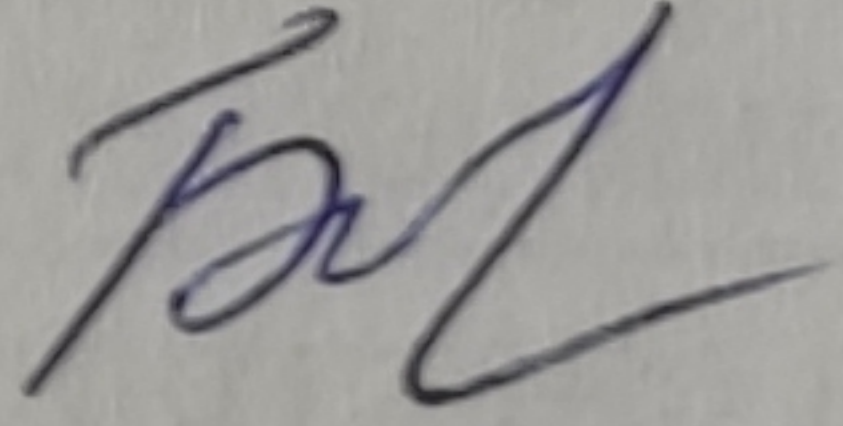
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Вступ. Загальні відомості про підприємство ПрАТ «Мотор Січ»	18.09.2021	
2	Аналіз напрямів можливого зниження втрат насосних агрегатів	10.10.2021	
3	Розробка заходів зі зменшення електричних втрат насосних агрегатів.	10.11.2021	
4	Охорона праці	20.11.2021	
5	Техніко- економічне обґрунтування розроблених заходів	01.12.2021	
	Висновки		

Студент  (підпис) О.Ю. Грядун (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)  (підпис) В.В. Артемчук (ініціали та прізвище)

*Нормоконтроль здійснює*  С.В. Ващенко

## РЕФЕРАТ

Грядун О.Ю. Аналіз можливості зниження витрат електричної енергії насосних агрегатів в умовах ПрАТ «Мотор Січ».

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Артемчук В.В. Запорізький національний університет. Навчально-науковий інженерний інститут ім. Потебні Ю.М. Кафедра електротехніки та енергоефективності, 2021.

Магістерська робота містить 89 сторінок, 29 рисунків, 17 таблиць, 38 літературних джерел.

Анотація. Проаналізовано поточний стан електричного обладнання на підприємстві ПрАТ «Мотор Січ», у тому числі, насосні агрегати. Визначено зв'язок між характеристиками насосних агрегатів в залежності від їх режимів роботи. В роботі було представлено матмодель системи управління (СУ) насосних агрегатів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** насосний агрегат; енергоефективність, система управління, асинхронний двигун, статичний перетворювач частоти.

## ЗМІСТ

Вступ .....	6
1 Загальні відомості про підприємство ПрАТ «Мотор Січ» .....	8
1.1 Загальна характеристика підприємства.....	8
1.2 Аналіз електротехнічного обладнання цеху № 39.....	10
1.3 Аналіз споживання електроенергії обладнанням цеху № 39.....	14
1.4 Аналіз роботи елементів обладнання.....	15
2 Аналіз напрямів можливого зниження втрат насосних агрегатів.....	17
2.1 Електропривод насосних агрегатів.....	17
2.2 Порівняння методів регулювання електроприводів насосних агрегатів.....	23
3 Розробка заходів зі зменшення електричних втрат насосних агрегатів .....	33
3.1 Аналіз режимів роботи насосних агрегатів.....	33
3.2 Вибір необхідного технологічного обладнання.....	38
3.3 Моделювання системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун – відцентровий насос» (ПЧ-АД-ВН) .....	49
4 Охорона праці .....	60
5 Техніко-економічне обґрунтування розроблених заходів.....	70
Висновки .....	76
Перелік посилань.....	77
Додаток А.....	81

## ВСТУП

У наш час проблема енергетичного забезпечення споживачів є першочерговою не тільки для окремої країни, а і всього людства. Перспективність та актуальність питання енергозбереження обумовлені загальносвітовою тенденцією, екологічними пріоритетами, постійним зростанням вартості паливно-енергетичних ресурсів. У таких умовах все більшого значення набувають енергозберігаючі технології та організаційно-економічні методи їх реалізації на всіх етапах розвитку економіки.

Актуальність теми. Насосні агрегати на основі асинхронних двигунів є одними з наймасовіших споживачів електроенергії. Один із шляхів підвищення економічності електроприводу насосних агрегатів пов'язаний з використанням енергоефективних асинхронних двигуна. У таких машинах за рахунок збільшення маси активних матеріалів, застосування високоякісної ізоляції і оптимізації конструкції знижуються втрати енергії і внаслідок цього, відбувається підвищення їх ККД на кілька відсотків. Напрямок розвитку електричних машин, пов'язаний з підвищенням їх енергоефективності, в першу чергу, пов'язаний зі зростанням цін на енергоносії та обмеженнями, пов'язаними з глобальним потеплінням. Саме ці процеси зумовлюють пошук способів підвищити енергоефективність АД, що розробляються для електроприводу насосних агрегатів.

Стимулювання застосування енергозберігаючих заходів забезпечується за рахунок державного економічного регулювання відносин між енергопостачальною організацією і промисловим підприємством прийняттям з метою енергозбереження, підвищення якості електроенергії та надійності електропостачання. Таке стимулювання забезпечується при використанні диференційованого обліку електроенергії по зонах добового графіка навантаження і використанні розробленої міністерством палива і енергетики України методики розрахунку оплати за споживану реактивну електроенергію, яка передбачає гнучку систему знижок і надбавок до тарифів на електроенергію.

Основне завдання енергозбереження з погляду підприємства зводиться до того, щоб із мінімальними витратами забезпечити економію енергії при збереженні незмінними або збільшенні обсягів виробництва, збереженні або підвищенні рівня якості продукції або виконаної роботи з метою зниження собівартості й ціни продукції, підвищення рентабельності й конкурентоспроможності виробництва.

Метою роботи є аналіз можливості зменшення споживання електроенергії насосними агрегатами в умовах підприємства ПрАТ «Мотор Січ».

Об'єкт дослідження – режими роботи насосних агрегатів в умовах ПрАТ «Мотор Січ».

Предмет дослідження – системи управління для насосних агрегатів.

## 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПІДПРИЄМСТВО ПрАТ «МОТОР СІЧ»

### 1.1 Загальна характеристика підприємства

ПрАТ «Мотор Січ» є підприємством, яке розробляє, виробляє, ремонтує і обслуговує авіаційні газотурбінні двигуни для літаків і гелікоптерів. Крім того, ПрАТ «Мотор Січ» також займається промисловими газотурбінними установками.

Важливим етапом у розвитку даного підприємства стало те, що у 1999 р. підприємство отримало статус спец-експортера, тобто правом на самостійний експорт продукції військового призначення. Станом на 2010 рік ПрАТ «Мотор Січ» виробляло та супроводжувало в експлуатації 55 типів і модифікацій двигунів для 61 видів літаків і гелікоптерів [1]. ПрАТ «Мотор Січ» має високий рейтинг серед провідних підприємств високотехнологічного машинобудування України за рівнем інновацій.

До структури ПрАТ «Мотор Січ» входять такі цехи [1] :

- Цех № 14 – цех розподілу води та повітря;
- Цех № 15 – електрогосподарство;
- Цех № 20 – цех загального обладнання;
- Цех № 28 – пуско-налагоджувальні роботи обладнання та установок;
- Цех № 31, 32 – цех збору та розбору авіаційних двигунів;
- Цех № 39 – цех дослідів та випробувань;
- Цех № 42 – зборка роторів для двигунів та турбін;
- Цех № 44 – виготовлення валів та шестерней;
- Цех № 45 – балансування валів двигунів;
- Цех № 46 – лопатковий цех (калібрування, шліфівка, налагодження).



Кількість спожитої електричної енергії заводом наведені в таблиці 1.1 та на рисунку 1.1.

Таблиця 1.1 – Кількість спожитої електроенергії заводом

№ цеху	Кількість спожитої електроенергії, кВт		
	2018	2019	2020
14	79654	81328	82570
15	56981	62438	63282
20	81358	76928	80369
28	68324	70087	72526
31	71459	68222	73460
32	91326	85266	90839
39	98984	93112	99288
42	75917	75721	76218
44	83641	56351	84345
45	88652	68038	89357
46	93554	80446	94556
<b>Всього</b>	<b>889850</b>	<b>817937</b>	<b>906810</b>

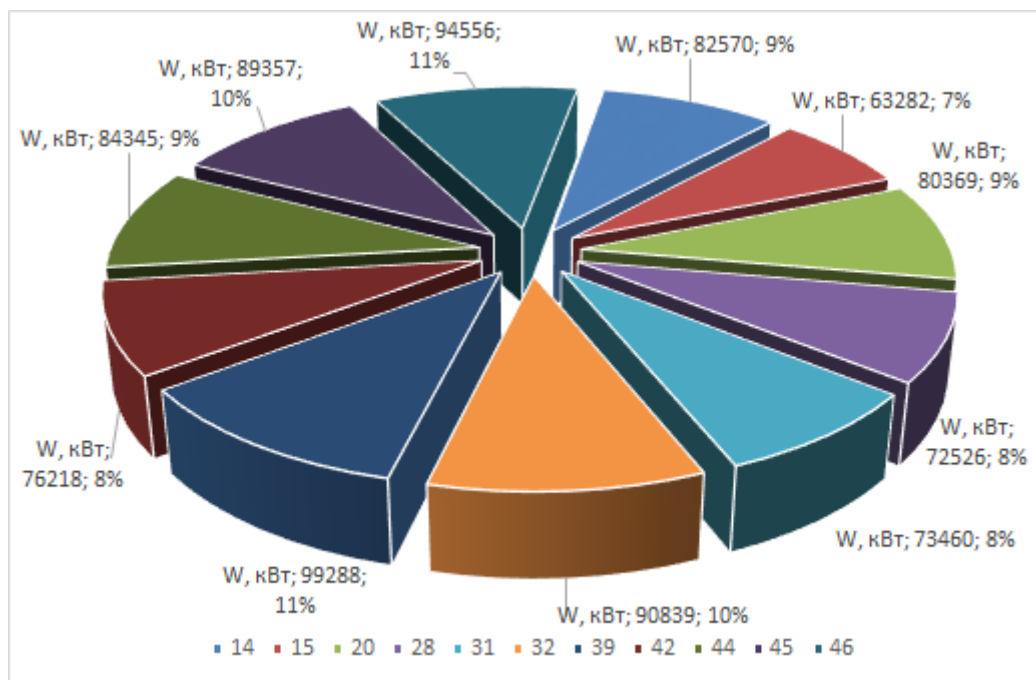


Рисунок 1.1 – Графік споживання електроенергії заводом  
ПрАТ «Мотор Січ» за 2020 рік

З таблиці 1.1 та рисунку 1.1 можна зробити висновок, що одним з найбільших споживачів електричної енергії є цех № 39, технологічне обладнання та технологія якого підлягає подальшому аналізу. Цех споживає значну кількість електроенергії. Саме тому доцільно розглядати електричне обладнання цеху № 39.

## 1.2 Аналіз електротехнічного обладнання цеху № 39

Цех випробувань (№ 39) ПрАТ «Мотор Січ» займається випробуваннями авіаційних двигунів, турбін, камер та підшипників. До споживачів електричної енергії у цеху №39 відноситься таке обладнання [2]:

- компресорна станція;
- паливна насосна станція;
- зневоднення палива;
- масло очистка;
- витяжна вентиляція;
- приточна вентиляція;
- кран - балки.

Компресорна станція відіграла дуже важливу роль у випробуванні авіаційних двигунів, але з модернізацією заводу і введенням в експлуатацію заводської повітряної магістралі, вона стала використовуватися лише за вимогою. У таблиці 1.2 приведені технологічне обладнання компресорної станції.

Таблиця 1.2 – Технологічне обладнання компресорної станції

Тип двигуна	Потужність, кВт	Об/хв	Струм, А	Кількість
AV210L-8431P10	75	720	253	2
4AM808493	7,5	1400	3,6	2
V3-225M	45	1460	87,5	1

Паливна насосна станція працює безперервно, усю добу. Вона підтримує постійний тиск у системі, що імітує подачу палива в реальних умовах. Це потрібно для отримання найбільш достовірних даних про двигун під час

випробування, на рисунку 1.2 зображене паралельне підключення насосів у системі подачі палива. У таблиці 1.3 приведені технологічне обладнання паливної насосної станції [2].

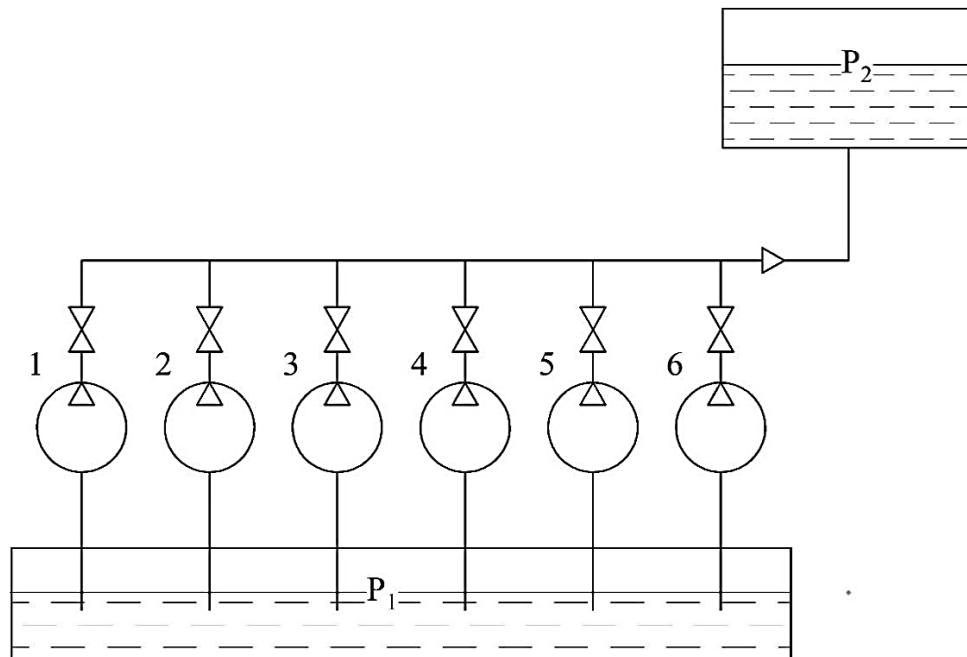


Рисунок 1.2 – Схема паралельного підключення насосних агрегатів у системі подачі палива для випробувань

Таблиця 1.3 – Технологічне обладнання паливної насосної станції

Тип двигуна	Потужність, кВт	Об/хв	Струм, А	Кількість
BAO12-2Y2	1,1	2860	2,5	1
2B112M4Y25	5,5	3000	11,6	6
BA42-6Y2	4	950	9,6	2
4AMX132M4	11	1500	22	1

Високі тягові характеристики і надійність роботи двигунів в значній мірі залежить від якості рідкого ракетного палива. Процеси підготовки ракетного палива, призначеного для заправки в паливні баки, з подальшим перекачуванням в систему, зводяться до очищення пального від твердих частинок, зневоднення (видалення вільної (емульсійної) і розчиненої води), та охолодженню або нагріванню до необхідної температури (ізольованими тенами

всередині паливних баків). У таблиці 1.4 наведене технологічне обладнання зневоднення палива. Допускається наявність води в паливі, але не більше 0,0015 % за масою [3].

Таблиця 1.4 – Технологічне обладнання зневоднення палива

Тип двигуна	Потужність, кВт	Об/хв	Струм, А	Кількість
ROA21-4	0,55	1400	1,43	1
AIP90L4Y3	2,2	1400	8,6	1

При випробуванні ракетних двигунів використовуються спеціальні мастила, вартість яких дуже велика. Через це мастила використовують декілька разів, очищуючи його. Для очистки масла використовують метод сепарації, який представляє собою процес центрифугування. Відцентрові сили впливають на найбільш важкі частки, які переміщуються до стінок посудини, утворюючи кільцевий шар відкладень. Другий шар складається з води, а третій - з очищеного мастила. У таблиці 1.5 приведені технологічне обладнання відділу маслоочистки [4]. Вентиляція є одним з важливих технологічних факторів на підприємстві для коректного виконання технології виробництва. В цеху випробувань витяжна вентиляція використовується за потребою, після випробування двигунів для очищення повітря від шкідливих випарювань всередині боксу, та при інших забрудненнях повітря цеху. У таблиці 1.6 приведені технологічне обладнання витяжної вентиляції [2].

Таблиця 1.5 – Технологічне обладнання відділу маслоочистки

Маслоочистка				
Тип двигуна	Потужність, кВт	Об/хв	Струм, А	Кількість
2B100L4Y25	4	1425	8,85	1
B90L4Y25	2,2	1400	5,15	1
BAO32-4	3	1425	6,8	1

Таблиця 1.6 – Технологічне обладнання витяжної вентиляції

Витяжна вентиляція				
Тип двигуна	Потужність, кВт	Об/хв	Струм, А	Кількість
AIP80A2Y3	1,5	2850	8,6	2
4A90L4Y3	2,2	1420	8,7	4
AIP90L4Y3	2,2	1400	8,6	3
4AM13254Y3	7,5	1450	15	2
4AM112M4Y3	5,5	960	12	3
4AX71B4Y3	0,75	1370	3,8	5
B71B4Y2	0,75	1395	1,9	3
2B90L4Y25	2,2	1400	8,5	2

Приточна вентиляція, аналогічно витяжній, використовується за потребою у холодний період року, для обігріву боксів випробувань та частково для побутових приміщень. У таблиці 1.7 приведені технологічне обладнання приточної вентиляції [2]. Використання кран балок на підприємстві – це одна з основних вимог на сьогоднішній день. Кран балки відрізняються функціональністю і надійністю, довговічністю і практичністю. У таблиці 1.8 приведений перелік двигунів кранбалок [2].

Таблиця 1.7 – Технологічне обладнання приточної вентиляції

Приточна вентиляція				
Тип двигуна	Потужність, кВт	Об/хв	Струм, А	Кількість
4AM112M4Y3	5,5	1425	12	17
4AM132S4Y3	7,5	1440	15	3
4AM132M6Y3	7,5	960	16	3
4AM132M4Y3	11	1460	22	1
4A80LA4	2,2	1420	4	2
4AM80A4Y3	1,1	1400	2,8	2
4AM112M4Y3	5,5	960	12	2

Таблиця 1.8 – Класифікація двигунів кран балок

Кран балки				
Тип двигуна	Потужність, кВт	Об/хв	Струм, А	Кількість
4АМх71А	0,55	1370	2,9	24
А1205КВН	0,25	840	3,25	12
КГ2412-6	8	920	21,4	12

Судячи з обстеження обладнання цеху випробувань, основна частка роботи доводиться на паливні насоси, які працюють цілодобово.

### 1.3 Аналіз споживання електроенергії обладнанням цеху № 39

В цеху випробувань був проведений аналіз технологічного обладнання споживання електричної енергії. Результати енергетичного обстеження зазначені у таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 – Споживання електричної енергії обладнанням цеху

Споживання електричної енергії, кВт год			
Обладнання	Добове	Тижневе	Щомісячне
Компресорна станція	-	630	2520
Паливна насосна станція	792	4752	19008
Зневоднення палива	5,5	38,5	165
Масло очистка	36,8	257,6	1104
Витяжна вентиляція	20	140	600
Приточна вентиляція	264	1848	7920
Кран балки	-	17,6	70,4

З таблиці 1.9 видно, що найбільшим споживачем електричної енергії цеху є паливна насосна станція та приточна вентиляція. Модернізація приточної вентиляції відбувалась в 2017 році та досі є актуальною. Актуальним є дослідження роботи саме насосних агрегатів, які є основним технологічним обладнанням.

#### 1.4 Аналіз роботи елементів обладнання

Насос – це гідравлічний пристрій, що забезпечує всмоктування рідини, її нагнітання і переміщення. У своїй роботі вони використовують принцип передачі рідини кінетичної і потенційної енергії. Насоси бувають декількох видів, і розподіл відбувається виходячи з їх технічних параметрів [5]. Основні відмінності між різними типами насосів, є різний ККД, потужність, продуктивність, напір і тиск виходу потоку. У цеху випробувань встановлено в основному відцентрові насоси (рисунок 1.3).

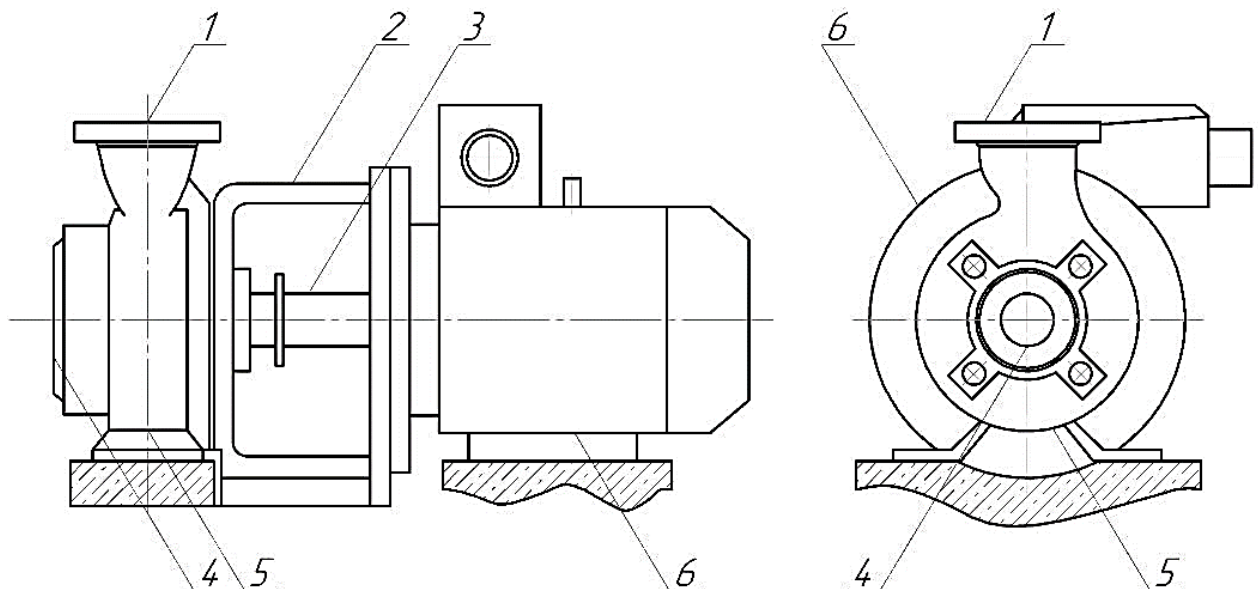


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд відцентрового насосу з асинхронним двигуном [5]:

1 – напірний патрубок; 2 – захисний кожух; 3 – вал двигуна;  
4 – всмоктувальний патрубок; 5 – корпус насосу; 6 – асинхронний двигун

Основним робочим елементом відцентрових насосів є диск, на якому зафіксовані лопатки. Вони мають нахил в сторону, протилежну напрямку руху. Лопатка закріплюється на валу, який приводиться в рух електричним двигуном. У конструкції може бути використано одне або два колеса. У другому випадку лопатки з'єднують їх між собою. Принцип дії відцентрового насоса заснований на тому, що вода через всхідний патрубок надходить в робочу камеру. Рідина,

захоплена обертовими лопатками, починає рухатися разом з ними. Відцентрова сила переміщує воду від центру колеса до стінок камери, де створюється підвищений тиск [6]. За рахунок нього рідина викидається через вихідний отвір. Завдяки тому, що рідина рухається постійно, насоси такого типу не створюють пульсацію у трубопроводі. На рисунку 1.4 зображено рух робочого колеса та рідини у відцентровому насосі.

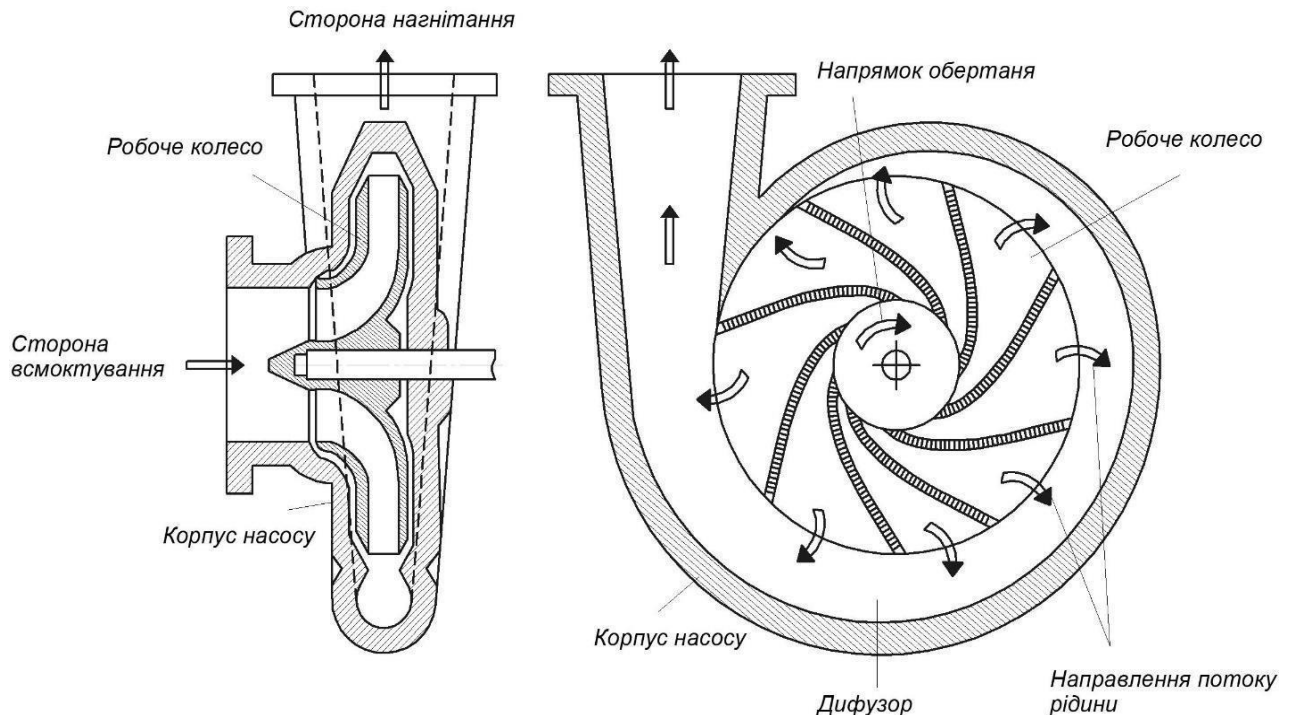


Рисунок 1.4 – Рух робочого колеса та рідини у відцентровому насосі

На розглядуваному підприємстві відцентрові насоси використовуються для перекачування ракетного палива (керосин) для проведення випробувань двигуна. Паливо закачується до турбіни та починається випробування [7]. Головним технологічним обладнанням цеху випробувань №39 ПрАТ «Мотор Січ» є насосна станція. Оскільки це обладнання споживає більше 68 % від загального споживання електричної енергії цехом, слід провести аналіз можливого підвищення енергоефективності. Частина обладнання цеху є технічно та морально застарілою, тому необхідно провести аналіз класифікації насосних установок та способів їх регулювання, та обрати найбільш раціональний варіант обладнання.



## 2 АНАЛІЗ НАПРЯМІВ МОЖЛИВОГО ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

### 2.1 Електропривод насосних агрегатів

Об'ємні насоси. Для перекачування в'язких рідин використовують об'ємні насоси. У цих насосах енергія двигуна безпосередньо перетворюється в енергію рідини. Це високонапірні насоси, чутливі до забруднення рідини. Робочий процес в об'ємних насосах невривноважений (висока вібрація), тому необхідно створювати для них масивні фундаменти. Також для цих насосів характерна нерівномірність подачі. Великою перевагою таких насосів можна вважати здатність до сухого всмоктування або інакше ще кажуть самовсмоктування [8]. Процес об'ємних насосів заснований на поперемінному заповненні робочої камери рідиною і витіснення її з робочої камери. Деякі види об'ємних насосів:

- поршневі насоси можуть створювати досить високий тиск, погано працюють з абразивними рідинами, можуть використовуватися для дозування рідини;

- пластинчасті насоси забезпечують спокійне всмоктування, рівномірне на виході з насоса, можуть використовуватися для дозування. Бувають як регульовані, так і нерегульовані. У пластинчастих регульованих насосах зміна подачі здійснюється за рахунок зміни обсягу робочої камери завдяки зміні ексцентриситету ротора і статора. Для регулювання застосовують механічні та гідравлічні регулятори;

- гвинтові насоси забезпечують рівномірний потік на виході з насоса, можуть використовуватися для дозування рідини;

- імпелерні насоси забезпечують ламінарний потік на виході з насоса і можуть використовуватися в якості дозаторів. Можуть бути виготовлені в харчовому, масло- та бензостійкому і кислотнолужному виконанні;

- мембранні насоси створюють невисокий тиск, можуть використовуватися для дозування;

– перистальтичні насоси створюють невисокий тиск, хімічно інертні, можуть використовуватися для дозування.

Загальні властивості об'ємних насосів:

– герметичність, тобто постійне відділення напірної гідролінії від всмоктуючої (лопатеві насоси герметичністю не володіють, а є проточними);

– циклічність робочого процесу і пов'язані з нею порціонність і пульсації подачі та тиску. Подача об'ємного насоса здійснюється не рівномірним потоком, а порціями;

– незалежність тиску, створюваного в напірної гідролінії, від подачі рідини насосом;

– самовсмоктування, тобто здатність об'ємних насосів створювати у всмоктувальній гідролінії вакуум, достатній для підйому рідини вгору у всмоктувальній гідролінії до рівня розташування насоса (лопатеві насоси не є самовсмоктуючими) [9].

Динамічні насосні агрегати (рис. А1, додаток А) [10]. Для динамічних насосів характерне подвійне перетворення енергії, а саме: механічна – кінетична + потенційна; кінетична – потенційна. У динамічних насосах можна перекачувати забруднені рідини, вони мають рівномірну подачу і врівноваженість робочого процесу. На відміну від об'ємних насосів, вони не здатні до самовсмоктування. Динамічні насоси підрозділяються на:

– лопатеві насоси, робочим органом у яких служить лопатеве колесо або дрібнозахідний шнек. До них відносять відцентрові насоси, у яких перетворення механічної енергії приводу в потенційну енергію потоку відбувається внаслідок відцентрових сил, що виникають при взаємодії лопаток робочого колеса з рідиною. Відцентрові насоси підрозділяють на:

а) відцентрово-шнековий насос. Являє собою вид відцентрового насоса з підведенням рідини до робочого органу виконаному у вигляді дрібнозахідного шнека великого діаметра (дисків), розташованому по центру, з викидом по дотичній вгору або пліч від корпусу. Такі насоси здатні перекачувати карамелізовані маси і маси які склеюються, типу

клею;

б) консольний насос. Являє собою вид відцентрового насоса з одностороннім підведенням рідини до робочого колеса, розташованого на кінці валу, віддаленому від приводу;

в) радіальні насоси, робочими органами яких є радіальні робочі колеса. Тихохідні одноступінчасті і багатоступінчасті насоси з високими значеннями напору при низьких значеннях подач;

г) осьові (пропелерні) насоси, робочим органом яких служить лопатеве колесо пропелерного типу. Рідина в цих насосах переміщуються уздовж осі обертання колеса. Швидкохідні насоси з високим коефіцієнтом швидкохідності, характеризуються великими значеннями подач, але низьких значеннях напору;

д) півосьові (діагональні, турбінні) насоси, робочим органом яких служить напівосьові (діагональне, турбінне) лопатеве колесо;

е) вихрові насоси – окремий тип лопатевих насосів, у яких перетворення механічної енергії в потенційну енергію потоку (напір) відбувається за рахунок утворення вихрів в робочому каналі насоса;

ж) струменеві насоси, в яких переміщення рідини здійснюється за рахунок енергії потоку допоміжної рідини, пари або газу (немає рухомих частин, але низький ККД);

з) тарани (гідротарани), що використовують явище гідравлічного удару для нагнітання рідини (мінімум рухомих частин, майже немає, що труться, простота конструкції, здатність розвивати високий тиск на виході, але мають низькі ККД та продуктивність) [11].

Двигуни електроприводів насосних агрегатів [12, 13].

Синхронні двигуни [12, 13]. Синхронні електродвигуни змінного струму застосовуються для приводу потужних насосів, які характеризуються великою тривалістю роботи. Частота обертання синхронних електродвигунів пов'язана постійним відношенням з частотою мережі змінного струму, в яку ця машина включена. Схема підключення синхронного двигуна показана на рисунку 2.1.

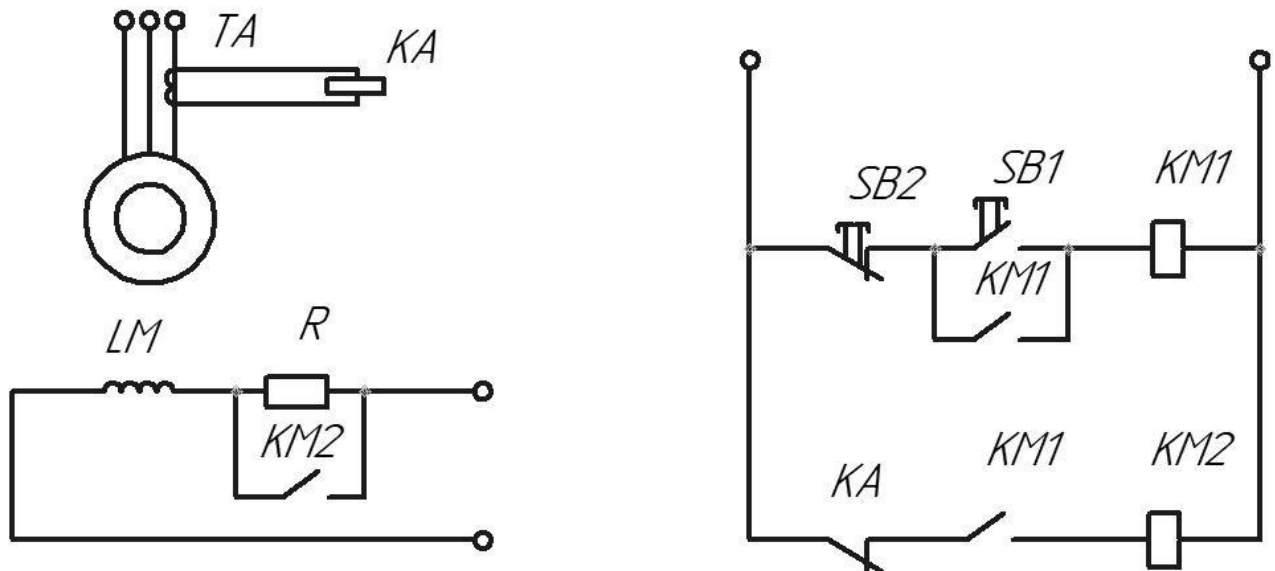


Рисунок 2.1 – Принципова схема підключення синхронного двигуна

Ротор синхронної машини відрізняється від ротора асинхронної наявністю робочої обмотки для створення постійного магнітного поля, що взаємодіє з обертовим магнітним полем статора. Робоча обмотка ротора живиться постійним струмом від збудника, яким може служити або генератор постійного струму, або тиристорний збудник. Генератор постійного струму може розташовуватися окремо від електродвигуна або кріпитися на валу ротора.

Основні переваги синхронного електродвигуна перед асинхронним [12, 13]:

- економія електроенергії;
- при коливаннях напруги в мережі синхронний електродвигун працює стійкіше, допускаючи короткочасне зниження напруги до 0,6 від номінального
- синхронний електродвигун може працювати з коефіцієнтом потужності ( $\cos \varphi$ ), що дорівнює одиниці, що покращує коефіцієнт потужності мережі.

Основним недоліком синхронних електродвигунів є те, що момент на їх валу при пуску дорівнює нулю, тому їх необхідно розкручувати тим чи іншим способом до швидкості, близької до синхронної. Для цієї мети більшість сучасних синхронних електродвигунів має в роторі додаткову пускову короткозамкненою обмотку, аналогічну обмотці ротора асинхронного двигуна.

Асинхронні двигуни. До приводних електродвигунів насосних агрегатів крім їх великої потужності, пред'являється низка специфічних вимог. Одним з визначальних є необхідність пуску двигунів під навантаженням. Конструкція електродвигуна повинна також допускати досить тривалий час обертання ротора в зворотну сторону. Для поліпшення умов роботи енергетичних систем, де застосовуються потужні насосні станції, використовують можливість частих повторних пусків, що, в свою чергу, висуває підвищені вимоги до конструкцій обмотки статора і пускової обмотки електродвигуна, нагрівання яких визначає тривалість необхідної паузи між пусками і допустиму кількість пусків за аналізований період. Короткозамкнені асинхронні двигуни є найбільш доцільними для невеликих насосів. Вони значно дешевше електродвигунів всіх інших типів. Також їхнє обслуговування набагато простіше. Пуск цих електродвигунів прямий, при цьому не потрібно додаткових пристроїв, що дає можливість значно спростити схему автоматичного керування агрегатами. Підключення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором показано на рисунку 2.2 [12, 13].

Однак при прямому включенні короткозамкнених асинхронних електродвигунів дуже висока кратність пускового струму, який для двигунів потужністю 0,6 - 100 кВт в 5-7 разів вище номінального струму. Такий короткочасний поштовх пускового струму відносно безпечний для двигуна, але викликає різке зниження напруги в мережі, що може погано позначитися на інших споживачах енергії, приєднаних до тієї ж розподільчої мережі. З цих причин допустима номінальна потужність асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, запущених прямим включенням, залежить від потужності мережі і в більшості випадків обмежується 100 кВт.

Асинхронні двигуни з фазним ротором. Вони мають більш складну і дорогу конструкцію, так як обмотки ротора у них з'єднуються із зовнішнім пусковим реостатом через три контактних кільця із ковзаючими по ним щітками. Схема підключення асинхронного двигуна з фазним ротором показано на рисунку 2.3.

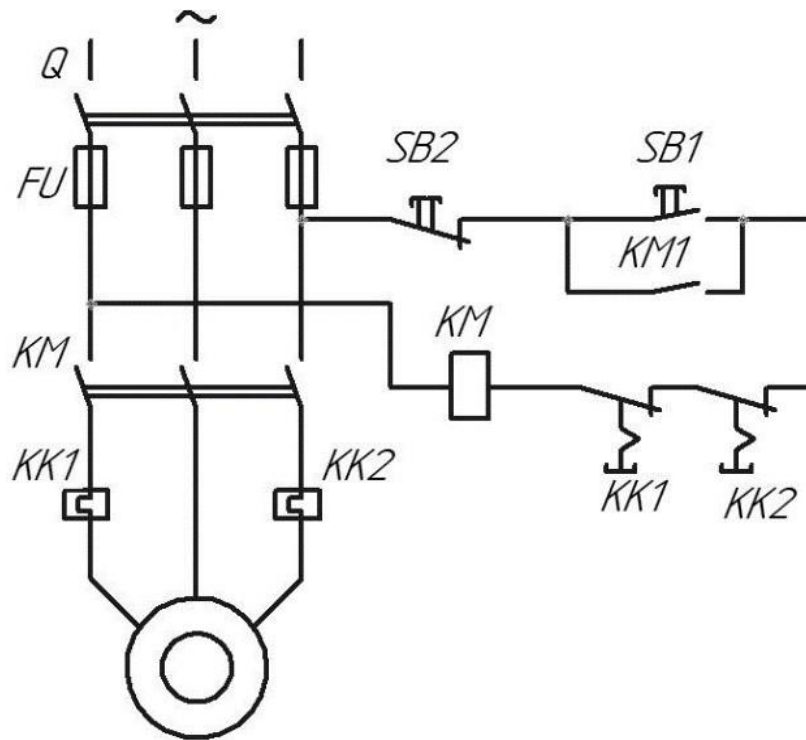


Рисунок 2.2 – Принципова схема підключення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором [13]

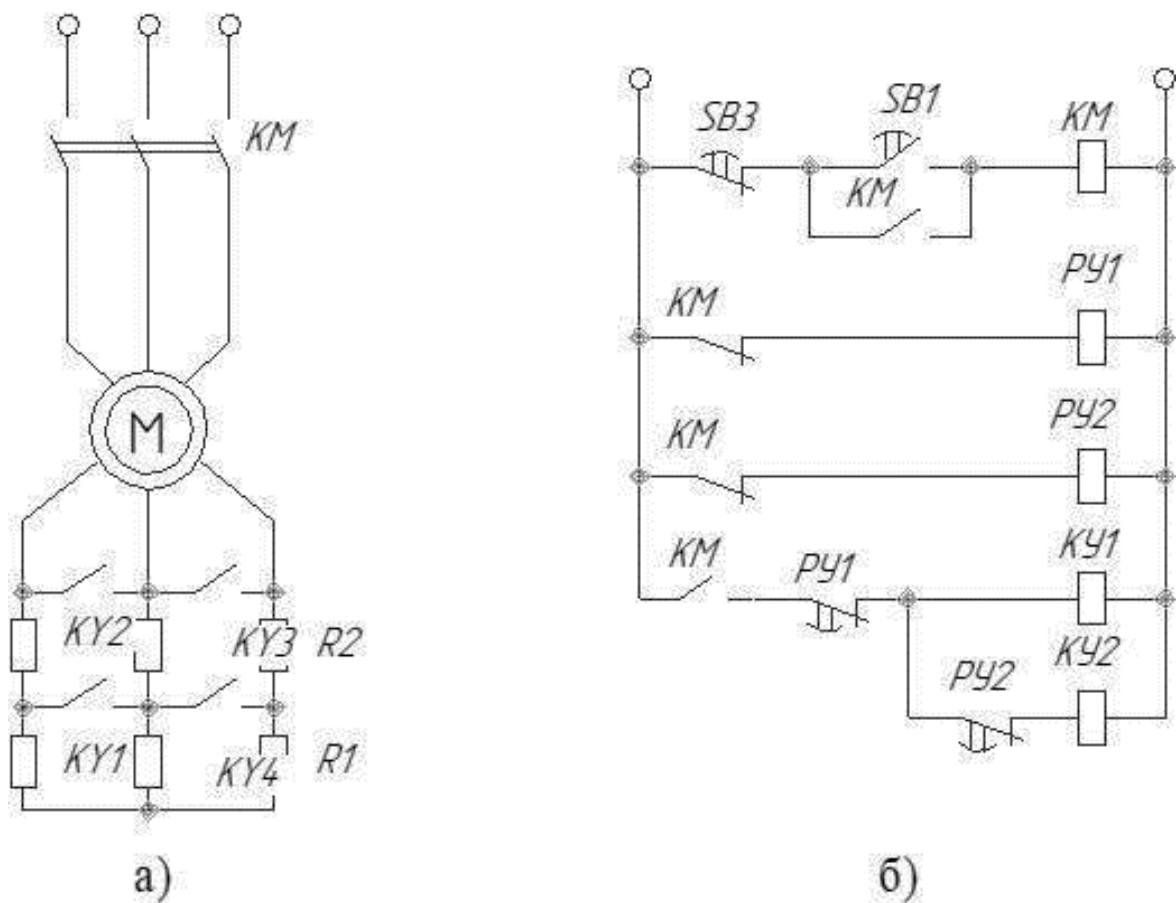


Рисунок 2.3 – Принципова схема підключення асинхронного двигуна з фазним ротором: а) силова схема; б) схема керування [13]

Перед пуском асинхронного двигуна з фазним ротором в коло ротора за допомогою реостата вводять додатковий опір, завдяки чому при включенні електродвигуна зменшується сила пускового струму в міру збільшення частоти обертання двигуна. Опір поступово зменшується, а після того як електродвигун досягне частоти обертання близькою до нормальної, опір пускового реостата цілком виводять, обмотки замикаються і двигун продовжує працювати як короткозамкнений.

## 2.2 Порівняння методів регулювання електроприводів насосних агрегатів

Регулювання насосного агрегату дроселюванням [14]. Під регулюванням роботи насоса мається на увазі процес зміни співвідношення між подачею і напором. Існують два основних способи регулювання подачі відцентрових насосів. Перший спосіб передбачає зміну умов роботи системи «насос-мережа», другий шляхом зміни характеристики насоса. Перший спосіб здійснюється дроселюванням засувками на напірній або всмоктуючій лінії, перпуском частини рідини з напірного трубопроводу у всмоктуючий, впусканням повітря в усмоктувальний патрубок насоса.

Спосіб регулювання подачі засувкою на напірному патрубку насоса заснований на збільшенні опору в напірній лінії. Цей спосіб найбільш поширений, так як в цьому випадку не потрібно установки додаткового обладнання. При даному способі регулювання змінюється характеристика мережі. При закриванні засувки на напірному трубопроводі збільшується опір трубопроводу. Характеристика трубопроводу стає більш крутою, ККД насосної установки зменшується зі збільшенням різниці між тиском, що розвивається насосом, і тиском, необхідним в мережі. Характеристика роботи насосного агрегату при дроселюванні представлена на рисунку 2.4.

Даний спосіб регулювання можливий тільки в сторону зменшення подачі, застосовується для насосів, що мають плавну характеристику, протягом короткого часу.

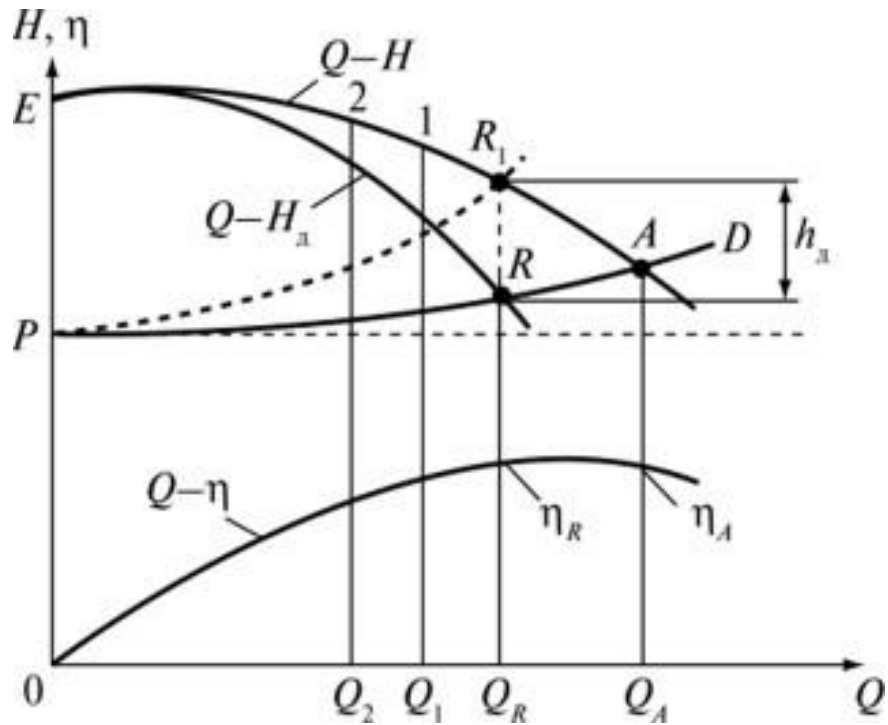


Рисунок 2.4 – Характеристики роботи насоса при дроселюванні [14]

Регулювання насосних агрегатів шляхом впуску повітря. Спосіб регулювання подачі шляхом впуску повітря у всмоктувальний патрубок насоса доцільний, коли фактична висота всмоктування для даного насоса значно менше допустимої, а впуск повітря не погіршує роботу системи. При впуску повітря, ККД установки знижується тим більше, чим більше повітря впускається в насос. Однак цей спосіб регулювання, як правило, більше економічний, ніж регулювання напірною засувкою. Спосіб дозволяє обмежено змінювати подачу через різке погіршення кавітаційних властивостей насоса [15 – 16].

Регулювання насосних агрегатів гідromуфтою [15]. На насосних станціях найбільш широко застосовуються короткозамкнені асинхронні двигуни, які не допускають зміни частоти обертання. При постійній частоті обертання ротора електродвигуна для зміни частоти обертання робочого колеса насос і електродвигун з'єднуються за допомогою регульованої гідromуфти. На рисунку 2.5 зображена загальна конструкція гідromуфти.



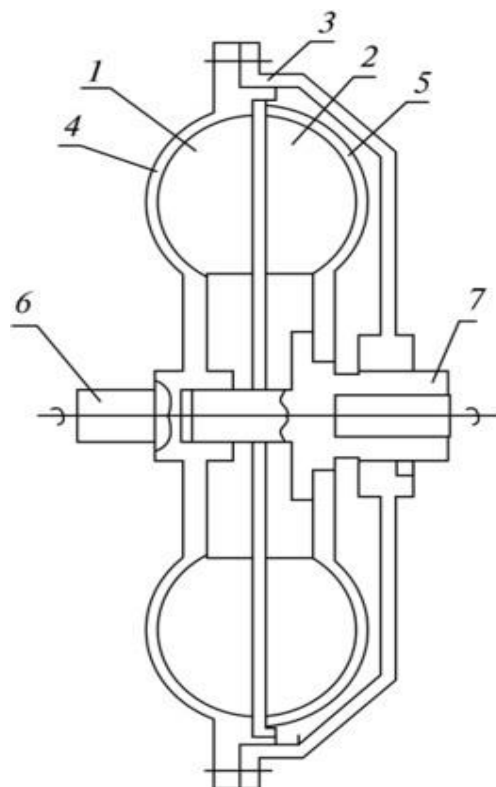


Рисунок 2.5 – Конструкція гідромуфти:

- 1 – насосне колесо; 2 – турбіна; 3 – корпус; 4, 5 – диски насоса і турбіни;  
6 – вал двигуна; 7 – вал турбіни

Робочими елементами гідромуфти є провідне лопатеве насосне колесо відцентрового типу і ведене лопатеве колесо, яке виконує функцію реактивної турбіни. Обидва колеса мають, як правило, плоскі радіальні лопатки. До насоса приєднаний корпус, який обертається при роботі. Диски насоса і турбіни виконані у вигляді чаш з криволінійними утворюють. У сукупності з міжлопастними каналами частина порожнини гідромуфти, укладена між чашами насоса і турбіни, є робочою порожниною. Між торцями коліс є невеликий осьовий проміжок, завдяки чому можливе обертання одного колеса щодо іншого. Замкнута порожнина гідромуфти заповнюється робочою рідиною, найчастіше мінеральними малов'язкими маслами. В пожежонебезпечних умовах застосовують воду і водні емульсії, а також важкозаймисті синтетичні масла. У приводному блоці насос з'єднується валом з двигуном, а турбіна валом з механічною передачею. При включенні двигуна, лопастева система насоса захоплює в обертання робочу рідину і відкидаючи до периферії робочої порожнини, направляє її на лопатки турбіни. У турбіні кінетична енергія

робочої рідини, запасена в насосі, перетворюється в механічну енергію обертання, необхідну для подолання сил опору руху і інерції махових мас машини. Робоча рідина, протікаючи в напрямку осі обертання уздовж лопаток, впливає на них і, віддавши енергію, всмоктується насосом на його найменшому радіусі. Процес передачі і перетворення енергії від насоса до турбіни відбувається при роботі гідromуфти безперервно, і замкнута циркуляція робочої рідини постійно забезпечує при цьому силовий зв'язок між колесами. Основним способом регулювання частоти обертання провідного валу є зміна наповнення рідиною робочого простору коліс гідromуфти [15]. Зміна наповнення робочої рідини і введення в порожнину гідromуфти простого дроселюючого диска дозволяють розширити діапазон переданої потужності. Основною перевагою регульованою гідromуфти є забезпечення безступінчастої, автоматичної і швидкої зміни частоти обертання провідного валу.

Регулювання насосних агрегатів перепуском рідини. Регулювання подачі перепуском рідини застосовується для усунення нестійкої роботи насосів і здійснюється перепуском з напірної лінії у всмоктувальну лінію частини подачі насоса. При цьому відбувається збільшення загальної подачі насоса і зменшення подачі в мережу. За рахунок зменшення витрат в мережі її характеристика змінюється і стає більш пологою. При цьому тиск, що розвивається насосом, зменшиться. Перепуск рідини у всмоктувальний трубопровід покращує кавітаційні властивості насоса, але наявність циркуляції знижує ККД системи. З точки зору економічності вказаний спосіб регулювання прийнятний для насосів з коефіцієнтом швидкохідності  $n_s > 300$  і для вихрових насосів, у яких при збільшенні подачі потужність зменшується [15]. У відцентрових насосах з меншими коефіцієнтами швидкохідності регулювання подачі перепуском призводить до збільшення потужності насоса і перевантаження електродвигуна. Для реалізації зазначеного способу регулювання потрібно пристрій циркуляційного трубопроводу і установка додаткової арматури, що призводить до збільшення габаритів установки.

Регулювання насосних агрегатів за допомогою частотно-регульованого приводу. Останнім часом для регулювання числа обертів широко

застосовується частотно-регульований привід насоса. Частотний привід включає в себе перетворювач частоти і асинхронний електродвигун, який є складовою частиною насосу. Перетворювачі частоти – це силові електронні пристрої, призначені для перетворення одно- або трифазної напруги з постійною частотою 50 Гц в трифазну напругу змінної частоти в діапазоні від 0 до 400 Гц. Ця властивість перетворювачів частоти дозволяє використовувати їх для безступінчастого регулювання швидкості будь-яких асинхронних електродвигунів, в тому числі електродвигунів насосів і компресорів [16]. Швидкість обертання асинхронного електродвигуна при використанні перетворювача частоти регулюється шляхом зміни частоти і напруги живлення двигуна. ККД такого перетворення становить близько 98 %, з мережі споживається майже виключно активна складова струму навантаження, мікропроцесорна система керування забезпечує високу якість управління електродвигуном і контролює безліч його параметрів, запобігаючи можливості розвитку аварійних ситуацій [16].

При з'єднанні насоса з електродвигуном за допомогою перетворювача частоти пуск двигуна відбувається плавно, без пускових струмів і ударів, що знижує навантаження на двигун і механізми, збільшуючи термін їх служби.

Застосування регульованого електроприводу на базі перетворювачів частоти забезпечує:

- збільшення терміну служби обладнання, трубопроводів та зменшення витрат на їх обслуговування;
- мінімальну залежність ходу технологічного процесу від дій обслуговуючого персоналу;
- можливість повної автоматизації технологічних процесів з виключенням суб'єктивного фактора в оперативному управлінні;
- скорочення споживання електроенергії при зменшенні необхідного тиску;
- можливість скорочення кількості працюючих насосних агрегатів за рахунок збільшення потужності одного або двох діючих двигунів і, відповідно, зменшення будівельних обсягів при капітальному будівництві або ремонті;

- роботу силового електрообладнання без компенсуючих конденсаторів;
- підвищення надійності електрообладнання за рахунок усунення ударних пускових струмів
- можливість зменшення заявленої електричної потужності за рахунок виключення значних пускових струмів при традиційному пуску насосного агрегату; зниження кількості аварій мережі і насосних агрегатів за рахунок можливості застосування плавного пуску;
- можливість автоматичного повторного включення насоса.

Економія електроенергії забезпечується за рахунок зниження надлишкового тиску на виході насосного агрегату, а також підвищення його ККД [17]. Управління апаратурою частотного регулювання здійснюється вбудованим контролером, який забезпечує підтримку заданого тиску при змінах витрати, виконання необхідної послідовності операцій пуску і зупинки насоса, технологічні блокування, ідентифікацію аварій, виконання операцій повторного включення або автоматичного включення резервного агрегату, збір і передачу на диспетчерський пункт інформації про роботу насоса. Вартість апаратури частотного регулювання досить висока, проте економія електроенергії при регулюванні досягає 20-30%, внаслідок чого термін окупності на апаратуру, як правило, протягом 2 років. Крім того, сучасні перетворювачі частоти мають широкий набір функцій і дозволяють здійснювати автоматизацію насосних станцій [18]. На рисунку А.2 представлена класифікація способів регулювання насосних агрегатів, їх переваги та недоліки.

Особливості роботи асинхронних двигунів в насосних агрегатах. Конструкція та принцип роботи асинхронних двигунів достатньо широко викладено у літературі [19], тому у даній роботі доцільно зауважити лише деякі моменти, що є корисними для основного матеріалу.

Основною характеристикою, на основі якої ведеться розрахунок робочої точки при різних частотах обертання, є механічна характеристика насосного агрегату. Розглянемо отримання механічної характеристики насосного агрегату на прикладі насосного агрегату КМ 65-50-160. Характеристики насоса (рисунок 2.6), що показують взаємозалежність напору  $H$ , подачі  $Q$ , потужності  $P_N$

насоса при номінальній частоті обертання двигуна  $n_n = 1450$  об/хв визначені за каталогом [20, 21].

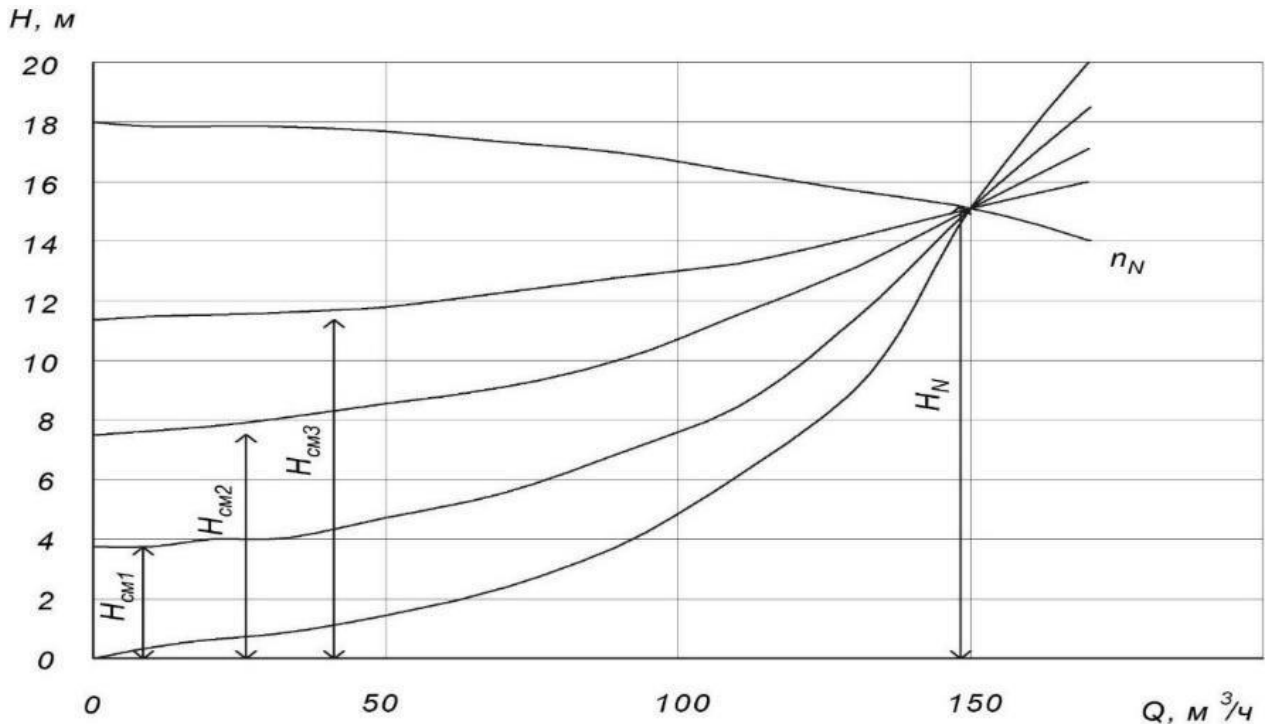


Рисунок 2.6 – Графік спільної роботи насосного агрегату KM 65-50-160 і трубопроводу

Одну з основних особливостей насосних агрегатів, як навантажувальних машин для електроприводу, становить механічна характеристика:

$$M_c = f(n)$$

Відомо, що механічні характеристики насосного агрегату мають вентиляторний характер [21]. Зазвичай для вентиляторів  $k = 2$ , а для насосних агрегатів  $k = 3$ , проте на практиці залежність механічної характеристики має більш складну форму, вид даної характеристики залежить значною мірою від параметрів мережі, на яку працює насосний агрегат.

На характер механічної характеристики суттєво впливає вид характеристики мережі, а саме співвідношення статичної та динамічної складовими необхідного напору. Механічна характеристика насосного агрегату може бути отримана при спільному аналізі характеристик трубопроводу і насосного агрегату при різних частотах обертання ротора асинхронних

двигунів.

Характеристики насосного агрегату, які одержані при зміні частоти обертання представлені на рисунку 2.7. Точки перетину даних характеристик визначають робочі точки насосного агрегату [21].

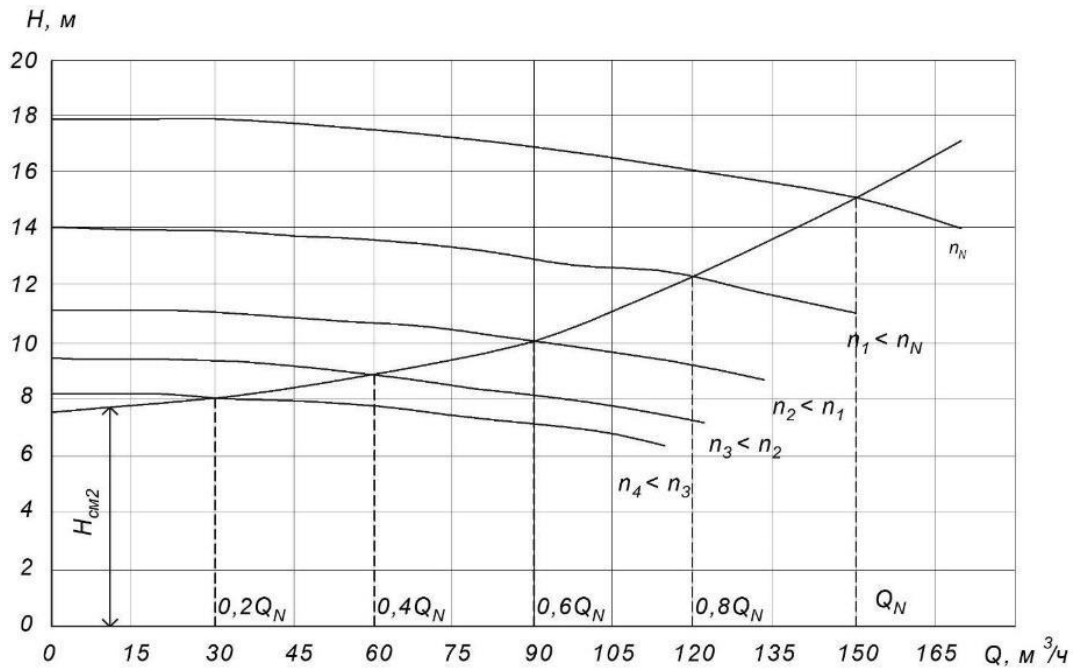


Рисунок 2.7 – Характеристики насосного агрегату KM 65-50-160 і трубопроводу при зміні частоти обертання

Згідно літературних джерел [20], для насосів характерна істотна залежність моменту опору на валу від швидкості, оскільки насоси зазвичай працюють на протитиск, то ця залежність більш різка, ніж квадратична (вентиляторна). Характер залежностей представлений на рисунку 2.8.

При регулюванні швидкості від нуля до мінімальної, залежність носить квадратичний характер, потім коли насос розвине натиск, достатній для подолання статичного напору, характер залежності  $M_c$  змінюється і залежить від величини статичної складової напору. Аналітичну залежність можна отримати, використовуючи апроксимовані характеристики насосного агрегату. Механічні характеристики багато в чому залежать від величини статичної складової напору, а також від виду характеристики трубопроводу, у випадку з насосним агрегатом залежність виявляється більш складною.

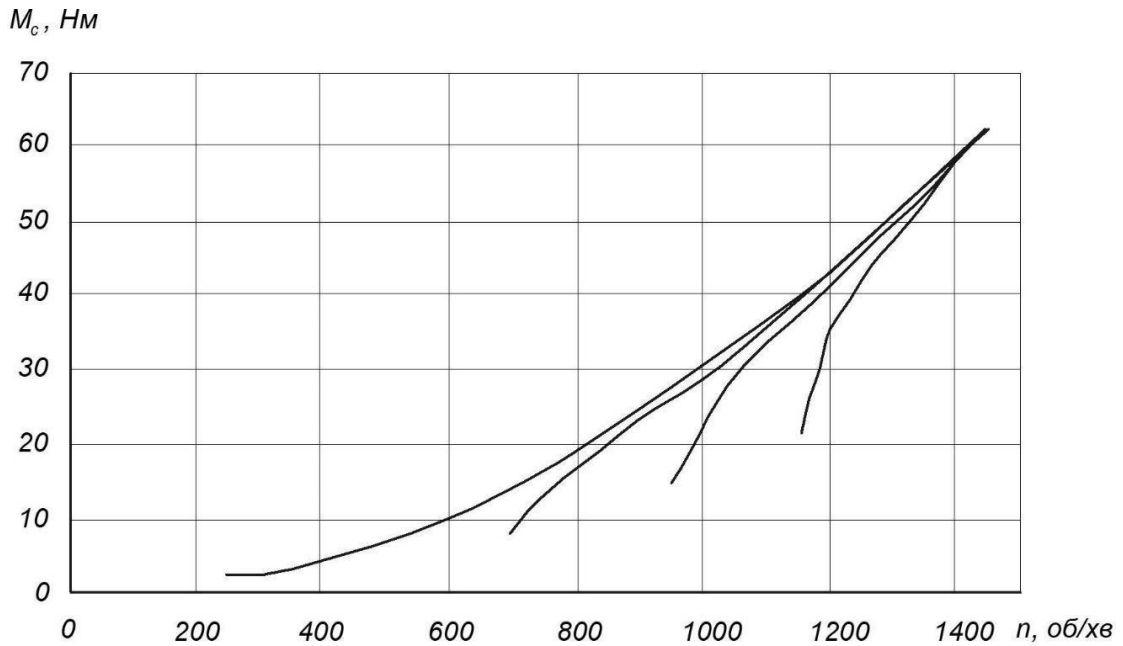


Рисунок 2.8 – Механічні характеристики насосного агрегату КМ 65-50-160 при різних значеннях статичної складової напору

Однак при роботі системи на підтримку постійного значення напору в мережі, механічна характеристика насосного агрегату виявляється відмінною від отриманих вище характеристик. Механічна характеристика насосного агрегату як навантажувальної машини асинхронного двигуна при підтримці постійного напору представлена на рисунку 2.9.

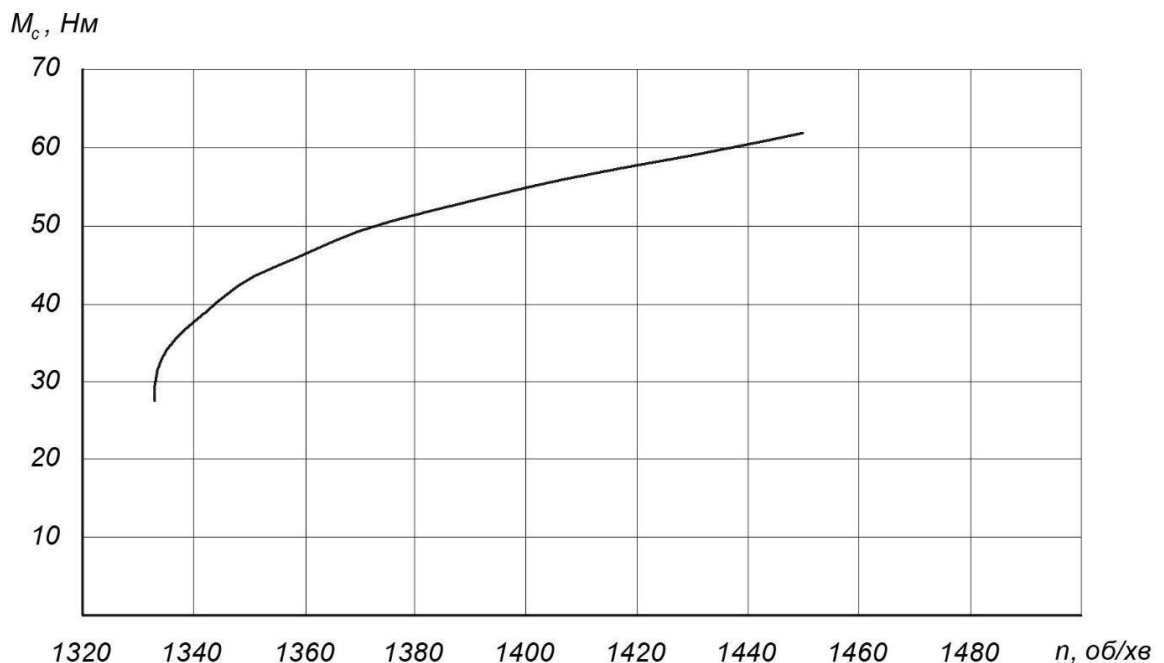


Рисунок 2.9 – Механічна характеристика насосного агрегату КМ 65-50-160 при підтримці постійного напору в мережі

Як показує аналіз механічних характеристик (рис. 2.9) показує, що в міру зростання статичної складової напору скорочується діапазон регулювання, при зниженні швидкості момент зменшується інтенсивніше, ніж це визначалося квадратичною залежністю.

Таким чином, можна зробити висновок, що розрахунок механічних характеристик повинен проводитися з урахуванням реального режиму роботи насосної установки. Механічні характеристики насосних агрегатів, отримані за представленої послідовності, дій, використовуються для подальших розрахунків регульованого електроприводу насосних агрегатів середньої потужності [22]. Механічні характеристики необхідні для точного визначення робочої точки асинхронного двигуна; використовуваної в математичній моделі оцінки економічної ефективності роботи асинхронного двигуна в складі регульованого електроприводу насосних агрегатів.



## 3 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЗІ ЗМЕНШЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

### 3.1 Аналіз режимів роботи насосних агрегатів

Як відомо, дроселюванням називається введення додаткового опору шляхом прикриття засувки, як правило, напірної лінії [23]. При повністю відкритій засувці робота системи «насос-мережа» характеризується режимною точкою  $A_1$  яка лежить на перетині робочої характеристики насоса  $Q - H$  і напірної характеристики мережі (рис. 3.1). При цьому насос розвиває тиск  $H_1$  подачі  $Q_1$ .

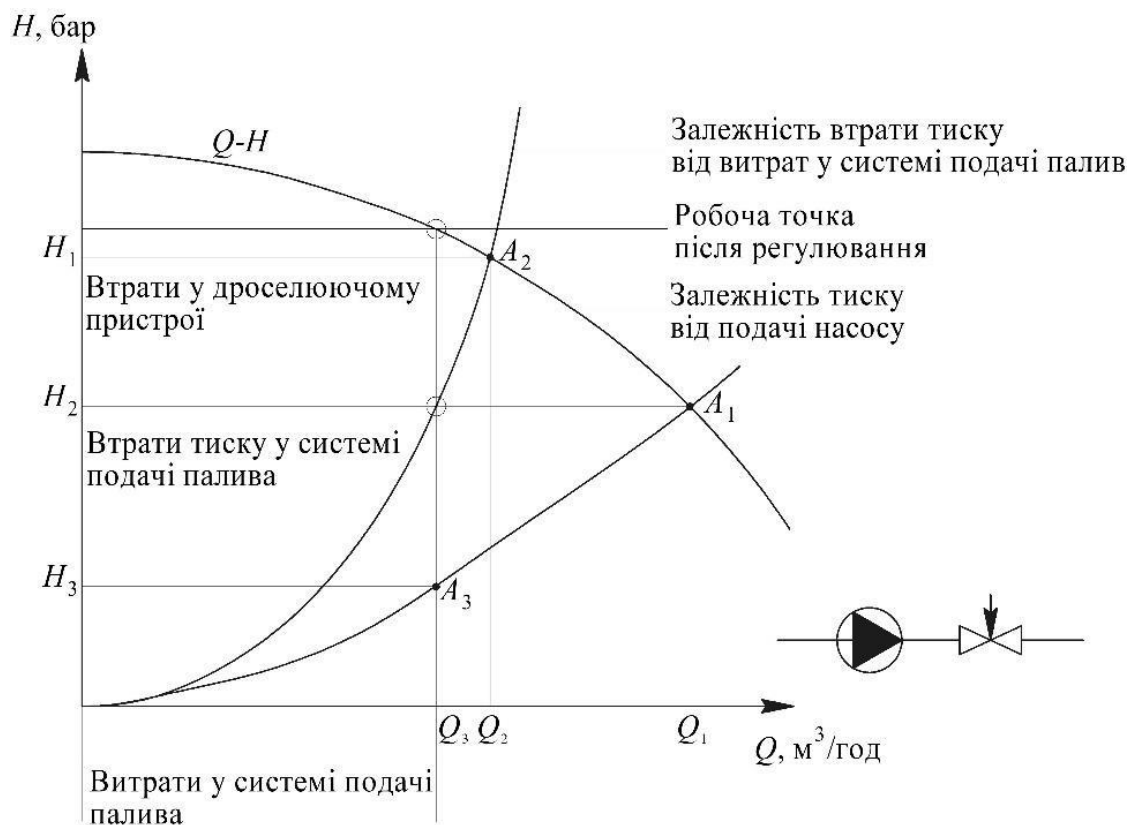


Рисунок 3.1 – Регулювання роботи насоса дроселюванням

Для зменшення подачі до необхідної, наприклад, величини  $Q_3$ , необхідно частково прикрити засувку. Так як опір засувки входить в загальний опір системи трубопроводів, то напірна характеристика системи трубопроводів підніметься більш круто і буде перетинати характеристику насоса  $Q - H$  в режимній точці  $A_2$ , відповідної необхідної подачі  $Q_3$ . При цьому необхідний тиск в

мережі дорівнює цьому необхідний тиск в мережі дорівнює  $H_3$ , а насос розвиває тиск  $H_2$ , отже, внаслідок прикриття засувки і збільшення опору в мережі втрачається потужність  $N_{nom}$

$$N_{nom} = \rho g Q_3 (H_2 - H_3) \quad (3.1)$$

Даний метод регулювання подачі порівняно простий, але він неекономічний внаслідок того, що значна частина енергії, споживаної насосом, витрачається на подолання сил опору в засувці відразу ж після виходу перекачується рідини з насоса. Такий метод регулювання дає можливість тільки зменшити подачу, його можна використовувати при регулюванні роботи насосів малої і середньої потужності з плавною робочою характеристикою  $Q-H$ , коли потрібне регулювання протягом короткого періоду часу. Прикриття засувки на всмоктувальній лінії не рекомендується, так як це може призвести до значних втрат напору в ній і надмірного зниження тиску, а отже, до виникнення кавітації і зриву роботи насоса. Зазначений метод регулювання, згідно [23], практично не використовується.

Регулювання подачі насосного агрегату перепуском рідини у всмоктувальну лінію [23]. При розрахунковій подачі насоса напірна характеристика системи трубопроводів займає положення  $Q-H_{мер}$  визначаючи місцезнаходження режимної точки  $A_1$ , при цьому насос при подачі  $Q_1$  розвиває напір  $H_1$  (рис. 3.3). Якщо потрібно зменшити подачу в мережу, наприклад, до величини  $Q_3$ , то по перепускній лінії з напірного трубопроводу у всмоктуючий направляють витрату рідини  $Q_{II}$ . Насосна установка з перепуском рідини зображена на рисунку 3.2.

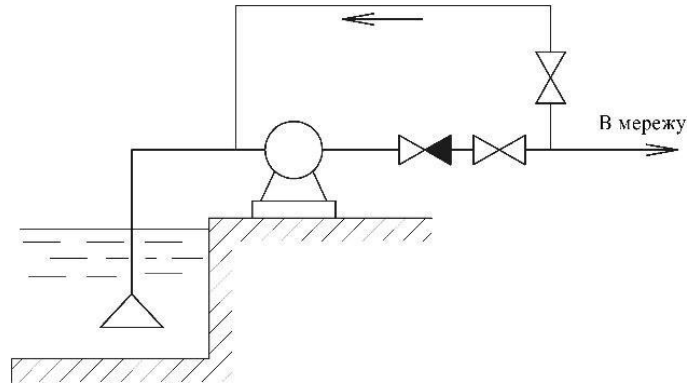


Рисунок 3.2 – Схема насосної установки з перепуском рідини

За рахунок зменшення витрат в мережі напірна характеристика системи трубопроводів стає більш пологою, вона займає положення  $Q-H_{мер}$ , визначаючи місцезнаходження режимної точки  $A_2$ . Внаслідок цього напір, що розвивається насосом, зменшується з  $H_1$  до величини  $H_2$ , загальна подача насоса збільшується до значення  $Q_2$ , а подача в мережу зменшується до величини  $Q_3$

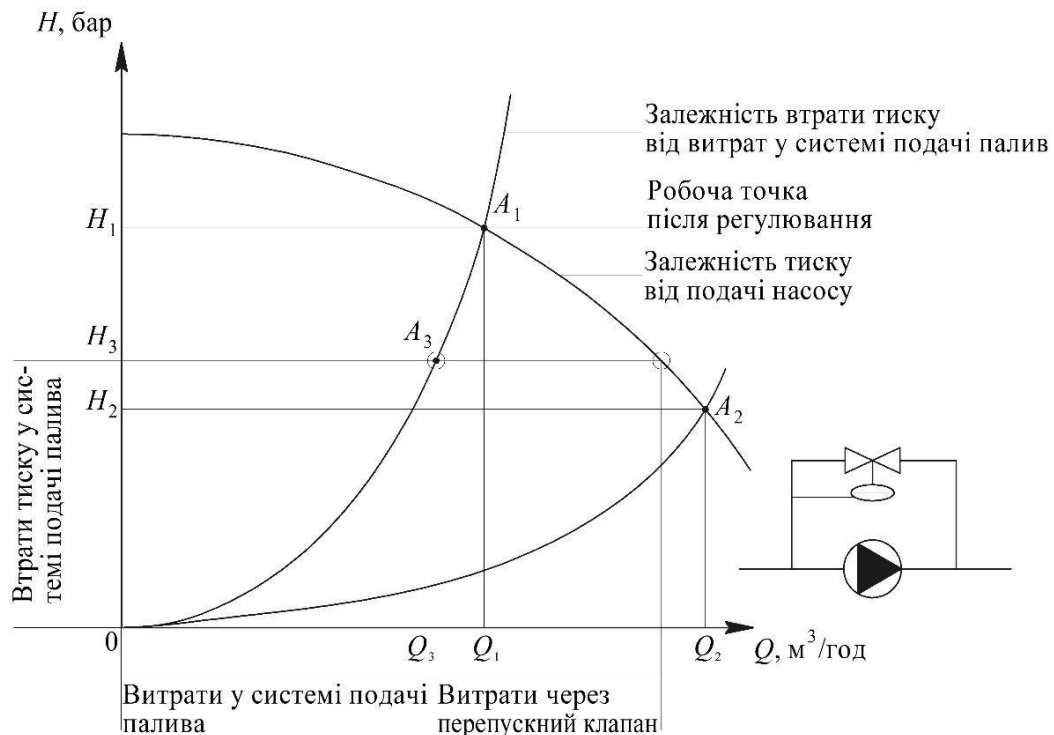


Рисунок 3.3 – Регулювання роботи насоса перепуском рідини

Перепуск рідини з напірного трубопроводу у всмоктуючий покращує кавітаційні якості насоса, але вимагає пристрою циркуляційного трубопроводу і установки додаткової арматури, що призводить до ускладнення комунікації

трубопроводів насосної станції. З точки зору економічності цей спосіб прийнятний для насосів з коефіцієнтом Швидкохідності  $n_s > 300$  у яких при збільшенні подачі потужність зменшується. При коефіцієнті швидкохідності насоса  $n_s < 300$  таке регулювання призводить до збільшення потужності, споживаної насосом, і може викликати перевантаження і виведення з ладу електродвигуна. Згідно [24], даний спосіб регулювання, як і перепуск рідини практично не використовується.

Регулювання подачі насосного агрегату впуском повітря у всмоктувальний патрубок. При розрахунковій подачі насоса  $Q_1$  режимною точкою спільної роботи насоса і мережі трубопроводів є точка  $A_1$  (рис. 3.4).

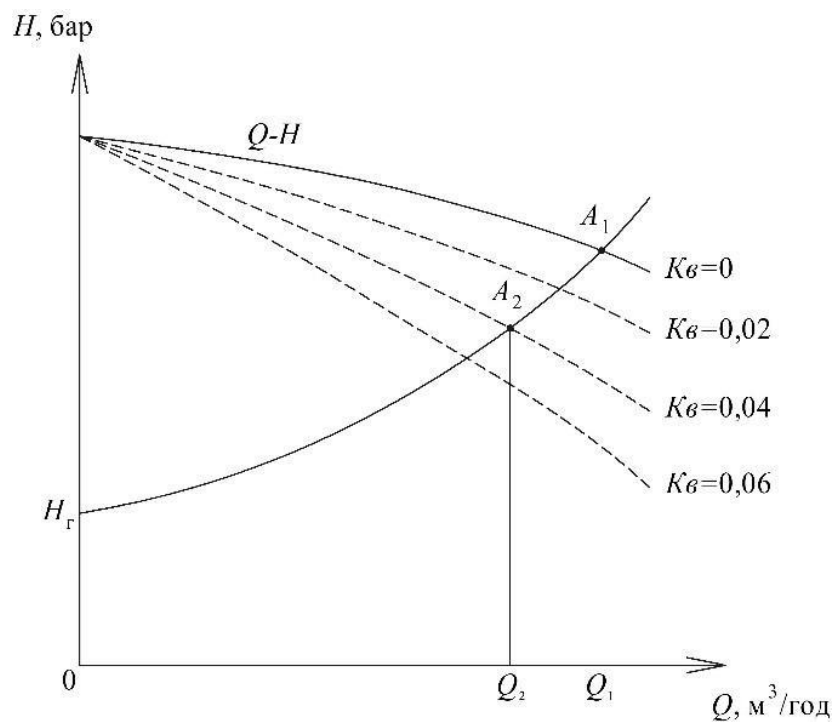


Рисунок 3.4 – Регулювання роботи насоса шляхом впуску повітря

При необхідності зменшити подачу, наприклад, до величини  $Q_2$ , у всмоктувальний патрубок насоса впускають деяку кількість повітря. При впуску повітря напірна характеристика насоса  $Q - H$  зміщується вниз, і таким чином можна підібрати такий режим роботи насоса, при якому характеристика насоса пройде через нову режимну точку  $A_2$ , в результаті чого забезпечується подача необхідної витрати  $Q_2$ .

При впуску повітря коефіцієнт корисної дії насосної установки

знижується тим більше, чим більше кількість впускається в насос повітря, тобто, чим більше число  $KV$  що представляє собою відношення обсягу, що впускається до обсягу рідини, що перекачується.

Цей спосіб регулювання подачі більш економічний, ніж дроселювання, але він можливий тільки в тому випадку, коли геометрична висота всмоктування насоса значно менше допустимої величини. При такому способі регулювання можливо тільки обмежена зміна подачі через різке погіршення кавітаційних якостей насоса. Істотним недоліком регулювання шляхом впуску повітря є зниження терміну служби робочого колеса під дією кавітаційних явищ в насосі. У системі подачі палива цей спосіб регулювання взагалі непридатний, так як в мережу не можна подавати паливо, змішане з повітрям [24].

Регулювання подачі насоса зміною частоти обертання робочого колеса. Положення напірних характеристик насоса  $(Q - H)_1$  і  $(Q - H)_2$  при частотах обертання робочого колеса  $n_1$  і  $n_2$  показано на рисунку 3.5 [23]. Так як ступінь закриття засувки залишається незмінною, то загальний опір системи трубопроводів і положення її напірної характеристики не змінюється. При зменшенні частоти обертання робочого колеса з величини  $n_1$  до величини  $n_2$  режимна точка переміститься по напірної характеристиці мережі з положення  $A_1$  в положення  $A_2$ , при цьому подача і напір насоса зменшується з величин  $Q_1$  і  $H_1$  до значень  $Q_2$  і  $H_2$ . Тиск, створений насосом при будь-якій частоті обертання робочого колеса, повністю використовується для підняття рідкого середовища і подолання сил опору в мережі трубопроводів.

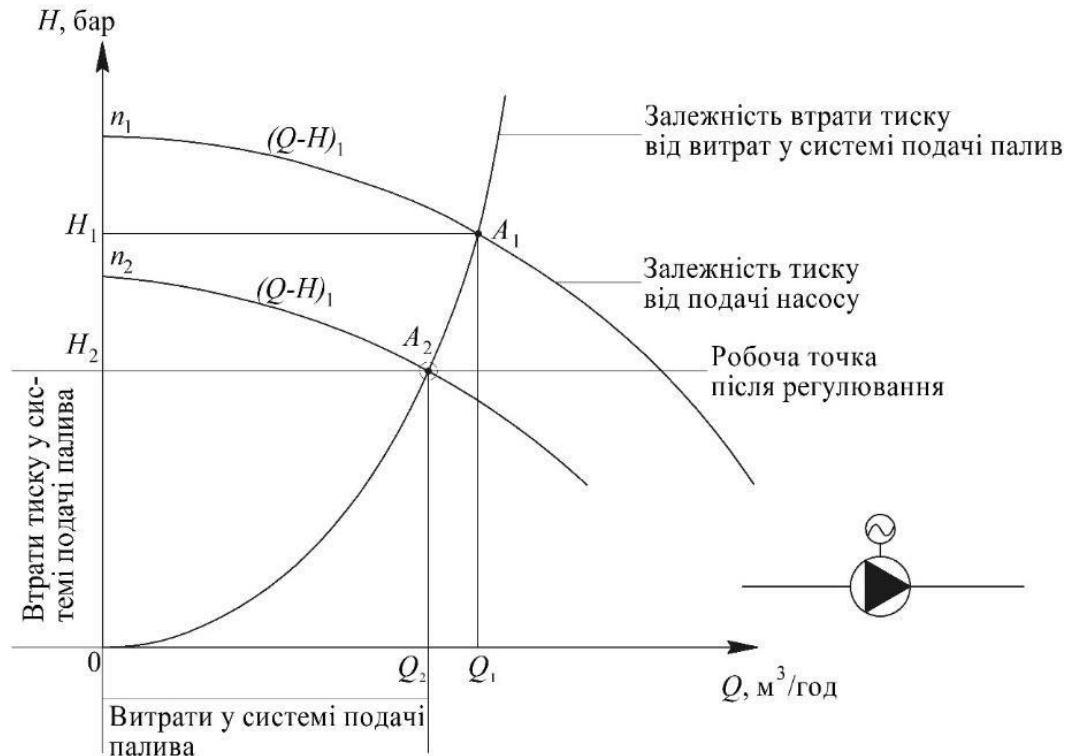


Рисунок 3.5 – Регулювання роботи насосу зміною частоти обертання

Розглядуваний метод регулювання роботи насосів є найбільш економічним, так як відсутні втрати потужності на дроселюванні потоку, економиться електроенергія [24]. Однак зміна частоти обертання робочого колеса насоса пов'язана з певними технічними труднощами, в зв'язку з чим цей метод регулювання використовується в разі, коли витрати на пристрій тієї чи іншої системи зміни частоти обертання робочого колеса насоса менше витрат на втрати потужності при дроселюванні.

### 3.2 Вибір технологічного обладнання

Перетворювач частоти. При виборі перетворювача частоти будемо виходити з того, що приводний асинхронний двигун вже встановлений. Не враховуючи цінову політику і гарантійні зобов'язання, розглянемо технічні параметри і характеристики, необхідні для вибору перетворювача частоти [25]:

- вхідна напруга;
- потужність і номінальний струм двигуна;
- діапазон регулювання частоти;
- кількість входів, виходів управління;

- характер навантаження;
- оперативне керування перетворювачем;
- тип охолодження двигуна;
- спосіб гальмування двигуна;
- довжина лінії, що з'єднує перетворювач і двигун;
- навколишнє середовище, де буде встановлений ПЧ.

Розглянемо це більш детально.

Вхідна напруга. Цей параметр визначає, при якій напрузі в мережі перетворювач частоти зберігає працездатність. В наших умовах мало знати, що ця мережа  $\sim 380$  В. В реальності, в різні моменти в ній може бути і  $\sim 270$  В і  $\sim 460$  В, а в мережах, де працюють перетворювачі і силове обладнання, ще й викиди напруги до 1 кВ. Якщо знижена напруга призведе до відключення перетворювача або зниження швидкості, то підвищена напруга може привести ПЧ до поломки.

Потужність частотного перетворювача повинна бути не нижча за потужність двигуна. Однак, існують двигуни спеціального виконання, у яких струм не відповідає номінальній потужності і може бути вище розрахункового. В цьому випадку ПЧ необхідно обирати по номінальному струму. Обрати перетворювач завищеної потужності (більш ніж в 2 рази) не варто, по-перше – це дорожче, по-друге – можуть виникнути складності при налагодженні.

Діапазон регулювання частоти. Необхідно переконатися, що частотний перетворювач здатний працювати в тому діапазоні частот, на який розраховані двигун і механізм. Якщо необхідний діапазон починається від 0 Гц, то, швидше за все, буде потрібно ПЧ з векторним керуванням і застосуванням енкодерів.

Тип навантаження також впливає на вибір ПЧ. Наприклад, при вентиляторному навантаженні, перевантажень не виникає, а при роботі пресу струм двигуна може перевищувати номінальний на 60 % і більше. Тому потрібно вибирати частотний перетворювач з урахуванням перевантажувальної здатності.

Оперативне управління частотним перетворювачем залежить від того, звідки воно буде вестися – за місцем установки або з іншого приміщення.

За типом охолодження двигуни можуть бути із самообдувом і примусовим охолодженням. Двигуни з самообдувом мають крильчатку, закріплену на валу ротора, яка, обертаючись разом з ротором, охолоджує двигун. Охолодження двигуна розраховане на номінальну частоту обертання ротора. Якщо двигун з самообдувом буде тривалий час працювати на зниженій частоті, виникне небезпека перегріву обмоток, тому необхідно подбати про додаткове охолодження. Якщо частота не змінюється більш ніж на 10% – такої небезпеки не виникає.

Гальмування двигуна можливо трьома способами: рекуперативним, електродинамічним і гальмування інверторним мостом (в більшості ПЧ вже реалізований). При необхідності швидкого і точного гальмування використовують електродинамічний метод. ПЧ з рекуперативним гальмуванням коштує значно дорожче, але в механізмах з частим гальмуванням або зміною швидкості дозволяє заощадити електроенергію.

Довжина лінії, що з'єднує перетворювач і двигун, визначає необхідність використання вихідного фільтра, що знижує перенапруження на обмотках двигуна. При довжині з'єднувальної лінії більше ніж 10 м, необхіднорозрахувати перенапругу на двигуні і, при неприпустимій величині, застосувати відповідний фільтр. Фільтр, зазвичай, в комплект поставки перетворювача частоти не входить; кількість входів, виходів управління повинно бути не менше, ніж передбачено для нормального технологічного управління і захисту двигунів і механізму.

Навколишнє середовище, де буде встановлений ПЧ, визначає тип виконання частотного перетворювача. У паспорті вказуються умови експлуатації, при яких гарантується безаварійна робота ПЧ.

Таким чином можна зробити висновок, що необхідно розглядати параметри вибору ПЧ в умовах цеху випробувань ПрАТ «Мотор Січ»:

- потужність шести двигунів насосної паливної станції складає 33 кВт;
- тип навантаження у даному випадку – це змінний обертовий момент.

Цей момент має відношення до навантажень, для яких потрібно низький крутний момент при низькій частоті обертання, а при збільшенні швидкості



обертання потрібно більш високий крутний момент;

- мережа ~ 380 В, яка безпосередньо виходить з підстанції заводу;
- діапазон від 0 Гц;
- двигун 2В112М4У25 має самообдуд (крильчатка на валу ротора);
- перетворювач частоти буде встановлений на паливній насосній станції, тому повинен відповідати нормам вибухо- та пожежонебезпеки;
- при випробуваннях авіаційних двигунів потрібне досить точне керування гальмуванням, тому обираємо найбільш точний метод – електродинамічне гальмування;
- оскільки ПЧ встановлюється безпосередньо на паливній насосній станції, то довжина з'єднувальної лінії становить менше 10 м, що дає можливість не встановлювати мережевий фільтр для перетворювача частоти;
- управління перетворювачем частоти в автоматичному режимі, повинно використовуватися за допомогою датчика тиску, встановленого у трубопроводі. А ручне управління – з стенду кожного боксу випробувань. Режим управління перемикається на комірці з ПЧ;
- якщо під'єднувати 6 двигунів до перетворювача частоти, то повинно бути не менш ніж по 6 входів та виходів управління, для нормального режиму роботи.

Проаналізувавши загальні і існуючі вимоги, можна обрати той ПЧ, який найбільш відповідає вимогам. Порівняльний аналіз ПЧ наведено у таблиці 3.1. Із представлених варіантів такий, що відповідає вимогам технології випробувань та паливної насосної станції відповідає перетворювач частоти VFD370CP43B-21. Його технічні характеристики наведені у таблиці 3.2 [26].

Таблиця 3.1 – Аналіз та порівняння ПЧ

Параметр	Тип перетворювача частоти		
	VFD370CP4 3B-21	e.f-drive.37 37кВт3ф/380В	INVT GD200A- 045G/055P-4
Потужність > 33 кВт	+	+	+
Тип навантаження	+	+	+
Живлення від мережі ~ 380 В	+	+	+
Діапазон керування від 0 Гц	+	+	+
Електродинамічне гальмування	+	-	+
Відповідність нормам пожежонебезпеки та вибухонебезпеки	+	+	+
Кількість входів та виходів управління	+	-	-

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики перетворювача частоти

VFD370CP43B-21

Параметр	Значення
1	2
Вхідна напруга	~ 380 В ± 15 % = 440 В ± 10 %
Вихідна потужність	до 37 кВт
Вихідний струм	до 75 А
Діапазон регулювання швидкості	1:1000
Точність підтримання швидкості	±0,02%
Час відгуку	< 10 мс
Точність управління обертового моменту	5%
Стартова частота / Пусковий момент	0 Гц / 200%
Енкодер	A1 до 200 кГц, B1 та C1 до 100 кГц, D1 до 500 кГц, H1 до 300 кГц

Схема каскадного підключення 6 асинхронних двигунів з насосними агрегатами за допомогою перетворювача частоти при включенні живлення включається контактор КМ2 і двигун М1 починає працювати від перетворювача частоти, збільшення частоти відбувається до досягнення заданої величини тиску. Каскадне управління дозволяє реалізувати послідовне підключення двигунів до мережі. При цьому один двигун постійно живиться від перетворювача частоти, розганяючись до максимального значення, потім другий двигун підключається до мережі безпосередньо (включається контактор КМ1) через час заданий в параметрах перетворювача, далі аналогічна комутація проводиться з наступним двигуном (включається контактор КМ2), далі аналогічно відбувається підключення інших двигунів. Схема може бути застосована тільки при потужності двигунів до 50 кВт, так як перемикання електродвигуна великої потужності від ПЧ на мережу або прямий пуск буде супроводжуватися високим стрибком струму. Не виключена також можливість появи гідроудару при перемиканні. Каскадне управління може бути реалізовано підключенням кожного двигуна до перетворювача частоти.

Використання перетворювача частоти в режимі ПД – регулювання. При встановленні перетворювача частоти, можуть виникнути причини, за якими не вдається забезпечити задовільну роботу обладнання. Вони зазвичай досить прості:

- помилки при підключенні силових ланцюгів і ланцюгів управління;
- неправильна установка параметрів перетворювача частоти для роботи в режимі ПД-регулювання;
- наявність статичної помилки після закінчення регулювання.
- помилки при підключенні датчика технологічного параметра;
- неправильний вибір перетворювача частоти або додаткових пристроїв;
- можливість виникнення мережевих перешкод.

Перетворювач частоти VFD370CP43B-21 розрахований на автоматичне регулювання двигуном за допомогою зворотного зв'язку за швидкістю та ПД-регулюванням. ПД-регулятор є одним з основних вузлів замкнутої системи регулювання потрібного параметра: тиску, витрати, рівня, швидкості,

температури і т. д.

У перетворювачі частоти ПІД-регулятор має два входи (рис. 3.6) [27]. На один вхід надходить сигнал завдання необхідної величини параметра, цей сигнал ще називають уставкою. На другий - сигнал зворотного зв'язку від датчика про фактичне значення параметра. Залежно від величини і знака неузгодженості між цими сигналами на виході ПІД-регулятора формується сигнал, що змінює вихідну частоту перетворювача з метою максимально зрівняти уставку і фактичний рівень сигналу. Вихідний сигнал ПІД-регулятора визначається величиною неузгодженості (пропорційна складова), тривалістю неузгодженості (інтегральна складова) і швидкістю зміни неузгодженості (диференціальна складова).

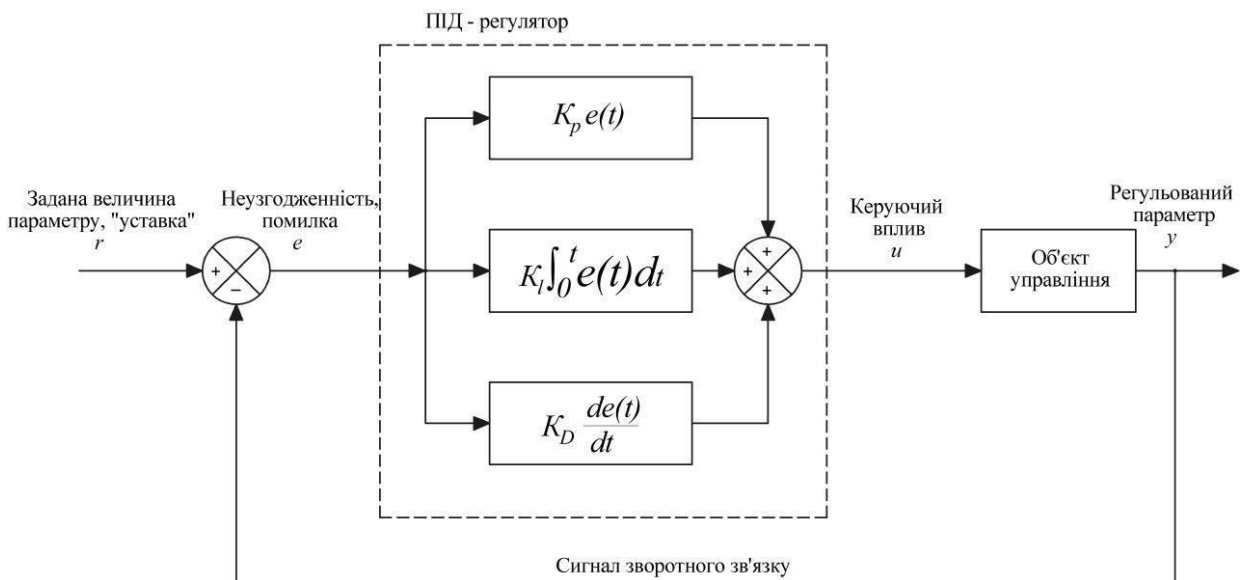


Рисунок 3.6 – Структурна схема ПІД – регулятора

Пропорційна складова прагне усунути безпосередню помилку в значенні регульованого параметра, що спостерігається в даний момент часу. Значення цієї складової прямо пропорційно відхиленню вимірюваної величини від уставки. Подібний регулятор називається пропорційним, або П-регулятором. Його вихідний сигнал - це помилка управління  $e(t)$ , помножена на коефіцієнт  $K_p$  [27]:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.1)$$

При використанні тільки пропорційного регулятора значення регульованої величини ніколи не встановлюється на заданому значенні, і завжди буде мати місце статична помилка. У міру збільшення коефіцієнта пропорційності зростає точність і швидкість відпрацювання відхилення, але знижується стійкість системи і може виникнути коливальний процес.

Для усунення статичної помилки в структуру регулятора вводять інтегральну складову з коефіцієнтом  $K_I$ :

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (3.2)$$

Такий регулятор називається пропорційно-інтегральним, або ПІ-регулятором. Вихідний сигнал інтегратора пропорційний накопиченій помилці, що забезпечує нульову помилку в сталому стані, але уповільнює перехідний процес. ПД-регулятор – це такий регулятор, у якого вихідний сигнал пропорційний вхідному сигналу і похідній. Похідна характеризує тенденцію зміни (відхилення) регульованої величини. Величина і знак впливу від похідної дозволяють регулятору як би передбачити в який бік і на скільки відхилилася б регульована величина під дією даного збурення. Це передбачення дозволяє регулятору випереджати своїм впливом можливе відхилення регульованої величини. В результаті процес регулювання завершується в більш короткий час.

Для прискорення перехідних процесів в структуру регулятора вводять диференціальну складову з коефіцієнтом  $K_D$ :

$$K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.3)$$

Такий регулятор називається пропорційно-інтегрально-диференціальним, або ПІД-регулятором [27]. Сигнал диференційного каналу найбільш важливий при швидких змінах сигналу на входах регулятора, і зникає в сталому режимі. Він дозволяє реагувати не на саме збільшення помилки, а на швидкість її зміни. Головним недоліком диференціального каналу є великий вплив високочастотних перешкод, наприклад шумів вимірювань. Найбільш часто перетворювачі частоти,

що працюють в режимі ПД- регулювання, вирішують завдання підтримки постійного тиску в різних гідравлічних системах. Розглянемо роботу системи підтримки заданого тиску палива для випробувань незалежно від її витрати. Для здійснення регулювання з використанням перетворювача частоти зазвичай будується замкнута система (рис. 3.7). На її вхід подаються сигнал завдання тиску (уставка) і сигнал реального тиску, що отримується з датчика зворотного зв'язку. Відхилення між реальним і заданим значеннями перетворюється ПД-регулятором в сигнал завдання частоти для перетворювача [27]. Під впливом сигналу завдання перетворювач змінює швидкість обертання електродвигуна насоса і прагне привести відхилення між заданим і реальним значенням тиску до нуля.

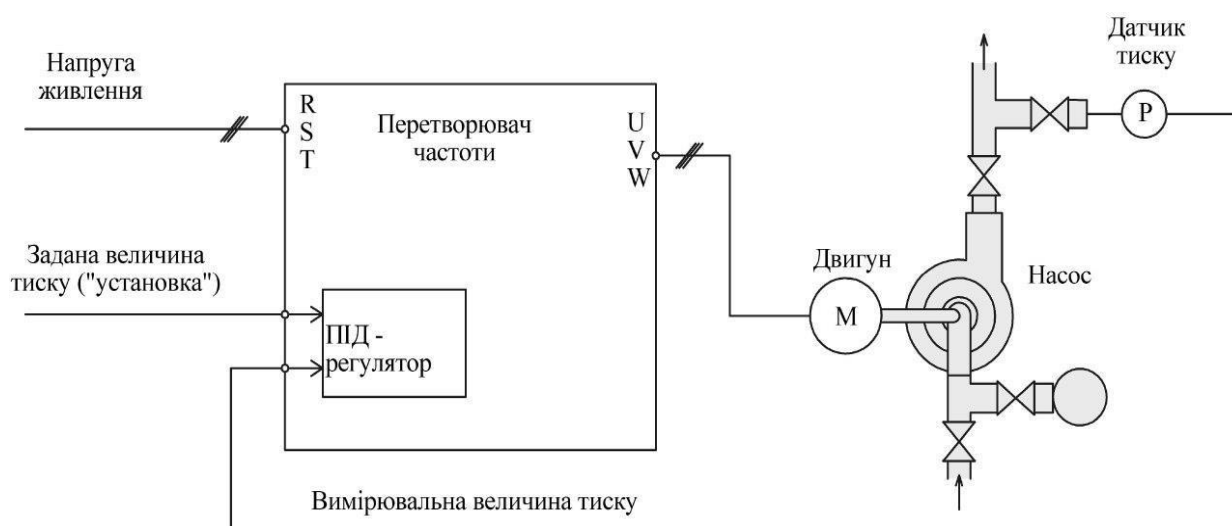


Рисунок 3.7 – Система автоматичної підтримки заданого тиску

При цьому, у разі падіння тиску, наприклад, через збільшення витрат палива ПД-регулятор збільшить вихідну частоту ПЧ, що призведе до збільшення швидкості обертання насоса, і тиск в системі почне підвищуватися. Якщо ж тиск виявиться більше заданої величини, наприклад, внаслідок зниження витрати палива, ПД-регулятор зменшить вихідну частоту і тиск зменшиться. Таким чином, тиск в системі підтримується на заданій величині і не залежить від витрати [28].

Застосування перетворювачів частоти з вбудованим ПД- регулятором у системах автоматичного регулювання. Необхідний рівень тиску задається в перетворювачі частоти за допомогою установки завдання частоти. Згідно до

технології випробувань, обраного перетворювача частоти та обраного датчику тиску, можна встановити необхідну частоту за формулою:

$$F_3 = \frac{P \cdot F_{max}}{P_{max}} \quad (3.4)$$

де  $F_3$  – необхідна частота, Гц;

$P$  – необхідний тиск у системі, бар;

$F_{max}$  – максимальна вихідна частота ПЧ, Гц;

$P_{max}$  – максимальний тиск датчику, бар.

Датчик тиску для ПД – регулювання перетворювача частоти. При виборі датчику тиску для перетворювача частоти необхідно враховувати такі параметри: діапазон тиску, точність, температура, вихідний сигнал, сертифікати. Вихідним показником в пошуку відповідної вимірювальної технології є вимірюваний діапазон тиску і очікуване вимірювання відносного або абсолютного тиску. Залежно від застосування, необхідно враховувати особливі функції. Зокрема, в випробувальних і вимірювальних задачах потрібні окремі діапазони вимірювань, коли стандартні датчики з діапазонами тиску ISO не можуть це зробити. В цьому випадку необхідні датчики, які відображають відповідний діапазон тисків і таким чином, досягають необхідної точності.

Вихідний сигнал. Також вирішальним є питання про те, в який вид має перетворюватися виміряний тиск. Аналоговий сигнал або цифровий інтерфейс, Modbus, I2C. При передачі аналогового сигналу тиск перетворюється в сигнал, який все ще необхідно виміряти.

Температура. Температурний фактор в деяких випадках важко визначити. Розробники часто не зовсім усвідомлюють, в яких температурних діапазонах застосовується датчик тиску, який повинен забезпечити його обслуговування. Наприклад, багато датчиків тиску оптимізовані для робочих температур від -30 С° до 100 С°. Таким чином, охоплюються загальні області застосування.

Точність. У питанні точності чинники необхідності її і вартості продукту безпосередньо залежать один від одного. Діапазон вимірювання тиску, який повинен бути визначений, зазвичай є підставою для прийняття рішень.

Сертифікати. При використанні у вибухонебезпечних умовах, необхідні певні сертифікати, які надають інформацію про безпечну експлуатацію приладів.

Вимоги технології випробувань для датчику тиску [29]:

- 1) тиск палива у трубопроводі повинен бути 15 бар;
- 2) необхідна точність вимірювання тиску складає 0,5 %;
- 3) температура рідини у системі подачі палива – 20 – 50 С°;
- 4) вихідний сигнал аналогового типу;
- 5) датчик тиску повинен відповідати умовам вибухонебезпечності.

Проаналізувавши загальні та необхідні вимоги для датчику тиску можна обрати необхідний датчик. До встановлення обраний датчик LEO 779692. У таблиці 3.3 наведені технічні характеристики датчику LEO 779692 [30].

Таблиця 3.3 – Технічні параметри датчику тиску LEO 779692

Параметр	Значення
Напруга	24 В
Робочий тиск	0-16 бар
Максимальний тиск	0-30 бар
Маса	0,3 кг
Допустима робоча температура	0-80 С°
Межа похибки	± 0,5 %
Стійкість до вібрації	5-1000 Гц з прискоренням у 15 г

Обравши перетворювач частоти та датчик тиску – можна розпочати розробку та моделювання математичної моделі системи перетворювач частоти – асинхронний двигун – відцентровий насос зі зворотнім зв'язком по швидкості.



### 3.3 Моделювання системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун – відцентровий насос» (ПЧ-АД-ВН)

Одним з найбільш ефективних шляхів розвитку енергозберігаючих технологічних режимів при управлінні відцентровими насосами є регульований електропривод. В даний час, домінуюче становище займають частотно - регульовані асинхронні електроприводи з системами автоматичного керування, що дозволяє вирішити не тільки технологічні завдання насосних агрегатів, а й проблему енергозбереження [31]. Формування необхідних статичних і динамічних властивостей асинхронного частотно-регульованого електроприводу можливо лише в замкнутій системі регулювання його координат, функціональна схема якого представлена на рисунку 3.8.

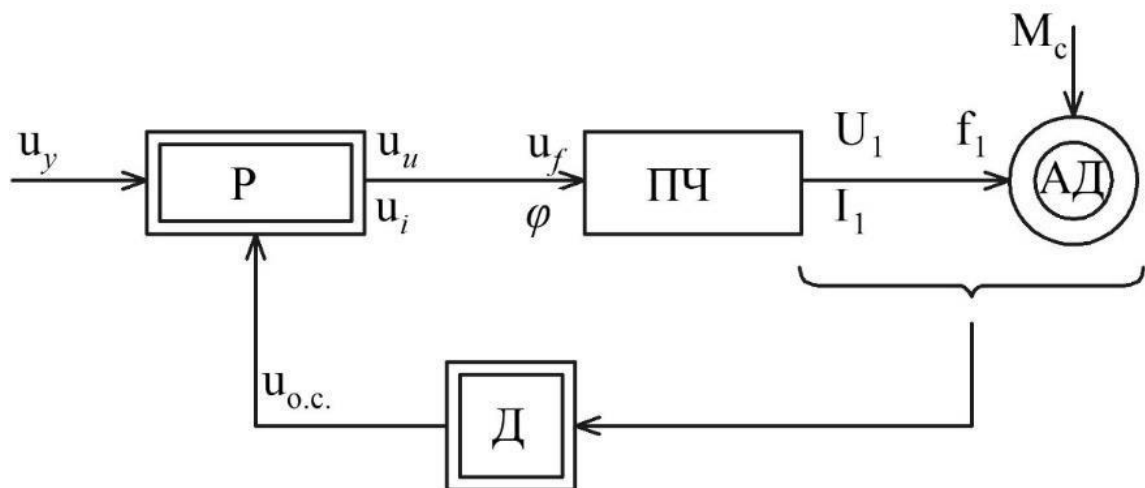


Рисунок 3.8 – Функціональна схема замкнутої системи ПЧ-АД-ВН [31]

Для збільшення діапазону регулювання по швидкості в дану систему регулювання необхідне введення негативного зворотного зв'язку по швидкості. Тому в математичному описі перехідних процесів електроприводу враховується зворотний зв'язок по швидкості. Структурна схема системи ПЧ- АД з негативним зворотним зв'язком за швидкістю матиме вигляд [31]:

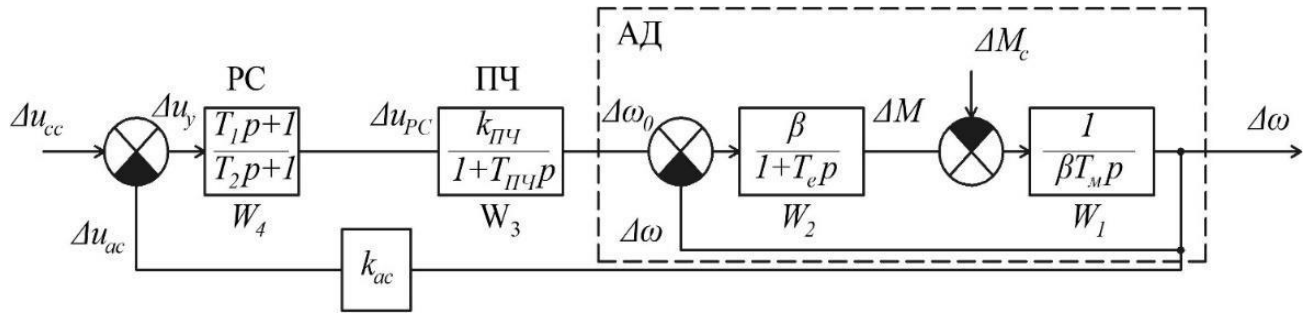


Рисунок 3.9 – Структурна схема системи ПЧ-АД з негативним зворотним зв'язком за швидкістю:

$\beta$  – модуль жорсткості механічної характеристики;  $T_e$  – еквівалентна електромагнітна постійна часу ланцюгів статора і ротора АД;

$k_{пч}$  – передавальний коефіцієнт функції ПЧ;  $T_{пч}$  – постійна часу ланцюга управління ПЧ;  $T_m$  – електромеханічна постійна часу

Отже було встановлено, можливості регулювання, аналогічні можливостям зміни напруги на якорі двигуна постійного струму з незалежним збудженням, в асинхронному електроприводі забезпечуються шляхом зміни частоти напруги і струму обмотки статора. Для реалізації цих можливостей необхідно здійснювати харчування обмотки статора двигуна від керованого перетворювача частоти. Регулювання частоти є технічно більш складне завдання, ніж регулювання випрямленої напруги, так як, як правило, вимагає додаткових ступенів перетворення енергії. В даній схемі присутні два канали управління: канал управління частотою і канал управління напругою, що впливає на збудження.

Розробка математичної моделі ПЧ-АД-ВН. Пропонується розробити математичну модель системи ПЧ-АД-ВН. Рівняння руху, згідно з передавальною функцією  $W_1$  структурної схеми (рисунок 3.9), можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{\beta T_M} (\Delta M - \Delta M_c) \quad (3.5)$$

де  $\Delta\omega$  – приріст швидкості;

$\Delta M$  – приріст моменту;

$\Delta M_c$  – приріст статичного моменту навантаження.

Згідно передавальної функції  $W_2$  матимемо наступне співвідношення:

$$\frac{\Delta M}{\Delta\omega_0 - \Delta\omega} = \frac{\beta}{1 + T_e} \quad (3.6)$$

Яке можна записати у вигляді диференціального рівняння:

$$T_e \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = \beta(\Delta\omega_0 - \Delta\omega) \quad (3.7)$$

де  $\Delta\omega_0$  – приріст кутової швидкості електромагнітного поля АД.

Рівняння ПЧ, виходячи з передавальної функції  $W_3$ , запишемо:

$$T_{ПЧ} \frac{d\Delta\omega_0}{dt} + \Delta\omega_0 = k_{ПЧ} \Delta U_{PC} \quad (3.8)$$

А РС (передавальна функція  $W_4$ ) представимо рівнянням:

$$T_{PC} \frac{d\Delta U_{PC}}{dt} = k_{PC} T_{PC} \frac{d\Delta U_y}{dt} + \Delta U_y \quad (3.9)$$

Приріст  $\Delta U_y$  запишемо в наступному вигляді:

$$\Delta U_y = \Delta U_{з.с} - k_{о.с} \Delta\omega \quad (3.10)$$

де  $\Delta U_{з.с}$  приріст задаючого сигналу;

$k_{o.c}$  коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості.

Таким чином, математичний опис частотно – регульованого електроприводу відцентрового насоса можна представити наступною системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{\beta T_M} (\Delta M - \Delta M_c); \\ T_e \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = \beta (\Delta\omega_0 - \Delta\omega); \\ T_{пч} \frac{d\Delta\omega_0}{dt} + \Delta\omega_0 = k_{пч} \Delta U_{PC}; \\ T_{PC} \frac{d\Delta U_{PC}}{dt} = \Delta U_y - k_{PC} T_{PC} k_{OC} \frac{d\Delta\omega}{dt} - k_{PC} T_{PC} k_{OC} \Delta\omega; \\ \Delta U_y = \Delta U_{з.с} - k_{o.c} \Delta\omega. \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Слід зазначити, що насос з системою ПЧ – АД зі зворотним зв'язком за швидкістю представляють єдиний механізм, який володіє маховою масою, складеної ротором електродвигуна і робочим колесом насоса і має механічну постійну часу [32].

Динамічну характеристику насоса з урахуванням перехідних процесів в ньому можна представити у вигляді:

$$T_n \frac{dz}{dt} + z = b \cdot \omega + h_0 \cdot \omega^2 \quad (3.12)$$

де  $h_0$  – наведений натиск холостого ходу насоса;

$b$  – коефіцієнт, що характеризує лінійну залежність між напором і подачею насоса.

Математична модель системи ПЧ – АД – ВН, на основі системи рівнянь

(3.7) і (3.8), буде мати наступний вигляд:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{\beta T_M} (\Delta M - \Delta M_C); \\ T_e \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = \beta (\Delta\omega_0 - \Delta\omega); \\ T_{ПЧ} \frac{d\Delta\omega_0}{dt} + \Delta\omega_0 = k_{ПЧ} \Delta U_{PC}; \\ T_{PC} \frac{d\Delta U_{PC}}{dt} = \Delta U_y - k_{PC} T_{PC} k_{OC} \frac{d\Delta\omega}{dt} - k_{PC} T_{PC} k_{OC} \Delta\omega; \\ T_n \frac{dz}{dt} + z = b \cdot \omega + h_0 \cdot \omega^2. \end{cases} \quad (3.13)$$

де  $T_n$  – постійна часу перехідних процесів в робочому колесі насоса (аналогічна електромагнітної постійної часу електродвигуна).

Моделювання системи ПЧ – АД – ВН в Matlab. Для зручності дослідження перехідних процесів динаміки системи ПЧ - АД зі зворотним зв'язком за швидкістю і відцентровий насос, після нескладних перетворень, систему рівнянь (3.7) представимо в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{\beta T_M} (x_2 - A); \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{\beta}{T_e} x_3 - \frac{\beta}{T_e} x_1 - \frac{1}{T_e} x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{k_{ПЧ}}{T_{ПЧ}} x_4 - \frac{1}{T_{ПЧ}} x_3; \\ \frac{dx_4}{dt} = u - \frac{k_{PC} T_{PC} k_{OC}}{T_{PC}} \frac{dx_1}{dt} - \frac{k_{PC} T_{PC} k_{OC}}{T_{PC}} x_1; \\ \frac{dx_5}{dt} = \left( \frac{b}{T_n} + \frac{2h_0 x_0}{T_n} \right) x_1 - \frac{1}{T_n} x_5. \end{cases} \quad (3.14)$$

де  $x_1 = \Delta\omega$ ;  $x_2 = \Delta M$ ;  $x_3 = \Delta\omega_0$ ;  $x_4 = \Delta U_{PC}$ ;

$x_0$  – коефіцієнт лінеаризації змінної  $\omega^2$ .

Програма рішення системи, при параметрах асинхронного двигуна 2В112М4У25, перетворювача частоти та відцентрового насосу наведена у таблиці 3.4 [32].

Таблиця 3.4 – Вихідні дані для моделювання системи ПЧ – АД – ВН у Matlab.

Параметр	Значення	Параметр	Значення
$P_{ном}$	5,5 кВт	$k_{PC}$	0,86
$n$	3000 об/хв	$T_{PC}$	0,35
$\beta$	5,085	$k_{OC}$	0,3
$T_M$	0,1	$b$	0,57
$T_e$	0,05	$h_0$	0,1
$k_{ПЧ}$	5	$x_0$	35
$T_{ПЧ}$	0,001	$T_n$	0,045

Динаміка системи ПЧ - АД – ВН, може бути досліджена на структурній схемі моделі, представленої на рисунку 3.10.

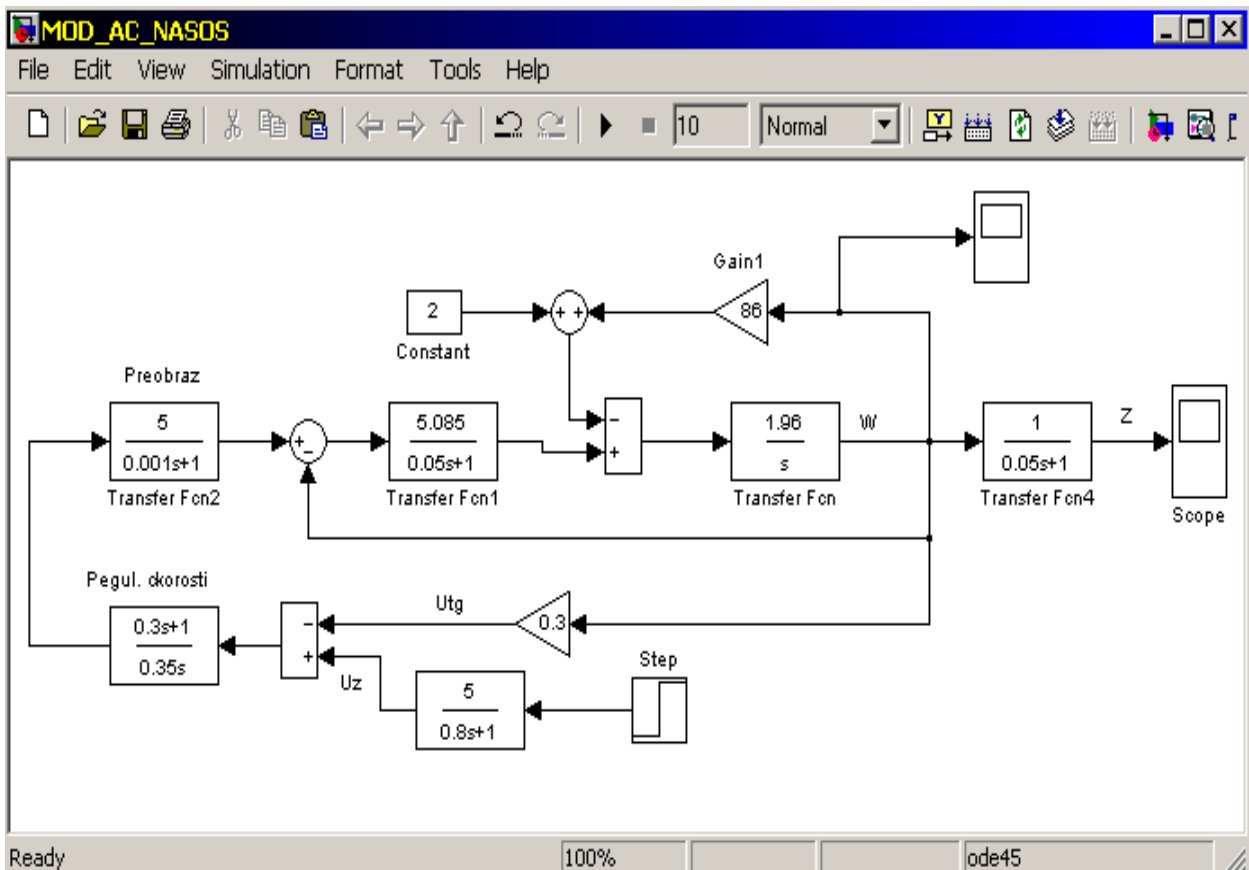
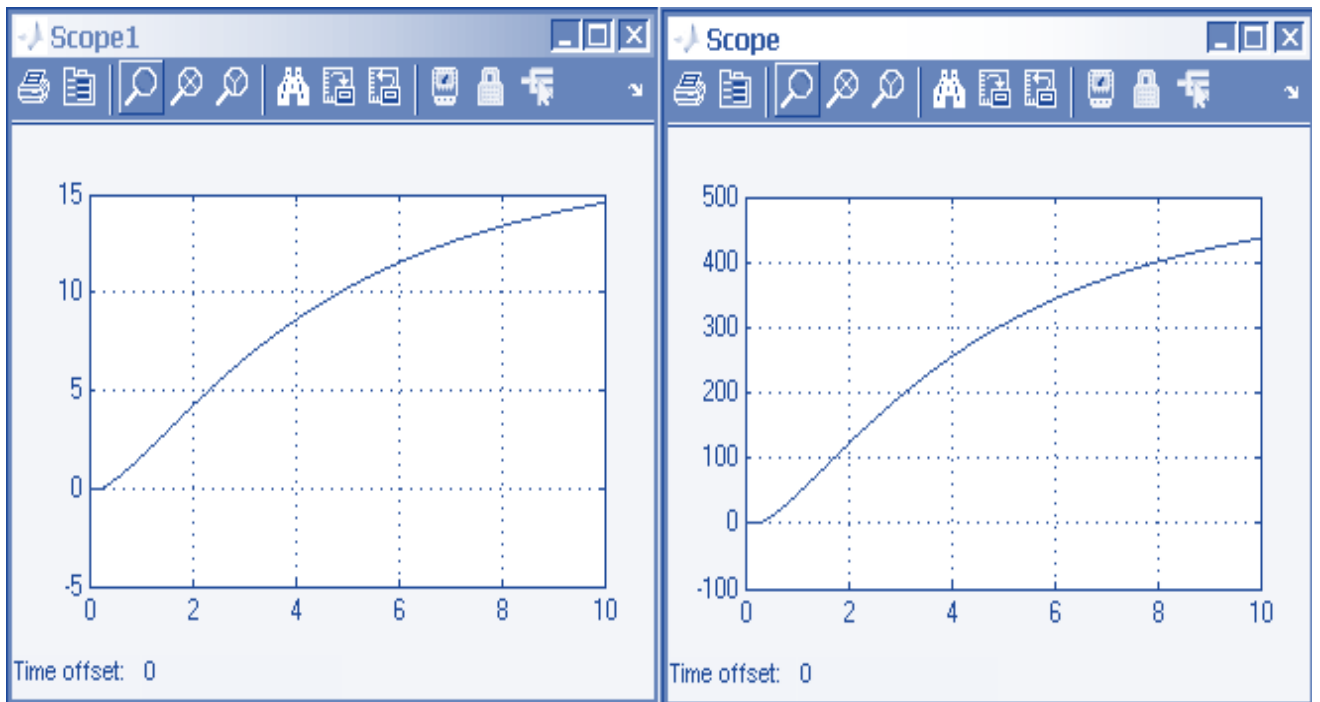


Рисунок 3.10 – Структурна схема моделі системи ПЧ – АД – ВН в Matlab



а)

б)

Рисунок 3.11 – Осцилограми, отримані в результаті моделювання:

а) перехідний процес швидкості системи ПЧ – АД;

б) перехідний процес тиску на виході насосу

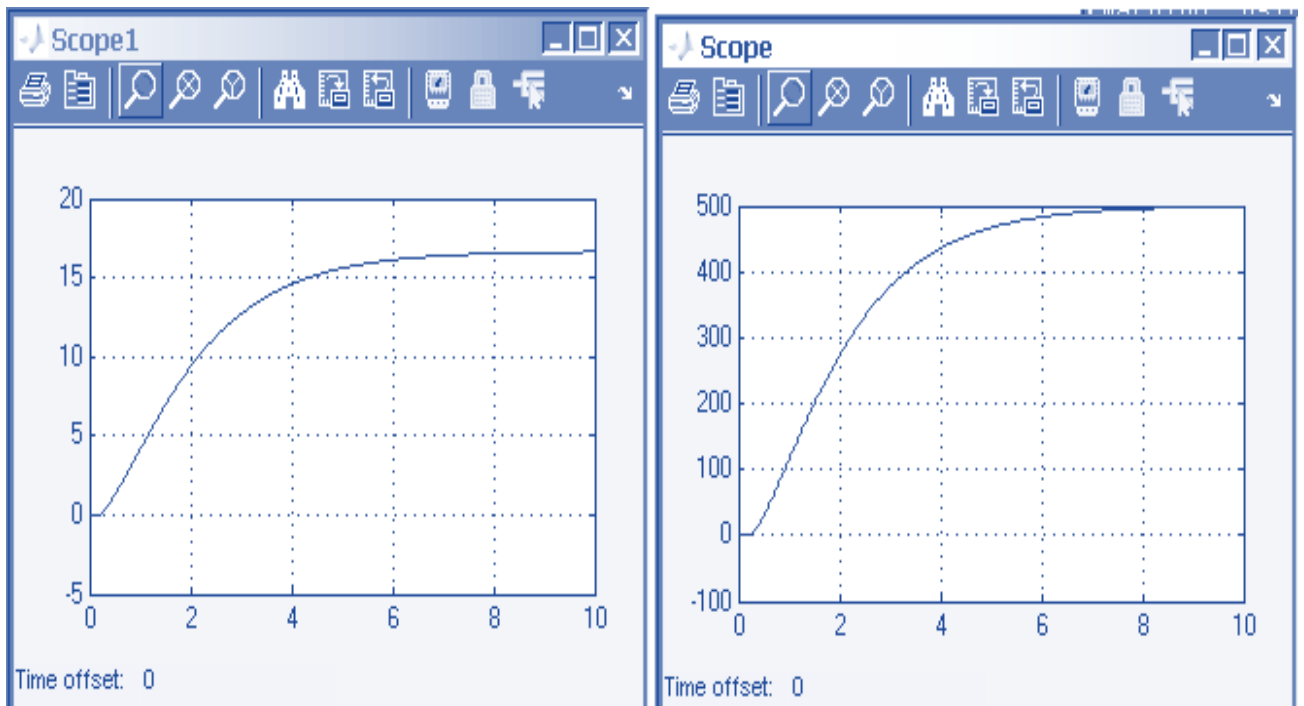


Рисунок 3.12 – Перехідні процеси системи ПЧ - АД і ВН при зміні параметрів регулятора швидкості ПЧ – АД

Візуальне дослідження осцилограм (рисунок 3.11) показує, що швидкість обертання колеса насоса за якісними характеристиками відповідає швидкості системи ПЧ - АД зі зворотним зв'язком за швидкістю. Візуальне дослідження осцилограм (рисунок 3.12) показує, що темп наростання тиску (прискорення) вище, ніж темп наростання швидкості системи ПЧ-АД.

Розробка математичної моделі оцінки економічної ефективності асинхронних двигунів.

Однією з основних причин неекономічної роботи насосних агрегатів є невідповідність робочих параметрів насоса до режиму роботи системи. Регулюванням частоти обертання насоса, його робочі параметри приводяться у відповідність з режимом роботи. Для комплексної оцінки економічної ефективності роботи насосних агрегатів була створена математична модель оцінки економічної; ефективності роботи АД у складі регульованого електроприводу насосних агрегатів [33]. Цикл навантаження характеризується даними графіка реального добового споживання та визначає дані по продуктивності насосного агрегату, тобто, який проміжок часу працює насосний агрегат при певній продуктивності (рисунок 3.13).

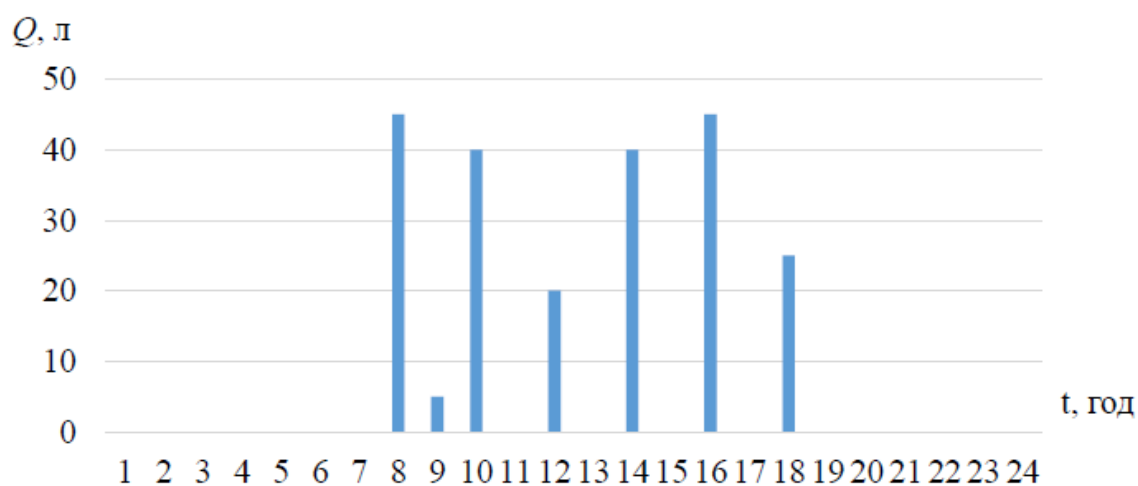


Рисунок 3.13 – Цикл навантаження насосних агрегатів цеху

Для оцінки економічної ефективності роботи АД в складі насосного агрегату слід повністю враховувати особливості процесу експлуатації



регульованого електроприводу насосного агрегату, до складу якого входить насос, ПЧ або перетворювач напруги, і АД загальнопромислового виконання [33]. На рисунку 3.14 зображена коротка блок-схема математичної моделі оцінки економічної ефективності впровадження системи ПЧ – АД – ВН при реалізації різних законів регулювання.

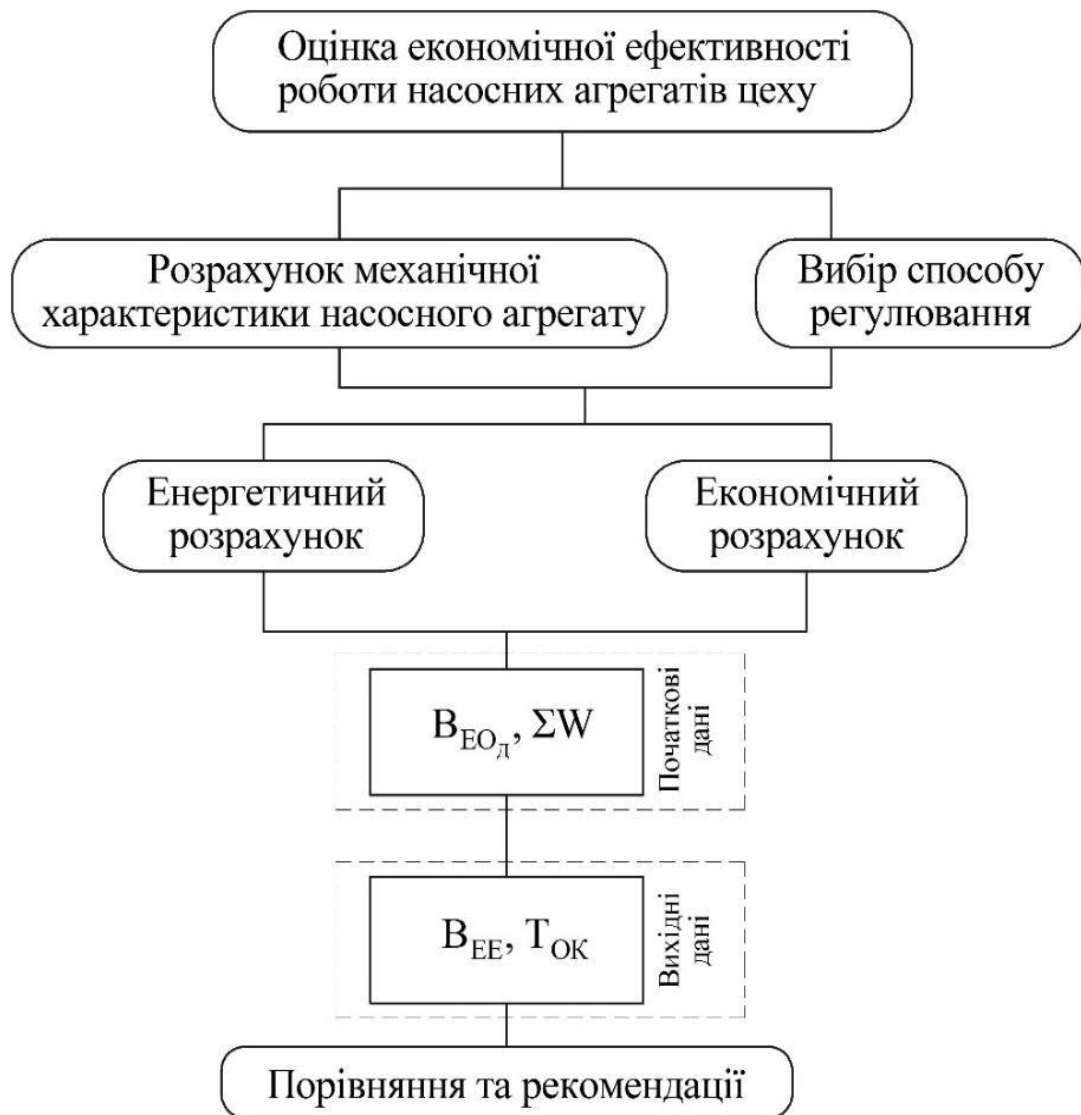


Рисунок 3.14 – Блок-схема математичної моделі оцінки економічної ефективності ПЧ – АД – ВН

Кількість споживаної електричної енергії за рік:

$$\Sigma W = \Sigma P_M \cdot t \quad (3.15)$$

Економія спожитої електричної електроенергії за рік при впровадженні ЧРП може бути розрахована за формулою на основі формули (3.9):

$$\Sigma W_{ек} = \Sigma W_{\partial} - \Sigma W_n \quad (3.16)$$

де  $\Sigma W_{\partial}$  – кількість електроенергії спожитої за рік у разі нерегульованого електроприводу,

$\Sigma W_n$  – кількість електричної енергії, спожитої за рік у разі регульованого електроприводу насосного агрегату.

Вартість електричної енергії споживаної насосним агрегатом за рік експлуатації в разі регульованого та нерегульованого електроприводу:

$$B_{EE_{\partial}} = \Sigma W_{\partial} \cdot B_{EO} \quad (3.17)$$

$$B_{EE_n} = \Sigma W_n \cdot B_{EO} \quad (3.18)$$

де  $B_{EO}$  – вартість електричної енергії за 1 кВт.

Тоді економія спожитої електроенергії за рік може бути визначена за формулою:

$$E_e = B_{EE_{\partial}} - B_{EE_n} \quad (3.19)$$

Для визначення відсотка економії електроенергії при впровадженні регульованого електроприводу скористаємося формулою:

$$E_{e\%} = \frac{B_{EE\delta} - B_{EE\eta}}{B_{EE\delta}} \cdot 100\% \quad (3.20)$$

Також на основі отриманих даних буде проводитися розрахунок терміну окупності при експлуатації електроприводу насосного агрегату, до складу якого входить перетворювач частоти. Термін окупності - визначається як відношення обсягів вкладень до передбачуваного щорічного доходу, тобто в нашому випадку річної економії електроенергії. При переході на регульований електропривод на основі АД:

$$T_{OK} = \frac{B_{ПЧ}}{E_e} \quad (3.21)$$

де  $B_{ПЧ}$  – вартість перетворювача частоти;

$E_e$  – економія спожитої електричної енергії в регульованому електроприводі.

У нерегульованих електроприводах насосних агрегатів відсутня можливість зниження споживання електроенергії при зменшенні технологічних навантажень [34]. Така особливість експлуатації насосних агрегатів є причиною підвищеного споживання електричної енергії. Перехід до систем регулювання частоти обертання призведе до збільшення терміну служби насосів і їх двигунів, а також до помітної економії електроенергії, у багатьох випадках до 20 – 30 %.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

На основі аналізу технологічних процесів та роботи обладнання розглядуваного підприємства, виявлені наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, здатні привести до травм або ушкодження здоров'я працівників і нанести збитки навколишньому середовищу:

- можливість випадкових торкань до частин електрообладнання, яке знаходиться під напругою;
- помилкові дії персоналу при оперативних переключеннях;
- пошкодження ізоляції;
- комутаційні, імпульсні і атмосферні перенапруги;
- прямі удари блискавки;
- коротке замикання в електроустановках;
- механічні травми, що можуть бути отримані від обертових частин електроприводів;
- гострі кромки, заусениці та шерохватість на поверхні інструментів та обладнання;
- підвищена або знижена температура поверхонь обладнання, матеріалів;
- підвищена або знижена вологість повітря;
- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму та вібрації на робочому місці;
- можливість виникнення пожежі, загоряння частин електроприводів або як наслідок не відключеного вчасно короткого замикання або їх перегріву. Апарати обліку (лічильники з трансформаторами струму та напруги), щит контролю та елементи схем релейного захисту, керування масляними вимикачами знаходяться в приміщенні на території підстанції.

Експлуатація обладнання здійснюється згідно НАПБ В.01.056-2005/111 «Правила будови електроустановок. Протипожежний захист електроустановок», ДСТУ Б В.2.5-38:2008 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (ІЕС 62305: 2006, NEQ)» та НАПБ 05.032-2002 «Інструкція з протипожежного захисту

розподільних пристроїв, підстанцій та трансформаторів».

Електричне обладнання розташоване згідно п'ятого розділу «ПУЕ» п. 5.1.4 – 5.1.10 «Загальні вимоги».

Згідно вимог пункту 12.4.7 ГКД 34.20.507-2003 «ПТЕСіМ» приміщення електричного пристрою, в якому встановлені комірки комплектного розподільчого устаткування з електрогазовим вимикачем (далі КРУЕ) або, окремо, елегазові вимикачі, а також приміщення для їх ревізії та ремонту ізолювані від інших приміщень. Стіни, підлога й стеля пофарбовані пілонепроникною фарбою або викладені кахельною плиткою.

Основним заходом з техніки безпеки на підприємстві є заземлення. Згідно розділу 1.7 «ПУЕ» [29] виконано вирівнювання потенціалів шляхом прокладання подовжніх та поперечних заземлювачів які об'єднані між собою в заземлюючу сітку з опором заземлюючого пристрою не більше 0,5 Ом.

Згідно вимог «ПУЕ» до захисного заземлення підлягають:

- металеві корпуси електричних машин, трансформаторів, апаратів, переносних електроприймачів, пускових та регулюючих реостатів, світильників та інше;
- приводів електричних апаратів, вимикачів та ін.;
- каркаси розподільчих щитів, щитів керування, шаф;
- металеві конструкції розподільчих пристроїв, кабельні конструкції, кабельні муфти, оболонки силових кабелів;
- металеві оболонки та броня нейтральних та силових кабелів, проводів напругою від 42 В змінного струму;
- електрообладнання, розташоване на рухомих частинах станків, машин, механізмів;
- залізобетоні та металеві опори на яких встановлені силові та вимірювальні трансформатори, роз'єднувачі та інші апарати.

А підпункт 5.1.2. пункту 5.1 глави 5 НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» наголошує: до оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають їхні схеми, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи обладнання і пройшли навчання та перевірку знань.

Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

До обов'язків формувальника входить: формування вручну або хвостовим молотком динасових, магнезійних та шамотних виробів нескладної конфігурації, а також тих, що мають на поверхні виступи, поглиблення, виїмки, гострі кути; карбідокремнієвих стержнів на механічному вібраційному верстаті і виливання гіпсових форм. Формування плавлених вогнетривів і смолопекової заготівки. Заповнення форм формовою масою і трамбування її і заготівок у спеціальній формі за допомогою пневматичного молотка. Опрання сформованих виробів, маркування їх, посипання дрібним піском або шамотом, укладання виробів на рівні щитки і віднесення їх на вагонетки або в сушила. Складання, розбирання і змащення форм. Транспортування сформованих виробів у сушила. Формування карбідокремнієвих стержнів на вібростолі вручну. Виявлення і усунення несправностей в роботі устаткування, що обслуговується. Налагодження механічного вібраційного верстата.

Кожний формувальник повинен знати: будову і правила технічної експлуатації хвостового молотка, механічного вібраційного верстата, вимірювального інструменту; будову і правила технічної експлуатації підйомних механізмів; склад і властивості формових мас і суспензій; види і розміри форм; способи готування формових мас; правила транспортування виробів; режим сушіння виробів; способи формування; прийоми опрання виробів; види браку під час формування і способи його попередження; правила читання креслень; слюсарну справу.

Основними небезпечними і шкідливими факторами при обслуговуванні обладнання шамотного цеху, є:

- машини і механізми, що рухаються (вантажопідйомні крани, пересувний бункер) тощо;
- вантажі, що переносяться кранами;
- падаючі предмети (деталі форм, інструмент тощо);
- небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання в якому може відбутися через тіло людини.

Основні шкідливі виробничі фактори:

- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- знижена температура повітря робочої зони.

Шкідливі фактори можуть призвести до професійних захворювань.

Технічні рішення по гігієні праці й виробничої санітарії

Мікроклімат робочої зони визначається такими параметрами як температура, відносна вологість повітря, теплове випромінювання, які, виходячи з категорії виконуваних робіт по важкості, характеристики приміщень, по надлишках явного тепла з урахуванням періоду року (теплий, перехідний, холодний) установлюємо відповідно до вимог .

Оптимальний мікроклімат у приміщенні забезпечує підтримка теплової рівноваги між організмом і навколишнім середовищем.

У таблиці 4.1 наведені значення прийнятих припустимих (оптимальних) параметрів повітряного середовища в робочій зоні робочої ділянки.

За нормативними величинами та даними наведеними у таблиці 4.1 можна зробити висновок, що мікроклімат у цеху відповідає вимогам.

Таблиця 4.1 – Нормовані величини температури, відносної вологості й швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

Період року	Категорія робіт	Температура			Відносна вологість		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	Допустима		Оптимальна	Допустима	Оптимальна, не більш ніж	Допустима на робочих місцях
			Верхня межа	Нижня межа				
Холодний	Середньої важкості 2а	18-20	23	17	40-60	75	0,2	Не більш ніж 0
Теплий	Середньої важкості 2а	21-23	27	18	40-60	60 при 270С	0,3	0,2-0,4

Освітлення виробничих приміщень.

У зв'язку з тим, що природне освітлення приміщення здійснюється через віконні отвори і є дуже слабким, на робочому місці має застосовуватися також штучне освітлення. Штучне освітлення створюють електричним джерелом світла, яке включають в міру необхідності, регулюють інтенсивність світлового потоку і його спрямованість.

Виконаємо розрахунок штучного освітлення по методу світлового потоку.

Довжина приміщення – 8 м, ширина – 6 м, висота – 3 м. Розрахункова висота:

$$h = 3 - 0,8 = 2,2 \text{ м,}$$

де 0,8 м – висота розрахункової поверхні.

Площа приміщення:

$$S = 6 \cdot 8 = 48 \text{ м}^2.$$

Визначимо індекс приміщення:

$$i = \frac{A \cdot B}{(A + B) \cdot h},$$

де  $A$  і  $B$  – довжина та ширина приміщення, м;

$h$  – висота підвісу світильників над розрахунковою поверхнею, м.

$$i = \frac{6 \cdot 8}{(6 + 8) \cdot 2,2} = 1,56.$$

Оскільки стіни і стеля приміщення бетонні, то приймаємо коефіцієнт віддзеркалення стелі і стін  $\rho_{стели} = 50 \%$ ,  $\rho_{стін} = 30 \%$  відповідно.

Коефіцієнт використання світлового потоку становить  $\eta = 50 \%$ .



Необхідний світловий потік ламп світильників:

$$F = \frac{E \cdot k_z \cdot S \cdot z}{N \cdot \eta},$$

де  $E$  – найменша нормована освітленість,  $E = 300$  лк, так як розряд зорових робіт дорівнює 3;

$k_z$  – коефіцієнт запасу,  $k_z = 1,4$ ;

$S$  – площа приміщення,  $\text{м}^2$ ;

$z$  – поправочний коефіцієнт для переходу від найменшої освітленості до середньої (зазвичай значення його набувають в межах 1,1 – 1,2),  $z = 1,1$ ;

$N$  – кількість світильників;

$\eta$  – коефіцієнт використання, тобто відносна доля потоку лампи, падаюча на поверхню  $S$ .

Розрахуємо за формулою (5.4) добуток  $F \cdot N$ .

$$F \cdot N = \frac{300 \cdot 1,4 \cdot 48 \cdot 1,1}{0,5} = 44352 \text{ лм.}$$

Знайдемо необхідне число ламп. Для освітлення виробничих приміщень вибір джерел світла проводять з врахуванням освітленості. При освітленості від 150 до 300 лк доцільно застосовувати джерела світла типи ЛБ, ДРЛ, ЛБХ. Вибираємо люмінесцентні лампи типу ЛХБ80 (2×80 Вт); довжина лампи – 1,5 м, ширина – 0,4 м, світловий потік даної лампи – 3840 лм.

Отже, потрібне число ламп:

$$N = \frac{44352}{3840} \approx 12 \text{ шт.}$$

Оскільки світильники дволампові, то для забезпечення нормальної потужності освітлення приміщення необхідно 6 світильників. Приймаємо, що

кількість світильників по довжині складатиме 2 шт., а по ширині – 3 шт.

Світильники з люмінесцентними лампами в основному розташовують рядами. Ряди слід орієнтувати паралельно стіні з вікнами. Потрібно встановити два світильники в ряд. Застосовуємо світильники ШОД (оскільки ШОД дає більш рівномірне освітлення) з люмінесцентними лампами ЛХБ потужністю 2×80 Вт і з потоком 3840 лм. Схема розташування світильників представлена на рисунку 6.1.

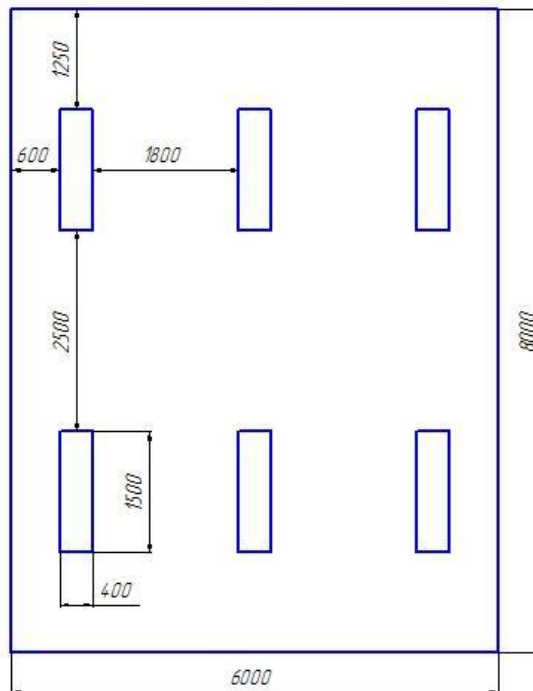


Рисунок 4.1 – Схема розташування світильників

Всі необхідні розрахунки для розташування світильників проводимо за формулами:

$$la = \frac{1}{2} \cdot La,$$

$$lv = \frac{1}{3} \cdot Lb$$

$$la = 1,25 \text{ м}, lv = 0,6 \text{ м},$$

де  $L$  – відстань між сусідніми світильниками (рядами люмінесцентних світильників).

$La$  – відстань між сусідніми світильниками по довжині приміщення,  $La = 2,5 \text{ м}$ .

$L_e$  – відстань між сусідніми світильниками по ширині приміщення,  $L_e = 1,8$  м.

$l$  – відстань від крайніх світильників або рядів світильників до стіни.

#### Електробезпека

При виявленні несправності в електричному обладнанні формувальник повинен припинити роботу, доповісти майстру і викликати чергового електрика.

Усувати неполадки в електрообладнанні самому не допускається. Після усунення несправності пуск обладнання повинен проводити черговий електрик за заявкою майстра.

Користуватися переносними електросвітильниками дозволяється при напрузі не вище 36 В, а в сирих підвальних приміщеннях - не вище 12 В.

Під час загоряння електропроводів, приладів, електрообладнання їх необхідно вимкнути від мережі і гасити осередок пожежі тільки сухим піском, порошковим, пінним вогнегасником або сухими інертними матеріалами (роздрібненим шамотом, динасом, кварцитом).

Забезпечення електробезпеки регламентується ПУЕ:

- пристрій захисного заземлення згідно СНиП 3.05.06-85 і ПУЕ для захисту людей від ураження електричним струмом при можливому пошкодженні ізоляції;

- недоступність ТВЧ для випадкового дотику ;

- застосування ізоляції , поточний контроль;

- посилення вимог до електропроводок ;

- застосування попереджувальних сигналізацій , написів і плакатів ;

- використання індивідуальних засобів захисту та пристроїв;

- посилення вимог до кваліфікації персоналу електромонтажних організацій (за ГОСТ Р 50571 1-93 , п. 4.1.1 ).

#### Заходи пожежної безпеки

Формувальник повинен вміти використати за призначенням засоби пожежогасіння (пісок, землю, вогнегасники тощо) і знати місця зберігання протипожежного інвентарю, вміти ним користуватися.

Під час виникнення пожежі необхідно доповісти керівництву цеху і диспетчерові підприємства, викликати пожежну охорону, а до її прибуття вжити

всіх заходів щодо ліквідації загоряння своїми силами, діючи відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

Під час загоряння електропроводів, приладів, електрообладнання їх необхідно вимкнути від мережі і гасити осередок пожежі тільки сухим піском, порошковим, пінним вогнегасником або сухими інертними матеріалами (роздрібненим шамотом, динасом, кварцитом).

Під час загоряння пально-мастильних матеріалів не можна гасити полум'я водою. Для цього необхідно використовувати землю, пісок, вогнегасники.

Не можна захаращувати проходи і доступ до протипожежного інвентарю, вогнегасників, гідрантів.

Палити дозволяється тільки у спеціально відведених місцях.

Кожний формувальник повинен бути ознайомлений з планом ліквідації аварій на підприємстві в частині, яка має відношення до його робочого місця і ділянки виконання робіт

Засоби індивідуального захисту

Формувальники вогнетривких підприємств повинні працювати у встановленому за нормами спецодязі:

- костюмі бавовняному за ГОСТом 27575-87 "Костюмы мужские для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий. Технические требования" - на 12 місяців;

- фартусі брезентовому з нагрудником за ГОСТом 12.4.029-76 "Фартуки специальные. Технические условия" - на 12 місяців;

- спецвзутті - черевиках шкіряних за ГОСТом 28507-90 "Обувь специальная кожаная для защиты от механических воздействий. Общие технические условия" - на 12 міс;

- рукавицях комбінованих за ГОСТом 12.4.010-75 "ССБТ. Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия» - на 2 міс; враховуючи необхідність роботи з віброінструментом, формувальник повинен одержувати також рукавиці антивібраційні за ТУ 78-349-75, виготовлені з бавовняних тканин та які мають на долоневій частині амортизаційну прокладку з поролону.

Крім наведених засобів індивідуального захисту, формувальник повинен працювати у захисній касці, захисних окулярах, користуватися протипиловим респіратором і засобами захисту органів слуху, а також під час роботи в умовах знижених температур - зимовим спецодягом - куртці на утеплюваній прокладці за ГОСТом 29335-92 "Костюмы мужские для защиты от пониженных температур. Технические условия" - на 36 місяців.

У відповідності до внутрішнього трудового розпорядку формувальник зобов'язаний:

- перед початком зміни прибути на змінно-зустрічні збори і одержати завдання на виконання робіт;

- виконувати тільки доручену роботу з дотриманням усіх вимог інструкції з охорони праці; виконувати вказівки старшого формувальника і майстра;

- не розпочинати роботу, якщо умови її виконання суперечать інструкції з охорони праці, або іншому документу, що регламентує безпечне виконання робіт, а також без інструктажу з охорони праці під час тимчасового переведення на іншу роботу і ставати до роботи тільки тоді, коли умови забезпечують безпеку робітника і оточуючих;

- утримувати своє робоче місце і устаткування в справному стані і чистоті;

- зберігати необхідні в роботі інструмент і пристосування в справному стані;

- не допускати сторонніх осіб на ділянку виконання робіт;

- не розпивати спиртні напої на робочому місці і на території підприємства і не з'являтися на роботу у нетверезому і наркотичному стані.

Формувальник, як і всі працівники цеху, повинен знати і вміти надати першу (долікарську) допомогу потерпілому.

## 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ЗАХОДІВ

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) – це комплект розрахунково-аналітичних документів, що містять основні технічні і організаційні рішення, розрахунково-кошторисні, оціночні та інші показники, що дозволяють розглядати доцільність і ефективність інвестиційного проекту. Техніко-економічне обґрунтування є необхідним дослідженням, в ході якого проводиться ряд робіт по вивченню і аналізу всіх складових інвестиційного проекту і розробці термінів повернення вкладених в бізнес засобів. Метою техніко-економічного обґрунтування є аргументація доцільності вибору нового устаткування, технології виробництва або процесу. ТЕО може проводитися по самих різних науково-технічних заходах, які можуть здійснюватися як на конкретному підприємстві, так і в масштабах всього господарства країни. Розробка ТЕО будь-якого проекту завжди проводиться перед ухваленням рішення про проектування і серійне виробництво певного устаткування або при ухваленні рішення про створення якого-небудь виробництва, орієнтованого на певний вид продукції. З довідників та літературних даних виявлено, що для впровадження частотно регульованого приводу у систему відцентрових насосів, які були розглянуті у третьому розділі, економія електричної енергії складає 20 %. Згідно енергоаудиту, який був проведений у першому розділі виявлено, що споживання електричної енергії насосними агрегатами цеху випробувань за 2020 рік складає 906810 кВт. Знайдемо вартість комплексу обладнання, яке складається з пусконаладжувальних робіт, вартості перетворювача частоти вартість монтажу, вартість датчику тиску, грн.

$$B = B_{ПНР} + B_{ПЧ} + B_M + B_D \quad (5.1)$$

де  $B_{ПНР}$  – вартість пусконаладжувальних робіт;

$B_{ПЧ}$  – вартість перетворювача частоти;

$B_M$  – вартість монтажу;

$B_D$  – вартість датчику тиску.

В таблиці 5.1 наведені дані для розрахунку вартості капіталовкладень.

Таблиця 5.1 – Вартість обладнання для регулювання частоти обертання насосних агрегатів

Найменування	Вартість, грн
Вартість перетворювача частоти	63909
Вартість датчику тиску	7392
Пусконаладжувальні роботи	9605
Монтаж	8315
Програмне забезпечення	19390
Всього	106611

До впровадження обрано перетворювач частоти VFD370CP43B-21, характеристики якого наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Технічні характеристики перетворювача частоти VFD370CP43B-21

Параметр	Значення
1	2
Вхідна напруга	~ 380 В ± 15 % = 440 В ± 10 %
Вихідна потужність	до 37 кВт
Вихідний струм	до 75 А
Діапазон регулювання швидкості	1:1000
1	2
Точність підтримання швидкості	±0,02%
Час відгуку	< 10 мс
Точність управління обертового моменту	5%
Стартова частота / Пусковий момент	0 Гц / 200%
Енкодер	А1 до 200 кГц, В1 та С1 до 100 кГц, D1 до 500 кГц, Н1 до 300 кГц

Керування перетворювачем частоти здійснюється ПІД – регулятором, зі зворотним зв'язком від датчику тиску LEO 779692, характеристики якого наведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Технічні характеристики датчику тиску LEO 779692

Параметр	Значення
Напруга	24 В
Робочий тиск	0-16 бар
Максимальний тиск	0-30 бар
Маса	0,3 кг
Допустима робоча температура	0-80 С°
Межа похибки	± 0,5 %
Стійкість до вібрації	5-1000 Гц з прискоренням 15 г

$$B = 63909 + 7392 + 9605 + 8315 = 89221 \text{ грн}$$

Економія електричної енергії після впровадження ЧРП за рік:

$$\Delta W = 0,2 \cdot W \quad (5.2)$$

$$\Delta W = 0,2 \cdot 906810 = 181362 \text{ кВт}$$

Вартість зекономленої електричної енергії складає:

$$\Delta E = C_e \cdot \Delta W \quad (5.3)$$

де  $C_e$  – ціна на електричну енергію для підприємства, яка становить 3,65 грн/кВт·год

$$\Delta E = 3.65 \cdot 181362 = 661971,3 \text{ грн}$$

Амортизаційні відрахування – це специфічний вид фінансових ресурсів. З одного боку, амортизаційні відрахування – це витрати підприємства, тому що



їхню суму, нараховану на виробничі необоротні активи, включають у собівартість продукції, робіт, послуг. Водночас, у складі виторгу (доходу) від реалізації продукції суму амортизаційних відрахувань розглядають як цільовий фонд, складову фінансових ресурсів, призначених для відтворення зношених у процесі виробництва необоротних матеріальних і матеріальних активів.

Амортизація основних засобів:

$$A = 0,01 H_A \cdot K \quad (5.4)$$

де  $H_A$  – річна норма амортизації основних засобів, для підприємства становить 8 %.

$$A = 0,01 \cdot 8 \cdot 89221 = 7137,7 \text{ грн}$$

Витрати на техобслуговування та ремонт:

$$P = 0,01 \cdot H_P \cdot K \quad (5.5)$$

де  $H_P$  – норма відрахувань на техобслуговування і ремонт, для підприємства становить 10 %.

$$P = 0,01 \cdot 10 \cdot 89221 = 8922,1 \text{ грн}$$

Економія поточних витрат (приріст прибутку):

$$\Delta C = \Delta E - (A + P) \quad (5.6)$$

$$\Delta C = 661971,3 - (7137,7 + 8922,1) = 645911,5 \text{ грн}$$

Приріст чистого прибутку підприємства:

$$ЧП = \Delta C(1 - 0,01C_{НП}) \quad (5.8)$$

де  $C_{НП}$  – ставка податку на прибуток, для підприємства становить 18 %.

$$ЧП = 645911,5 \cdot (1 - 0,01 \cdot 18) = 529647,43 \text{ грн}$$

Річний дохід інвестиційного проекту:

$$Д = ЧП + А \quad (5.9)$$

$$Д = 529647,43 + 7137,7 = 536785,13 \text{ грн}$$

Термін окупності:

$$T = \frac{Д}{К} \quad (5.10)$$

$$T = 536785,13 / 106611 = 5 \text{ років}$$

Основні розрахункові характеристики зводимо в таблицю 5.4. На рисунку 5.1 наведено прогнозоване споживання електроенергії ділянкою цеху після впровадження запропонованих заходів щодо енергоефективності.

Таблиця 5.4 – Основні техніко – економічні показники

Найменування	Показник
Капітальні вкладення, грн	106611
Економія електроенергії, кВт·год	181362
Річний дохід, грн	536785,13
Термін окупності, років	5

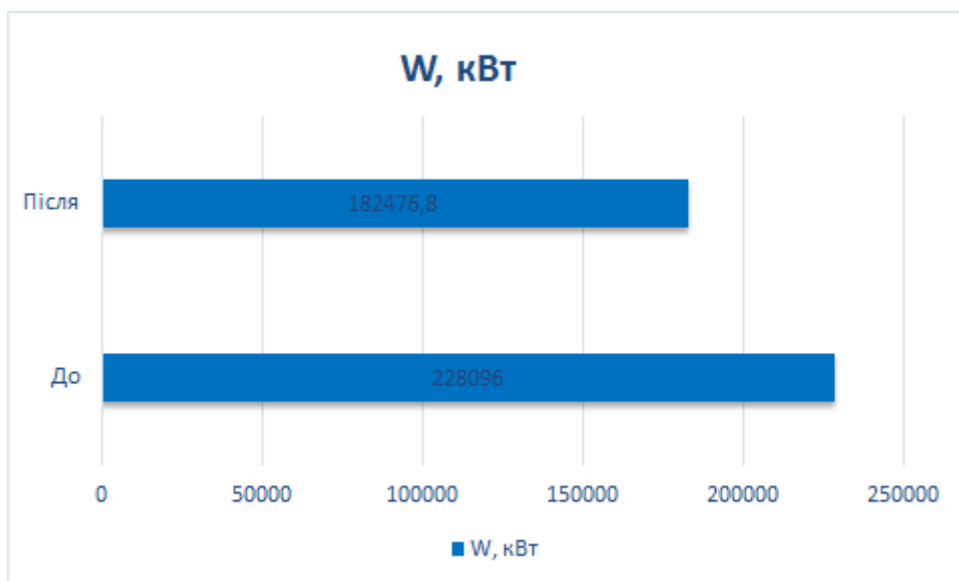


Рисунок 5.1 – Споживання електричної енергії насосними агрегатами до та після впровадження запропонованих заходів

Таким чином, результати проведених розрахунків свідчать про економічну доцільність впровадження запропонованих заходів, щодо підвищення економічної ефективності роботи насосних агрегатів, обсяги споживання електричної енергії знизяться на 20 %, що в грошових одиницях складає 661971,3 грн. Термін окупності складає 5 років, отже заходи є рентабельними та можуть бути запропоновані до впровадження на підприємстві.

## ВИСНОВКИ

В представлений роботі було проаналізовано рівень споживання електричної енергії обладнанням заводу ПрАТ «Мотор Січ». В результаті було виявлено, що серед цехів заводу найбільшим споживачем є цех випробувань (№ 39). При цьому, серед обладнання цеху випробувань найбільше електричну енергію споживають насосні агрегати (до 40 %).

Аналіз можливих шляхів регулювання вихідних потоків насосних агрегатів дроселюванням не є ефективним, тому даний спосіб використовувати не рекомендується. Альтернативним варіантом, розглянутим у роботі і таким, що пропонується до використання – це регулювання продуктивності насосів шляхом зміни частоти обертів електродвигунів в електроприводах. Тобто головною ідеєю у представлений роботі є використання частотно-регульованого електроприводу (ЧРП).

Відповідно до зроблених розрахунків обрано частотний перетворювач потужністю до 37 кВт (VFD 370CP 43B-21). Також підприємству пропонується використовувати каскадну схему керування насосними агрегатами. При цьому для управління шістьох насосів, які на даний час працюють у цеху випробування, згідно запропонованого алгоритму має враховуватись поточне навантаження на насоси.

У роботі представлено математичну модель роботи системи « частотний перетворювач – асинхронний двигун – відцентровий насос», яка враховує поточне навантаження на насосні агрегати.

У четвертому розділі розглянуто питання, що стосуються охорони праці.

У п'ятому розділі представлено техніко-економічне обґрунтування від запропонованих заходів. Згідно отриманих розрахунків, оціночне зниження споживання електроенергії насосними агрегатами складе приблизно 24 %. Очікуваний термін окупності витрат на реалізацію розроблених заходів складе біля 5 років.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Про підприємство [Електронний ресурс]. – Режим доступу : \WWW/  
URL: <http://www.motorsich.com/ukr/profile/> – 01.2019 – Загол з екрану.
2. Документація. Звіти щодо енергоспоживання цеху випробувань на  
ПрАТ «Мотор Січ». [Текст] : ДСТУ 3008-95. – Введ. 1995–02–23. – Запоріжжя:  
2019. – 45 с
3. Дослідження можливості підвищення електроприводу насосних  
агрегатів [Текст] : МАтеріали науч.-практ. конф. студентів Молода наука, 30  
березня 2019 г. Запоріжжя/ Єременко А. В., Коваленко Л. Р.. – Запоріжжя , 2005.  
– 28с.
4. Очистка отработанного масла классическими методами [Електронний  
ресурс]. – Режим доступу: \WWW/ URL: <https://oil.globecore.ru/ochistka-otrabotannogo-masla-klassicheskimi-metodami> – 23.05.2016 г. – Загол. з екрану.
5. Качан, Ю.Г. Основы энергозбереження / Для студ. ЗДІА спец. 7.000008  
"ЕМ": Конспект лекцій / ЗДІА. - Запоріжжя: ЗДІА, 2005. - 183 с.: іл.
6. Виды насосных агрегатов [Електронний ресурс]. – Режим доступу :  
7. \WWW/ URL: <http://tehnika.expert/dlya-sada/nasos/vidy-i-ih-klassifikaciya.html#i-6/> – 03.2017 – Загол з екрану.
8. Принцип действия центробежного насоса [Електронний ресурс]. –  
Режим доступу: \WWW/ URL: <https://udobnovdome.ru/princip-dejstviya-centrobezhnogo-nasosa/> – 02.2017. – Загол. з екрану.
9. Объемные насосы [Електронний ресурс] / WIKIMEDIA. – Режим  
доступу : \WWW/ URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Насос#Объёмные\\_насосы](https://ru.wikipedia.org/wiki/Насос#Объёмные_насосы) –  
04.11.2019 г. – Загол. з екрану.
10. Объемные насосы и их класификация [Електронний ресурс]. Режим  
доступу: \WWW/ URL: <https://studfile.net/preview/2180227/page:17/> – 04.2013 г.
11. Насос для перекачки топлива. Строение и принцип действия насосов.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу : \WWW/ URL:  
[http://neftebaza.kiev.ua/nasosy\\_svetlye\\_nefteproducty/](http://neftebaza.kiev.ua/nasosy_svetlye_nefteproducty/) - 07.2016.

12. Малюшенко, В. В. Динамические насосы [Текст] : Атлас / В. В. Малюшенко. – Москва : Машиностроение, 1984. – 84 с.
13. Динамические насосы [Электронный ресурс] / WIKIPEDIA. – Режим доступа: \WWW/ URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Насос#Динамические\\_насосы](https://ru.wikipedia.org/wiki/Насос#Динамические_насосы) – 04.11.2019 г. – Загол. з екрану.
14. Проектирование электрических машин. /Под ред. И.П.Копылова – М.: Энергия, 1980. – 326 с.
15. Гульков, Г.И. Системы автоматического управления электроприводами [Текст] / Учебное пособие для среднего специального образования по специальностям "Автоматизированные электроприводы", "Городской электрический транспорт", "Монтаж и эксплуатация электрооборудования" / Гульков Г.И., Петренко Ю.Н., Бачило Т.В., под общ. ред. Петренко Ю.Н. - Минск : ИВЦ Минфина, 2014. - 365 с.
16. Регулирование подачи центробежного насоса [Электронный ресурс] – Режим доступа: \WWW/ URL: <http://www.ktto.com.ua/nastroika/nmb> – 07.05.2009 г.
17. Насосне обладнання [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \WWW/ URL: [http://www.agrovodcom.ru/info\\_regular\\_pumps.php](http://www.agrovodcom.ru/info_regular_pumps.php) – 08.04.2013. Загол. з екрану.
18. Осин, И. В. Технология энергосбережения в насосах [Текст] // - электронный журнал — №6. 2005. URL: [http://esco-ecosys.narod.ru/2005\\_6/art03.htm](http://esco-ecosys.narod.ru/2005_6/art03.htm) (дата обращения 10.05.2019).
19. Регулирование работы насосов. Параллельная и последовательная работа центробежных насосов. [Электронный ресурс] – Режим доступа: \WWW/ URL: [https://studref.com/437365/stroitelstvo/regulirovanie\\_raboty\\_nasosov\\_parallelnaya\\_rabota\\_tsentrobezhnyh\\_nasosov](https://studref.com/437365/stroitelstvo/regulirovanie_raboty_nasosov_parallelnaya_rabota_tsentrobezhnyh_nasosov) – 19.08.2014 г.
20. Шкердин, Д. Г. Преобразователи частоты в энергосберегающем приводе насосов [Текст] - підручник - 2004. - №7. - С. 29-32.  
Керовані випрямлячі: Навчальний посібник/М.М. Казачковський. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 229 с.
21. Каталог насосов для водоснабжения, теплоэнергетики, сельского

хозяйства, жилищно-коммунального хозяйства, пищевых и химических производств [Текст]. ОАО «Ливгодромаш». - Ливны, 2008. - 71 с.

22. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоидат, 1981. – 576 с.

23. Карелин, В. Я. Насосы и насосные станции [Текст] / В.Я. Карелин, А.В. Минаев. – М.: Издательский Дом «БАСТЕТ», 2010. – 448 с.

24. Как выбрать частотный преобразователь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \WWW/ URL: <https://shop.voltenergo.com.ua/kak-vybrat-chastotnyu-preobrazovatel---10-osnovnyh-aktsentov-pri-podbore> – 02.03.2015 г.

25. Преобразователь частоты INVT GD35 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \WWW/ URL: <http://www.invt.su/katalog/chastotnye-preobrazovateli/seriya-gd35/preobrazovatel-chastoty-invt-gd35-037g-4-a1.html> – 17.09.2012 г.

26. Карасёв, Б. В. Насосные и воздуходувные станции [Текст] / Б. В. Карасёв. – Минск: Высш. школа, 1990. – 326 с.

27. Николаев, В. Г. Анализ энергоэффективности различных способов управления насосными установками с регулируемым электроприводом [Текст] // - 2006. - №11. - 4.2. - С. 6-16.

28. Трехов, В. М. Преобразователи частоты – просто о сложном [Текст]: справочник / В. М. Трехов. – Москва : ИздАтельство ЗАО «Данфосс», 2006. – 165 с.

29. Использование частотных преобразователей в режиме ПИД-регулирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : \WWW/ URL: <https://isup.ru/articles/47/10837/> – 02.05.2016 г. – Загол. з экрана.

30. Датчик давления [Электронный ресурс] – Режим доступа : \WWW/ URL: <https://rt.co.ua/katalog/otoplenie-i-vodosnabzhenie/nasosnoe-oborudovanie/promyshlennoe-oborudovanie/datchiki-davleniya/datchik-davleniya-24v-0-16bar-> – 14.09.2013 г.

31. Как выбрать датчик давления [Электронный ресурс]. – Режим

доступу: \WWW/ URL: <https://izmerkon.ru/podderzhka/publikaczii/kak-vybrat-datchik-davleniya.html> – 17.04.2015 г.

32. Анализ методов управления электроприводом насосных станций [Электронный ресурс]. – Режим доступа – \WWW/ URL: <https://studfile.net/preview/3545179/page:12/#20> – 07.11.2014 г.

33. Исследование частотно-управляемого электропривода насосной станции [Электронный ресурс]. – Режим доступа – \WWW/ URL: <https://studfile.net/preview/3545179/page:13/#22> – 07.11.2014 г. – Загол з екрану.

34. Птах, Г. К. Методологические аспекты разработки компьютерных моделей электромеханических преобразователей [Текст]. Электромеханика. — № 1. — 2003. — С. 7—11.

35. Качан, Ю. Г. Управління проектами енерговикористання [Текст] : навч. посібник для вnz : [рек. М-вом освіти і науки України] / Ю. Г. Качан, К. О. БрАтковська ; ЗДІА. - Запоріжжя : ЗДІА, 2014. - 140 с. : іл. - ISBN 978-617- 685-005-2 : 9 грн. - (кафедра ЕЕЕ).

36. Ткачук, К. Н. Охорона праці та промислова безпека [Текст].-К.: Основа, 2009. – 560 с.

37. Жидецький, В. Ц. Правила безпечної експлуатації електроустановок. Основи охорони праці [Текст] - Львів :Афіша, 2002. – 320 с.

38. Тютеева, П. В. Оценка экономической эффективности асинхронного регулируемого электропривода насосных агрегАтов[Текст] // Известия вузов. Электромеханика, 2009. - №2. – с. 61-64.



## ДОДАТОК А

Демонстраційні матеріали до магістерської роботи

**Аналіз можливості зниження витрат електричної енергії насосних агрегатів в умовах ПрАТ «Мотор Січ»**