

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

### Розробка енергозберігаючого електроприводу для систем водопостачання

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

Шифр МРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу  
група ЕТм-22-1



Підпис

Безсмертний В.В.

Ініціали, прізвище

Керівник



Підпис, дата

доц. Майдан П.С.

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер



Підпис, дата

доц. Поліщук О.С.

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС

24 12 2023 р.

Підпис, дата

проф. Поліщук О.С.

Ініціали, прізвище

Хмельницький 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень магістр  
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
Шифр і назва  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Шифр і назва  
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС  
д.т.н., проф. Полюшук О.С.

\_\_\_\_\_.2023р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Безсмертний Владислав Валентинович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка енергозберігаючого електроприводу для систем водопостачання

керівник роботи к.т.н., доц. Майдан П.С.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 15 08 2023 р. № 30

2. Строк подання студентом роботи на кафедру \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи енергетичні характеристики обладнання.

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

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Проектування системи керування насосною станцією. 3. Розрахунки, що підтверджують працездатність. 4. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуші 1 та 2. Проектування системи керування насосною станцією. Документ оглядовий (A1). Аркуш 3. Розрахунок та побудова характеристик відцентрових насосів. Результати розрахунків (A1). Аркуш 4. Відцентровий насос. Вид загальний (A1). Аркуш 5. Відцентровий насос. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 6. Силові кола насосного обладнання. Схема електрична (A1). Аркуші 7 та 8. Характеристика режимів роботи насосної станції. Результати розрахунків. (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

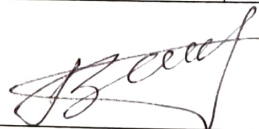
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень з тематики магістерської роботи	до 30.10.22р.	
2. Проектування системи керування насосною станцією	до 10.11.22р.	
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність	до 20.11.22р.	
4. Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	до 12.12.22р.	

Студент



Підпис

В.В. Безсмертний

Ініціали, прізвище

Керівник роботи



Підпис

П.С. Майдан

Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Безсмертний Владислав Валентинович

2. Тема магістерської роботи Розробка енергозберігаючого електроприводу для систем водопостачання

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента Щур Сергій  
засл. гол. енергетика ТОВ Каїра

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 8 арк., сторінок записки 83

5. Одним з основних напрямів підвищення енергоефективності насосних станцій в умовах технічної модернізації систем водопостачання та водовідведення є використання спеціальних частотно-регульованих електроприводів. На сучасному етапі електропривод є базовим споживачем електричної енергії (до 60% споживання) та головним джерелом механічної енергії в галузях промисловості, отже використання енергозберігаючих технологій є актуальною задачею. Метою даної кваліфікаційної роботи є аналіз та оцінка ефективності використання регульованого електроприводу на насосних станціях другого підйому, ККД, коефіцієнта потужності, а крім того і визначення економічної ефективності впровадження частотно-регульованих електроприводів. В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень з тематики магістерської роботи, а саме конструкцій насосного обладнання та насосних установок, проаналізовано способи регулювання швидкості обертання головного валу АД. В другому зроблено вибір на користь частотного способу регулювання величини частоти обертання ротора АД. В третьому розділі виконано необхідні розрахунки та запропоновано схему заміщення АД для якої виконано визначення параметрів та розрахунок уточнення параметрів для схеми заміщення. Наведено і охарактеризовано режими роботи насосної станції.

Підпис студента 

"22" 12 2023 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 01 від "26" 12 2023 р.

Оцінка проекту ЕК добре 4,5/5  
Рекомендації ЕК \_\_\_\_\_

Особливі відмітки \_\_\_\_\_

Технічний секретар \_\_\_\_\_

"28" 12 2023 р.

# ЗМІСТ

	с.
Вступ	5
1 Огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень	7
1.1 Огляд та аналіз існуючих конструкцій насосів	7
1.2 Огляд та аналіз способів регулювання швидкості обертання АД	13
Висновки до розділу	21
2 Проектування системи керування насосною станцією	22
2.1 Підбір автономного інвертору для ЧП	24
2.2 Частотний перетворювач із АІН та керованим випрямлячем	26
2.3 Частотний перетворювач із АІН та широтно-імпульсною модуляцією	33
Висновки до розділу	40
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність	41
3.1 Розрахунок та побудова характеристик ВНС та трубопроводу	43
3.2 Визначення параметрів схеми заміщення АД	50
3.3 Розрахунок уточнення параметрів запропонованої схеми заміщення	58
3.4 Характеристика режимів роботи розроблюваної насосної станції	70
Висновки до розділу	77
Загальні висновки	78
Перелік джерел посилань	79
Додатки	83

<b>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</b>					
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис	Дата	
Виконав	Безсмертний В				
Перевір.	Майдан П.С.				
І контр.	Тимоцьук			25.12.23	
Затвер.	Полщук О.С.				
Розробка енергозберігаючого електроприводу для систем водопостачання			Літера	Аркуш	Аркушів
			М	4	85
			ХНУ гр. ЕТМ-22-1		

## ВСТУП

Загально відомо, що енергозбереження - реалізація наукових, виробничих, технічних, правових, організаційних та економічних заходів, спрямованих на раціональне використання та відповідно, і розподілення паливно-енергетичних ресурсів та на залучення відновлювальних джерел енергії [1-4]. Тобто це важливе завдання щодо збереження природних ресурсів.

На сучасному етапі в нашій країні найбільш затребуваним є саме побутове енергозбереження, а крім того і енергозбереження втілене у сфері ЖКГ. Перешкодою до втілення в сфері ЖКГ є стримування постійного зростання тарифів на паливно-енергетичні ресурси для населення, відсутність коштів у підприємств ЖКГ на розробку та втілення енергозберігаючих програм, суттєво низька частка розрахунків згідно індивідуальних приладів обліку та використання нормативів, а також відсутність в населення елементарної побутової культури енергозбереження.

Завдання енергозбереження має два напрямки виконання. Перший напрямок – впровадження в ЖКГ енергоефективних технологій та відповідного енергозберігаючого обладнання, яке дозволить виконувати ідентичний обсяг робіт при значно нижчих витратах електроенергії. Другий напрямок – спеціальні організаційно-технічні заходи, які повинні бути спрямовані на унеможливлення марного витрачання енергоресурсів.

Відомо, що водопровідно-каналізаційне господарство міста є енергоємним виробництвом. У собівартості продукції міських водоканалів витрати на електричну енергію досягають більше 25%. Основна частка споживання електроенергії припадає саме на підйом та подальше транспортування об'єму води водопровідними та каналізаційними насосними станціями (НС).

Традиційно регулювання параметрів роботи НС (величина витрати, величина напору) на багатьох об'єктах до нинішнього часу здійснюється шляхом виконання дреселювання. У результаті втрати енергії досягають рівня в 20-25%,

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

а при неправильному виборі НС і того більше - до 30-40%.

Одним з основних напрямів підвищення енергоефективності НС в умовах технічної модернізації систем водопостачання та водовідведення є використання спеціальних частотно-регульованих електроприводів (ЧРЕ).

Використання ЧРЕ має наступні переваги:

- економія електроенергії на рівні 60%;
- економія об'єму води, що транспортується, на рівні 25%, за рахунок зниження непродуктивних витрат;
- зниження аварійності електричної мережі та зниження аварійності встановленого електрообладнання шляхом усунення ударних пускових струмів;
- зниження аварійності гідравлічної мережі за рахунок підтримання мінімально рівня необхідного тиску та усунення шансу виникнення гідроударів, що можуть зруйнувати систему водопостачання;
- зниження рівня шуму, від працюючого технологічного обладнання;
- зручність автоматизації технологічного процесу;
- зручність та легкість впровадження [5-7].

На сучасному етапі електропривод є базовим споживачем електричної енергії (до 60% споживання) та головним джерелом механічної енергії в галузях промисловості, отже використання енергозберігаючих технологій є актуальною задачею [1-7].

Метою даної кваліфікаційної роботи є аналіз та оцінка ефективності використання регульованого електроприводу на НС другого підйому, ККД, коефіцієнта потужності, а крім того і визначення економічної ефективності впровадження ЧРЕ.

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ

## 1.1 Огляд та аналіз існуючих конструкцій насосів

Відомо, що насосом називають спеціальну гідравлічну машину, що створює транспортування рідини під напором при передачі їй необхідної енергії [8-11].

У сукупності з електроприводом та спеціальним передавальним механізмом (фрикційною/магнітною муфтою, редуктором та пасовим шківом) насос утворює, так званий, насосний агрегат. Комплекс обладнання, що забезпечує роботу насосів у штатному режимі і що складається з одного або декількох встановлених насосних агрегатів, трубопроводів, необхідної запірної та регулювальної апаратури, апаратури керування та захисту, створює насосну установку.

НС – це ціла окрема споруда, до складу якої входить одна або декілька окремих насосних установок, а так само допоміжні системи та спеціалізоване обладнання, побутові та виробничі приміщення, що забезпечують працездатність всього об'єкта [8-11].

В залежності від призначення і роду речовини, що перекачується, насосні установки класифікують як водопровідні, меліоративні, каналізаційні, теплофікаційні та ін.

Водопровідні НС в залежності від місця, яке вони займають у загальній міській системі водопостачання, розподіляють на станції першого та другого підйому, а також окремо відокремлюють спеціальні підвищувальні станції.

НС першого підйому використовується для забору води з джерела водопостачання та транспортування на спеціальні очисні споруди.

НС другого підйому використовується для подачі води з резервуарів чистої води у загальну міську розподільну мережу. Якщо рівня тиску, що створюється,

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

недостатньо для підйому води на потрібну висоту, тоді будуються спеціальні підвищувальні НС, для підвищення рівня тиску в загальній мережі.

В залежності від призначення водопровідні НС класифікують як станції питної та технічної води [8-11].

У нашій роботі розглядається саме НС другого підйому для холодного водопостачання міста, яка є виготовленою згідно із затвердженим проектом, встановлено п'ять насосних агрегатів типу Д1250-65 з електричними двигунами типу А111-4М. Регулювання величини подачі речовини здійснюється використанням засувки розташованої на напірному трубопроводі.

В залежності від топографічних умов та висоти розташування ємностей чистої води НС другого підйому можуть виконуватись незаглибленими, коли підлога машинного залу розташовується на позначці планування майданчика, і виконуватись частково заглибленими, коли підлога машинного залу розташовується нижче відмітки поверхні землі, якщо необхідно, щоб встановлені в машинному залі насоси перебували під затокою із водою.

При водопостачанні питної води НС другого підйому зазвичай розташовуються у безпосередній близькості від спеціальних очисних споруд для того, щоб вода забиралась насосами безпосередньо з ємностей із чистою водою. НС даного типу характерні для схем водопостачання невеликих населених пунктів та окремих промислових підприємств, крім того можуть бути використані також в якості станції підкачування [8-11].

НС представляє собою одноповерхову будівлю із частково заглибленим машинним залом, стіни верхньої будівлі, зазвичай, цегляні. Підземна частина будівлі може бути виконана у двох варіантах: або зі збірних фундаментних блоків або з бутобетону. Покриття одноповерхової будівлі - із залізобетонних великопанельних плит.

Величина подачі НС може бути різною в залежності від марки встановлених насосів без зміни розмірів всієї будівлі. Вода до насосів підводиться спеціальними водоводами та подається в загальну розподільну

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

мережу спеціальними напірними трубопроводами.

### 1.1.1 Конструкція відцентрового насосу та принцип роботи

Загально відомо, що відцентровий насос (ВНс) - насос, у якому рух речовини та необхідна величина напору створюються за рахунок відцентрової сили, що створюється під час дії лопатей робочого колеса на речовину. Потужність відцентрових насосів може становити від часток кіловата до багатьох тисяч кіловат [8-11].

ВНс (рис.1.1) призначені для подачі гарячої або холодної води, в'язких або агресивних рідин (лугів чи кислот), сумішей води з торфом, золою чи шлаком, ґрунтом, роздробленим кам'яним вугіллям, стічних вод. Усередині корпусу насосу на головному валу жорстко закріплено робоче колесо. Воно складається із заднього і переднього дисків, між якими встановлено лопаті, відігнуті від радіального напрямку в бік, протилежний напрямку обертання робочого колеса.

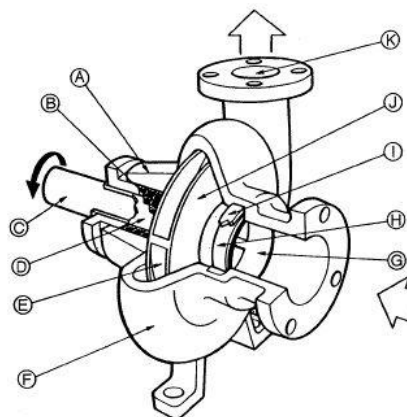


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд відцентрового насосу та принцип роботи:

А – сальник; В – набивка; С – головний вал; D – втулка головного валу; Е – лопать; F – корпус насосу; G – простір лопатевого колеса; H – робоче колесо; I – ущільнююче кільце; J – робоче колесо; K – патрубок випуску

За допомогою патрубків корпус насоса з'єднується зі напірним та всмоктувальним трубопроводами (рис. 1.1). Дія ВНс заснована на передачі кінетичної енергії від робочого колеса, що обертається, тим частинкам речовини,

які знаходяться між лопатями робочого колеса. Під впливом відцентрової сили, що виникає при цьому, частинки речовини, що подається, з робочого колеса транспортуються в середину корпусу насоса і далі в патрубок випуску, а на їхнє місце під дією тиску повітря надходять нові частинки, забезпечуючи безперервну роботу ВНС.

Основні параметри ВНС - кількість рідини, що переміщується за одиницю часу, тобто величина подача  $Q$  та величина напору  $H$  [8-11].

### 1.1.2 Характеристики встановленого насосного обладнання

Згідно із технічним завданням у НС встановлено п'ять насосних установок із наступними характеристиками:

- вид насосу – відцентровий;
- тип ВНС – Д1250-65 [12];
- кількість ВНС – 5;
- тип електродвигуна – А111-4М.

Відомо, що головні вали насосів приводяться в рух саме асинхронними електродвигунами. У даній кваліфікаційній роботі ми виконаємо необхідні розрахунки для ВНС типу Д1250-65.

Технічні характеристики ВНС типу Д1250-65 [12]:

- діаметр робочого колеса ВНС -  $D = 455$  мм;
- величина номінального напору -  $H_{ном} = 65$  м;
- величина номінальної подачі -  $Q_{ном} = 1250$  м<sup>3</sup>/год;
- номінальна частота обертання ВНС -  $n = 1450$  хв<sup>-1</sup>;
- величина ККД ВНС -  $\eta = 0,86$ ;
- величина споживаної потужності ВНС -  $P = 314$  кВт.

На напірно-витратній характеристиці ВНС (рис. 1.2) наводять робочий діапазон ВНС, тобто область режимів роботи, що гарантують максимальну надійність ВНС та, відповідно, і найвищий ККД. Робоча точка встановленого в системі ВНС визначається перетином його характеристики з характеристикою

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

всієї системи. Дана точка має перебувати в робочій області характеристики ВНС. При дотриманні цієї умови ККД ВНС буде досягати свого максимуму. Робота ВНС в допустимому діапазоні також забезпечує надійність його роботи [8-11].

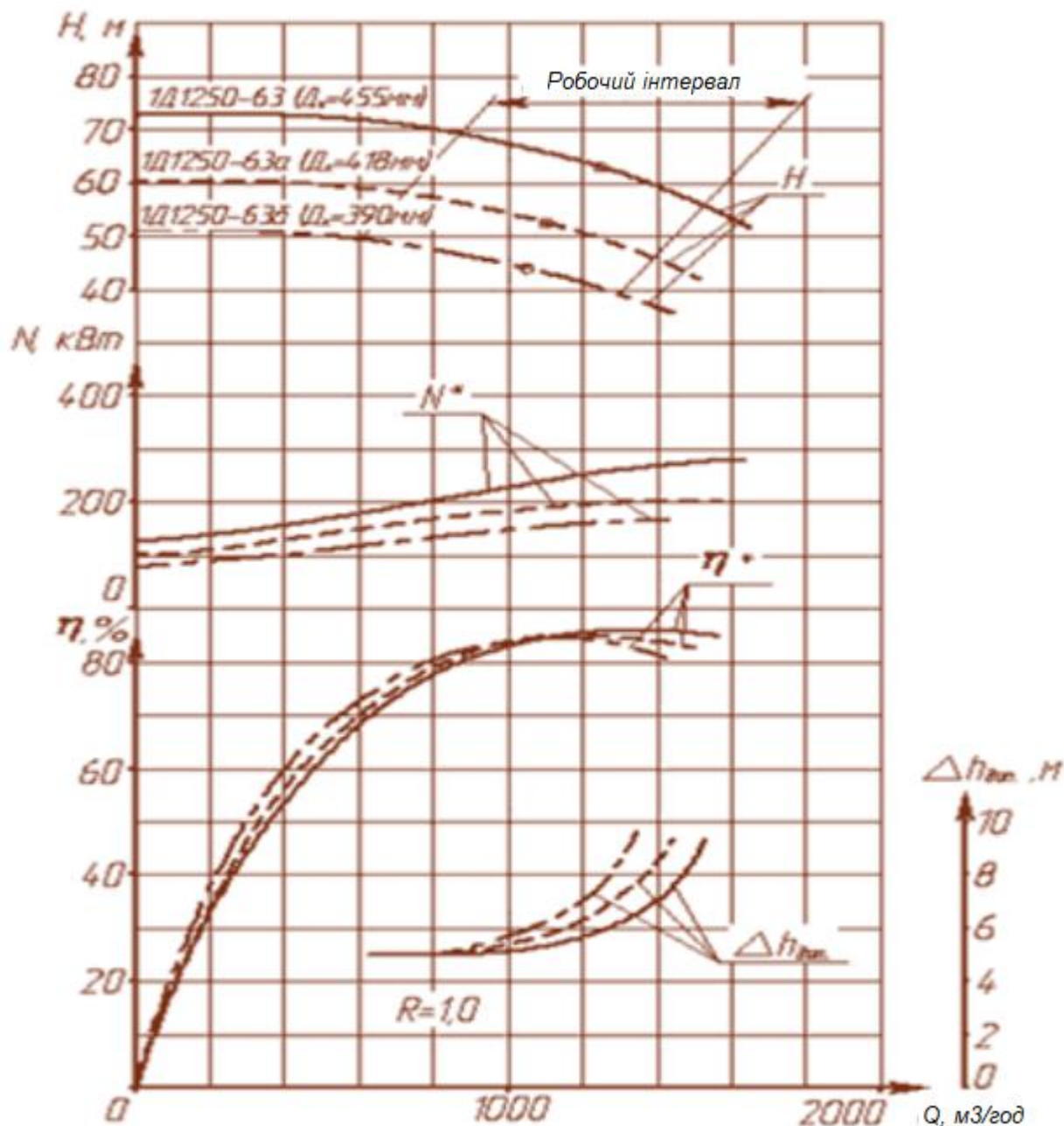


Рисунок 1.2 – Графічні залежності напірно-витратної характеристики ВНС

Використання систем автоматичного керування (САК) на базі ЧРЕ у системах водопостачання, насамперед, дає змогу істотно знизити споживання електричної енергії електроприводами насосів, оскільки величина надлишкового

напору при цьому не буде створюватись. Рівень тиску підтримується на постійному рівні саме за рахунок регулювання частоти обертання головного валу електродвигуна насосного агрегату [8-11].

### 1.1.3 Підбір необхідного електродвигуна для ВНс

Потужність електродвигуна будемо визначати згідно із формулою [13, 14]:

$$N = 9,81 \cdot \frac{Q \cdot H}{\eta_{нас} \cdot \eta_{ед}} \cdot K, \quad (1.1)$$

де  $Q$  – величина подачі одного ВНс;  $H$  – величина напору, що розвивається ВНс;  $\eta_{нас}$  – ККД ВНс, приймаємо  $\eta_{нас} = 0,86$ ;  $\eta_{ед}$  – ККД електродвигуна, приймаємо  $\eta_{ед} = 0,945$ ;  $K$  – коефіцієнт запасу, приймаємо  $K = 1,15$ .

Виконавши необхідні підстановки в формулу (1.1) отримуємо:

$$N = 9,81 \cdot \frac{235,232 \cdot 65}{0,86 \cdot 0,945} \cdot 1,15 = 212,25 \text{ кВт.}$$

Згідно із отриманим результатом вибираємо для агрегування із ВНс стандартний асинхронний електродвигун (АД) типу А111-4М, із номінальною потужністю  $N = 250$  кВт та номінальною напругою змінного струму  $U = 380$  В. Маса зібраного агрегату буде складати 3,285 т.

Технічні характеристики АД типу А111-4М [15]:

- величина номінальної напруги -  $U = 380 / 660$  В;
- номінальна частота обертання -  $n = 1470$  хв<sup>-1</sup>;
- величина номінальної сили струму -  $I_{ном} = 437$  А ;
- величина пускової сили струму -  $I_n = 3059$  А ;
- величина ККД -  $\eta = 0,945$ ;

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- $\cos \varphi = 0,92$ ;
- частота мережі -  $f = 50$  Гц;
- співвідношення сил струму -  $I_n / I_{ном} = 7$ .

## 1.2 Огляд та аналіз способів регулювання швидкості обертання АД

Методи регулювання частоти обертання АД визначаються згідно із наступним виразом [13, 14]:

$$n = n_0 \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_0}{p} \cdot (1 - s), \quad (1.2)$$

де  $p$  - число пар полюсів в статорній обмотці;  $n_0$  - синхронна частота обертання, або частота обертання магнітного поля;  $f_0$  - частота коливання змінного струму в мережі;  $s$  - величина проковзування, в.о.,  $s = (n_0 - n) / n_0$ .

З виразу (1.2) випливає, що частота обертання ротора буде залежати від числа пар полюсів  $p$ , величини проковзування  $s$  та частоти коливання змінного струму  $f_0$  в мережі. Отже, регулювання частоти обертання ротора можливе зміною будь-якого із цих головних параметрів. Тому необхідно більш детально розглянути способи регулювання частоти обертання АД.

### 1.2.1 Регулювання швидкості обертання зміною числа пар полюсів АД

Регулювання швидкості обертання АД зміною числа пар полюсів знаходить широке використання в багатошвидкісних АД із короткозамкненим ротором [16-19]. У пазах сердечника статора розташовують дві незалежні обмотки із різним числом пар полюсів, або одну обмотку, з можливістю перемикання. Методом перемикання котушкових груп можна отримувати різне число пар полюсів.

Наприклад, у тришвидкісному АД на статорі змонтовано одну обмотку із фіксованим числом пар полюсів та одну обмотку, з можливістю перемикання.

Якщо встановлено дві обмотки із можливістю перемикання, то АД - чотиришвидкісний. Багатошвидкісні АД знаходять широке застосування в електроприводах, із можливістю ступінчастого регулювання частоти обертання головного валу.

Перевагою даного методу є збереження високих показників при переході з однієї частоти обертання головного валу на іншу, коефіцієнт потужності та ККД залишаються на тому самому рівні.

Однак збільшені габарити, складність конструкції АД та досить висока вартість є недоліком. Так як необхідність перемикання статорних обмоток на різне число пар полюсів вимагає використання складної комутуючої апаратури, а отже вартість АД зростає [16-19].

### 1.2.2 Регулювання швидкості обертання шляхом зміни напруги живлення статора

Швидкість обертання головного валу АД можна регулювати зміною напруги, що підводиться до обмоток статора. При цьому частота коливання змінної напруги на АД не змінюється та дорівнює 50 Гц. Для регулювання напруги на статорних обмотках використовуються тиристорні регулятори напруги (ТРН) [16-19].

Трифазна схема підключення ТРН, побудована на базі однофазних схем підключення ТРН, наведена на рисунку 1.3.

Схема складається із шести тиристорів  $VS1-VS6$ . У кожен фазу трифазного ТРН підключаються, відповідно, по два тиристири відповідно до зустрічно-паралельної схеми, яка дозволяє протікання струму при навантаженні в обидва напів періоди коливання напруги мережі [16-19].

										Арк.
										14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	МРМА 23.00.00.000 ПЗ					





тертя та вентиляцію, виражена через кутову швидкість обертання ротора  $\omega$  матиме наступний вигляд [16-19]:

$$P_{\text{мех}} = M \cdot \omega, \quad (1.4)$$

де  $M$  - величина електромагнітного моменту АД.

Вираз для визначення повної електромагнітної потужності, що буде передаватись через повітряний зазор від статора до ротора матиме наступний вигляд:

$$P_{\text{ем}} = M \cdot \omega_0. \quad (1.5)$$

Різниця потужностей  $\Delta P_2 = P_{\text{ем}} - P_{\text{мех}}$  буде розсіюватися у вигляді виділення теплоти в активних опорах ротора. Отже, величина втрати в роторі буде визначатись згідно із формулою [16-19]:

$$\Delta P_2 = M \cdot (\omega_0 - \omega) = M \cdot s \cdot \omega_0 = s \cdot P_{\text{ем}}. \quad (1.6)$$

Електромагнітна потужність АД буде розподілятися при цьому наступним чином: одна частина, пропорційна величині проковзування  $s$ , буде розсіюватися у вигляді виділення теплоти в обмотці ротора, інша частина, пропорційна  $(1 - s)$ , буде передаватись на головний вал АД, тобто:

$$P_{\text{мех}} = (1 - s) \cdot P_{\text{ем}}. \quad (1.7)$$

У зв'язку з цим спосіб регулювання кутової швидкості шляхом зміни величини напруги за постійної частоти коливання мережі є досить неекономічним, оскільки втрати у роторі за постійного моменту навантаження

зростають пропорційно до зростання величини проковзування. Крім цього, різке зниження крутного моменту під час регулювання швидкості обертання призводить до зниження перевантажувальної здатності АД [16-19].

Діапазон регулювання швидкості обертання може бути підвищений під час роботи АД на вентиляторне навантаження, при якій статичний момент навантаження змінюється пропорційно квадрату частоти обертання головного валу -  $M \sim \omega^2$ . На рисунку 1.4 діапазон регулювання швидкості обертання головного валу АД складає від  $\omega_{ном}$  до  $\omega''$ .

### 1.2.3 Частотне регулювання швидкості обертання головного валу АД

Спрощений вираз для оцінки максимального моменту  $M_{max}$  АД при частотному регулюванні швидкості обертання матиме наступний вигляд [20, 21]:

$$M_{max} \approx C \cdot \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad (1.8)$$

де  $C$  - постійна для конкретного типу АД величина;  $U_1$  - величина напруги, що підводиться до статорної обмотки.

Із формули (1.8) слідує, що зі зміною частоти напруги живлення  $f_1$ , змінюється величина максимального крутного моменту, та відповідно, і перевантажувальна здатність  $\lambda$ , яка визначається із наступної формули [20, 21]:

$$\lambda = \frac{M_{кр}}{M_{ном}} = const, \quad (1.9)$$

де  $M_{кр}$  - величина критичного крутного моменту, Н\*м;  $M_{ном}$  - величина номінального крутного моменту, Н\*м.

Тому для збереження перевантажувальної здатності АД на необхідному

рівні, необхідно одночасно зі зміною величини напруги  $U_1$ , що підводиться до статорної обмотки змінювати і частоту напруги живлення  $f_1$ .

Закон частотного керування швидкості обертання з умови збереження переважувальної здатності, що встановлює оптимальне співвідношення між частотою, напругою живлення та моментом навантаження АД можна записати наступним чином:

$$\frac{U}{U_{ном}} = \frac{f}{f_{ном}} \cdot \sqrt{\frac{M}{M_{ном}}}, \quad (1.10)$$

де  $U_{ном}, f_{ном}$  - величини номінальних напруги та частоти мережі;  $U, f$  - величина напруги та частоти на виході частотного перетворювача (ЧП);  $M, M_{ном}$  - величина поточного та номінального моменту АД.

Керування АД відповідно до виразу (1.10) за ненасиченої магнітної системи і без урахування опору статора дає змогу зберігати практично незмінним коефіцієнт потужності й абсолютне ковзання, при цьому ККД системи не залежить від швидкості [16-21].

Залежно від видів навантаження закон зміни частоти та напруги матиме різні форми запису. Якщо статичний момент навантаження є величиною постійною ( $M_{ст} = const$ ), то величину напруги, що підводиться до АД, необхідно змінювати пропорційно зміні частоти згідно виразу:

$$U = U_{ном} \cdot \frac{f}{f_{ном}}. \quad (1.11)$$

Для випадку вентиляторного навантаження, тобто,  $M_{ст} = k \cdot \omega^2$  - величину напруги, що підводиться до статорної обмотки, необхідно змінювати пропорційно квадрату зміни частоти змінного струму [16-21]:



Порівняно з АД, у якому швидкість обертання АД регулюється за допомогою ТРН, частотно-регульований АД може розглядатися в якості пристрою, що розв'язує завдання енергозбереження за швидкостей обертання, нижчих від номінальних [16-21].

#### Висновки до розділу

Виконано аналітичний огляд існуючих технічних та технологічних рішень конструкцій насосного обладнання та насосних установок, проаналізовано способи регулювання швидкості обертання головного валу АД.

Порівняно з АД, у якому швидкість обертання головного валу регулюється за допомогою використання ТРН, частотно-регульований АД може розглядатися в якості пристрою, що розв'язує завдання енергозбереження за швидкостей обертання, нижчих від номінальних.

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		21

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАСОСНОЮ СТАНЦІЄЮ

Загально відомо, що ЧП - електронний пристрій для зміни частоти електричного струму (або напруги) [20, 21], виконує функції перетворення параметрів електроенергії мережі живлення до такого рівня значень, який є необхідним для нормальної роботи АД, а також функцію певного дозування електричної енергії, що підводиться до АД для регулювання швидкості обертання.

ЧП складається із випрямляча (або моста постійного струму), що перетворює змінний струм промислової частоти на постійний струм, та інвертора (або перетворювача інколи із вбудованою широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ)), що виконує перетворення постійного струму на змінний струм необхідних амплітуди та частоти. Вихідні тиристори (GTO) або транзистори (IGBT) будуть забезпечувати необхідну силу струму для живлення АД. Для поліпшення форми вихідної напруги між ЧП та АД іноді монтують дросель, а для зниження електромагнітних перешкод – спеціальний ЕМС-фільтр [22-29].

Частотне регулювання АД надасть можливість зміни напрямку обертання головного валу за допомогою інвертування напруги шляхом використання ШІМ. Крім того, дані пристрої забезпечують плавний запуск/гальмування АД.

ЧП, зазвичай, складається із керуючої частини та електричного приводу. Електричний привід ЧП складається зі схем, до складу яких входить транзистор або тиристор, які працюють у режимі електронних ключів. В основі керуючої лежить мікропроцесор, який забезпечує керування силовими електронними ключами, а також для розв'язання великої кількості допоміжних завдань (наприклад, діагностика, контроль, захист) [20, 21].

Залежно від принципу роботи та структури електричного приводу розрізняють два класи ЧП:

- з проміжною ланкою постійної сили струму;

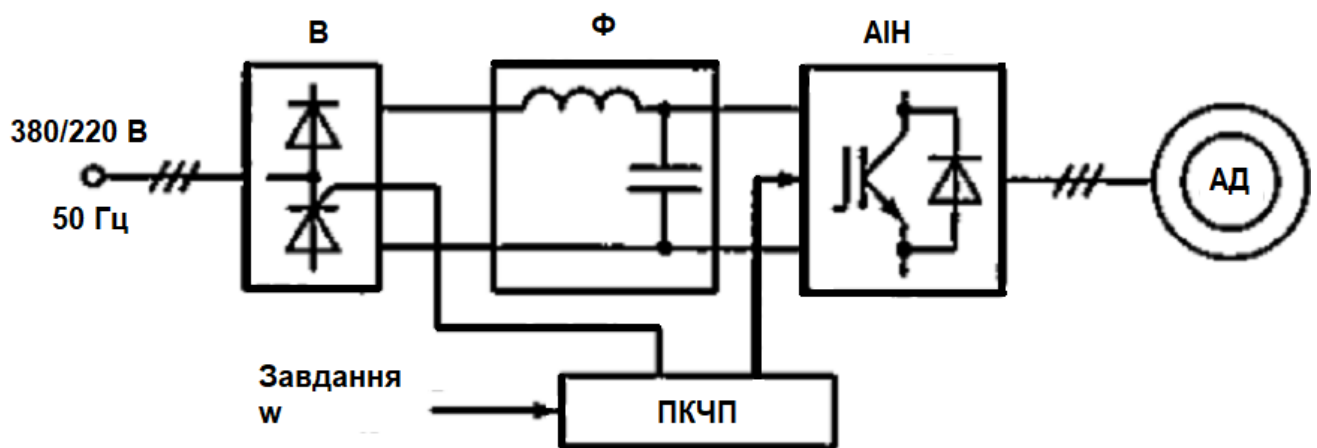
					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		22

- безпосередні ЧП.

Незважаючи на наявні переваги (високий ККД, застосування низькочастотних тиристорів, легкість отримання зворотного напрямку передачі енергії) ЧП мають цілу низку недоліків. Це обмежений діапазон зміни вихідної частоти, складність схеми силових ланцюгів, значне спотворення форми вихідної напруги, підвищена чутливість до якості напруги мережі, низьке значення форми вихідної напруги, низьке значення коефіцієнта потужності [20, 21].

У сучасних ЧРЕ набувають ширшого використання перетворювачі із явно вираженою ланкою постійного струму. В ЧП такого класу використовується подвійне перетворення електричної енергії: вхідна синусоїдальна напруга із постійною частотою та амплітудою зазнає випрямлення у випрямлячі, фільтрується за допомогою використання фільтра, згладжується, а потім знову виконується перетворення за допомогою інвертору у напругу змінних амплітуди та частоти.

Подвійне перетворення енергії призводить до певного погіршення масо-габаритних показників та до зниження ККД відносно ЧП із безпосереднім зв'язком [16-21].



В – випрямляч; Ф – фільтр; АІН - автономний інвертор напруги;

ПКЧП - пристрій керування ЧП

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд схеми ЧРЕ:

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для формування змінної напруги синусоїдальної форми використовують автономний інвертор, який виконує створення електричної напруги заданої форми на обмотках АД.

Як електронні ключі в інверторах ЧП застосовують тиристори GTO або більш вдосконалені модифікації - IGCT, GCT, SGCT, та біполярні транзистори із ізольованим затвором або IGBT [22-29].

ЧП є нелінійним навантаженням, що створює сили струмів вищих гармонік у мережі живлення, що може призвести до погіршення якості електроенергії.

Структурну схему ЧРЕ з його складовими елементами та ЧП представлено на рисунку 2.1 та [МРМА 23.00.00.000 ДО].

## 2.1 Підбір автономного інвертору для ЧП

Автономні інвертори (АІ) - це перетворювачі постійної сили струму на змінну, які працюють на мережу, в якій відсутні інші джерела електроенергії [30].

Як АІ в системах ЧРЕ змінної сили струму знаходять застосування автономні інвертори напруги (АІН) та струму (АІС). АІС, що відповідає за формування при навантаженні кривої вихідної сили струму, зазвичай використовується разом із спеціальним керованим тиристорним випрямлячем, який відповідає за регулювання значення вхідної сили струму інвертора, визначаючи тим самим амплітуду вихідних сил струмів.

Головними перевагами ЧП із АІС є можливість використання звичайних тиристорів та легкість виконання зворотного перетворення енергії. До основних недоліків слід віднести: вихідні напруги і сили струмів не синусоїдальної форми, досить низький коефіцієнт потужності на виході, обмеженість діапазону регулювання допустимих змін параметрів навантаження та вихідної частоти.

Більш широкого використання набули двоступеневі ЧП на основі АІН. На

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



електроприводів різного призначення, у тому числі прецизійних електроприводів із широким та над широким діапазоном регулювання швидкості обертання; високошвидкісних, середньошвидкісних та тихохідних;

- можливість нарощування складності силової частини та системи керування ЧП пропорційно рівню зростання вимог до електроприводу без великої надмірності всієї системи;

- можливість реалізації в порівняно малоелементній структурі ЧП різноманітних алгоритмів керування, що, в свою чергу, будуть відповідати вимогам, що висуваються до електроприводів різного призначення;

Основні недоліки використання дволанкових ЧП із ланкою постійної сили струму:

- дворазове перетворення енергії, що збільшує величину втрати енергії та погіршує масо-габаритні характеристики ЧП;

- наявність у ланці постійної сили струму силового фільтра, що містить батарею конденсаторів досить значної ємності (у схемах із використанням АІН) або реактор зі досить значною індуктивністю (у схемах із використанням АІС). Призводить до погіршення масо-габаритних характеристик, а використання електролітичних конденсаторів - до зниження надійності роботи [30].

## 2.2 Частотний перетворювач із АІН та керованим випрямлячем

АІН виконує перетворення напруги постійного струму, що подається на його вхід, у пропорційну за величиною напругу змінного струму. Найбільш широкого використання в конструкціях електроприводів змінного струму набула трифазна мостова схема заснована на повністю керованих вентилях (транзисторах або замикаємих тиристорах), представлена на рисунку 2.2 та [МРМА 23.00.00.000 ДО].

Така схема містить LC-фільтр, призначений для згладжування випрямленої напруги  $U_d$  та спеціальний трифазний мостовий інвертор. В гальмівному



до основних ключів зустрічно-паралельних діодів, що будуть відповідати за захист силових ключів та повернення надлишкової магнітної енергії в конденсатор  $C_d$  фільтра. Оскільки вхідний випрямляч не пропускає силу струму у зворотному напрямку, для АД із високою інтенсивністю режимів гальмування передбачено використання спеціальної схеми для розсіювання надлишкової електричної енергії.

Конденсатор  $C_d$  на вході забезпечує постійне споживання енергії, що надходить від джерела живлення навіть за замкненого стану ключів та виконує захист напівпровідникових елементів від виникнення перенапруги на з'єднувальних проводах між джерелом живлення та встановленим блоком вентилів. Тому конденсатор повинен бути встановлений якомога ближче до блоку вентилів [30].

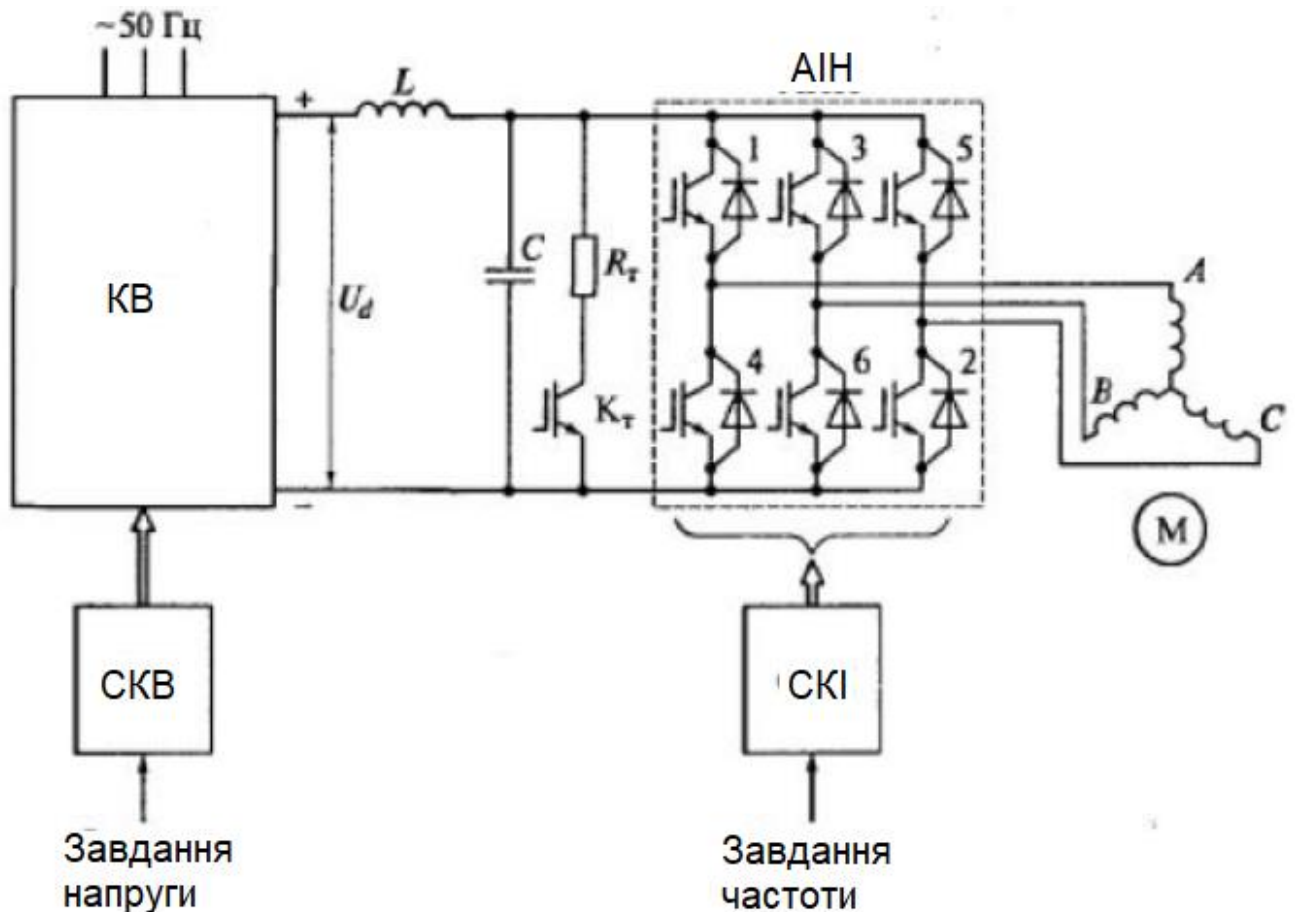


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд структури ЧП із ланкою постійної сили струму та керованим випрямлячем [30]





$$U_{ab}(v) = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot U_d \cdot \left( \sin v' - \frac{1}{5} \sin 5v' - \frac{1}{7} \sin 7v' + \frac{1}{11} \sin 11v' \dots \right); \quad (2.1)$$

$$v = \omega_{0en} \cdot t; v' = \omega_{0en} \cdot t + \frac{\pi}{6}.$$

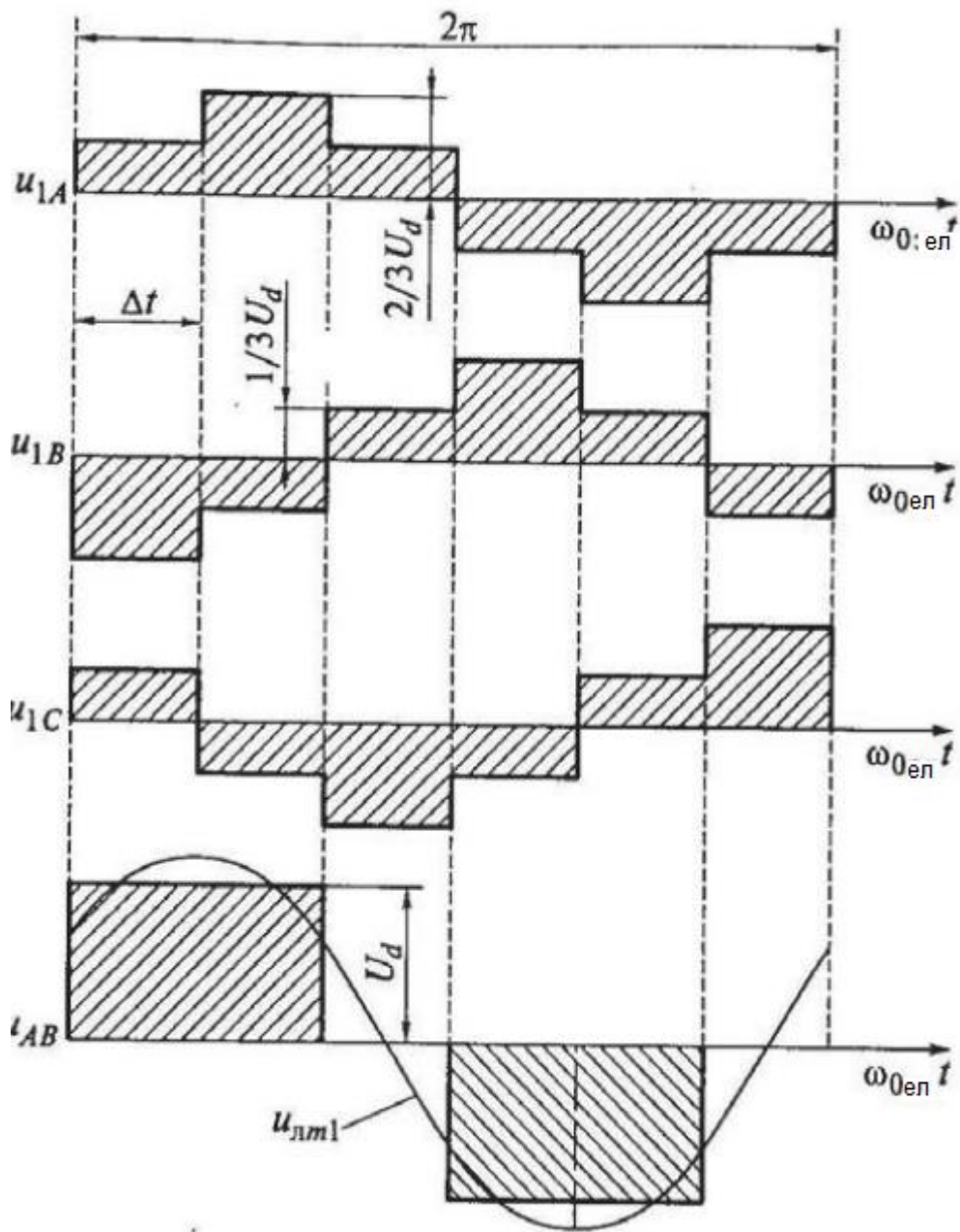


Рисунок 2.5 – Загальний вигляд форми напруги на виході інвертора

Тоді перша гармоніка лінійної напруги матиме вигляд (див. рис. 2.5):

$$u = f_{\omega_1}(\omega_{0en} \cdot t).$$

та матиме амплітуду, рівну [30]:

$$U_{\text{лм1}} = 1,1 \cdot U_d.$$

Звідки, амплітуда першої гармоніки фазової напруги матиме вигляд:

$$U_{\text{фм1}} = 0,637 \cdot U_d.$$

Якби АІ живився від джерела постійної напруги (тобто випрямляча), що володіє двосторонньою провідністю, то при зниженні частоти на виході перетворювача або при збільшенні швидкості обертання АД до значення, вищого за швидкість обертання ідеального ХХ в результаті дії активного моменту на головному валу, АД автоматично переходив би в режим рекуперативного гальмування [30].

Якщо ж випрямляч виконується як неререверсивний, то він не буде пропускати потік потужності від АД в мережу. Тому для забезпечення режиму гальмування в схемі передбачено застосування спеціального гальмівного резистору  $R_T$  (див. рис. 2.3) та [МРМА 23.00.00.000 ДО].

У разі виникнення умов для переходу в режим гальмування АД електронний ключ  $K_T$  буде замкнено та енергія гальмування буде розсіяна на спеціальному гальмівному резисторі.

Не синусоїдальна форма вихідної напруги призводить до несинусоїдального характеру сили струму в статорних обмотках та певної пульсації крутного моменту електродвигуна. Такі пульсації особливо сильно проявляються за зниженої частоти обертання головного валу та низького моменту інерції механізму, які будуть впливати на нерівномірність обертання АД та виникнення, навіть, подоби крокового режиму, коли АД буде виконувати обертання із зупинками.

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



швидкості (обмеження щодо діапазону регулювання швидкості із боку способу формування рівня напруги порівняно малі);

- істотно підвищився коефіцієнт потужності ЧП як споживача електроенергії [20, 21].

Проте присутня низка негативних ефектів, пов'язаних із підвищенням частоти за допомогою ШІМ, а саме наявність електромагнітних перешкод, що будуть мати вплив на інші радіотехнічні та електротехнічні пристрої, а також виникнення перенапруги у ланцюзі навантаження, що, в свою чергу, небезпечно для ізоляції обмоток АД. Засоби боротьби з такими явищами полягають у використанні АД із підвищеною якістю ізоляції, тобто у використанні спеціальних фільтрів та екранованих кабелів, в обмеженні загальної довжини комунікацій, а також у роздільному прокладанні кабелів системи керування та силових.

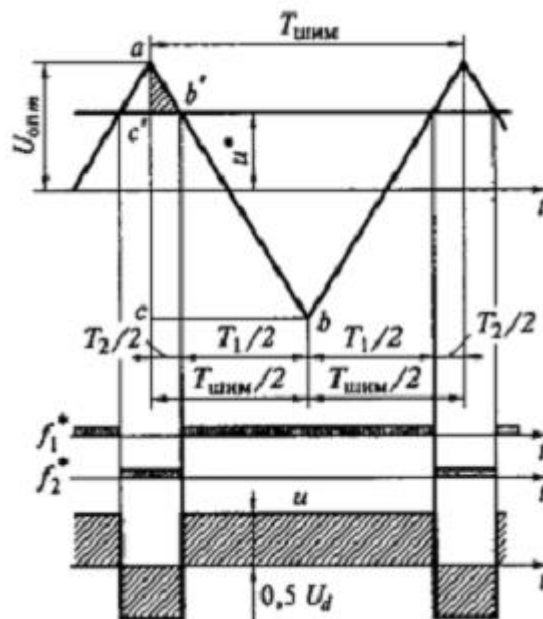


Рисунок 2.6 – Графічна залежність характеристики передаточного коефіцієнта інвертора (напруги задаюча та опорна)

Схема трифазного мостового інвертора (рис. 2.7) складається із 3-х плечей з транзисторними ключами. До середніх точок кожного із плечей, між середньою точкою джерела живлення та точкою з'єднання електронних ключів, підключено

початок фазної статорної обмотки АД (або так зване, активно-індуктивне навантаження), якщо статорні обмотки підключені в зірку, як представлено на рисунку 2.7 та [МРМА 23.00.00.000 ДО].

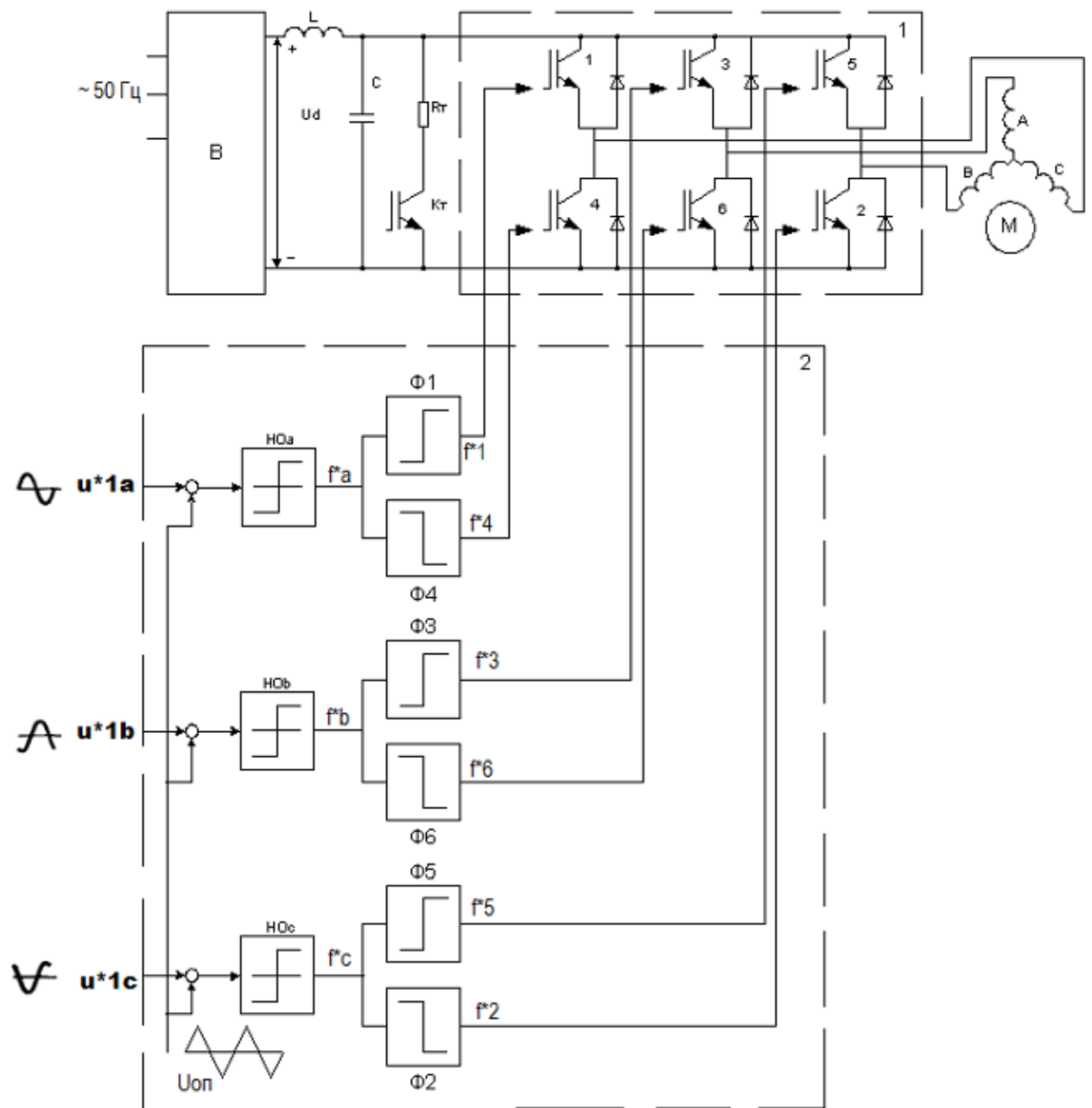


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд ЧП з трифазним інвертором та ШІМ:

1 - АІН, 2 - система керування АІН

Схема містить шість ключів (рис. 2.7), кожен з яких містить у собі спеціальний IGBT-транзистор, що працює в ключовому режимі та діод зворотної

сили струму [22-29]. Система керування транзисторними ключами складається із нуля-орган (НО) та формувача  $\Phi$ . На вході НО виконується порівняння задаючого сигнал  $U^*$  та рівня пилкоподібної опорної напруги  $U_{оп}$ . Якщо виконується нерівність  $U^* > U_{оп}$ , тобто різниця  $U^* - U_{оп} > 0$ , то за допомогою НО та  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  створюються сигнали, що відкривають транзистори верхньої групи (а саме 1, 3, 5) - на навантаженні формується рівень позитивної напруги  $0,5U_d$ . У випадку якщо різниця негативна  $U^* - U_{оп} < 0$  то відбудеться замикання ключів нижньої групи (а саме 2, 4, 6), і рівень напруги на навантаженні стає від'ємним та рівним  $-0,5U_d$  (рис. 2.6).

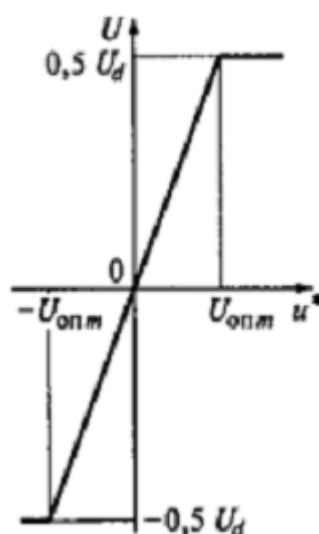


Рисунок 2.8 – Графічна залежність регульовальної характеристики інвертора

На рисунку 2.8, а представлено рівень симетричної пилкоподібної опорної напруги із максимальним значенням  $U_{опm}$  та рівень задаючої напруги  $U^*$ , яка розглядається як постійна протягом усього періоду  $T_{ШИМ}$  рівня опорної напруги. Також представлені стани сигналів  $f_1^*, f_2^*$  та форма напруги на виході інвертора  $U$ . Середнє значення напруги на виході інвертора будемо визначати з наступної формули [22-29]:

$$U = 0,5 \cdot U_d \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot T_2}{T_{ШИМ}}\right); \quad (2.2)$$

$$T_{ШИМ} = T_1 + T_2 = f_{ШИМ}^{-1},$$

де  $T_1, T_2$  - інтервали замкнутого стану ключів, відповідно 1 та 2;  $T_{ШИМ}$  - період ШІМ;  $f_{ШИМ}$  - частота ШІМ.

З подібності трикутників (рис. 2.6) і для робочої частини характеристики інвертора, коли  $|u^*| < U_{onm}$  можливо виконати наступний запис:

$$\frac{T_2}{T_{ШИМ}} = \frac{U_{onm} - u^*}{2 \cdot U_{onm}}. \quad (2.3)$$

Тоді із виразів 2.2 та 2.3 можливо отримати:

$$U = \frac{0,5 \cdot U_d}{U_{onm}} \cdot u^* = k_i \cdot u^*, \quad (2.4)$$

де  $k_i$  - передаточний коефіцієнт інвертору в лінійній його частині характеристики, коли  $|u^*| < U_{onm}$ .

З регулювальної характеристики інвертора  $U = f(u^*)$  (рис. 2.8), очевидно, що має бути передбачено обмеження на рівні  $0,5 \cdot U_d$ , оскільки для отримання неспотвореного рівня напруги на виході, рівень задаючої напруги не повинен бути більшим за максимальний рівень опорної напруги  $U_{onm}$ .

У СКІ повинна бути передбачена короткочасна затримка між замиканням одного ключа та розмиканням іншого для відновлення замикаючих властивостей транзистора, що виходить із роботи.

Якщо сигнал керування має синусоїдальну форму із частотою  $\omega_{0el}$ , то

рівень напруги на виході інвертора, що розглядається за період  $t \geq 2\pi/\omega_{0ел}$ , буде представляти собою гармонійну криву, яка поруч із першою гармонікою, що має частоту сигналу керування, містить цілу низку гармонійних складових більш високого порядку. Таким чином, якщо амплітуда напруги  $U^*$  не перевищує значення рівня напруги  $U_{opt}$ , то перша гармоніка рівня напруги на виході інвертора в певному масштабі буде повторювати сигнал керування. Зміна рівня частоти сигналу керування призводить до зміни рівня всієї частоти на виході інвертора. Зміна величини амплітуди керуючого сигналу за незмінного рівня частоти призводитиме до зміни співвідношення тривалості негативних та позитивних імпульсів величини напруги на виході, тобто зміни величини амплітуди першої гармоніки, представлено на рисунку 2.9.

За високої величини частоти ШІМ та активно-індуктивного навантаження сила струм виявляється практично синусоїдальної форми [22-29].

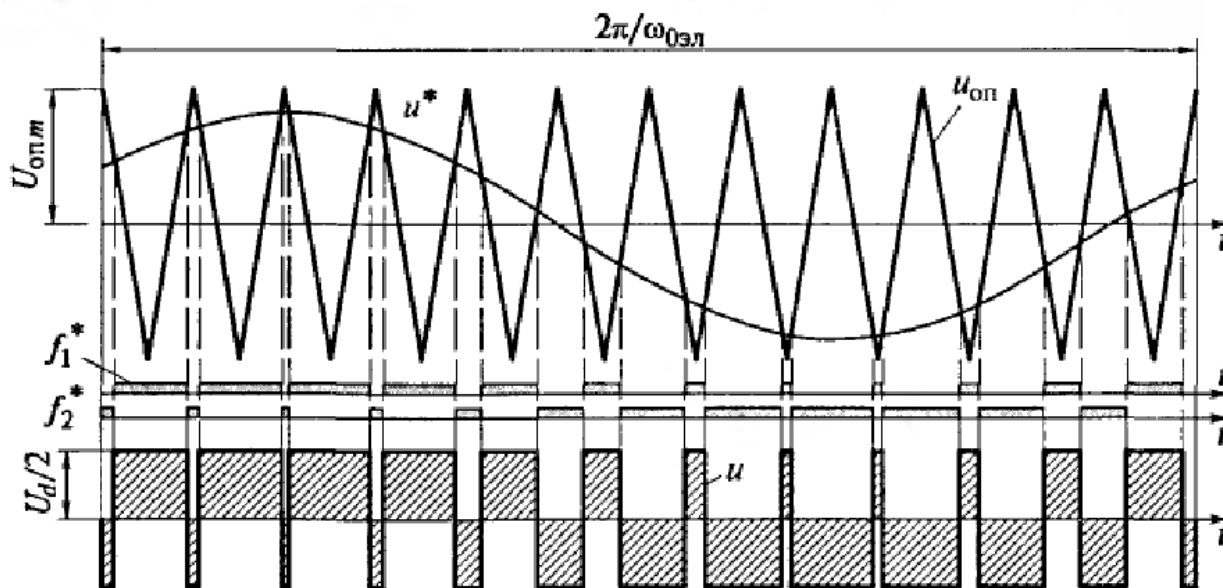


Рисунок 2.9 – Графічна залежність принципу дії ШІМ на прикладі однофазного інвертора

Схема трифазного мостового інвертора містить у своєму складі спільне джерело опорної напруги пилко подібної форми  $u_{on}$ , для всіх трьох фаз. Сигнали керування  $u_{1A}^*, u_{1B}^*, u_{1C}^*$ , представляють трифазну систему напруг синусоїдальної

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

форми, з кутом зсуву фаз -  $120^\circ$ . Зміна величини частоти напруги на виході інвертора досягається зміною частоти сигналів керування, а зміна величини амплітуди - зміною величини амплітуди.

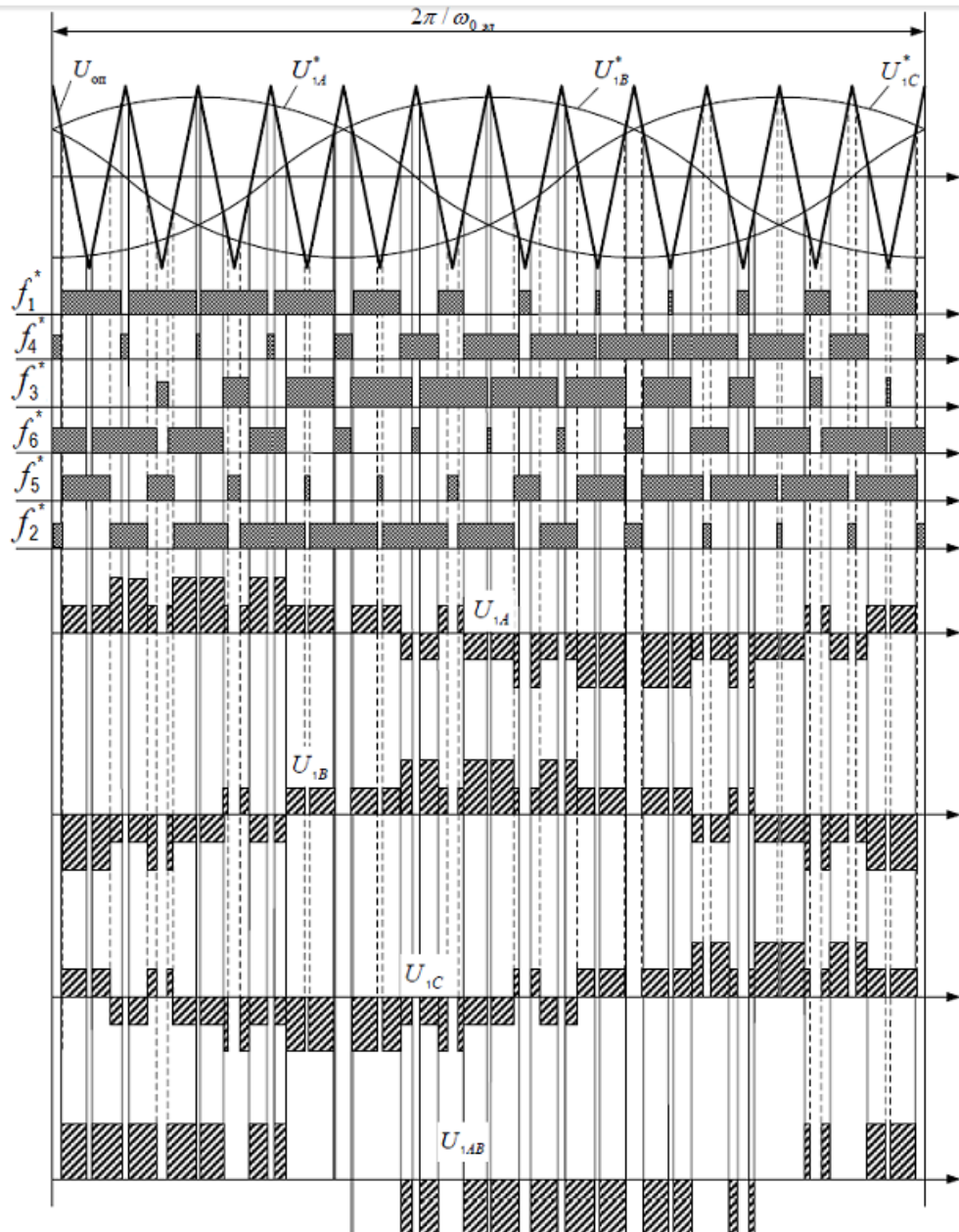


Рисунок 2.10 – Графічні залежності формування рівня напруги на виході трифазного інвертора

На рисунку 2.10 представлено, графічні залежності величини трифазної напруги на фазах навантаження, підключених зіркою. На графічних залежностях 2.10 та [МРМА 23.00.00.000 ДО] заштрихованими горизонтальними лініями

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

позначено стани сигналів керування  $f_1^* - f_6^*$ , а отже, і замкнуті стани ключів 1-6. Величини фазних напруг на виході можуть приймати чотири різних стани:  $+2/3 \cdot U_d, +1/3 \cdot U_d, -1/3 \cdot U_d, -2/3 \cdot U_d$ . На крайньому лівому проміжку часу будуть замкнуті ключі 2, 4 та 6, чому буде відповідати рівність нулю величини напруги на виході:  $u_{1A} = u_{1B} = u_{1C} = 0$  [22-29].

На наступному за ним проміжку часу будуть замкнені ключі 1, 6 та 5. При цьому  $u_{1A} = u_{1C} = 1/3 \cdot U_d, u_{1B} = -2/3 \cdot U_d$ . Величина лінійної напруги між фазами буде визначатись як різниця напруг  $u_{1AB} = u_{1A} - u_{1B}$ .

Алгоритм роботи запропонованої схеми виключає можливість одночасного замикання обох ключів, розташованих в одному плечі моста.

У разі рівності величини амплітуди задаючого сигналу  $u^*$  максимальному значенню опорної напруги  $U_{omn}$  величина амплітуди першої гармоніки напруги на виході інвертора буде рівною  $0,5 \cdot U_d$ .

Запропонована схема інвертора з явно опорною напругою пилкоподібної форми може бути реалізована як в аналоговій формі інвертором та ШІМ, так і в цифровій - із використанням мікропроцесорної техніки. Крім того, розроблено та запропоновано алгоритми векторної ШІМ, спеціально орієнтовані саме на мікропроцесорну реалізацію [30].

### Висновки до розділу

В результаті вибору ЧП для АД було обрано АІН із ШІМ, оскільки при використанні інших типів ЧП спостерігаються нижчі значення ККД та коефіцієнта потужності, а також не зовсім синусоїдальний характер сили струму в статорних обмотках.

Оскільки в такому випадку діапазон регулювання частоти не дуже широкий - від 37,5 Гц до 50 Гц, отже можна буде застосовувати звичайний АІ з ШІМ-модуляцією.

### 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ

Виконаємо розрахунок необхідних параметрів та величин, щоб довести ефективність використання ЧРЕ у системах міського водопостачання.

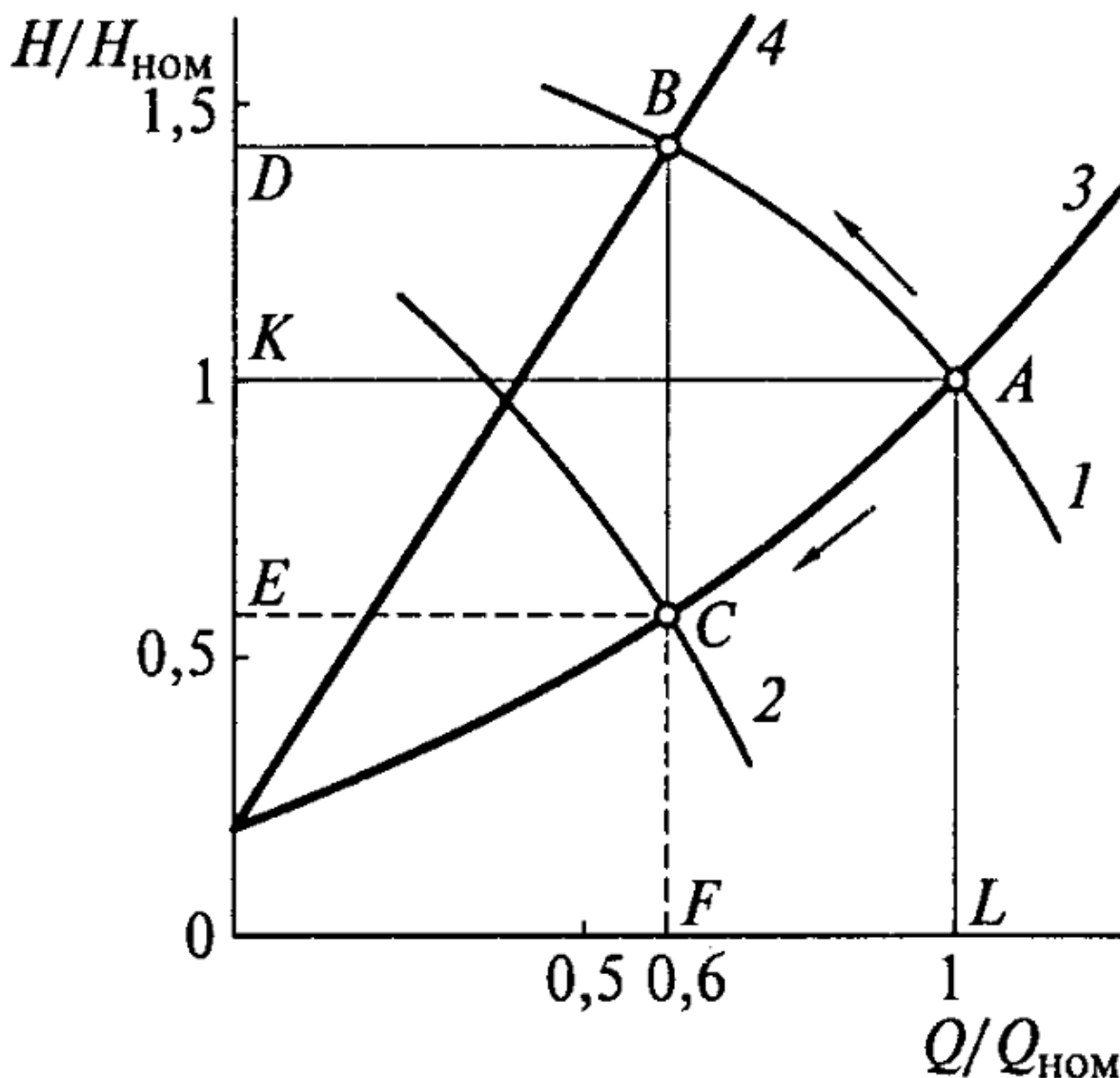


Рисунок 3.1 – Графічні залежності характеристики продуктивності ВНС при дросельному та частотному керуванні

На рисунку 3.1 представлено графічні залежності характеристики продуктивності ВНС за дросельного та частотного керування. Крива 1

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

характеризує роботу нерегульованого електроприводу на номінальній величині частоти обертання, крива 3 в свою чергу, характеризує роботу трубопроводу при повністю відкритій заслінці. Значення величини витрати та величини напору речовини представлено на рисунку 3.1 у відносних одиницях у разі використання в якості базових величин номінальної величини витрати  $Q_{ном}$  та номінальної величини напору  $H_{ном}$ . За номінальної величини витрати та величини напору ВНС працює в точці А (рис. 3.1), а потужність, споживана ВНС, пропорційна площі прямокутника  $OKAL$  [8-11].

Зі зменшенням величини витрати при використанні нерегульованого електроприводу ( $0,6 \cdot H_{ном}$ ) за рахунок дросельного регулювання відбувається зміна опору магістралі (крива 4, рис. 3.1), ВНС буде працювати в точці В кривої 1, що призводить до зростання величини напору, який переважає номінальний, а потужність ВНС, пропорційна площі прямокутника  $ODBF$ , несуттєво відрізняється від потужності, яка споживається при номінальній величині витрати, значить, і енергоспоживання при зменшеній величині витрати не змінюється.

При дросельному регулюванні величини витрати (або величини подачі) речовини зростає величина напору (або рівень тиску) у мережі, але рівень енергоспоживання не знижується.

Енергозбереження під час регулювання швидкості обертання електропривода порівняно із порівняно з дросельним методом регулюванням так само представлено на рисунку 3.1. За рахунок зменшення швидкості ВНС, робота відбувається під час зниження величини витрати у точці С на кривій 2 (рис. 3.1) за незмінної характеристики самого трубопроводу.

Потужність, споживана електроприводом у даному випадку, пропорційна площі прямокутника  $OECF$ , що наочно ілюструє зниження рівня енергоспоживання при використанні регульованих електроприводів ВНС [8-11].

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

### 3.1 Розрахунок та побудова характеристик ВНС та трубопроводу

Усталений режим роботи НУ за постійної швидкості обертання приводного АД визначається точкою перетину характеристики ВНС, що відповідає величині частоти, і характеристики трубопроводу, під'єданого до ВНС [8-11]. Однією з основних характеристик ВНС є залежність величини напору  $H$  від величини витрати  $Q$ , і має наступний вигляд:

$$H = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q, \quad (3.1)$$

де  $H_{0н}$  - величина напору ВНС при наступних параметрах -  $Q = 0, \omega = \omega_{ном}$ ;  $\omega_{ном}$  - величина номінальної швидкості обертання АД;  $C$  - конструктивний коефіцієнт ВНС, розраховується із формули  $C = (H_{0н} - H_{ном}) / Q_{ном}^2$ ;  $Q_{ном}, H_{ном}$  - відповідно величини номінальних витрати та напору.

Частоту обертання визначимо із наступної формули [13, 14]:

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n}{30}. \quad (3.2)$$

Підставимо табличні значення параметрів та виконаємо необхідний розрахунок:  $H_{0н} = 70\text{м}; H_{ном} = 65\text{м}; Q_{ном} = 1250\text{м}^3/\text{год}; n_{ном} = 1450\text{хв}^{-1}$ .

Використавши формулу 3.2, виконаємо обрахунок частот обертання:

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1450}{30} = 151,78\text{с}^{-1};$$

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{3,14 \cdot 110}{30} = 115,13\text{с}^{-1};$$

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30} = \frac{3,14 \cdot 1200}{30} = 125,6 \text{ c}^{-1};$$

$$\omega_3 = \frac{\pi \cdot n_3}{30} = \frac{3,14 \cdot 1300}{30} = 136,1 \text{ c}^{-1};$$

$$C = \frac{(70 - 65)}{\left(\frac{1250}{3600}\right)^2} = 41,7.$$

Мінімальна відносна величина частоти напруги живлення статора, за якої ВНС починає долати дію протитиску, визначається з формули [8-11]:

$$a_{\min} = \sqrt{h_c} \rightarrow h_c = \frac{H_c}{H_0}, \quad (3.3)$$

де  $H_0$  - величина напору ВНС, за якого величина витрати  $Q=0$ ;  $H_c$  - величина статичного напору (або відстань по вертикалі між віссю робочого колеса ВНС та самою верхньою точкою трубопроводу напору).

У даному випадку приймаємо величини напору -  $H_c = 39,05 \text{ м}$ ;  $H_0 = 70 \text{ м}$ .

Визначаємо мінімальну відносну величину частоти напруги живлення статора:

$$a_{\min} = \sqrt{\frac{39,05}{70}} = \sqrt{0,56} \approx 0,75.$$

Отже, мінімальна величина частоти напруги АД буде рівною [13, 14]:

$$f_{\min} = 0,75 \cdot 50 = 37,5 \text{ Гц};$$

$$n_{\min} = \frac{60 \cdot 37,5}{2} = 1125 \text{ хв}^{-1}.$$

Тепер визначимо мінімальну величину частоти обертання ротора АД:

$$n_{1\min} = n_{\min} \cdot (1 - s) = 1100 \text{ хв}^{-1}.$$

Для виконання необхідних розрахунків було прийнято декілька значень частоти обертання ротора АД і величини витрати речовини, яка визначається згідно із формулою (3.4):

$$n_1 = 1100 \text{ хв}^{-1}; n_2 = 1200 \text{ хв}^{-1}; n_3 = 1300 \text{ хв}^{-1};$$

$$Q = Q_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{n}{n_{\text{ном}}}\right)^2 - \left(\frac{H_c}{H_0}\right)}{1 - \left(\frac{H_c}{H_0}\right)}}; \quad (3.4)$$

$$Q_1 = 237,5 \text{ м}^3/\text{год}; Q_2 = 665 \text{ м}^3/\text{год}; Q_3 = 930 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Визначимо значення величини напору  $H$  при обраних значеннях величин частоти обертання робочого колеса із формули (3.1) [8-11]:

- частота обертання номінальна -  $\omega_{\text{ном}} = 151,78 \text{ с}^{-1}$ :

$$H(\omega_{\text{ном}}, Q_{\text{ном}}) = H_{0н} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}}\right)^2 - C \cdot Q_{\text{ном}}^2 = 70 \cdot \left(\frac{151,78}{151,78}\right)^2 - 41,68 \cdot \left(\frac{1250}{3600}\right)^2 = 65 \text{ м};$$

$$H(\omega_{\text{ном}}, Q_1) = H_{0н} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}}\right)^2 - C \cdot Q_1^2 = 70 \cdot \left(\frac{151,78}{151,78}\right)^2 - 41,68 \cdot \left(\frac{237,5}{3600}\right)^2 = 69,82 \text{ м};$$

$$H(\omega_{ном}, Q_2) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_{ном}}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_2^2 = 70 \cdot \left( \frac{151,78}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{665}{3600} \right)^2 = 68,6 м;$$

$$H(\omega_{ном}, Q_3) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_{ном}}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_3^2 = 70 \cdot \left( \frac{151,78}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{930}{3600} \right)^2 = 67,2 м.$$

- частота обертання робочого колеса -  $\omega_1 = 115,13 c^{-1}$ :

$$H(\omega_1, Q_{ном}) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_1}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_{ном}^2 = 70 \cdot \left( \frac{115,13}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{1250}{3600} \right)^2 = 35,4 м;$$

$$H(\omega_1, Q_1) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_1}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_1^2 = 70 \cdot \left( \frac{115,13}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{237,5}{3600} \right)^2 = 40,2 м;$$

$$H(\omega_1, Q_2) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_1}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_2^2 = 70 \cdot \left( \frac{115,13}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{665}{3600} \right)^2 = 38,9 м;$$

$$H(\omega_1, Q_3) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_1}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_3^2 = 70 \cdot \left( \frac{115,13}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{930}{3600} \right)^2 = 37,6 м.$$

- частота обертання робочого колеса -  $\omega_2 = 125,6 c^{-1}$ :

$$H(\omega_2, Q_{ном}) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_2}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_{ном}^2 = 70 \cdot \left( \frac{125,6}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{1250}{3600} \right)^2 = 42,9 м;$$

$$H(\omega_2, Q_1) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_2}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_1^2 = 70 \cdot \left( \frac{125,6}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{237,5}{3600} \right)^2 = 47,77 м;$$

$$H(\omega_2, Q_2) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_2}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_2^2 = 70 \cdot \left( \frac{125,6}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{665}{3600} \right)^2 = 46,5 м;$$

$$H(\omega_2, Q_3) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_2}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_3^2 = 70 \cdot \left( \frac{125,6}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{930}{3600} \right)^2 = 45,14 м.$$

- частота обертання робочого колеса -  $\omega_3 = 136,1 c^{-1}$ :

$$H(\omega_3, Q_{ном}) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_3}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_{ном}^2 = 70 \cdot \left( \frac{136,1}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{1250}{3600} \right)^2 = 51,3 м;$$

$$H(\omega_3, Q_1) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_3}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_1^2 = 70 \cdot \left( \frac{136,1}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{237,5}{3600} \right)^2 = 56,11 м;$$

$$H(\omega_3, Q_2) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_3}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_2^2 = 70 \cdot \left( \frac{136,1}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{665}{3600} \right)^2 = 54,9 м;$$

$$H(\omega_3, Q_3) = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega_3}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q_3^2 = 70 \cdot \left( \frac{136,1}{151,78} \right)^2 - 41,68 \cdot \left( \frac{930}{3600} \right)^2 = 53,5 м.$$

Характеристика трубопроводу будуть визначатись із наступного виразу [8-11]:

$$H = H_c + R \cdot Q^2, \quad (3.5)$$

де  $H_c$  - величина статичного напору (або протитиск), що відповідає величині витрати -  $Q = 0$  (або закритій засувці);  $R$  - коефіцієнт опору трубопроводу, визначається як  $R = (H_{ном} - H_c) / Q_{ном}^2$ .

Для розглянутої НС -  $H_c = 39,05 м$ .

Виконаємо розрахунок коефіцієнту опору [8-11]:

$$R = \frac{65 - 39,05}{\left(\frac{1250}{3600}\right)^2} = 216,25.$$

З виразу (3.5) отримуємо наступні значення:

$$H(Q_{ном}) = H_c + R \cdot Q_{ном}^2 = 39,05 + 216,25 \cdot \left(\frac{1250}{3600}\right)^2 = 65 м;$$

$$H(Q_1) = H_c + R \cdot Q_1^2 = 39,05 + 216,25 \cdot \left(\frac{237,5}{3600}\right)^2 = 40 м;$$

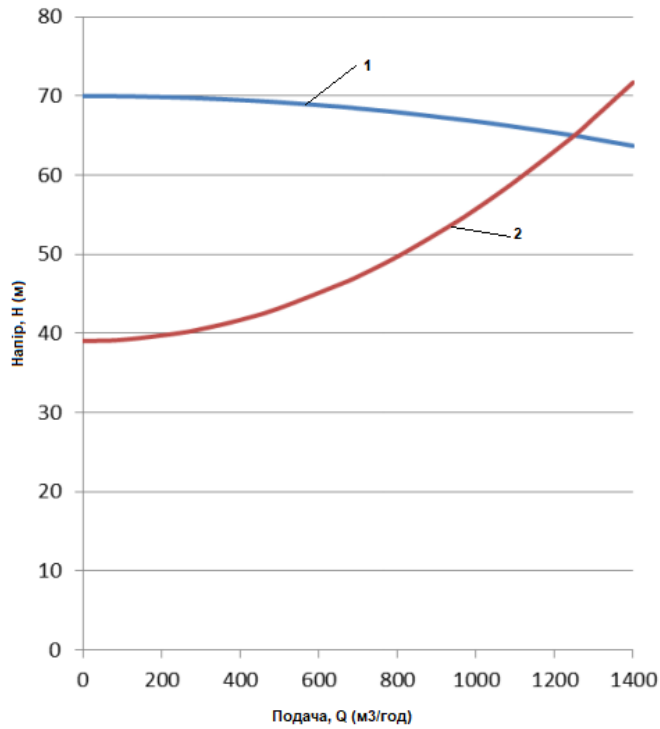
$$H(Q_2) = H_c + R \cdot Q_2^2 = 39,05 + 216,25 \cdot \left(\frac{665}{3600}\right)^2 = 46,43 м;$$

$$H(Q_3) = H_c + R \cdot Q_3^2 = 39,05 + 216,25 \cdot \left(\frac{930}{3600}\right)^2 = 53,5 м.$$

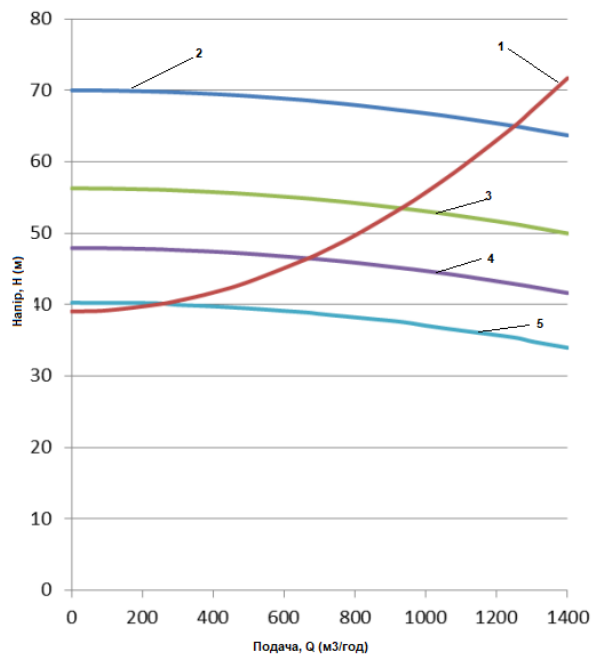
Далі виконаємо побудову напірних характеристик ВНс на підставі проведених розрахунків (рис. 3.2 та 3.3) та [МРМА 23.01.00.000 РР].

Регулювання подачі за допомогою дросельної заслінки ґрунтується на зміні опору трубопроводу. У даному випадку згідно із  $\omega = \omega_{ном} = const$  робоча точка механізму рухається вздовж  $Q - H$ -характеристики, що відповідає номінальній швидкості обертання АД, у бік зниження величини подачі до точки перетину із новою характеристикою трубопроводу (точки 1, 2, 3 на рис. 3.4) [8-11].

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		48



1 – напірна характеристика ВНС; 2 – характеристика трубопроводу  
 Рисунок 3.2 – Графічні залежності характеристик ВНС та трубопроводу для номінального значення частоти обертання:



1 – характеристика трубопроводу; 2 – номінальна частота обертання; 3 – частота обертання  $136,1\text{c}^{-1}$ ; 4 – частота обертання  $125,6\text{c}^{-1}$ ; 5 – частота обертання  $115,13\text{c}^{-1}$   
 Рисунок 3.3 - Графічні залежності характеристик ВНС та трубопроводу для перемінного значення частоти обертання:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

У разі використання способу регулювання величини подачі шляхом зміни частоти обертання робочого колеса, робоча точка буде рухатись вздовж незмінної характеристики трубопроводу (точки 4, 5, 6 та 7 на рис. 3.4). При цьому зі зменшенням величини подачі зменшується і величина необхідного напору, що призводить до зниження величини статичної потужності, необхідної для роботи ВНС із заданою величиною витрати речовини, порівняно з способом дросельного регулювання [8-11].

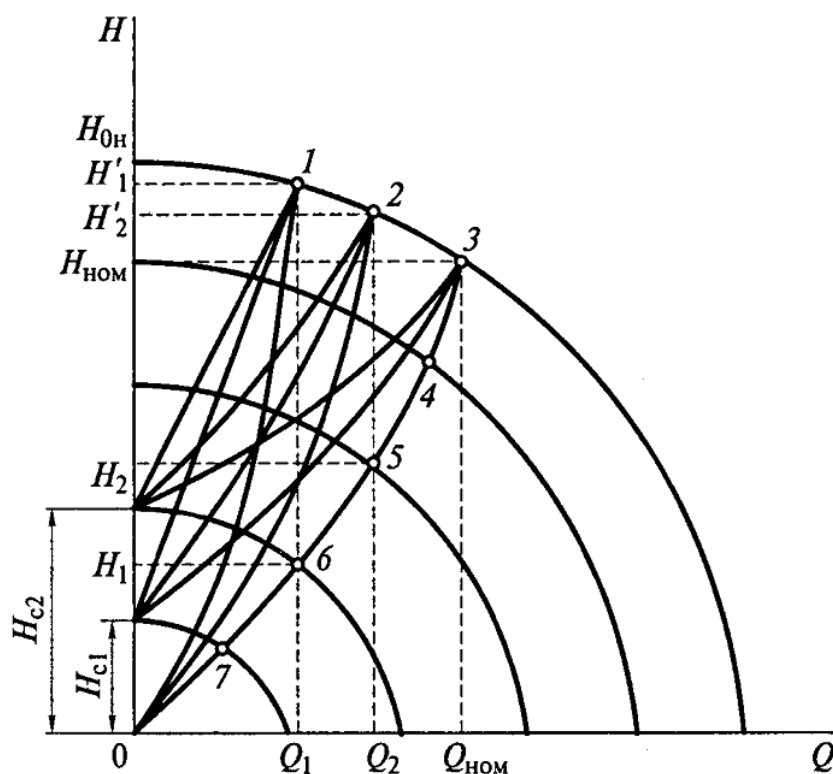
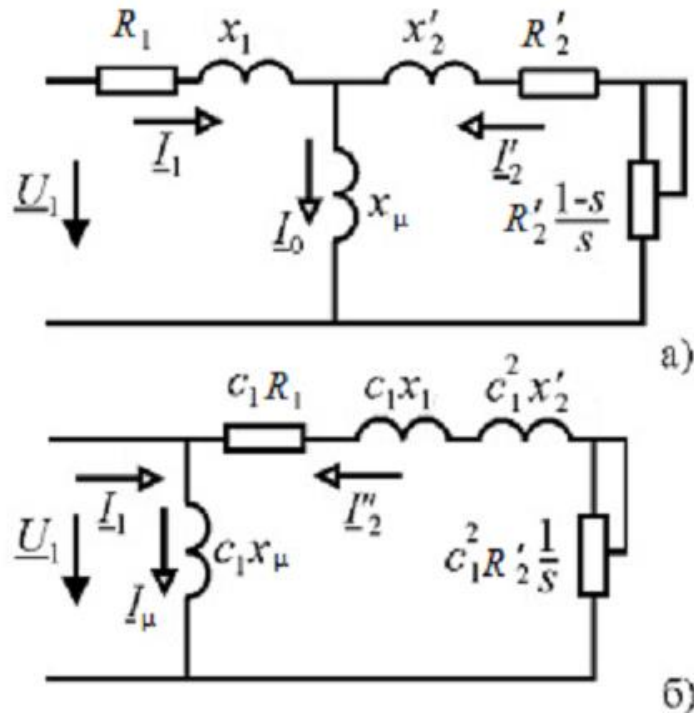


Рисунок 3.4 – Графічні залежності характеристики способів регулювання ВНС при використанні обох способів регулювання:

1, 2, 3 - робочі точки при дросельному регулюванні величини подачі; 4, 5, 6, 7 - робочі точки при регулюванні величини подачі за рахунок зміни частоти обертання АД

### 3.2 Визначення параметрів схеми заміщення АД

Для визначення ККД та коефіцієнта потужності АД необхідно виконати розрахунки та уточнити параметри схеми заміщення (рис. 3.5).



а) - Т-подібна схема заміщення АД; б) - Г-подібна схема заміщення АД

Рисунок 3.5 - Схеми заміщення АД:

Виконаємо необхідні розрахунки:

Розрахуємо швидкість обертання магнітного поля (або синхронну швидкість обертання АД) [13, 14, 18]:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об} \cdot \text{хв}^{-1}. \quad (3.6)$$

Визначимо величину номінального проковзування:

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0,02, \quad (3.7)$$

де  $n_1$  - швидкість обертання магнітного поля АД;  $n_2$  - частота обертання головного валу АД.

Тоді величина номінальної кутової швидкості обертання ротору:

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1470}{30} = 153,9 c^{-1}.$$

Визначимо кутову швидкість обертання магнітного поля АД:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 c^{-1}.$$

Розрахуємо величини номінального, максимального та пускового моментів:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{25 \cdot 10^4}{153,9} = 1624,8 H \cdot m;$$

$$M_{max} = m_{max} \cdot M_{ном} = 2,3 \cdot 1624,8 = 3875,16 H \cdot m;$$

$$M_{пуск} = m_{пуск} \cdot M_{ном} = 2,0 \cdot 1624,8 = 3249,7 H \cdot m,$$

де  $m_{пуск}$  - кратність пускового моменту АД;  $m_{max}$  - - кратність максимального моменту АД.

Тоді величина потужності, що споживається НУ з мережі буде рівною:

$$P_1 = \frac{P_{мех}}{\eta_1}, \quad (3.8)$$

де  $P_{мех}$  - величина потужності на головному валу АД насоса, приймаємо  $P_{мех} = M_c \cdot \omega$ ;  $M_c$  - статичний момент навантаження на головному валу АД;  $\eta_1$  - ККД АД.

Знайдемо потужність на головному валу АД із виразу (3.8):

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\text{мех}} = P_1 \cdot \eta_1 = 25 \cdot 10^4 \cdot 0,945 = 236,25 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Тоді активний опір статора можна розрахувати за рівнем потужності, що розсіюється на активному опорі  $P_s = m_1 \cdot I_{\text{ном}}^2 \cdot R_1$ , як різниці споживаної активної потужності  $P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi$  та електромагнітної потужності в номінальному режимі роботи  $P_{\text{ем}} = \frac{M_{\text{ном}} \cdot \omega_1}{p}$  з наступної формули, де активний опір статора визначається як [13, 14, 18]:

$$R_1 = \frac{U_1 \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi - \frac{M_{\text{ном}} \cdot \omega_1}{m_1 \cdot p}}{I_{\text{ном}}^2}, \quad (3.9)$$

де  $U_1$  - величина фазної напруги,  $U_1 = 220 \text{ В}$ ;  $m_1$  - число фаз,  $m_1 = 3$ ;  $\omega_1$  - кутова частота мережі живлення,  $\omega_1 = 314 \text{ с}^{-1}$ ;  $p$  - число пар полюсів магнітного поля АД,  $p = 2$ .

$$R_1 = \frac{220 \cdot 437 \cdot 0,92 - \frac{1624,85 \cdot 314}{3 \cdot 2}}{437^2} = 0,030 \text{ Ом.}$$

Тоді приведенний активний опір ротору дорівнюватиме:

$$R_2' = \frac{M_{\text{ном}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s_{\text{ном}}}{I_1^2 \cdot p \cdot m_1}; \quad (3.10)$$

$$R_2' = \frac{1624,85 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50_1 \cdot 0,02}{437^2 \cdot 2 \cdot 3} = 0,009 \text{ Ом.}$$

Виконаємо аналіз рівняння механічної характеристики:

$$M(s) = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_1 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2 \right]} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_1 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_k)^2 \right]}. \quad (3.11)$$

Знайдемо значення похідної в режимі ХХ. Для цього виконаємо диференціювання виразу (3.11) [13, 14, 18]:

$$\frac{\partial M}{\partial s} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{\omega_1} \cdot \left[ \frac{2 \cdot (R_2')^2 \cdot \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \right) \cdot c_1}{s^3 \cdot \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_k)^2 \right]^2} - \frac{R_2'}{s^2 \cdot \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_k)^2 \right]^2} \right].$$

Далі знайдемо межу при  $s \rightarrow 0$  та виконуємо заміну похідної кінцевими різницями між точками ХХ і номінального режиму роботи АД.

Звідки отримуємо вираз для  $R_2'$ :

$$R_2' = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot s_{ном}}{\omega_1 \cdot c_1^2 \cdot M_{ном}}, \quad (3.12)$$

тоді, коефіцієнт приведення Т-подібної схеми заміщення до Г-подібної схеми буде перебувати в межах  $1,02 < c_1 < 1,06$  та  $c^2 \approx 1$ .

З виразу (3.12) для приведенного активного опору ротора отримаємо:

$$R_2' = \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2 \cdot 0,02}{314 \cdot 1624,85} = 0,0011 \text{ Ом.}$$

Під час визначення активних опорів статора та ротора приймаємо величину механічних втрат на рівні (0,01-0,05) від номінальної потужності АД. При цьому менші значення відповідають електричним машинам із більшою вихідною потужністю. Тому коефіцієнт приведення приймаємо рівним одиниці.

Визначимо величину критичного ковзання [13, 14, 18]:

$$s_{крит} = \frac{s_{ном}}{A} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - A}). \quad (3.13)$$

Звідки

$$a = \frac{R_1}{c_1 \cdot R'_x} = \frac{0,031}{1,02 \cdot 0,011} = 2,76,$$

де  $c_1$  - коефіцієнт приведення Т-подібної схеми до Г-подібної схеми заміщення, приймаємо  $c_1 = 1,02$  [13, 14, 18].

$$A = 1 - 2 \cdot a \cdot s_{ном} \cdot (\lambda - 1) = 1 - 2 \cdot 2,82 \cdot 0,02 \cdot (2,3 - 1) = 0,85.$$

Тоді з формули (3.13) ми отримаємо:

$$s_{крит} = \frac{0,02}{0,85} \cdot (2,3 + \sqrt{2,3^2 - 0,85}) = 0,104.$$

Запишемо рівняння для критичного моменту АД:

$$M_{крит} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot c_1 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2})} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot c_1 \cdot \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s_{крит}} \right)} \quad (3.14)$$

Знайдемо  $R_1$  для цього використаємо вираз для критичного проковзування:

$$s_{\text{крит}} = \frac{c_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}};$$

$$R_1 = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega \cdot \lambda \cdot M_{\text{ном}}} - \frac{c_1 \cdot R_2'}{s_{\text{крит}}};$$

$$R_1 = \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot 2,3 \cdot 1627,8} - \frac{1,02 \cdot 0,011}{0,104} = 0,016 \text{ Ом.}$$

Визначимо індуктивний опір виникаючого короткого замикання:

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{c_1 \cdot R_2'}{s_{\text{крит}}}\right)^2 - R_1^2}; \quad (3.15)$$

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{1,02 \cdot 0,011}{0,104}\right)^2 - 0,031^2} = 0,103 \text{ Ом.}$$

Виконаємо поділ індуктивного опору виникаючого короткого замикання на опори потоків розсіювання ротора та статора:

$$x_1 = x_2 = \frac{x_k}{2} = 0,052 \text{ Ом.}$$

Розрахуємо реактивну складову комплексної провідності:

$$b = \frac{x_k}{c_1 \cdot \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)^2 + x_k^2 \right]}; \quad (3.16)$$

$$b = \frac{0,103}{1,02 \cdot \left[ \left( 0,031 + 1,02 \cdot \frac{0,011}{0,02} \right)^2 + 0,103^2 \right]} = 0,28.$$

Провідність гілки намагнічування  $1/x_m$  у режимах роботи, близьких до номінального режиму, порівнянна з реактивною провідністю головного ланцюга  $b$  та має суттєвий вплив на енергетичні параметри системи. Тому доцільно визначати саме з балансу реактивної потужності:

$$Q_1 = Q_k + Q_m = U_1 \cdot I_{ном} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi^2}, \quad (3.17)$$

де  $Q_k$  - реактивна складова потужності, що буде формуватись на формування полів розсіювання ротора та статора.

Після виконання перетворення головного ланцюга, потужності основного потоку та потоків розсіювання можуть бути виражені з використанням фазної напруги  $U_1$ .

$$Q_k = U_1^2 \cdot b \cdot s_{ном}; \quad (3.18)$$

$$Q_m = U_1^2 \cdot b_m = \frac{U_1^2}{c_1 \cdot x_m}. \quad (3.19)$$

При підставленні отриманих виразів (3.18) та (3.19) у рівняння балансу потужностей (3.17) отримаємо наступний вираз:

$$x_m = \frac{1}{I_{ном} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} / U_1 - b \cdot s_{ном}} - x_1; \quad (3.20)$$

$$x_m = \frac{1}{437 \cdot \sqrt{1 - 0,92^2} / 220 - 0,28 \cdot 0,02} - 0,052 = 1,24 Ом.$$

Далі виконаємо необхідне уточнення параметрів запропонованої схеми заміщення.

### 3.3 Розрахунок уточнення параметрів запропонованої схеми заміщення

Визначимо можливі межі зміни опору статора  $R_1$  та ротора  $R_2'$ :

$$0,016 < R_1 < 0,031 Ом;$$

$$0,009 < R_2' < 0,011 Ом.$$

Метою виконання уточнення параметрів є забезпечення максимального збігу отриманих результатів розрахунку із максимальним моментом, коефіцієнтом потужності та величиною критичного проковзування при номінальній величині частоти обертання ротора.

Як початкове значення для виконання уточнення приймається середнє значення опору ротора  $R_2'$ :

$$R_2' = \frac{0,009 + 0,011}{2} = 0,01 Ом.$$

Далі визначимо суму параметрів  $R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s_{крит}}$  з наступного виразу [13, 14,

18]:

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		58

$$M_{\text{крит}} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot c_1 \cdot \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2} \right)} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot c_1 \cdot \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s_{\text{крит}}} \right)};$$

$$R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s_{\text{крит}}} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot c_1 \cdot M_{\text{крит}}}; \quad (3.21)$$

$$R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s_{\text{крит}}} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot 1 \cdot 3875,16} = 0,019 \text{ Ом};$$

$$R_1 = 0,023 \text{ Ом}.$$

Виконаємо уточнення значення критичного проковзування для уточнених значень  $R_1, R_2'$ :

$$s_{\text{крит}} = \frac{s_{\text{ном}}}{A} \cdot \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - A} \right); \quad (3.22)$$

$$A = 1 - 2 \cdot a \cdot s_{\text{ном}} \cdot (\lambda - 1) = 1 - 2 \cdot 2,3 \cdot 0,02 \cdot (2,3 - 1) = 0,88;$$

$$s_{\text{крит}} = \frac{0,02}{0,88} \cdot \left( 2,3 + \sqrt{2,3^2 - 0,88} \right) = 0,1.$$

Знайдемо середнє значення величини критичного проковзування:

$$s_{\text{крит}} = \frac{0,104 + 0,1}{2} = 0,102.$$

Тоді значення опору статора  $R_1$  складатиме:

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		59

$$R_1 = 0,119 - c_1 \cdot \frac{R_2'}{s_{крит}} = 0,021 \text{ Ом.}$$

Далі при відомих значеннях опорів та проковзування визначимо індуктивний опір виникаючого короткого замикання:

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{R_2'}{s_{крит}}\right)^2 - R_1^2} = 0,096 \text{ Ом.}$$

Тоді опір потоків розсіювання статора та ротора буде рівним:

$$x_1 = x_2 = \frac{x_k}{2} = 0,048 \text{ Ом.}$$

При цьому величини індуктивності розсіювання статора, ротора та ланцюга намагнічування склали відповідно  $L_1 = 0,153 \cdot 10^{-3}$ ;  $L_2 = 0,153 \cdot 10^{-3}$ ;  $L_\mu = 3,94 \cdot 10^{-3}$  Гн [13, 14, 18].

Далі виконаємо оцінку коефіцієнту потужності та еквівалентних значень опорів необхідних для його визначення:

$$\cos \varphi = \frac{R_{екв}}{\sqrt{R_{екв}^2 + X_{екв}^2}}; \quad (3.23)$$

$$\cos \varphi = \frac{0,389}{\sqrt{0,389^2 + 0,24^2}} = 0,87.$$

Уточнені значення параметрів запропонованої схеми заміщення дають можливість виконати порівняння аналітично визначених значень параметрів АД

з аналогічними паспортними параметрами.

Значення паспортних параметрів [15]:

- величина максимального моменту  $M_{\max} = 3875,16H \cdot m$ ;
- коефіцієнт потужності  $\cos \varphi = 0,92$ ;
- величина критичного проковзування  $s_{\text{крит}} = 0,104$ .

Тоді як аналітично визначені значення за параметрами запропонованих схем заміщення склали:  $M_{\max} = 3875,16H \cdot m$ ;  $\cos \varphi = 0,87$ ;  $s_{\text{крит}} = 0,102$ .

### 3.3.1 Оцінювання втрат у ЧП

Для виконання оцінювання значення ККД ЧП необхідно вибрати IGBT-модуль, що буде забезпечувати область безпечної роботи за величиною напруги ( $U_{\max} = 540V$ ) і за силою струму (номінальний струм у АД - 437A).

Цим вимогам відповідає IGBT-модуль серії CM600-12H [31], що забезпечує проходження сили струму 600 А при максимальній напрузі 600В.

Напруга насичення в транзисторах даного модуля складає 2,4 В, час вмикання модуля - 600нс, а час вимкнення - 350 нс.

Виконаємо оцінку втрати в АІН із ШІМ - модуляцією.

Слід врахувати такі умови [30]:

- за період дії низькочастотної напруги, що подається на статорні обмотки АД, величина амплітуди сили струму за інтервал увімкненого стану змінюється відповідно до синусоїдального закону;

- основний внесок у сумарні втрати вносять саме динамічні втрати (або втрати під час виконання комутації).

Визначимо середнє значення сили струму:

$$I_{\text{сеп}} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \cdot \sin(\omega t) dt = \frac{2 \cdot I_m}{\pi} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\phi}}{\pi}; \quad (3.24)$$

$$I_{сеп} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 437}{3,14} = 392,5 A.$$

Визначимо величину динамічних втрат в одному ключі:

$$P_{ON} + P_{OFF} = (E_{ON} + E_{OFF}) \cdot f \cdot \int_0^{\pi} \sin(\omega t) d(\omega t) = (E_{ON} + E_{OFF}) \cdot f \cdot \frac{1}{\pi}, \quad (3.25)$$

де  $E_{ON}, E_{OFF}$  - величина енергії втрат під час виконання перемикання ключа в схемі з індуктивним навантаженням, наведені до величини заданої амплітуди сили струму навантаження і рівня напруги живлення інвертора.

$$E_{ON} = \frac{I_m \cdot E \cdot t_R}{K_{ON}}; E_{OFF} = \frac{I_m \cdot E \cdot t_F}{K_{OFF}},$$

де  $K_{ON}, K_{OFF}$  - коефіцієнти, що визначаються типом використовуваного навантаження. У нашому випадку, щоб врахувати індуктивний характер навантаження,  $K_{ON} = 2 \cdot K_{OFF}$ .

Томі величину частоти ШІМ приймаємо рівною:  $f = 10^4 \text{ Гц}$ .

Тоді величина динамічних втрат в одному ключі буде рівною:

$$P_{ON} + P_{OFF} = \left( \frac{392,5 \cdot 540 \cdot 600 \cdot 10^{-9}}{2} + \frac{392,5 \cdot 540 \cdot 350 \cdot 10^{-9}}{2} \right) \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{3,14} = 320,6 \text{ Вт}.$$

Визначимо втрати у всіх ключах.

$$(P_{ON} + P_{OFF}) \cdot 6 = 2 \text{ кВт}.$$

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

За високої рівня частоти ШІМ і використання активно-індуктивного навантаження, сила струм навантаження буде мати синусоїдальну форму.

### 3.3.2 Визначення ККД та коефіцієнта потужності АД із ТРН

Виконаємо оцінювання переваги частотного регулювання, порівняно з іншими способами регулювання швидкості обертання ротора.

Вираз для визначення ККД матиме наступний вигляд [13, 14, 18]:

$$\eta = \frac{M \cdot \omega_{\text{крит}}}{M \cdot \omega_{\text{крит}} + \Delta P_{1,м} + \Delta P_{2,м} + \Delta P_{1C}}, \quad (3.26)$$

$\Delta P_{1,м}, \Delta P_{2,м}$  - величина втрати в міді статора та ротора АД;  $\Delta P_{1C}$  - величина втрати в сталі в статорі АД.

$$\Delta P_{1,м} = 3 \cdot I_{\text{ном}}^2 \cdot R_1;$$

$$\Delta P_{1,м} = 3 \cdot 437^2 \cdot 0,031 = 17,7 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{2,м} = 2 \cdot M \cdot s_{\text{крит}} \cdot \pi \cdot f_1;$$

$$\Delta P_{2,м} = 2 \cdot 1624,85 \cdot 0,0102 \cdot 314 = 52,5 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{1C} = 0,2 \cdot \Delta P_{\text{ов}} = 0,2 \cdot P_{\text{ном}} \cdot \left( \frac{1}{\mu_{\text{ном}}} - 1 \right);$$

$$\Delta P_{1C} = 0,2 \cdot \Delta P_{\text{ов}} = 0,2 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{1}{0,945} - 1 \right) = 2910 \text{ Вт}.$$

Як бачимо основний внесок у сумарні втрати вносять втрати саме в роторі міді, які залежать від величини проковзування.

Обчислимо ККД із виразу (3.26):

$$\eta = \frac{1624,85 \cdot 141}{1624,85 \cdot 141 + 17700 + 52500 + 2910} = 0,75.$$

Визначимо величину споживаної з мережі потужності:

$$S_1 = \frac{M \cdot \omega_{\text{крит}}}{\eta_{\text{дв}} \cdot v \cdot \cos \varphi}; \quad (3.27)$$

$$S_1 = \frac{1624,85 \cdot 141}{0,75 \cdot 0,5} = 611 \text{ кВт}.$$

Далі виконаємо оцінку коефіцієнту потужності згідно (3.23):

$$\cos \varphi = \frac{0,102}{\sqrt{0,102^2 + 0,098^2}} = 0,72.$$

### 3.3.3 Визначення ККД та коефіцієнта потужності частотно-регульованого АД

Мінімальна відносна частота  $a_{\text{min}}$  напруги АД, за якої механізм починає долати протидію тиску, визначається згідно із виразом:

$$a_{\text{min}} = \sqrt{h_c} = \sqrt{\frac{H_{\text{cm}}}{H_0}} = \sqrt{\frac{39,05}{70}} = 0,75;$$

$$f_{\text{min}} = 37,5 \text{ Гц}.$$

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		64

Для визначення ККД для ЧРЕ необхідно розрахувати величину проковзування  $s = \beta/\alpha$  під час роботи АД на зниженій частоті  $f_1 = f_{ном} \cdot \alpha$ .

Тоді величина проковзування буде рівною:

$$s = \frac{\Delta\omega}{\omega_1} = \frac{f_2 \cdot f_{1ном}}{f_1 \cdot f_{1ном}}. \quad (3.28)$$

Прийmemo припущення, що абсолютне проковзування  $\Delta\omega$  не змінюється при зниженні величини синхронної частоти живлення двигуна з 50 Гц до частоти, що відповідає величині проковзування. Тоді з виразу (3.28):

$$f_2 = 50 \cdot 0,02 = 1 \text{ Гц};$$

$$f_1 = f_{крит} + f_2 = 50 \cdot (1 - 0,102) + 1 = 45,9 \text{ Гц};$$

$$s = \frac{f_2}{f_1} = \frac{1}{45,9} = 0,022.$$

Величина проковзування порівняно зі значенням проковзування, яке мало місце в АД із тиристорним регулюванням значно знизилась. У результаті цього відбувається зростання ККД.

$$\Delta P_{1м} = 3 \cdot 437^2 \cdot 0,031 = 17,7 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{2м} = 2 \cdot 1624,85 \cdot 0,022 \cdot 314 = 9,7 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{1с} = 0,2 \cdot \Delta P_{ог} = 0,2 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{1}{0,945} - 1 \right) = 2910 \text{ Вт}.$$

Тоді ККД згідно виразу (3.26):

					МРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\eta = \frac{1624,85 \cdot 141}{1624,85 \cdot 141 + 17700 + 9693,8 + 2910} = 0,88.$$

Незначна величина втрат у модулі не матиме істотного впливу на ККД ЧП.

$$\eta_{\text{ЧП}} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{ЧП}}}{M \cdot \omega_{\text{крит}} + \Delta P}; \quad (3.29)$$

$$\eta_{\text{ЧП}} = 1 - \frac{2}{250 + 2} = 0,992;$$

$$\eta = \eta_{\text{ЧП}} \cdot \eta_{\text{ос}} = 0,992 \cdot 0,88 = 0,873.$$

Далі представимо залежність ККД від величини частоти обертання ротора АД.

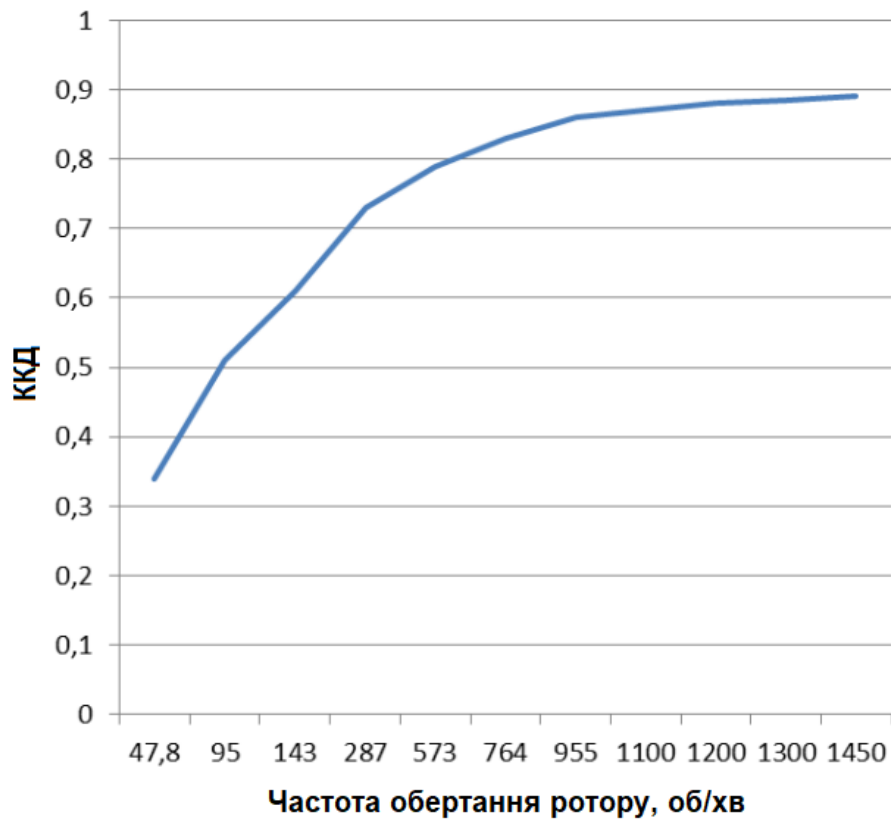


Рисунок 3.6 - Графічна залежність ККД від частоти обертання ротора АД

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 23.00.00.000 ПЗ

Арк.

66

Тоді величина споживаної з мережі потужності ЧРЕ складатиме:

$$S_2 = \frac{M \cdot \omega_{\text{крит}}}{\eta_{\text{ЧП}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \nu \cdot \cos \varphi}; \quad (3.30)$$

$$S_2 = \frac{229103}{0,992 \cdot 0,88 \cdot 0,87} = 301,85 \text{кВт}.$$

Виконаємо оцінювання коефіцієнта потужності за змінної величини частоти живлення статорної обмотки АД при мінімально допустимій частоті  $f_1 = 37,5 \text{Гц}$ .

Для цього скористаємося схемою заміщення (рис. 4.6):

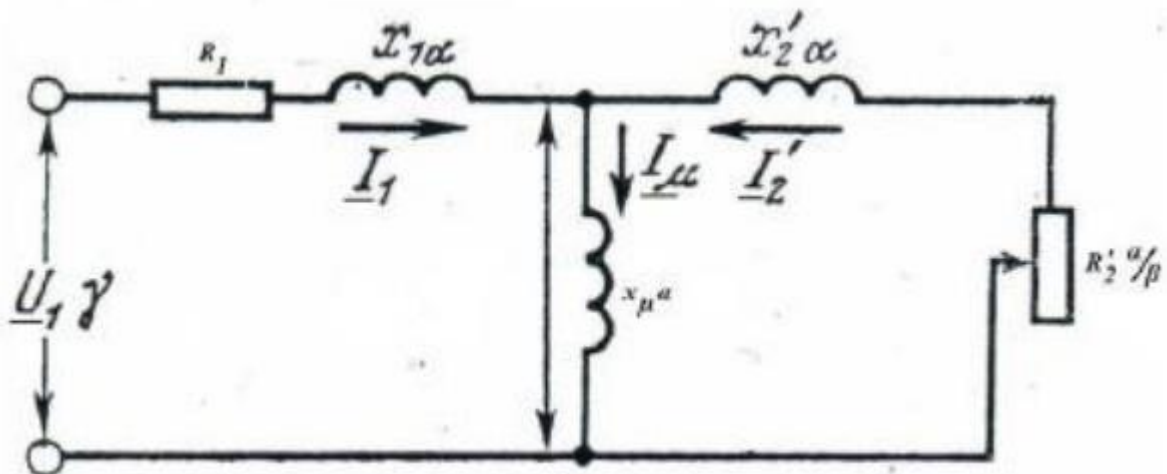


Рисунок 3.7 - Схема заміщення частотно-регульованого АД

Визначимо індуктивні опори  $x_1, x_2, x_\mu$ .

Значення коефіцієнту потужності  $\cos \varphi$  при частоті сили струму живлення статора  $f_1 = 37,5 \text{ Гц}$  та значеннях інших параметрів:

$$R_1 = 0,021 \text{ Ом}; R_2 = 0,01 \text{ Ом}; s = 0,022; L_1 = 0,153 \cdot 10^{-3}; L_2 = 0,153 \cdot 10^{-3}; L_\mu = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Значення коефіцієнту потужності у частотно-регульованому АД практично не змінилося при зниженні частоти сили струму живлення обмотки статора від

Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата

величини номінального значення до величини мінімального значення 37,5 Гц.

Далі виконаємо оцінку коефіцієнту потужності згідно (3.23):

$$\cos \varphi = \frac{0,36}{\sqrt{0,36^2 + 0,265^2}} = 0,84.$$

Представимо графічну залежність зміни коефіцієнту потужності від частоти обертання ротора АД.

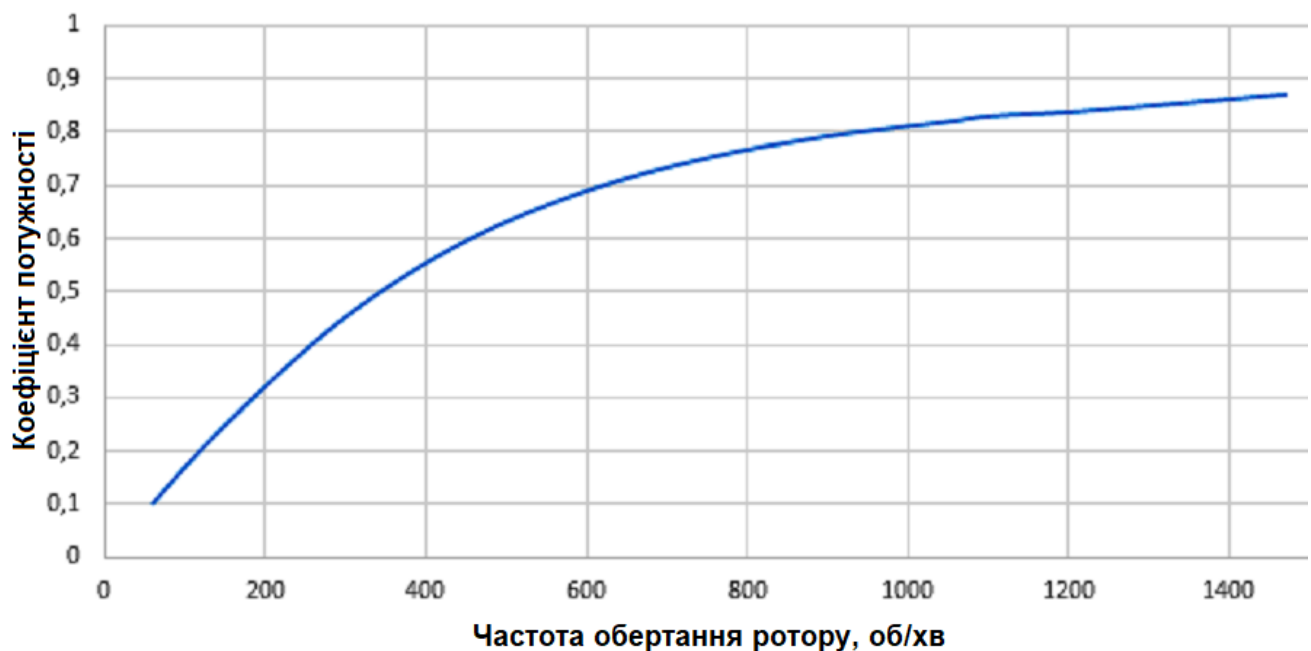


Рисунок 3.7 – Графічна залежність зміни коефіцієнту потужності залежно від частоти обертання ротора АД

У нашому випадку діапазон регулювання частоти обертання невеликий, ККД та коефіцієнт потужності практично не мають змін.

Для оцінки ефективності енергозбереження виконаємо обчислення відносного зменшення споживаної з мережі потужності частотно-регульованим АД, в порівнянні з потужністю, споживаною з мережі АД без використання частотного регулювання [13, 14, 20, 21].

Відносне зниження величини потужності, споживаної частотно-регульованим АД, становить, враховуючи (3.27) та (3.30):

$$\delta \geq \frac{S_1 - S_2}{S_1}; \quad (3.31)$$

$$\delta \geq \frac{610,94 - 301,85}{610,94} = 0,51.$$

### 3.3.4 Визначення потужності, що споживається електроприводом

Для того, щоб отримати вирази для розрахунку потужності споживання залежно від величини витрати  $Q$ , необхідно знайти величину напору  $H$  за відповідних значень величини подачі:

$$H = H_{0ном} \cdot \left( \frac{1-s}{1-s_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q.$$

Потужність, споживана НА буде визначається із наступних виразів:

- для ЧРЕ

$$P_2 = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta_{чп} \cdot \eta_{ов} \cdot \cos \varphi}; \quad (3.32)$$

- для нерегульованого електроприводу;

$$P_2 = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta_{ов} \cdot \cos \varphi}, \quad (3.33)$$

де  $Q$  - величина подача ВНС;  $g$  - прискорення вільного падіння;  $H$  - величина напору, м;  $\rho$  - густина речовини (води).

Із наведених вище формул розрахуємо значення крутного моменту, величини напруги на виході інвертора та споживаної потужності при частотного

способі регулювання та представимо в табличному вигляді в Додатках, табл. А.2.

### 3.4 Характеристика режимів роботи розроблюваної насосної станції

Розглянемо кілька режимів роботи НС другого підйому, для цього виконаємо аналіз графіку водоспоживання НС (рис. 3.8 та таблиця А.3) [8-11].

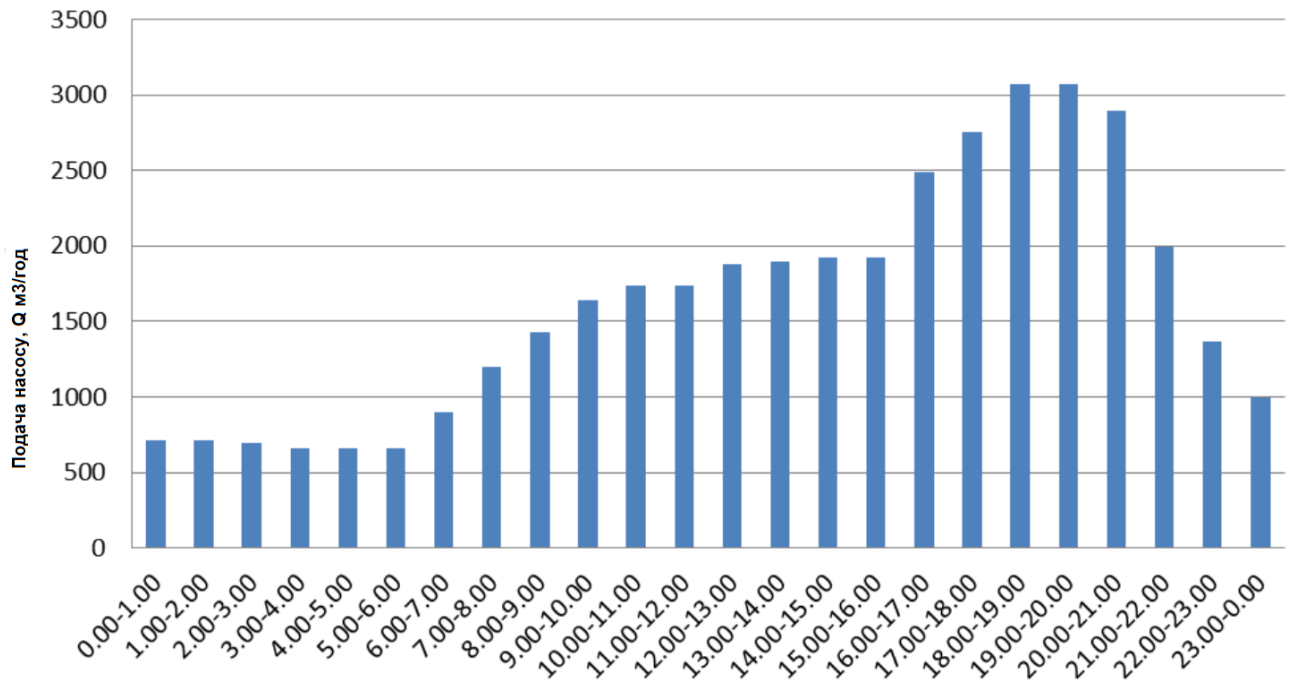


Рисунок 3.8 – Графік водоспоживання насосної станції другого підйому [8-11]

Поділимо отримані дані на декілька випадків та розглянемо їх.

Перший випадок - подача ВНС  $Q$  міняється в діапазоні від 0 до  $0,19Q_{ном}$ , тобто від 0 до  $237,5 \text{ м}^3/\text{год}$ , (час роботи з 0:00 до 6:00, рис. 3.8) [8-11].

В даному випадку доцільно використовувати нерегульований електропривод, оскільки за частотного способу регулювання діапазон частоти обертання ротора АД коливається в діапазоні від 1100 до 1450 об/хв, оскільки інакше ВНС не зможе долати протидію тиску. У випадку використання ТРН діапазон частоти буде коливатись в межах від 1350 до 1450 об/хв. У даному випадку ККД є сталим -  $\eta = 0,89$ , коефіцієнт потужності -  $\cos \varphi = 0,87$ .

Визначимо потужність, що споживається:

$$Q = 0; P = 0;$$

$$Q = 0,1Q_{ном}; P = 30,5кВт;$$

$$Q = 0,15Q_{ном}; P = 45,67кВт;$$

$$Q = 0,19Q_{ном}; P = 62,2кВт.$$

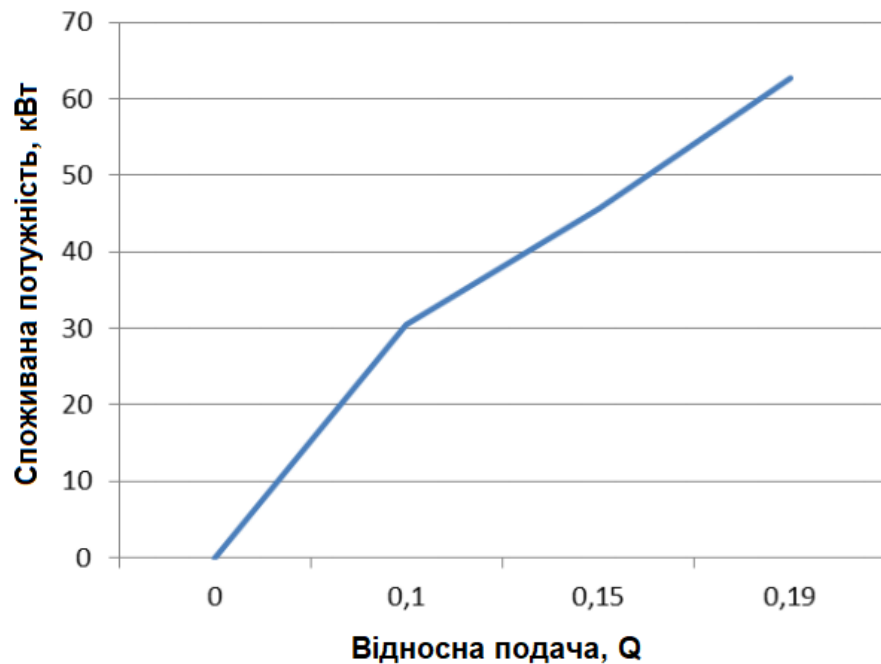


Рисунок 3.9 – Графічна залежність потужності, яка споживається від величини відносної подачі (діапазон зміни подачі від 0 до  $0,19Q_{ном}$  )

Другий випадок - подача ВНС Q коливається в межах від 0,19 до  $0,5Q_{ном}$ , тобто від 237,5 до 625 м<sup>3</sup>/год (час роботи з 6:00 до 13:00 та з 22:00 до 0:00, рисунок 3.8) [8-11]. В даному випадку доцільно виконувати регулювання величини подачі ВНС за допомогою використання дросельної засувки, або за допомогою зміни величини частоти напруги живлення статорної обмотки. У даному режимі діапазон регулювання величини частоти обертання ротора коливається від 1100 до 1200 об/хв. При використанні ТРН діапазон регулювання буде в межах від 1350 до 1450 об/хв, отже, ТРН не можливо використовувати в даному режимі роботи. У даному випадку коефіцієнт ККД коливається,  $\eta = 0,87$  при 1100 об/хв та  $\eta = 0,88$  при 1200 об/хв. Коефіцієнт потужності також змінний при 1100 об/хв -  $\cos \varphi = 0,829$  і при 1200 об/хв -

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



У даному режимі діапазон регулювання величини частоти обертання ротора коливається в межах від 1200 до 1300 об/хв. У разі використання ТРН діапазон регулювання знаходиться в межах від 1350 до 1450 об/хв, отже у даному режимі роботи використовувати ТРН не можливо.

У даному випадку ККД змінюється дуже мало при 1200 об/хв -  $\eta = 0,88$  та при 1300 об/хв -  $\eta = 0,885$ . Коефіцієнт потужності також коливається незначно, при 1200 об/хв -  $\cos \varphi = 0,837$  та при 1300 об/хв -  $\cos \varphi = 0,849$ .

Визначимо потужність, що споживається:

$$Q = 0,5Q_{ном}; P_{чр} = 109,4кВт; P_{др} = 157,16кВт;$$

$$Q = 0,6Q_{ном}; P_{чр} = 132,1кВт; P_{др} = 180,8кВт;$$

$$Q = 0,7Q_{ном}; P_{чр} = 165кВт; P_{др} = 208,9кВт;$$

$$Q = 0,75Q_{ном}; P_{чр} = 189кВт; P_{др} = 222,4кВт.$$

При використанні частотного способу регулювання потужність, яка споживається, нижча, водночас ККД та коефіцієнт потужності коливаються несуттєво. Отже, у даному режимі роботи АД використовувати частотний спосіб регулювання - доцільно.

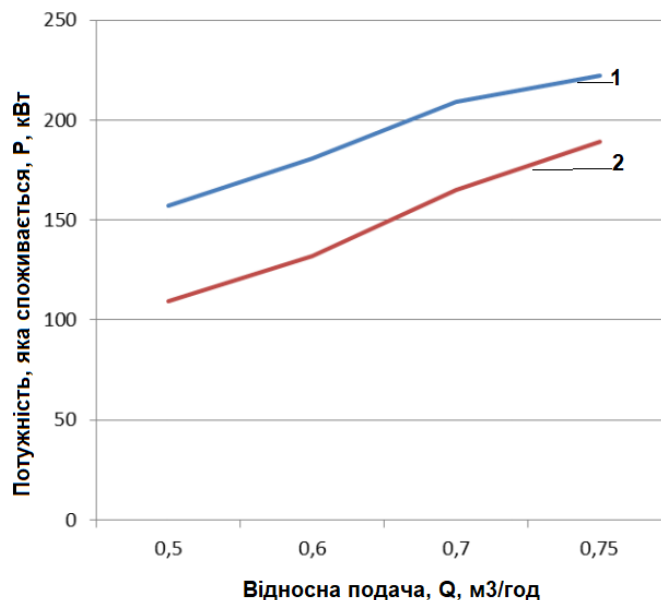


Рисунок 3.11 - Графічна залежність потужності, яка споживається від величини відносної подачі (діапазон зміни подачі від  $0,5Q_{ном}$  до  $0,75Q_{ном}$ ):

1 – дросельне регулювання; 2 – частотне регулювання

Четвертий випадок – величина подачі ВНС  $Q$  змінюється в межах 0,75 до  $Q_{ном}$ , тобто від 937,5 до 1250 м<sup>3</sup>/год (час роботи з 18:00 до 21:00, див. рис. 3.8) [8-11]. В даному випадку потрібно регулювати величину подачі ВНС за допомогою використання дросельної засувки, або за допомогою зміни величини частоти напруги живлення статорної обмотки, або використовувати ТРН.

У даному випадку діапазон регулювання величини частоти обертання ротора коливається в межах від 1300 до 1450 об/хв. У такому разі при частотному регулюванні ККД змінюється незначно при 1300 об/хв -  $\eta = 0,885$  та при 1450 об/хв -  $\eta = 0,89$ . Коефіцієнт потужності також мало змінюється, при 1300 об/хв -  $\cos \varphi = 0,849$  та при 1450 об/хв -  $\cos \varphi = 0,87$ . У випадку використання ТРН ККД коливається в діапазоні при 1300 об/хв -  $\eta = 0,75$  та при 1450 об/хв -  $\eta = 0,89$ . Коефіцієнт потужності змінюється в широкому діапазоні - при 1300 об/хв -  $\cos \varphi = 0,72$  та при 1450 об/хв -  $\cos \varphi = 0,87$ .

Діапазон регулювання величини подачі при цьому зовсім незначний в межах від 1125 об/хв до 1250 об/хв.

Визначимо потужність, що споживається:

$$Q = 0,75Q_{ном}; P_{чр} = 189кВт; P_{др} = 222,4кВт; P_{ТРН} = -кВт;$$

$$Q = 0,8Q_{ном}; P_{чр} = 204,5кВт; P_{др} = 236,1кВт; P_{ТРН} = 414,38кВт;$$

$$Q = 0,9Q_{ном}; P_{чр} = 245,82кВт; P_{др} = 262,1кВт; P_{ТРН} = 450,41кВт;$$

$$Q = 0,95Q_{ном}; P_{чр} = 265,9кВт; P_{др} = 274,14кВт; P_{ТРН} = 482,1кВт;$$

$$Q = Q_{ном}; P_{чр} = 287,1кВт; P_{др} = 287,1кВт; P_{ТРН} = 287,1кВт.$$

При використанні частотного способу регулювання потужність, яка споживається, нижча, ніж за при використанні дросельного регулювання та при використанні ТРН. ККД та коефіцієнт потужності коливаються незначно та суттєво вищі, ніж у разі використання ТРН.

Отже, у даному режимі роботи АД також доцільно використовувати саме частотний спосіб регулювання.



У режимі регулювання величини частоти ЧП за сигналом ДТ керує продуктивністю ВНС. Керування відбувається шляхом автоматичної зміни величини частоти обертання ВНС в залежності від неузгодженості величин заданого та реального тисків у напірному трубопроводі.

ДТ представляє собою малогабаритний високоточний вимірник рівня тиску води. Який перетворює вимірний рівень тиску у стандартизований сигнал, що подається на аналоговий вхід ЧП. Монтується на трубу в стандартне різьблення, наприклад замість встановлення манометра.

Функціональний перетворювач  $F_1$  на основі отриманої вхідної інформації ( $a, h_c, \mu_0$ ) розраховує статичний момент  $\mu_c$ , а функціональний перетворювач  $F_2$  формує задане значення ЕРС статорної обмотки -  $e_3$ .

Необхідне значення рівня сигналу задаючої напруги отримується шляхом додавання ЕРС статорної обмотки  $e_3$  та падіння рівня напруги  $u_{1p}$  на активному опорі статорної обмотки АД.

Струм статора  $i_1$  вимірюється за допомогою датчика струму ДТ. Функціонування системи в пусковому та робочому режимах розділено за допомогою спеціальної перемикальних функцій:

$$K = \left| \frac{a}{a_{kin}} \right| = \text{int};$$
$$K = \left| \frac{a}{a_{min}} \right| = \text{int},$$

де  $a_{kin}$  - кінцеве значення величини відносної частоти під час запуску;  $a_{min}$  - мінімальне значення величини відносної частоти.

Під час початку роботи ЧП починає плавно розганяти АД насоса, що дає змогу уникнути стрибка сили струму ВНС та виникаючих гідравлічних перевантажень. Час розгону може регулюватися та зазвичай знаходиться в межах від 5 до 30 с.

Під час розгону ВНС ЧП безперервно відстежує рівень тиску за сигналом

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		76

давача.

Щойно рівень тиску досягне заданого, ЧП перестає розганяти ВНС, підтримуючи його поточну величину частоти обертання. Як правило, при цьому ВНС працює на рівні частоти, дещо нижчій ніж його паспортний рівень частоти і тому споживає дещо менше електроенергії. Якщо під час роботи величина витрати води повинна збільшитися (наприклад, у вечірній час), то ЧП за сигналом давача рівня тиску відстежить тенденцію до падіння рівня тиску та, відповідно, підвищить продуктивність ВНС. У нічний час рівень частоти обертання ВНС автоматично знизиться [20, 21].

Таким чином, у точці монтажу давача рівень тиску із високою точністю підтримується рівним заданому значенню незалежно від величини витрати води.

#### Висновки до розділу

Виконано необхідні розрахунки, що підтверджують працездатність запропонованої насосної станції із енергозберігаючим приводом. Виконано розрахунок та необхідну побудова характеристик відцентрового насосу та підключеного трубопроводу.

Запропоновано схему заміщення АД для якої виконано визначення параметрів та розрахунок уточнення параметрів для схеми заміщення. Наведено і охарактеризовано режими роботи насосної станції.

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		77

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконавши аналіз роботи насосної станції в декількох режимах, відповідно до графіка водоспоживання (таблиця А.3), було розглянуто випадки регулювання величини подачі ВНС за допомогою наступних способів - дроселювання, регулювання зміною величини частоти напруги живлення статорної обмотки, регулювання зміною напруги живлення статора.

Було зроблено вибір на користь частотного способу регулювання величини частоти обертання ротора АД. Це можна пояснити тим, що в такому випадку буде споживатись менша потужність, при усіх режимах роботи ВНС, крім випадку із величиною подачі в межах від 0 до 0,19 від номінального значення, де, взагалі, доцільно використовувати тільки нерегульований електропривод.

Коефіцієнти потужності та корисної дії мають досить високі значення та змінюються в дуже малих інтервалах, діапазон регулювання величини частоти набагато ширший, ніж у випадку використання, наприклад, тиристорного регулятора напруги. Буде досить суттєва економія електроенергії у грошовому вираженні, а значить, і швидкий термін окупності встановленого обладнання.

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		78





електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. – 470 с.

21. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання: Навч. посібник / С.М. Довгань. – Дніпропетровськ: НГА України, 2001. – 137 с.

22. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії: навч. посіб. / К.К. Победаш, В.А. Святненко - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. - 244 с.

23. Промислова електроніка: Підручник. / За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2015. – 536 с.

ISBN 978-966-222-976-9

24. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник. – Т.1. Елементна база електронних пристроїв / В.І.Сенько, М.В.Панасенко, Є.В.Сенько та ін. – К.: Обереги, 2000. – 300 с.

25. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник. – Т.2. Аналогові та імпульсні пристрої / В.І.Сенько, М.В.Панасенко, Є.В.Сенько та ін. – Х.: Фоліо, 2002. – 510 с.

26. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник. – Т.3. Цифрові пристрої / В.І. Сенько, М.В. Панасенко, Є.В. Сенько та ін. – К.: Каравела, 2008. – 400 с.

27. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник. – Т.4. Силові пристрої: у 2-х кн. – Кн.1 / В.І. Сенько, М.В. Панасенко, Є.В. Сенько та ін. – К.: Каравела, 2013. – 640 с.

28. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник. – Т.4. Силові пристрої: у 2-х кн. – Кн.2 / В.І. Сенько, М.В. Панасенко, Є.В. Сенько та ін. – К.: Каравела, 2013. – 316 с.

29. Руденко В.С. Промислова електроніка / В.С. Руденко, В.Я.Ромашко, В.В.Трифонюк. – К.: Либідь, 1993. – 432 с.

30. Інвертори і перетворювачі частоти : монографія / Сенько В.І., Трубіцин

					MPMA 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

К.В., Чибеліс В.І. — Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. — 300 с.

31. IGBT модуль Semikron SKM600GA12V 600 А 1200 В. [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://discon.ua/ua/silovye-poluprovodnikovye-moduli-i-komponenty/igbt-modul-skm600ga12v>

32. Теорія автоматичного керування : Підручник / Попович М. Г., Ковальчук О. В. — 2-ге вид., перероб. і доп. — К.: Либідь, 2007. — 656 с.

33. Навчальний посібник з дисципліни «Теорія автоматичного керування» : у 2 ч. Ч. 1 / А. П. Гуров, С. І. Ольшевський, О. О. Черно, Л. І. Бугрім. – Миколаїв : НУК, 2018. – 111 с.

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		82

Додатки

					<i>МРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						83
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		