

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра електроенергетики

Робота допущена до захисту

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ І. Л. Лебединський

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: «Проектування системи електропостачання та електропривода насосної станції адміністративної будівлі»

Спеціальність: 141– Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент гр. ЕТМ-01 \_\_\_\_\_ Б. Р. Фесенко

Керівник: к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ П. О. Василега

Консультанти:

з економічної частини: к.е.н., доцент \_\_\_\_\_ О. М. Маценко

з питань охорони праці й безпеки в

надзвичайних ситуаціях: к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ П. О. Василега

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ М. А. Никифоров

Суми-2021

Сумський державний університет  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра електроенергетики

Спеціальність: 141– Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електроенергетики

І.Л. Лебединський

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську роботу**  
Фесенка Богдана Романовича

1. Тема роботи: «Проектування системи електропостачання та електропривода насосної станції адміністративної будівлі»

Затверджено наказом по університету № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 17.12.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи: механізм що проектується – електропривод насосу; система електроприводу за схемою ПЧ-АД.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно вирішити):

Вступ.

1 Розрахункова частина.

2 Науково-дослідна частина.

3 Економічна частина.

4 Охорона праці.

Висновки

Список використаної літератури.

Додатки.

5 Перелік графічного матеріалу: схема ЧП-АД в системі підтримання тиску води; імітаційна модель роботи асинхронного частотнорегульованого електроприводу насоса.

6 Консультанти:

Розділ	Керівник	Завдання видав	Завдання прийняв
Розрахунок економічної частини	Маценко О.М.		

7. Дата видачі завдання: 12.09.21

Керівник проекту \_\_\_\_\_

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розрахункова частина	13.09.21 по 01.10.21	
2.	Науково-дослідна частина	01.10.21 по 20.10.21	
3.	Економічна частина	20.10.21 по 01.11.21	
4.	Охорона праці	01.11.21 по 15.11.21	

Магістрант \_\_\_\_\_ Б.Р. Фесенко  
(підпис)

Керівник роботи:

к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ П.О. Василега  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

88 сторінок, 30 рисунків, 7 таблиць, 188 формул, 2 додатки, 16 джерел, 1 мультимедійна презентація.

**Бібліографічний опис:** Фесенко Б.Р. Проектування системи електропостачання та електропривода насосної станції адміністративної будівлі [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра; спец.: 141 - електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Б.Р. Фесенко; наук. керівник П.О. Василега. - Суми: СумДУ, 2021. - 88 с.

**Ключові слова:** електропостачання, насосна станція, електропривод, перетворювач частоти.

**Короткий огляд:** Спроектовано систему керування електроприводом насосної станції для 9-ти поверхового будинку. Розраховано електричні навантаження НС та електричного освітлення приміщення в якому розташована дана станція. Зроблено розрахунки та обрано основні силові елементи системи. Розраховано та побудовано механічні та електромеханічні характеристики електродвигуна НС. Проведено розрахунки електропривода за схемою ПЧ-АД. Проведено моделювання роботи системи з П-регулятором в програмному середовищі MathLab. Зроблено розрахунок економії при використанні спроектованої НС та термін її окупності.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

СПРВ – системи подачі та розподілу води

НС – насосна станція

АД – асинхронний двигун

ПЧ-АД – перетворювач частоти – асинхронний двигун

РЧВ – резервуар чистої води

ПЧ – перетворювач частоти

ЕП – електропривод

ЕД – електродвигун

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor (біполярний транзистор з ізолюваним затвором)

АСК ТП - автоматизована система керування технологічним процесом

КЗ – коротке замикання

ЧДД – чистий дисконтований дохід

ІД – індекс дохідності

ПТЕ - правила технічної експлуатації

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА .....	10
1.1 Загальні відомості про системи міського водопостачання.....	10
1.2 Характеристика насосних станцій .....	13
1.3 Характеристика 9-ти поверхового будинку цивільного призначення .....	17
1.4 НС для підкачування води в 9-ти поверховому будинку .....	18
1.5 Характеристика насосних агрегатів.....	19
1.6 Розрахунок потужності двигуна насосного агрегату.....	24
1.7 Розрахунок електричних навантажень НС .....	26
1.8 Навантаження електричного освітлення приміщення НС.....	28
1.9 Розрахунок та вибір трансформатора .....	29
1.10 Розрахунок комплектуючих пристроїв для перетворювача частоти .....	29
1.10.1 Розрахунок інвертора напруги.....	29
1.10.2 Розрахунок випрямляча струму .....	31
1.11 Вибір перетворювального пристрою для системи регульованого електроприводу.....	32
1.12 Розрахунок та вибір контакторів і автомату захисту .....	34
1.13 Вибір кабелів для НС.....	35
1.14 Розрахунок параметрів електроприводу НС .....	35
1.14.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна за каталожними даними.....	35
1.14.2 Регулювання координат електроприводу в системі "перетворювач частоти - двигун" (ПЧ-АД) .....	43
1.14.3 Розрахунок механічної характеристики при частотному регулюванні АД.....	47
1.14.4 Розрахунок струму намагнічування та струму статора при регулюванні швидкості АД за частотою.....	53
1.14.5 Розрахунок втрат та ККД АД при частотному регулюванні.....	57
1.14.6 Розрахунок пускових характеристик АД .....	61
1.14.7 Розрахунок енергетичних характеристик АД .....	64
2 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НС .....	66

					МР 3.8.141.222 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Фесенко Б.Р.			Проектування системи електропостачання та електропривода насосної станції адміністративної будівлі	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.		Василега П.О.				6	88	
Реценз.						СумДУ ЕТ.м-01		
Н. Контр.		Никифоров М.						
Затверд.		Лебединський ІЛ						

3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....	73
3.1 Економічне обґрунтування використання ЧП для електроприводу НС ....	73
3.2 Розрахунок економії при використанні проектованої НС .....	74
4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	78
4.1 Вимоги до безпеки працівників при обслуговуванні електроустановок ...	78
4.2 Охорона праці при виконанні робіт на електродвигунах .....	81
ВИСНОВОК .....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	85
Додаток 1. Схема ЧП-АД в системі підтримання тиску води .....	86
Додаток 2. Імітаційна модель роботи асинхронного частотнорегульованого електроприводу насоса .....	86

					МР 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Водні ресурси являються одними з найбільш важливих чинників, які забезпечують соціально-економічний прогрес у світі. Призначення водних ресурсів - підтримати життєдіяльність всього живого на Землі (людини, рослин та тварин). Вода є основою всього живого та основний постачальник кисню у процесі фотосинтезу. Вода бере участь і в кліматоутворенні - вбираючи тепло з атмосфери, щоб віддати його, тим самим регулює кліматичні процеси. Вода є невід'ємною складовою багатьох сфер суспільства: екологічної, економічної, соціальної. Це означає, що забезпечення населення планети водними ресурсами являється передовою потребою людства.

Водопостачання це технологічний процес, який передбачає забезпечення, забір, підготовку, транспортування та передачу питної води до споживачів.

Водопостачання - це водопідготовка, транспортування та подача питної або технічної води споживачам з використанням централізованих або не централізованих систем холодного водопостачання (холодне водопостачання) або приготування, транспортування та подача гарячої води споживачам з використанням централізованих або нецентралізованих систем гарячого водопостачання (гаряче водопостачання).

Для транспортування води від водоприймальної споруди на територію об'єктів водопостачання та розподілу її між споживачами служать системи подачі та розподілу води (СПРВ). До їх складу входять: насосні станції II підйому, підкачування та регулювання; водоводи та водопровідні мережі на території об'єкта; регулюючі та запасні ємності. Дані системи відносять до найбільш енергоємних об'єктів комунального комплексу, а основними споживачами енергії у них служать насосні станції (НС).

Насосна станція – комплект елементів на базі електронасоса, здатний працювати автоматично: брати воду з джерела, наприклад, у свердловині та подавати її на точки споживання, підтримувати стабільний тиск у водопровідній системі.

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



НС у сучасних системах водопостачання прийнято обладнувати відцентрованими насосами з електричним приводом, контрольно-вимірювальною та регулюючою апаратурою.

Метою даної МР є проектування системи електропостачання та електропривода насосної станції адміністративної будівлі.

Завдання МР – зробити проектування насосної станції 9-ти поверхової адміністративної будівлі та провести розрахунки системи електроприводу за схемою ПЧ-АД.

					МР 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

## 1.1 Загальні відомості про системи міського водопостачання

Система водопостачання – це комплекс інженерних споруд, що призначені для забору води з джерела водопостачання, її очистки, зберігання і подачі до споживачів [1]. В якості споживачів виступають як населені пункти, так і підприємства більшості галузей промисловості.

Системи водопостачання, за видом об'єкту їх обслуговування поділяють на такі групи: міські, селищні, промислові, сільськогосподарські та інші.

Сучасні системи водопостачання населених пунктів є централізованими, оскільки вони забезпечують водою велику групу споживачів. В той час як децентралізовані системи, як правило, застосовують для окремих житлових будівель, або груп будівель та інших локальних споживачів.

Централізована система водопостачання населеного пункту або промислового підприємства повинна забезпечувати прийом води з джерела, її кондиціонування (якщо це необхідно), транспортування і подачу до всіх споживачів під необхідним тиском. З цією метою в систему водопостачання повинні бути включені: водоприймальні споруди, призначені для отримання води з природних джерел; насосні станції, що створюють натиск для передачі води на очисні споруди, в акумулюючі ємності або споживачам; споруди для обробки води; резервуари і водонапірні башти, які є запасними і регулюючими ємностями; водоводи і водорозподільні мережі, призначені для передачі води до місць її розподілу і споживання [2].

Водоводи прокладають не менш, ніж у дві лінії, з'єднані перемичками, що забезпечує безперебійну подачу води. Відстань між окремими лініями повинна бути не менше 5 м при діаметрі труб до 300 мм і 10 м - при трубах більшого діаметру. Магістральні трубопроводи призначені для транспортування основних транзитних мас води. Розподільними трубопроводами подають воду від магістралей до місць споживання. Водопровідні мережі проектують на основі

					MP 3.8.141.222 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Фесенко Б.Р.</i>			Проектування системи електропостачання та електропривода насосної станції адміністративної будівлі	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Василега П.О.</i>					10	88
<i>Реценз.</i>		.				СумДУ ЕТ.м-01		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Никифоров М.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Лебединський ІЛ</i>						

плану забудови населеного пункту. При цьому беруть до уваги конфігурацію населеного пункту, взаємне розташування джерела водопостачання та споживачів, розташування вулиць, кварталів і зосереджених водоспоживачів (заводи, фабрики і т.д.), рельєф місцевості. Мережі прокладають проїздами або узбіччям доріг паралельно до лінії забудови. У повздовжньому профілі трубопроводи повторюють рельєф місцевості на певній постійній глибині. При цьому трубам надається певний нахил не менше 0,001 в напрямку до випуску, що забезпечує вивільнення мережі та випуск з неї повітря. З цією метою в підвищених місцях мережі влаштовують вантузи, а в понижених - випуски. Заглиблення водопровідних труб залежить від глибини промерзання ґрунту, температури води в трубах та режиму її подачі. Трубопровід повинен знаходитись на 0,5 м нижче розрахункової глибини промерзання, але не вище 0,5 м до верху труби, як це вказано на рисунку 1.1.

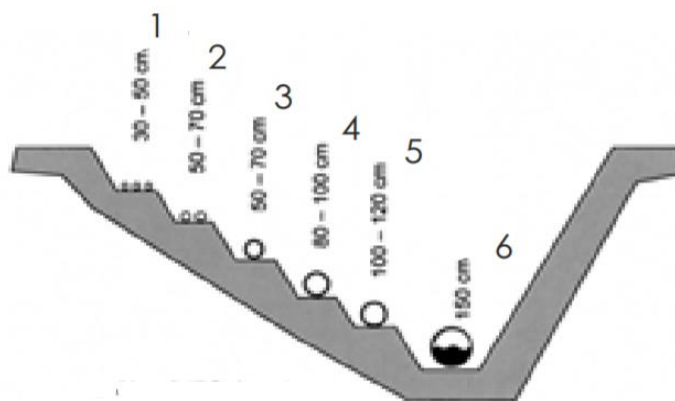


Рисунок 1.1 – Розрахункова глибина: 1- кабелі телебачення; 2- телефонний кабель; 3 – електричний кабель; 4 – газопровід; 5 – водопостачання; 6 – каналізація

Внутрішній водопровід будинку – це система трубопроводів та інженерного обладнання, що забезпечують подачу води всередині будівель до внутрішніх водозабірних пристроїв, пожежних кранів та технологічного обладнання.

Внутрішній водопровід складається з:

- 1) трубопроводів та фасонних деталей для сполучення;
- 2) обладнання (насоси);

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 3) прилади (водоміри, манометри);
- 4) арматура (вентилі, крани та ін.).

За класифікацією внутрішні водопроводи бувають гарячими та холодними. Схеми розподілу внутрішнього водопроводу зображені на рисунку 1.2.

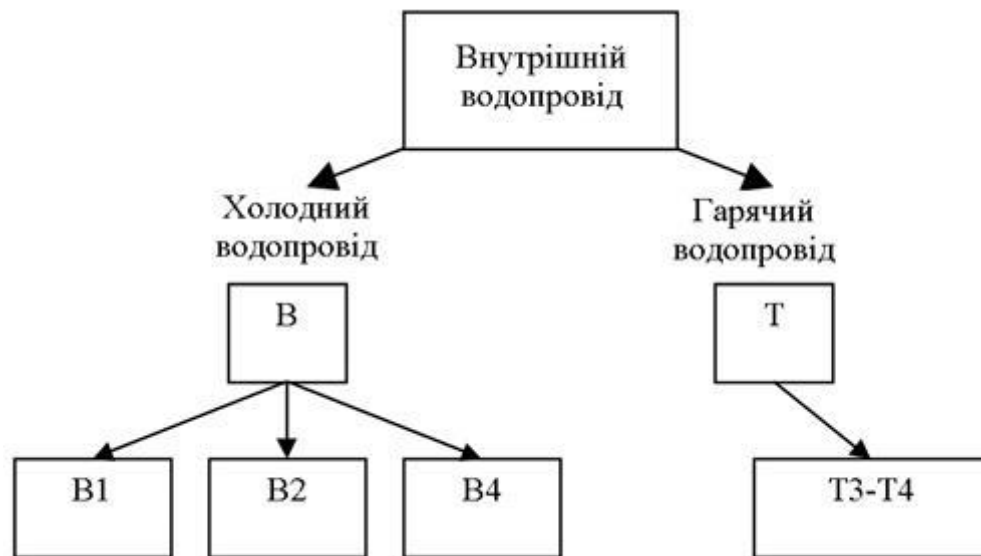


Рисунок 1.2 – Внутрішній водопровід будинку

Холодний водопровід розділяють на такі три види:

- 1) В1 - господарсько-питний водопровід;
- 2) В2 - протипожежний водопровід;
- 3) В3 - виробничий водопровід.

Гарячий водопровід складається з двох труб: Т3 – подаюча, Т4 - циркуляційна.

Схема водопостачання для міст з використанням поверхневих вододжерел показана на рис. 1.3. Вода поступає у водоприймач (оголовок) 1 та по самотічних трубах 2 подається до берегового колодязя 3, а із нього насосною станцією першого підйому (НС-I) до очисних споруд – відстійників 5 та фільтрів 6. Після очищення та знезаражування хлором або іншим засобом вода подається до резервуарів чистої води (РЧВ) 7, від яких забирається насосною станцією другого підйому НС – II і по водоводах 9 на водонапірну башту 10, після чого подається магістральною 11 та розподільчою 12 мережами до споживачів 13.

					МП 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Насосна станція другого підйому будується із урахуванням режиму водоспоживання, який протягом доби нерівномірний. Регулювання нерівномірності роботи насосних станцій першого та другого підйомів досягається за рахунок влаштування РЧВ та водонапірних башт, гідропневмоустановок та гідроколон.

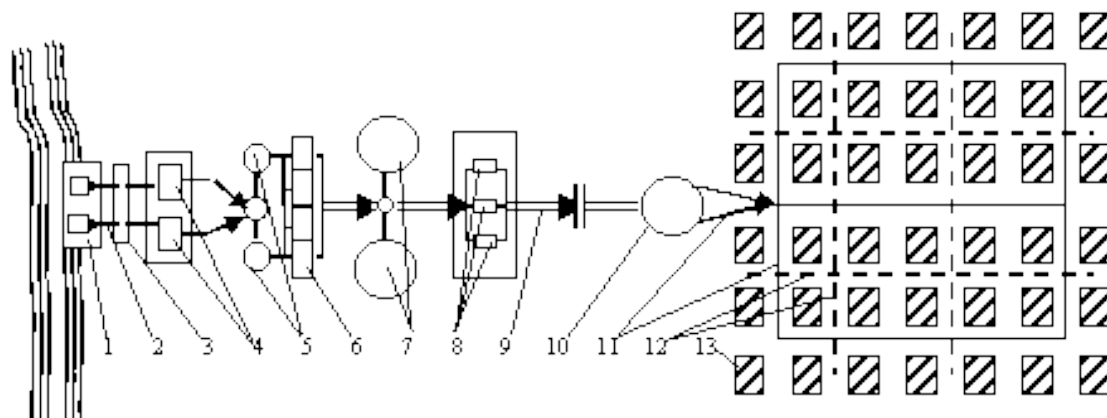


Рисунок 1.3 – Стандартна схема водопостачання населеного пункту:

1- оголовок, 2 – самотічні труби, 3 – береговий колодезь, 4 – насосна станція першого підйому, 5 – відстійники, 6 – фільтри, 7 – резервуари чистої води, 8 – насосна станція другого підйому, 9 – водоводи, 10 – водонапірна башта, 11 – магістральна мережа, 12 – розподільча мережа, 13 – водоспоживачі.

## 1.2 Характеристика насосних станцій

Насосна станція (НС) – це інженерна конструкція яка включає в себе усе необхідне обладнання та устаткування для перекачування рідини.

НС складається з наступних елементів:

- насос;
- електричний двигун;
- гідроаккумулятор;
- блок керування (реле тиску і манометр).

Насосні станції по своєму виконанню і технічним характеристикам поділяються на два класи:

1) побутовий (застосовуються на замських ділянках, в приватних будинках, дачах, котеджах);

2) промисловий (призначений для великих обсягів води і посилених навантажень, вони оснащені ефективними системами охолодження, зазвичай включають в себе дублюючі пристрої, щоб не переривати перекачку води).

Побутові насосні станції служать для водопостачання приватних будинків, наприклад, дачі або котеджу, можуть використовуватися для поливу городів, теплиць і садів, водопостачання фермерських господарств.

Також існують побутові каналізаційні насосні станції, які призначені для збору і відведення стічних вод на локальні очисні споруди.

Побутова насосна станція може мати різні типи насосів:

- самовсмоктувальний (глибина всмоктування до 9 метрів; тягне воду навіть якщо в системі є повітря; дуже шумний);
- багатоступінчастий (глибина всмоктування 8-9 метрів; відзначається високою продуктивністю, малошумний, з більшою кількістю ступенів більша продуктивність);
- вихровий (глибина всмоктування 8 метрів; дуже потужний, але рідина повинна бути чистою, без домішок);
- відцентровий (глибина всмоктування понад 10 метрів; температура води може бути різною, допускаються домішки);
- каналізаційний (застосовується при відсутності самопливу; дуже габаритний, оснащений регуляторами і датчиками; часто включає в себе кілька різних насосів).

Промислові насосні станції відрізняються великою потужністю, підвищеною продуктивністю і міцністю. Вони застосовуються для водопостачання і тепlopостачання різних будівель, великих об'єктів сільського господарства, в установках пожежогасіння і на інших подібних об'єктах.

Основними відмінностями насосних станцій для різних сфер промисловості від побутових установок є:

- 1) більш високі продуктивність, натиск і інші техніко-експлуатаційні показники;
- 2) великі габарити;

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3) одно- і багатонасосні варіанти виконання.

Основне завдання насосної станції водопостачання (рис. 1.4) - підтримка високого тиску води для подачі населенню і промисловим підприємствам. Для стабільного функціонування насосного обладнання водопостачання всі елементи конструкції повинні бути послідовно з'єднані в єдину мережу.

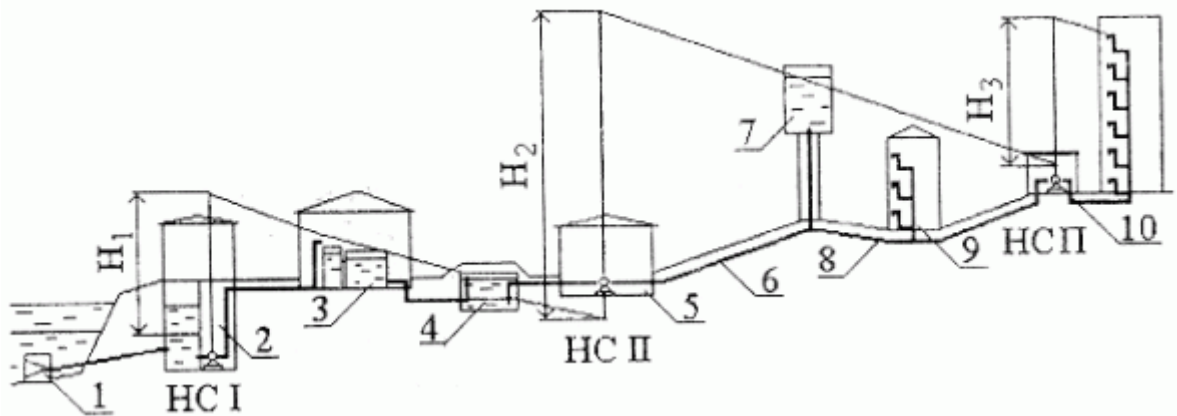


Рисунок 1.4 – багаторівнева схема водопостачання:

1 - насосні установки різного рівня; 2 - насосне обладнання підкачки; 3 - водорозбірна конструкція; 4 - накопичувальні резервуари; 5 - очисні установки; 6 - водонапірна вежа; 7 - водопровідна мережа.

Найважливіша особливість промислових насосних станцій полягає в можливості перекачування рідини в великому обсязі, в зв'язку з чим відбувається серйозне навантаження на систему. Таке навантаження забезпечує безперебійну роботу насосних станцій, яка також досягається завдяки дублюючому обладнанню, а також застосуванню циркуляційних і вакуумних насосів. Своє застосування вакуумні насоси знайшли в різних промислових галузях, які потребують перекачуванні рідини в великих обсягах.

У системах опалення найчастіше застосовують циркуляційні насоси. Найважливішим критерієм при виборі такого насоса вважається його потужність.

									Арк.
									15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МР 3.8.141.222 ПЗ				

Завдяки можливості виконувати швидко заміну деяких елементів насоса, а також високої зносостійкості, вакуумні і циркуляційні насоси є широко поширеними в багатьох видах промисловості.

Циркуляційні установки мають в складі наступні види приладів:

- насоси для перекачки відпрацьованого робочого розчину в охолоджувальний резервуар;
- насоси, що забезпечують подачу води в очисний модуль;
- насоси, що перекачують розчин на обладнання для здійснення технологічного процесу.

Сучасні насосні станції часто контролюються і обслуговуються за допомогою комп'ютера, званого адміністратором насосної станції. Ці комп'ютери мають перевагу, що полягає в тому, що насосна станція може працювати безперервно, без необхідності обслуговувати персонал в будь-який час дня і ночі. Комп'ютери керуючих насосною станцією зазвичай мають зручний інтерфейс, який дозволяє нетехнічному персоналу управляти станцією. Ці комп'ютери зазвичай відстежують багато важливих змінні, які впливають на успішну роботу насосних станцій, такі як тиск рідини і швидкість потоку.

Ці насосні системи, як правило, працюють безшумно і безперебійно, а також вимагають мінімального обслуговування. Привід легко знімається з насосного агрегату в разі заміни, що дозволяє проводити обслуговування з обмеженим порушенням. Багато прориви в композитної конструкції дозволяють перекачувати компоненти, які можуть працювати в екстремальних умовах протягом тривалих періодів часу без збоїв. Замовити обладнання сьогодні можна в режимі онлайн за невисокою ціною. Перш ніж зробити замовлення товару, правильним буде визначитися в потужності відповідної моделі, в залежності від сфери застосування.

Основні фактори, які впливають на вибір НС:

1. Висота напору - на скільки метрів у висоту ваш насос подає воду.

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



2. Потужність двигуна - клас побутових станцій може мати мотор від 0,5 до 2 кВт потужності.
3. Продуктивність - це та кількість літрів води, яке перекачується насосом за годину роботи.
4. Обсяг гідроакумулятора - все залежить від потреб у воді, чим він об'ємніше, тим рідше запускається двигун і насос.
5. Автоматичний захист від перегріву і сухого ходу - це гарантія довгого терміну служби механізмів насоса і електроприводу.
6. Матеріал корпусу, крильчатки насоса, робочого вала - все також впливає на довговічність станції і на якість її роботи. Сталь і чавун краще і надійніше, ніж пластик. А якщо насосна станція недалеко від житлового будинку, то чавун краще - він знижує шум роботи насоса і двигуна. Чавун дуже міцний і солідний металевий сплав, але він швидко іржавіє, тому обов'язково дивіться, чи є протикорозійне покриття на чавуні.

### 1.3 Характеристика 9-ти поверхового будинку цивільного призначення

У розрахунках буде використовуватися будівля з параметрам наведеними у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика будинку

Кількість поверхів	9
Кількість квартир (на поверх)	4
Висота поверху	3,15 м
Висота підвалу	3 м
Товщина перекриття	0,3 м
Кількість споживачів (на квартиру)	3
Відмітка поверхні землі	0,6 м
Натиск водопроводу	20,66
Діаметр труби міського водопроводу	300 мм
Діаметр труби міської каналізації	300 мм
Відстань від червоної лінії до будинку	9 м

Глибина промерзання ґрунту	1,2 м
Кількість приладів водоспоживання у будинку	202 шт.

## 1.4 НС для підкачування води в 9-ти поверховому будинку

Технологічна схема насосної станції підкачування зображена на рис. 1.5. НС забирає воду з мережі водопроводу низького напору  $2,5 \text{ кг/м}^2$  та подає її в мережу високого напору  $6,05 \text{ кг/м}^2$ .

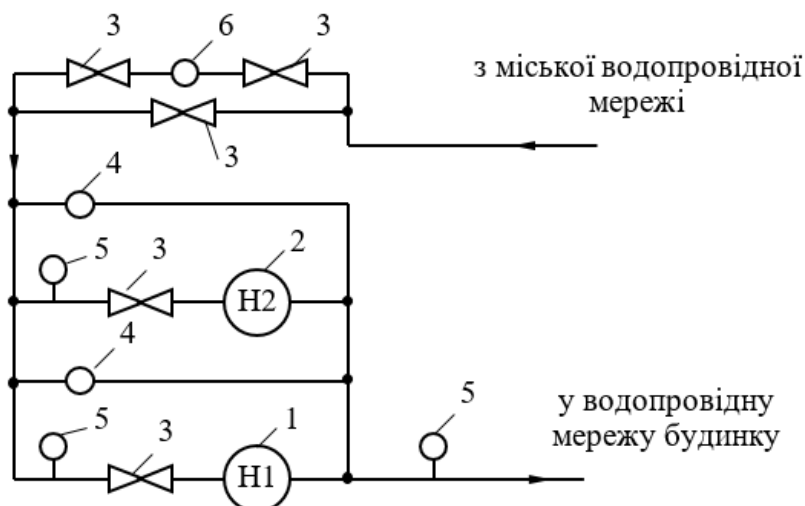


Рисунок 1.5 – Технологічна схема НС:

- 1 - головний насос; 2 - резервний насос; 3 - заслонка;  
4 - зворотний клапан; 5 - манометр; 6 - водомір

Для даної схеми застосовуються два відцентрових насоси консольного типу у комплекті з асинхронними двигунами. Транспортування води з міської мережі до будинку відбувається по двом трубам діаметром 100 мм. Схема перемикавання тут – колекторна. Високонатискний та низьконатискний колектри розміщені у приміщенні НС. Усі трубопроводи усередині станції розташовані вище рівня підлоги.

Відцентровий насос - це гідравлічний динамічний механізм, що складається з:

- 1) спіралеподібного металевого корпусу;

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

2) робочого колеса з лопатями, зібраного з двох дисків (зовнішні кінці лопатей крильчатки виконані загнутими, в протилежну сторону від напрямку її руху).

Принцип роботи: коли корпус помпи заповнюється рідиною, через всмоктуючий патрубок починає обертання колесо-крильчатка, створюючи відцентрову силу, відштовхуючу рідину від центру колеса на периферію. Тут виникає зона підвищеного тиску, що виштовхує рідину в натискну трубу. У той же час, в центральній зоні тиск знижується, забезпечуючи надходження нової порції рідини з всмоктуючої труби. Такий принцип дії насоса забезпечує постійний приплив, що транспортується.

Внутрішні трубопроводи виконані із сталевих труб, з'єднаних за допомогою зварювання. Діаметри труб всередині НС дещо менший, ніж для зовнішніх водоводів, так як від розмірів труб залежать розміри і вартість будівлі насосної станції.

У якості трубопровідної арматури використовуються засувки, затвори, зворотні затвори (клапани). Засувки на автоматичному та дистанційному керуванні, а також з великим діаметром обладнують електричними або гідравлічними приводами.

Затвори застосовуються як регулююча та запірна арматура. В свою чергу дискові затвори обладнані електричними приводами.

### 1.5 Характеристика насосних агрегатів

Для розглянутої схеми НС застосовується відцентровий насос консольного типу К20/30, технічні характеристики якого наведені в таблиці 1.2.

Розшифровка позначення насоса К20/30:

К - тип насоса, консольний;

20 - продуктивність, м<sup>3</sup>/год;

30 – натиск, м.

						MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			19

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики насоса К20/30

Марка насоса	Подача Q, м <sup>3</sup> /год	Напіск Н, м	Потужність Р, кВт	К-ть обертів N, об/хв	Потужність насоса, Р <sub>н</sub> , кВт	ККД η, %	Кавітаційний запас, м	Витік	Робоче колесо		
									Ø, мм	Обертання	К-ть лопаток N,
К20/30	20	30	4	3000	2,7	64	≤3,8	≤2	161	Л	6
			5,5								

Насос консольний типу К20/30 (зовнішній вигляд зображений на рис. 1.6) являє собою горизонтальний одноступінчатий, відцентровий насос, з горизонтальним підведенням рідини по осі і відведенням вертикально вгору. Широко застосовується для перекачування в стаціонарних умовах води (за винятком морської), а також різних невибухонебезпечних рідин, схожих з водою по щільності, фізико-хімічними властивості, з водневим показником рН від 6 до 9, і містять тверді включення розміром до 0,2 мм, об'ємна концентрація яких не перевищує 0,1%.

Насоси перекачують воду температурою від 0 до 85 ° С.

Матеріал проточної частини насосів К20/30 - чавун.

Ущільнення валу насоса - сальникове.

Кліматичне виконання - "У" (для районів з помірним кліматом).

Привід насоса К20 здійснюють асинхронні електродвигуни через пружну муфту.

											Арк.
											20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP 3.8.141.222 ПЗ						

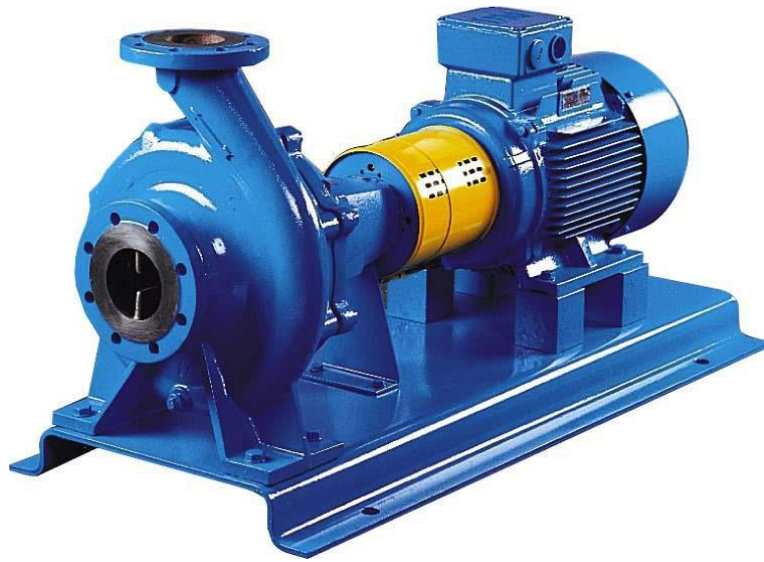


Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд насоса К20/30

Подача « $Q$ » - це кількість рідини, яка подається насосом в одиницю часу і вимірюється в  $\text{м}^3/\text{год}$  (кубічних метрах на годину) або л/с, (літрах в секунду). Вона може бути об'ємною ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) - вимірюють в одиницях об'єму і масовою  $M$  (кг/с) - маса рідини (газу), що подається машиною за одиницю часу.

Між масовою та об'ємною подачею є взаємозв'язок;

$$Q = \rho M, \quad (1.1)$$

де  $\rho$  – густина рідини, що перекачується,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Натиск « $H$ » - це питома механічна робота, що передається насосом перекачується рідини і вимірюється в метрах водяного стовпа (м). Натиск являє собою висоту  $H$  стовпа рідини або газу, врівноважує тиск  $p$ , де  $p$  - Зв'язок між натиском  $H$  (м) і тиском  $p$  (Па) наступна:

$$H = \frac{p}{\rho \cdot Q}, \quad (1.2)$$

де  $\rho$  – густина середовища,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$Q$  – об'ємна подача,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

ККД « $\eta$ » будь-якого механізму є відношенням корисної потужності до потужності, підведеної на вал насоса  $N$ :

					МП 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

$$\eta = \frac{N_{\Pi}}{N_{\text{в}}} \quad (1.3)$$

З іншого боку, коефіцієнт корисної дії насоса дорівнює:

$$\eta = \eta_0 \cdot \eta_r \cdot \eta_{\text{мех}}, \quad (1.4)$$

де  $\eta_0$  - об'ємний ККД насоса, враховує витік рідини через нещільності і сальники;

$\eta_r$  - гідравлічний ККД, враховує втрати напору на подолання сил тертя при русі рідини в проточній частині насоса;

$\eta_{\text{мех}}$  - механічний ККД, враховує втрати напору на подолання сил тертя в підшипниках і ущільненнях вала при його обертанні.

Основні параметри лопатевих насосів такі як подача  $Q$ , натиск  $H$ , потужність  $N$ , коефіцієнт корисної дії  $\eta$  та частота обертання вала робочого колеса  $n$  перебувають у певній залежності.

Натискна характеристика відцентрового насоса, нерегульованого по швидкості, описується таким рівнянням:

$$H = H_0 - R_{\text{в}} \cdot Q^2, \quad (1.5)$$

де  $H$  – натиск, який розвиває насос;

$H_0$  – натиск насоса при нульовій подачі;

$R_{\text{в}}$  – внутрішній опір насоса;

$Q$  – продуктивність, яку розвиває насос.

Натискна характеристика регульованого по швидкості насоса:

$$H = H_0 \cdot v^2 - R_{\text{в}} \cdot Q^2, \quad (1.6)$$

де  $v^2 = \frac{\omega}{\omega_0}$  - відносна швидкість обертання насоса;

$\omega$  - поточна швидкість насоса;

$\omega_0$  - швидкість ідеального холостого ходу.

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робоча характеристика (рис. 1.7) - це крива яка виражає залежність між витратами і напором насоса, в межах якої рекомендується його експлуатувати. ККД насосів різного призначення може коливатися в дуже широких межах. Так для насосів з вологим ротором ККД змінюється від 5% до 54%, а для високоефективних сухим ротором він змінюється в межах від 30% до 80%.

Розрахунок необхідної споживаної потужності проводиться за такою формулою:

$$M = \rho \cdot g \cdot s \cdot N, \quad (1.7)$$

де  $M$  - необхідна споживана потужність;

$\rho$  - густина рідини, що перекачується;

$g$  - величина прискорення вільного падіння;

$s$  - необхідний обсяг витрат рідини;

$N$  - висота напору.

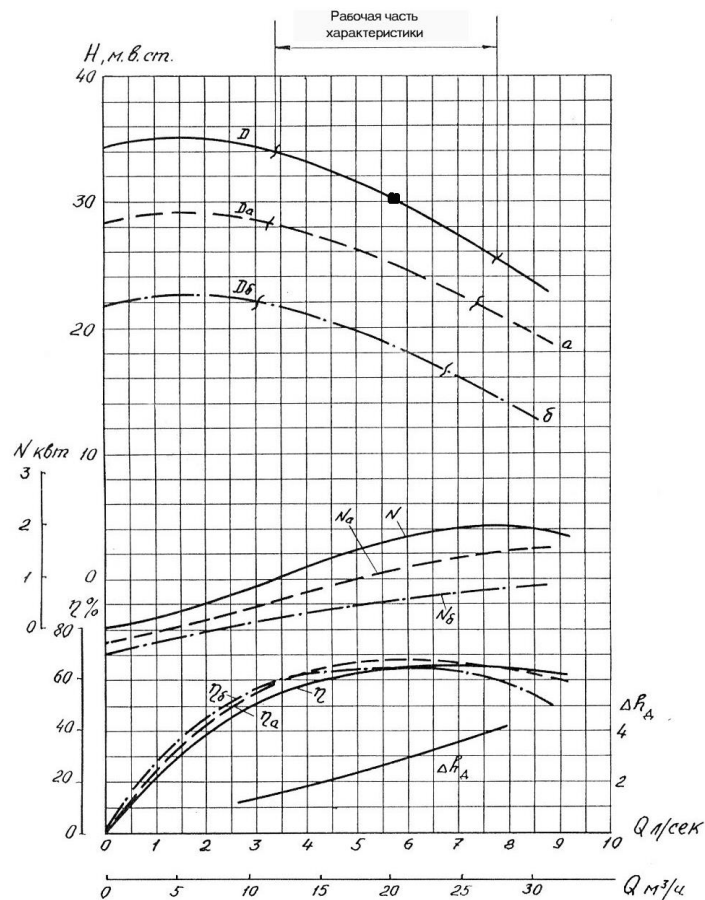


Рисунок 1.7 – Робоча характеристика насоса К20/30

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Максимальна висота всмоктування рідини розраховується за формулою:

$$N_v = \frac{(h_1 - h_2)}{(\rho \cdot g)} - s_p - \frac{q_2}{(2 \cdot g)} - k \cdot N, \quad (1.8)$$

де  $N_v$  - висота всмоктування рідини;

$h_1$  - тиск в ємності забору;

$h_2$  - тиск рідини на лопатки крильчатки;

$\rho$  - щільність рідини, яка перекачується;

$g$  - прискорення вільного падіння;

$s_p$  - кількість втрат у вхідному трубопроводі при гідравлічному опорі;

$\frac{q_2}{(2 \cdot g)}$  - напір рідини у всмоктувальній магістралі;

$k \cdot N$  - втрати, що залежать від додаткового опору;

$k$  - коефіцієнт кавітації;

$N$  - створюваний насосом натиск.

#### 1.6 Розрахунок потужності двигуна насосного агрегату

Розрахуємо потужність яку споживає насосний агрегат за формулою:

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot k_3}{102 \cdot \eta_n}, \quad (1.9)$$

де  $Q$  - подача насосу, м<sup>3</sup>/с;

$H$  - сумарний напір, м;

$\rho$  - густина рідини, що перекачується, кг/м<sup>3</sup>;

$k_3$  - коефіцієнт запасу (для двигунів потужністю до 50 кВт =1,2);

$\eta_n$  - ККД насосу.

$$P = \frac{0,00555 \cdot 36 \cdot 1000 \cdot 1,2}{102 \cdot 0,64} = 3,67 \text{ кВт} \quad (1.10)$$

З каталогу [4] обираємо двигун – W22-112М 2 В3Т 4,0. Асинхронні двигуни лінійки W22 загальнопромислового призначення мають високий ККД, що перевищує значення, які вимагаються згідно до класу EFF1. Двигуни лінії W22 виробляються з використанням високоякісного чавуну, що забезпечує максимальну зносостійкість і високу продуктивність в агресивних середовищах.

						MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
							24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



Система ізоляції WISE збільшує діелектричний опір обмоток, дозволяючи використовувати двигун з ПЧ до 575В без додаткових модифікацій, забезпечуючи експлуатаційну гнучкість і збільшений термін служби.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики електродвигуна W22-112М 2 В3Т 4,0

Параметр	Умовне позначення	Значення
Серія	W22	-
Типорозмір	112М	-
Потужність	$P_{\text{НОМ}}$	4 кВт
Ковзання	S	4,17 %
ККД	$\eta_{\text{НОМ}}$	84,8%
Синхронна частота обертання	$\eta_c$	3000 об/хв
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$	0,87
Номінальний струм	$I_{\text{НОМ}}$	8,24 А
Пусковий струм	$I_{\text{ПУСК}}$	55,9 А
Кратність пускового струму	$K_i = \frac{I_{\text{ПУСК}}}{I_{\text{НОМ}}}$	6,8
Номінальний момент	$M_{\text{НОМ}}$	13,3 Нм
Кратність пускового моменту	$K_{\text{П}} = \frac{M_{\text{ПУСК}}}{M_{\text{НОМ}}}$	240%
Кратність максимального моменту	$K_{\text{М}} = \frac{M_{\text{МАКС}}}{M_{\text{НОМ}}}$	300%
Число полюсів	p	2
Частота мережі	f	50 Гц

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР 3.8.141.222 ПЗ

Арк.

25

Число фаз двигуна	m	3
Інерційний момент	J	0,00809 кг · м <sup>2</sup>



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд електродвигуна W22-112M 2 V3T 4,0

### 1.7 Розрахунок електричних навантажень НС

Визначення електричних навантажень є першим визначальним етапом проектування системи електропостачання. Опираючись на значення електричних навантажень проводиться вибір та перевірка електричного обладнання системи електропостачання, визначаються втрати потужності та електроенергії.

При проектуванні систем електропостачання застосовують різні методи визначення електричних навантажень, це методи розрахунку [13]:

- встановленої потужності та коефіцієнту попиту;
- середньої потужності та відхилення розрахункового навантаження від середнього (статистичний метод);

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP 3.8.141.222 ПЗ				

- середньої потужності та коефіцієнту максимуму (метод упорядкованих діаграм);
- середньої потужності та коефіцієнту форми графіка навантажень.
- питомої витрати електроенергії на одиницю продукції, що випускається при заданому обсязі випуску продукції за певний період часу;
- питома навантаження на одиницю виробничої площі та ін.

Установлена потужність електричного приймача для режиму S1 приймається рівній паспортній потужності електродвигуна, який застосовується для проекрованої системи:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{пасп}}, \quad (1.11)$$

де  $P_{\text{пасп}}$  – номінальна потужність на валу ЕД.

Груповий коефіцієнт використання ЕП в групі знаходиться за формулою:

$$K_{\text{в.гр}} = \frac{\sum K_{\text{в}} P_{\text{ном}}}{\sum P_{\text{ном}}}, \quad (1.12)$$

де  $K_{\text{в}}$  – коефіцієнт використання ЕП в групі;

$P_{\text{ном}}$  – номінальна потужність ЕП в групі.

Ефективне число активних електроприймачів знаходиться за виразом:

$$n_e = \frac{(\sum P_{\text{ном}})^2}{\sum n p_{\text{ном}}^2}, \quad (1.13)$$

де

$P_{\text{ном}}$  – номінальна потужність ЕП в групі;

$N$  – кількість ЕП в групі;

$p_{\text{ном}}$  – номінальна потужність окремого ЕП.

Розрахункове навантаження ЕП визначаємо за формулами:

$$P_p = K_c \cdot P_{\text{ном}} = 0,92 \cdot 4 = 3,68 \text{ кВт}, \quad (1.14)$$

$$Q_p = P_p \cdot \text{tg} \varphi = 3,68 \cdot 0,57 = 2,1 \text{ кВт}, \quad (1.15)$$

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_p = K_{p,m} \cdot \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = 0,9 \cdot \sqrt{3,68^2 + 2,1^2} = 3,81 \text{ кВт}, \quad (1.16)$$

де  $tg\varphi$  – знаходиться зі значення  $cos\varphi$  ЕП;

$P_p$  – розрахункова активна потужність;

$Q_p$  – розрахункова реактивна потужність;

$K_{p,m}$  – коефіцієнт рівномірності максимумів навантажень окремих груп електроприймачів (наближено приймаємо рівним 0,9).

### 1.8 Навантаження електричного освітлення приміщення НС

Проектована НС розташована у підвальному приміщенні 9-ти поверхового будинку. Приміщення має розміри 6×4 м з висотою до стелі 3 м, джерелами світла являються лампи типу ДРЛ.

Розрахункове навантаження електричного освітлення приміщення НС визначається методом коефіцієнта попиту.

Розрахуємо встановлене навантаження освітлення приміщення за формулою:

$$P_{уст.0} = k \cdot p_{п.о} \cdot F \cdot 10^{-3} = 1,1 \cdot 15 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,4 \text{ кВт}, \quad (1.17)$$

де  $k$  – коефіцієнт потужності пускових приладів залежно від джерела світла (для ламп ДРЛ  $k = 1,1$ );

$p_{п.о}$  – питома встановлена потужність загального освітлення (для ламп ДРЛ  $p_{п.о} = 15 \text{ Вт/м}^2$ );

$F$  – площа освітлення.

Виконаємо розрахунок активного навантаження освітлення приміщення НС за формулою:

$$P_{p.о} = K_{п.о} \cdot P_{уст.0} = 1 \cdot 0,4 = 0,4 \text{ кВт}, \quad (1.18)$$

де  $K_{п.о}$  – коефіцієнт попиту загального освітлення.

Виконаємо розрахунок реактивного навантаження освітлення приміщення НС за формулою:

$$Q_{p.о} = P_{p.о} \cdot tg\varphi_0 = 0,4 \cdot 0,73 = 0,29 \text{ кВАр}, \quad (1.19)$$

					МР 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $tg\varphi_0$  – відповідає значенню  $cos\varphi_0$  залежно від типу ламп (для ДРЛ  $cos\varphi_0 = 0,5$ , отже  $tg\varphi_0 = 1,73$ ).

Тоді розрахункове повне навантаження загального освітлення приміщення НС буде:

$$S_{p.o} = \sqrt{P_{p.o}^2 + Q_{p.o}^2} = \sqrt{0,4^2 + 0,29^2} = 1,04 \text{ кВА}, \quad (1.20)$$

Визначимо розрахунковий струм загального освітлення приміщення НС за формулою:

$$I_{p.o} = \frac{S_{p.o}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1,04}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 1,58 \text{ А} \quad (1.21)$$

### 1.9 Розрахунок та вибір трансформатора

Робоча потужність трансформатора на соної станції визначається за формулою:

$$S = k_c \cdot \sum \left( \frac{P_{ном}}{\eta_{дв}} \cdot cos\varphi \right) + (S_0), \quad (1.22)$$

де  $k_c$  – коефіцієнт спросу по потужності ( $k_c = 1$ );

$P_{ном}$  – номінальна паспортна потужність електродвигуна робочого насосу;

$\eta_{дв}$  – ККД електродвигуна;

$cos\varphi$  – коефіцієнт потужності електродвигуна;

$S_0$  – споживана потужність опалювальних та освітлювальних приборів (приймаємо рівною 25 кВА).

$$S = \frac{1 \cdot 4}{0,84 \cdot 0,87} + 25 = 30,47 \text{ кВА} \quad (1.23)$$

Для трансформації напруги змінного струму було обрано 2 трансформатора ТМ-40-6-0,4: робочий та резервний. Включення та виключення трансформаторів проводяться через масляні вимикачі.

### 1.10 Розрахунок комплектуючих пристроїв для перетворювача частоти

#### 1.10.1 Розрахунок інвертора напруги

Знайдемо максимальний струм через ключі інвертора з наступного виразу:

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{c \max} = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}}} = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}}} = 18,17 \text{ А} \quad (1.24)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт допустимого короткочасного перевантаження по струму (1,2 ÷ 1,5);

$k_2$  – коефіцієнт допустимії миттєвої пульсації струму (1,1 ÷ 1,2);

$U_{\text{л}}$  – лінійна напруга двигуна.

Далі визначимо живлячу напругу інвертора від випрямляча за формулою:

$$U_d = k_{\text{с.н.}} \cdot U_{\text{л}} = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В}, \quad (1.25)$$

де  $k_{\text{с.н.}}$  – коефіцієнт схеми для номінального навантаження.

Розрахуємо зворотню напругу IGBT модуля. Її необхідно робити з запасом та враховувати максимальне відхилення напруги у 15% від живлячої напруги інвертора.

$$U_{\text{зв}} = k_3 \cdot k_{\text{відх}} \cdot U_d = 2 \cdot 1,15 \cdot 513 = 1180 \text{ В} \quad (1.26)$$

Вибір модуля проводиться відповідно до наступних умов:

$$I_c \geq I_{c \max};$$

$$U_{\text{к.е}} \geq U_{\text{зв}}.$$

Обираємо модуль IXGA20N120A3 з робочою напругою 20А та максимальною напругою пробою колектор-емітор 1200 В, що відповідає наведеним вище вимогам.

Розрахуємо максимальну амплітуду струму на вході інвертора:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{c \max}}{k_1} = \frac{18,17}{1,2} = 15,14 \text{ А}, \quad (1.27)$$

Визначимо втрати IGBT в режимі провідності:

$$\begin{aligned} P_{\text{ss}} &= I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{с.е(sat)}} \left( \frac{1}{8} + \frac{D \cdot \cos\theta}{3 \cdot \pi} \right) = \\ &= 15,14 \cdot 2,3 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{0,95 \cdot 0,87}{3 \cdot 3,14} \right) = 7,4 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (1.28)$$

де  $D$  – скважність;

$\cos\theta \approx \cos\varphi$  – коефіцієнт потужності.

						MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
							30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Втрати IGBT при комутації:

Визначивши втрати IGBT в режимі провідності та при комутації,

$$P_{sw} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{(I_{cp} \cdot U_{cc}) \cdot (t_{con} + t_{coff}) \cdot f_{sw}}{2} = 1,66 \text{ Вт} \quad (1.29)$$

розрахуємо сумарні втрати за наступним виразом:

$$P_Q = P_{sw} + P_{ss} = 1,66 + 7,4 = 9,075 \text{ Вт} \quad (1.30)$$

Втрати діода в привідному стані знаходимо за формулою:

$$P_{DS} = I_{ep} \cdot U_e \cdot \left( \frac{D \cdot \cos\theta}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{8} \right) = 1,13 \text{ Вт} \quad (1.31)$$

де  $I_{ep} \approx I_{cp}$  – максимальна амплітуда струму через діод.

Виконаємо розрахунок втрат при відновленні запираючих властивостей за формулою:

$$P_{DR} = \frac{1}{8} (I_{rr} \cdot U_{cc} \cdot t_{rr} \cdot f_{sw}) = 0,052 \text{ Вт} \quad (1.32)$$

Знаючи значення втрат діода в привідному стані, втрат діода при відновленні запираючих властивостей та сумарні втрати IGBT можемо провести розрахунок сумарних втрат діода:

$$P_D = P_{DR} + P_{DS} = 0,052 + 1,13 = 1,18 \text{ Вт} \quad (1.33)$$

$$P_T = P_D + P_Q = 9,075 + 1,18 = 10,25 \text{ Вт} \quad (1.34)$$

### 1.10.2 Розрахунок випрямляча струму

Розрахуємо максимальне значення середнього випрямленого струму з наступного виразу:

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{3} \cdot \left( \frac{I_{c \max}}{\sqrt{2}} \right) \cdot U_L \cdot \cos\varphi + n \cdot P_T}{U_d} = 16,6 \text{ А} \quad (1.35)$$

де  $n$  – кількість пар транзистор/діод в інверторі.

Максимальний робочий струм діода знаходимо за формулою:

$$I_{vm} = k_{cc} \cdot I_{dm} = 1,045 \cdot 16,6 = 17,35 \text{ А} \quad (1.36)$$

де  $k_{cc}$  – коефіцієнт для мостової 3-фазної схеми.

						Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP 3.8.141.222 ПЗ	

Проведемо розрахунок максимальної зворотної напруги діода:

$$\begin{aligned} U_{vm} &= k_{з.н} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{л} \cdot k_{с.н} \cdot k_c + \Delta U_n = \\ &= 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,1 + 130 = 810 \text{ В} \end{aligned} \quad (1.37)$$

де  $k_{з.н}$  – коефіцієнт запасу по нарузі ( $\geq 1,15$ );

$k_{с.н}$  – коефіцієнт допустимого підвищення напруги ( $\geq 1,1$ );

$\Delta U_n$  – запас на комутаційні викиди напруги у ланці постійного струму (100÷150 В).

Вибір модуля випрямляча проводиться відповідно до умови:

$$I_{пр} > I_{vm}.$$

Обираємо 3-фазний мостовий випрямляч Vishay VS-26MT10 з номінальним робочим струмом діода 25А, що задовольняє заданій умові.

### 1.11 Вибір перетворювального пристрою для системи регульованого електроприводу

Частотно-регульований електропривод забезпечує: плавний запуск; тривалу роботу в заданому діапазоні зміни швидкості та навантаження; реверсування, гальмування та зупинка; захист електричного та механічного обладнання від аварійних режимів.

Частотно-регульований електропривод є не лише пристроєм економічного перетворення електричної енергії на механічну, а й ефективним засобом управління технологічним процесом, у тому числі у замкнених системах автоматичного керування у складі різних АСК ТП.

Ефективність застосування частотно-регульованих електроприводів обумовлена:

- високими енергетичними показниками;
- гнучкою настройкою програмними засобами параметрів та режимів роботи електроприводу;
- розвиненим інтерфейсом та пристосованістю до різних систем управління та автоматизації, у тому числі високого рівня;

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



- простотою та зручністю управління та обслуговування в експлуатації;
- високою якістю статичних та динамічних характеристик, що забезпечують високу продуктивність керованих машин.

При регулюванні швидкості електроприводу частота та напруга на виході ПЧ змінюється взаємопов'язано відповідно до необхідного співвідношення. Змінюючи частоту, можна плавно в межах регулювати частоту обертання ротора двигуна. При цьому ковзання асинхронного двигуна в процесі регулювання при заданому значенні навантаження змінюється незначно, а, отже, втрати в ланцюзі ротора, пропорційні ковзанню, також незначно змінюються, що забезпечує енергозбереження.

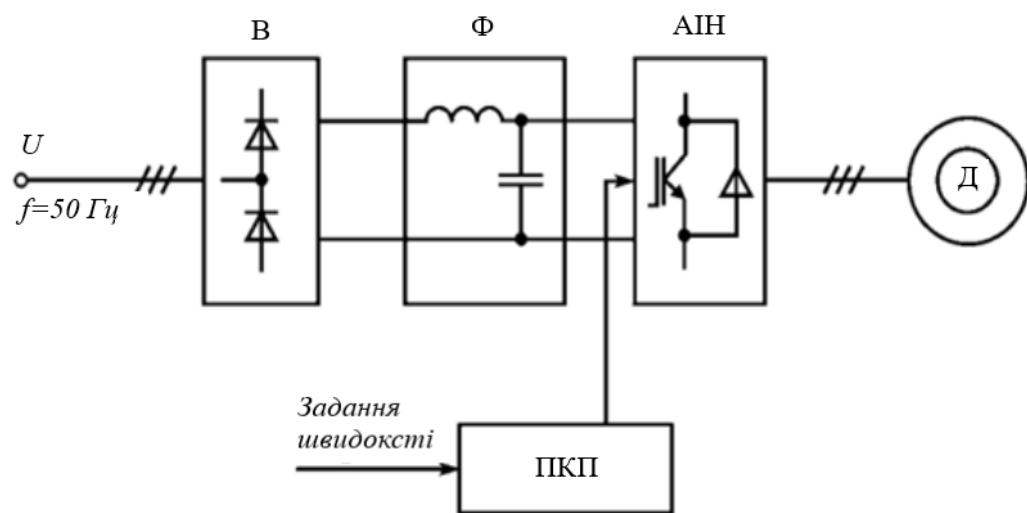


Рисунок 1.9 – Частотно-регульований електропривод з асинхронним двигуном

На схемі рис.1.9 застосовуються такі позначення:

В – випрямляч;

Ф – фільтр;

АІН – автономний IGBT-інвертор напруги;

ПКП – пристрій керування перетворювачем частоти;

Д – двигун.

Користуючись умовою  $I_{\text{ном пч}} \geq I_{\text{ном дв}}$ , обираємо перетворювач частоти Hitachi NES1-040HBE з напругою живлення 3x380В і вихідною напругою

						MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			33

3x380В (ШІМ). Для трифазного асинхронного мотора потужністю 4кВт з напругою живлення 3x380В і номінальним струмом до 9,2А.

Умова  $9,2 \geq 8,22$  виконується, отже ПЧ обраний правильно.

### 1.12 Розрахунок та вибір контакторів і автомату захисту

Відповідно до значень номінального струму та потужності було обрано контактор фірми General Electric серії M MC1A301ATN 4,0 кВт з такими технічними характеристиками:

- 1) номінальний струм: 20 А;
- 2) кількість полюсів: 3;
- 3) робоча напруга: 50 Гц;
- 4) потужність: 4 кВт;
- 5) діапазон температури експлуатації:  $-40 \dots +55$  °С;
- 6) номінальна напруга катушки: 220 В;
- 7) номінальна робоча напруга: 380 В.

Обираємо автоматичний вимикач, який призначений для захисту дротів, кабелів та електроприладів від короткого замикання та перевантаження.

Струм розчеплення автомата повинен перевищувати номінальний струм ЕД:  $I_{розч} \geq 8,22$  А.

Відповідно до наведеної умови обираємо автоматичний вимикач HAGER 10А.

Проведемо перевірку обраного автомата на можливість спрацювання при пуску двигуна:

$$I_{пуск,д} = I_{ном,д} \cdot K_i = 8,22 \cdot 6,8 = 55,9 \text{ А} \quad (1.38)$$

Визначимо струм спрацювання автоматичного вимикача при пуску двигуна:

$$I_{сп,р} \geq 1,25 \cdot I_{пуск,д} = 1,25 \cdot 55,9 = 69,87 \text{ А} \quad (1.39)$$

Визначимо струм спрацювання автоматичного вимикача за каталогом:

$$I_{сп,к} = I_{ном,д} \cdot 10 = 8,22 \cdot 10 = 82,2 \text{ А} \quad (1.40)$$

Відповідно до умови:

					МП 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{\text{сп.р}} \leq I_{\text{сп.к}}$$

$69,87 \leq 82,2$  , отже при пуску двигуна автоматичний вимикач не відключиться, що означає відсутність хибних спрацювань.

### 1.13 Вибір кабелів для НС

На вибір перерізу дротів та жил кабелів впливають ряд економічних та технічних факторів. До технічних факторів належать:

- нагрівання від тривалого виділення тепла робочим (розрахунковим) струмом;
- нагрівання від короткочасного виділення тепла струмом КЗ;
- втрати (падіння) напруги в жилах кабелів або проводах повітряних ліній від струму, що проходить по них, в нормальному і аварійному режимах;
- механічна міцність;
- коронування - фактор, що залежить від застосовуваної напруги, перерізу дроту та навколишнього середовища.

З'єднання обладнання в шафах виконується дротом марки ПВ-1. Даний тип дроту має однодротову та багатодротову мідну жилу з полівініл хлоридною ізоляцією.

Для підключення перетворювача частоти та контакторів обираємо дріт з однодротовою жилою перерізом  $2,5 \text{ мм}^2$ .

Для живлення перетворювачів частоти та насосів з електродвигунами обираємо кабель відповідно до умови  $I_{\text{каб}} \geq I_{\text{доп}}$ . Для заданої умови обираємо кабель ВВГнг 4х1,5.

### 1.14 Розрахунок параметрів електроприводу НС

#### 1.14.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна за каталожними даними

Для розрахунку параметрів двигуна за каталожними даними скористаємося методиками, викладеними в [5] та [6].

					МП 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для розрахунків статичних і динамічних характеристик асинхронного двигуна знайдемо параметри схем заміщення. Т – подібна та Г-подібна схеми заміщення асинхронного двигуна для однієї фази приведені на рисунку 1.10.

Для дослідження установлених режимів і перехідних процесів зручніше Г-подібна схема заміщення АД, оскільки має два включених паралельно контури - намагнічуючий і робочий. Однак в цьому випадку необхідно визначати додатковий параметр, а саме коефіцієнт приведення  $C_1$  Т-подібної схеми до Г-подібної схеми заміщення, величина якого в загальному випадку є комплексною величиною [7].

$$C_1 = 1 + \frac{r_1 + jx_{\sigma 1}}{r_{\mu} + jx_{\mu}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_{\mu}} = c_1 \cdot e^{j\Delta_c} \quad (1.41)$$

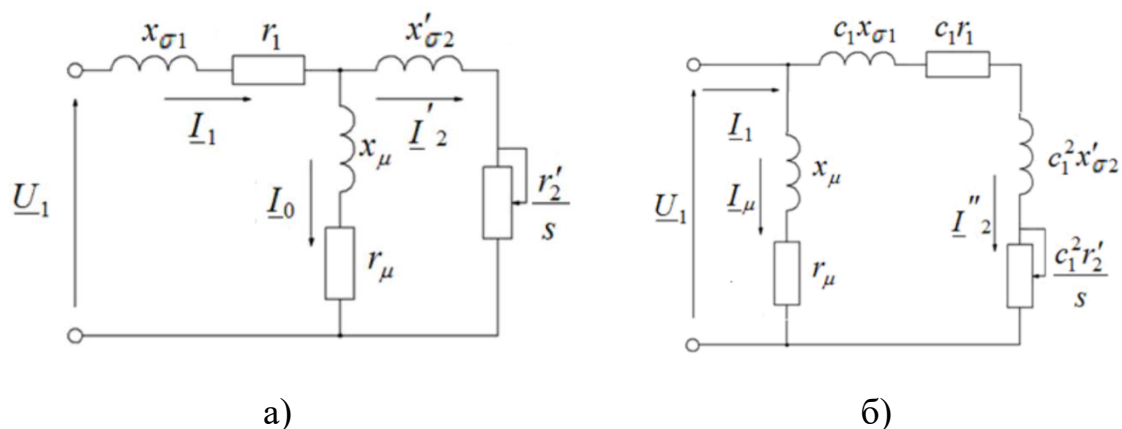


Рисунок 1.10 – Т-подібна (а) та Г-подібна (б) схеми заміщення асинхронного двигуна

$r_1, x_{\sigma 1}$  - активний та індуктивний опори розсіювання обмотки статора;  
 $r'_2, x'_{\sigma 2}$  - приведені до обмотки статора активний та індуктивний опори розсіювання роторної обмотки;

$I_1$  – струм обмотки статора;

$I'_2$  – струм обмотки ротора;

$r_{\mu}, x_{\mu}$  – активний та індуктивний опори намагнічуючого контуру.

Для характеристики режимів роботи асинхронного двигуна, одними з найбільш важливих параметрів виступають номінальні значення приведенного струму ротора  $I'_{2H}$  та струму намагнічування  $I'_{0H}$ . Беручи до уваги, що магнітний потік майже не змінюється при переході від ідеального холостого ходу (ковзання  $s=0$ ) до номінального режиму ( $s=s_H$ ), в такому випадку доцільно буде прийняти  $I'_{0H}$  рівним струму холостого ходу  $I'_{0x}$ , що вимірюється при роботі двигуна без навантаження на валу.

В машинах потужністю вище декількох кіловат  $\Delta_c < 1^\circ$ , тому  $C_1 \cong c_1$  [8]. Тоді з урахуванням очевидних для  $\Gamma$ -подібної схеми заміщення АД співвідношень  $U_1 = z_\mu I_0$ ;  $U_1 = z_K I_n = K_1 z_K I_{\text{НОМ}}$ ;  $z_1 \cong 0,5 \cdot z_K$ , а також значення номінального струму обмотки статора

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 84,8 \cdot 0,87} = 8,24 \quad (1.42)$$

можна записати

$$c_1 = 1 + \frac{z_K}{2 \cdot z_\mu} \cong 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_{ni} \cdot I_{1\text{НОМ}}} = 1 + \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}}}{2 \cdot K_1 \cdot P_{\text{НОМ}}} \cdot I_0 \quad (1.43)$$

$$= 1,89$$

де  $z_K = \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2}$  – повний опір робочого контуру АД при ковзанні  $s=1$ , тобто при короткому замиканні;

$K_1$  – відношення струмів  $I_n/I_H$ ;

$I_0$  – струм ідеального холостого ходу АД при  $s=0$ .

Струм статора можна представити у вигляді геометричної суми намагнічуючого та струму ротора. В такому випадку при номінальному режимі:

$$I_{1\text{НОМ}} = \sqrt{(I_{0\text{НОМ}} + \sin\varphi_{0\text{НОМ}} + I'_{2\text{НОМ}} \sin\varphi'_{\text{НОМ}})^2 + (I_{0\text{НОМ}} + \cos\varphi_{0\text{НОМ}} + I'_{2\text{НОМ}} \cos\varphi'_{\text{НОМ}})^2} \quad (1.44)$$

або без обліку активних втрат у сталі ( $\cos\varphi_{0H} = 0$ ):

$$I_{1\text{НОМ}} = \sqrt{(I_{0\text{НОМ}} + I'_{2\text{НОМ}} \sin\varphi'_{\text{НОМ}})^2 + (I'_{2\text{НОМ}} \cos\varphi'_{\text{НОМ}})^2} \quad (1.45)$$

а реактивна складова струму статора:

						Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{1p,ном} = I_{1ном} \sin \varphi_{ном} \approx I_{0ном} + I'_{2ном} \sin \varphi'_{ном} \quad (1.46)$$

і активна складова:

$$I_{1a,ном} = I_{1ном} \cos \varphi_{ном} \approx I'_{2ном} \cos \varphi'_{ном} \quad (1.47)$$

Скористаємося рівністю зазначеною в [6] та виразимо  $\sin \varphi'_{ном}$  та  $\cos \varphi'_{ном}$  через кратність максимального моменту. Зневажаємо опором статора  $r_1$  у порівнянні з  $c_1 r'_2/s$  в [6, (1.17)]  $r_1^2$  у порівнянні з  $(x_1 + c_1 x'_2)^2$  в [6, (2.3)]:

$$\operatorname{tg} \varphi'_{ном} = \frac{(x_1 + c_1 x'_2) s_{ном}}{c_1 r'_2} \approx \frac{s_{ном}}{s_{кр}} \quad (1.48)$$

де  $s_{кр}$  – критичне ковзання.

Вирівши рівняння [6, (2.19)] при номінальному режимі ( $M_* = 1,0$ ) відносно  $s_{кр}/s_{ном}$ :

$$\frac{s_{кр}}{s_{ном}} = K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}, \quad (1.49)$$

отримуємо:

$$s_{кр} = 0,04 \cdot \left( 3 + \sqrt{3^2 - 1} \right) = 0,24$$

Виконавши підстановку в (1.34) отримуємо вирази:

$$\operatorname{tg} \varphi'_{ном} \approx \frac{1}{K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}} \quad (1.50)$$

$$\sin \varphi'_{ном} \approx \frac{1}{\sqrt{2K_M(K_M + \sqrt{K_M^2 - 1})}} \quad (1.51)$$

$$\cos \varphi'_{ном} \approx \sqrt{\frac{K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}}{2K_M}} \quad (1.52)$$

Виконаємо підстановку (1.48) в (1.52) та отримуємо вираз для номінального наведеного струму ротора:

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

$$I'_{2\text{НОМ}} \approx \sqrt{\frac{2K_M}{K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}}} I_{1\text{НОМ}} \cos\varphi_{\text{НОМ}} \quad (1.53)$$

Розв'язавши (1.53) отримуємо:

$$I'_{2\text{НОМ}} \approx \sqrt{\frac{2 \cdot 3}{3 + \sqrt{3^2 - 1}}} \cdot 8,24 \cdot 0,87 = 7,27 \text{ А}$$

Виконаємо заміну  $\sin\varphi'_{\text{НОМ}}$  відповідно до (1.51) та після підстановки (1.53) в (1.47) знаходимо номінальне значення струму намагнічування:

$$I_{0\text{НОМ}} \approx I_{1\text{НОМ}} \left( \sin\varphi_{\text{НОМ}} \frac{\cos\varphi_{\text{НОМ}}}{K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}} \right) = 0,6 \text{ А} \quad (1.54)$$

Згідно з [6] при  $K_M > 1,7$  можна прийняти

$$I'_{2\text{НОМ}} \approx I_{1\text{НОМ}} \cos\varphi_{\text{НОМ}} \quad (1.55)$$

оскільки похибка у порівнянні  $I'_{2\text{НОМ}}$ , знайденої відповідно до (1.37), буде меншою за 5%.

У каталозі [4] також приведені кратності початкового моменту  $K_{\Pi} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{НОМ}}}$  (при  $s=1,0$ ) і пускового струму  $K_i = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{НОМ}}}$  при номінальній напрузі. За наведеними вище даними можна визначити активний й індуктивний опори обмоток статора й ротора.

Визначаємо повний опір двигуна при нерухомому роторі ( $s=1,0$ ) по кратності початкового пускового струму:

$$z_{k1} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{\sqrt{3} K_i I_{1\text{НОМ}}} \quad (1.56)$$

де  $U_{1\text{НОМ}}$  - номінальна лінійна напруга статора.

$$z_{k1} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 6,8 \cdot 8,24} = 3,91 \text{ Ом}$$

Згідно з [6, (2.26в)] визначаємо наведений активний опір ротора при  $s=1$ , за кратністю початкового моменту  $K_{\Pi}$ . Механічні втрати приймаємо рівними 1% ( $\Delta P_{\text{мех}} = 0,01 \Delta P_{\text{НОМ}}$ ).

						MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
							39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$$r'_{21} = \frac{(P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{мех}})K_{\Pi}}{3(1 - s_{\text{НОМ}})I'_{2\text{к}}{}^2} \approx \frac{(P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{мех}})K_{\Pi}}{3(1 - s_{\text{НОМ}})K_i^2 I_{1\text{НОМ}}^2} \quad (1.57)$$

Розв'язавши (1.57) отримуємо:

$$r'_{21} = \frac{4 \cdot 1,01 \cdot 10^3 \cdot 2,4}{3 \cdot (1 - 0,04) \cdot 6,8^2 \cdot 8,24^2} = 1,07 \text{ Ом}$$

Згідно [6, (2.146)] визначаємо індуктивний опір наведеному струму ротора при  $s=0$  за кратністю максимального моменту  $K_M$ , знехтувавши  $r_1^2$  у порівнянні з  $(x_1 + c_1 x'_{20})^2$ :

$$x_1 + c_1 x'_{20} \approx \frac{U_{1\text{НОМ}}^2 (1 - s_{\text{НОМ}})}{2c_1 (P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{мех}})K_{\Pi}} - r_1 \quad (1.58)$$

Наведений активний опір ротора при  $s=0$  визначаємо за [6, (2.36)] відповідно замінюючи критичне ковзання відповідно до рівності (1.48):

$$r'_{20} = \frac{(x_1 + c_1 x'_{20})s_{\text{кр}0}}{c_1} = \frac{(x_1 + c_1 x'_{20})s_{\text{НОМ}}(K_{\Pi} + \sqrt{K_M^2 - 1})}{c_1} \quad (1.59)$$

де  $(x_1 + c_1 x'_{20})$  замінюються відповідно до рівності (1.28).

У випадку коли активний опір статора є невідомим, то з достатнім ступенем точності можна прийняти, що  $r_1 = r'_{20}$ [6]. Вирішивши (1.57) та (1.58) відносно  $r'_{20}$ , отримуємо:

$$r'_{20} = \frac{U_{1\text{НОМ}}^2 (1 - s_{\text{НОМ}})}{2c_1 (P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{мех}})K_{\Pi} \left[ 1 + \frac{c_1}{s_{\text{НОМ}}K_{\Pi} + \sqrt{K_M^2 - 1}} \right]} \quad (1.60)$$

Виконуємо розв'язок (1.60):

$$r'_{20} = \frac{380^2 \cdot (1 - 0,04)}{2 \cdot 1,89 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 1,01 \cdot 2,4 \cdot \left[ 1 + \frac{1,89}{0,04 \cdot 2,4 + \sqrt{3^2 - 1}} \right]} = 0,39 \text{ Ом}$$

Знайдемо значення  $X_k$  з виразу для критичного ковзання, оскільки індуктивні опори ротора і статора (при  $s=1$ ) без обліку струму намагнічування не завжди дає позитивний результат:

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \quad (1.61)$$

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{R_2'}{s_k}\right)^2 - R_1^2} = \sqrt{\left(\frac{1,07}{0,24}\right)^2 - 0,39^2} = 4,4 \text{ Ом} \quad (1.62)$$

Для того, щоб виділити з індуктивного опору  $X_k$  опір розсіювання фаз статора і ротора, скористаємося співвідношеннями:

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,48X_k = 0,48 \cdot 4,4 = 2,1 \text{ Ом} \\ X_2 &= 0,48 \frac{X_k}{c_1} = 0,52 \frac{4,4}{1,89} = 1,2 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (1.63)$$

Також розрахуємо індуктивний опір контуру намагнічування:

$$X_\mu = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{3}I_{\mu\text{ном}}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 0,6} = 364 \text{ Ом} \quad (1.64)$$

Значення  $x_1$ ,  $x'_{20}$  та  $x'_{21}$ , враховуючи співвідношення  $x_1/x'_{20}$ , визначаємо шляхом спільного рішення рівнянь (1.44) та (1.47), відповідно до [6, (2.42)].

Визначивши опір обмотки статора  $r_1$ , та знаючи ККД електродвигуна при номінальному навантаженні, можемо знайти окремі втрати двигуна.

Додаткові втрати в статорі приймаємо рівними  $\Delta P_d = 0,005P_{\text{ном}}$ .

Визначаються втрати в обмотці статора і додаткові втрати за наступним виразом:

$$\Delta P_{1\text{ном}} = P_{1\text{м.ном}} + 0,005P_{\text{ном}} = 3I_{1\text{ном}}^2 r_1 \cdot 10^{-3} + 0,005P_{\text{ном}} \quad (1.65)$$

Розрахувавши (1.65) отримуємо:

$$\Delta P_{1\text{ном}} = 3 \cdot 8,24^2 \cdot 0,39 \cdot 10^{-3} + 0,005 \cdot 4 = 0,1 \text{ кВт}$$

Механічні втрати:

$$\Delta P_{\text{мех}} = 0,01P_{\text{ном}} = 0,01 \cdot 4 = 0,04 \text{ кВт} \quad (1.66)$$

Втрати в роторі:

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P_{2\text{НОМ}} = \frac{(P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{мех}})s_{\text{НОМ}}}{1 - s_{\text{НОМ}}} = \frac{1,01P_{\text{НОМ}}s_{\text{НОМ}}}{1 - s_{\text{НОМ}}} \quad (1.67)$$

$$\Delta P_{2\text{НОМ}} = \frac{1,01 \cdot 4 \cdot 0,04}{1 - 0,04} = 0,17 \text{ кВт}$$

Сумарні втрати двигуна:

$$\sum \Delta P_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}(1 - \eta_{\text{НОМ}})}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{4 \cdot (1 - 0,848)}{0,848} = 0,71 \text{ кВт} \quad (1.68)$$

Втрати в сталі статора:

$$\Delta P_{1\text{с,НОМ}} = \sum \Delta P_{\text{НОМ}} - \left( 3I_{1\text{НОМ}}^2 r_1 \cdot 10^{-3} + 0,005P_{\text{НОМ}} + \frac{0,01P_{\text{НОМ}}s_{\text{НОМ}}}{1 - s_{\text{НОМ}}} \right) \quad (1.69)$$

$$\Delta P_{1\text{с,НОМ}} = 0,71 - \left( 3 \cdot 8,24^2 \cdot 0,39 \cdot 10^{-3} + 0,005 \cdot 4 + \frac{1,01 \cdot 4 \cdot 0,04}{1 - 0,04} \right) = 0,44 \text{ кВт}$$

При визначенні втрат в роторі необхідно мати на увазі, що номінальне ковзання, визначене по табличним даним, може значно відрізнятись від дійсного значення. Тому бажано визначити номінальне значення ковзання з досвіду. Для цієї цілі при навантаженні, можливо більш близькою до номінальної, визначають споживану двигуном потужність  $P_1$  та ковзання  $s$ [6].

Ковзання при номінальному навантаженні, з достатньо високою точністю, визначається за формулою:

$$s_{\text{НОМ}} \approx \frac{P_{\text{а,НОМ}}}{P_{\text{а}}} \approx \frac{sP_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}P_1} \quad (1.70)$$

В каталогах на синхронні двигуни кратність максимального моменту  $K_M$  та критичне ковзання  $s_{\text{кр}}$  зазвичай не приводять. З досить високим ступенем точності при номінальному навантаженні кратність  $K_M$  може бути визначена з виразу [6, (2.60)], який для симетричного ротора буде мати вигляд[6]:

$$K_M = \frac{s_{\text{НОМ}}}{2P_{\text{НОМ}}} \left( K_i - \frac{2}{x_d + x_q} \right) \quad (1.71)$$

де  $K_i = 1/x''$  – кратність пускового струму (за каталогом при обмотці збудження, замкнутої на опір).

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для машин з явно вираженими полюсами  $x_q \approx 0,6 x_d$  та

$$K_M = \frac{S_{\text{НОМ}}}{2P_{\text{НОМ}}} \left( K_i - \frac{1,25}{x_d} \right) \quad (1.72)$$

Критичне ковзання:

$$s_{\text{кр}} = \frac{K_M}{K_{\Pi}} - \sqrt{\left(\frac{K_M}{K_{\Pi}}\right)^2 - 1} \quad (1.73)$$

або

$$s_{\text{кр}} = \frac{1}{\frac{K_M}{K_{\Pi}} + \sqrt{\left(\frac{K_M}{K_{\Pi}}\right)^2 - 1}} \quad (1.74)$$

де  $K_{\Pi}$  – кратність початкового пускового моменту.

В каталогах величини  $K_M$  та  $K_{\Pi}$  приведені для випадків замикання обмотки збудження на розрядний резистор з опором, який дорівнює десятикратному опору обмотки збудження[6].

#### 1.14.2 Регулювання координат електроприводу в системі "перетворювач частоти - двигун" (ПЧ-АД)

Даний спосіб набув широкого поширення як спосіб регулювання синхронної швидкості  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ . Спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні як вгору, так і вниз від основної. Так як не відбувається збільшення  $S$ , втрати ковзання невеликі - спосіб економічний. Однак для кращого використання АТ необхідно одночасно зі зміною  $f_1$  змінювати і  $U_1$ . Закон зміни напруги залежить від характеру моменту навантаження. Основний критерій - зберегти перевантажувальну здатність Я при регулюванні напруги і частоти  $\lambda = \frac{M_k}{M_c} = \text{const}[9]$ .

Підставивши вираз  $M_k$ , зневажаючи  $R_1$  та беручи до уваги, що  $X_k \cong f_1$ ;  $\omega_0 \cong f_1$ , отримуємо вираз:

$$\lambda = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_k M_c} = A \frac{U_1^2}{f_1^2 M_c} \quad (1.75)$$

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, для будь-яких значень  $f_1(i, k)$  повинно зберігатися співвідношення:

$$\frac{U_{1i}^2}{f_{1i}^2 M_{ci}} = \frac{U_{1k}^2}{f_{1k}^2 M_{ck}} \quad (1.76)$$

Звідки ми отримуємо:

$$\frac{U_{1i}}{U_{1k}} = \frac{f_{1i}}{f_{1k}} \sqrt{\frac{M_c(\omega_i)}{M_c(\omega_k)}} \quad (1.77)$$

де  $U_{1i}$  – фазна напруга АД при  $f_{1i}$ ;

$M_c(\omega_i)$  - момент статичного навантаження на валу АД при швидкості  $\omega_i$  ;

$U_{1k}$  - фазна напруга джерела живлення АД при  $f_{1k}$ ;

$M_c(\omega_k)$  - момент статичного навантаження на валу АД при швидкості  $\omega_k$ .

Закон зміни напруги при частотному регулюванні у відносних одиницях виразимо у вигляді:

$$U_{1*} = f_{1*} \sqrt{M_{c*}} \quad (1.78)$$

де

$$U_{1*} = \frac{U_1}{U_{1ном}} \quad (1.79)$$

$$f_{1*} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \quad (1.80)$$

$$M_{c*} = \frac{M_c}{M_{cном}} \quad (1.81)$$

У виразі (1.60) при  $M_c = const$  отримуємо, що  $U_1/f_1 = const$ .

Для вентиляторної характеристики при  $M_c = const$  буде  $U_1/f_1^2 = const$ .

Якщо л/с обернено пропорційний швидкості:  $U_1/\sqrt{f_1} = const$ .

При регулюванні частоти вгору від  $f_1$ , неможливо одночасно збільшувати  $U_1$  понад  $U_{1н}$ , отже, не можна забезпечити  $\lambda = const$ , тому критичний момент знижується, як це показано на рис.1.11 [9].

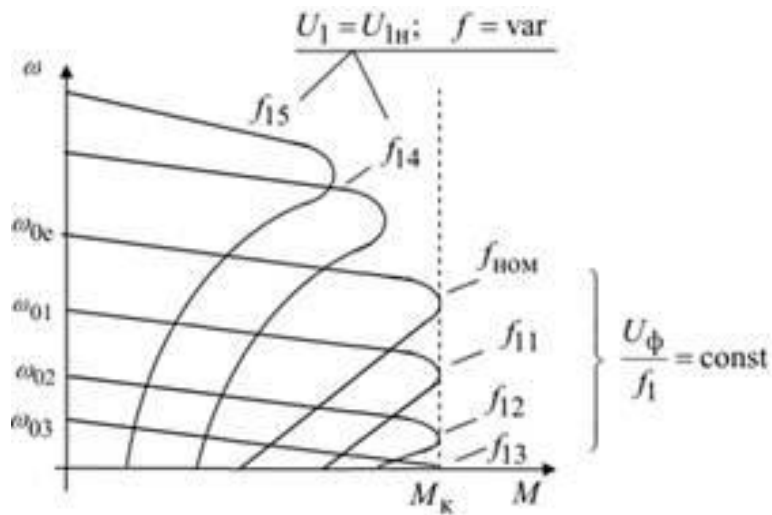


Рисунок 1.11 - механічна характеристика АД при регулюванні швидкості за частотою

Визначимо коефіцієнт приведення опорів за формулою:

$$K_R = \left(0,95 \frac{U_{1\text{НОМ}}}{E_{2\text{НОМ}}}\right)^2 = \left(0,95 \frac{380}{220}\right)^2 = 3,26 \quad (1.82)$$

Визначивши в попередньому підрозділі значення опорів ротора та індуктивний опір короткого замикання, з формули для знаходження критичного моменту двигуна при номінальному значенні напруги живлення:

$$M_K = \frac{3U_1^2}{2\omega_0(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2})} \quad (1.83)$$

отримуємо вираз для розрахунку критичного моменту при частотному регулюванні:

$$M'_K = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_K (f_{1*} p_{1K} \pm \sqrt{(f_{1*}^2 + p_{1K}^2)(f_{1*}^2 + p_{1\mu}^2)})} \quad (1.84)$$

де  $\omega_0 = \frac{2\pi f_{\text{НОМ}}}{p_n} = \frac{2\pi \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ с}^{-1}$  – швидкість ідеального холостого ходу;

$p_{1K} = \frac{R_1}{X_K}$ ;  $p_{1\mu} = \frac{R_1}{X_\mu}$ ;  $X_K$  – індуктивний опір короткого замикання;  $X_\mu$  – індуктивний опір намагнічування.

$$p_{1K} = \frac{0,39}{4,4} = 88,6 \cdot 10^{-3}$$

$$p_{1\mu} = \frac{0,39}{364} = 1,07 \cdot 10^{-3}$$

Критичне ковзання на природній характеристиці розраховуємо за формулою:

$$s'_{кр} = \pm \frac{R'_2}{f_1 X_K} \sqrt{\frac{f_{1*}^2 + p_{1\kappa}^2}{f_{1*}^2 + p_{1\mu}^2}} \quad (1.85)$$

Синхронна кутова частота обертання двигуна:

$$\omega_c = \frac{\pi \eta_c}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314,16 \text{ рад/с} \quad (1.86)$$

Номінальна частота та кутова швидкість обертання двигуна:

$$\eta_{дв.ном} = (1 - s_{ном}) \cdot \eta_c = (1 - 0,014) \cdot 3000 = 2958 \text{ об/хв} \quad (1.87)$$

$$\omega_{дв.ном} = (1 - s_{ном}) \cdot \omega_c = (1 - 0,014) \cdot 314,16 = 301,06 \text{ рад/с} \quad (1.88)$$

Розрахунок механічних характеристик асинхронного двигуна будемо вести за уточненою формулою Клосса:

$$M = \frac{2M'_K(1 + \alpha' s'_{кр})}{\frac{s}{s'_{кр}} + \frac{s'_{кр}}{s} + 2\alpha' s'_{кр}} \quad (1.89)$$

де

$$\alpha' = R_1 f_{1*}^2 / R'_2 (f_{1*}^2 + p_{1\mu}^2) \quad (1.90)$$

Проводимо розрахунок значень  $M'_K$ ,  $s'_{кр}$  та  $\alpha'$  для частот 10, 20, 30, 40, 50 Гц. Отримані дані заносимо до таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Результати розрахунків  $M'_K$ ,  $s'_{кр}$  та  $\alpha'$  для частот 10, 15, 20, 30, 40, 50 Гц.

$f_1$ , Гц	$f_{1*}$	$s'_{кр}$	$\alpha'$	$M'_K$
10	0,2	1,22	0,58	404,3
20	0,4	0,61	0,58	222,3

$f_1, \text{Гц}$	$f_{1*}$	$s'_{\text{кр}}$	$\alpha'$	$M'_k$
30	0,6	0,409	0,58	142,4
40	0,8	0,306	0,58	99,4
50	1	0,24	0,58	73,6

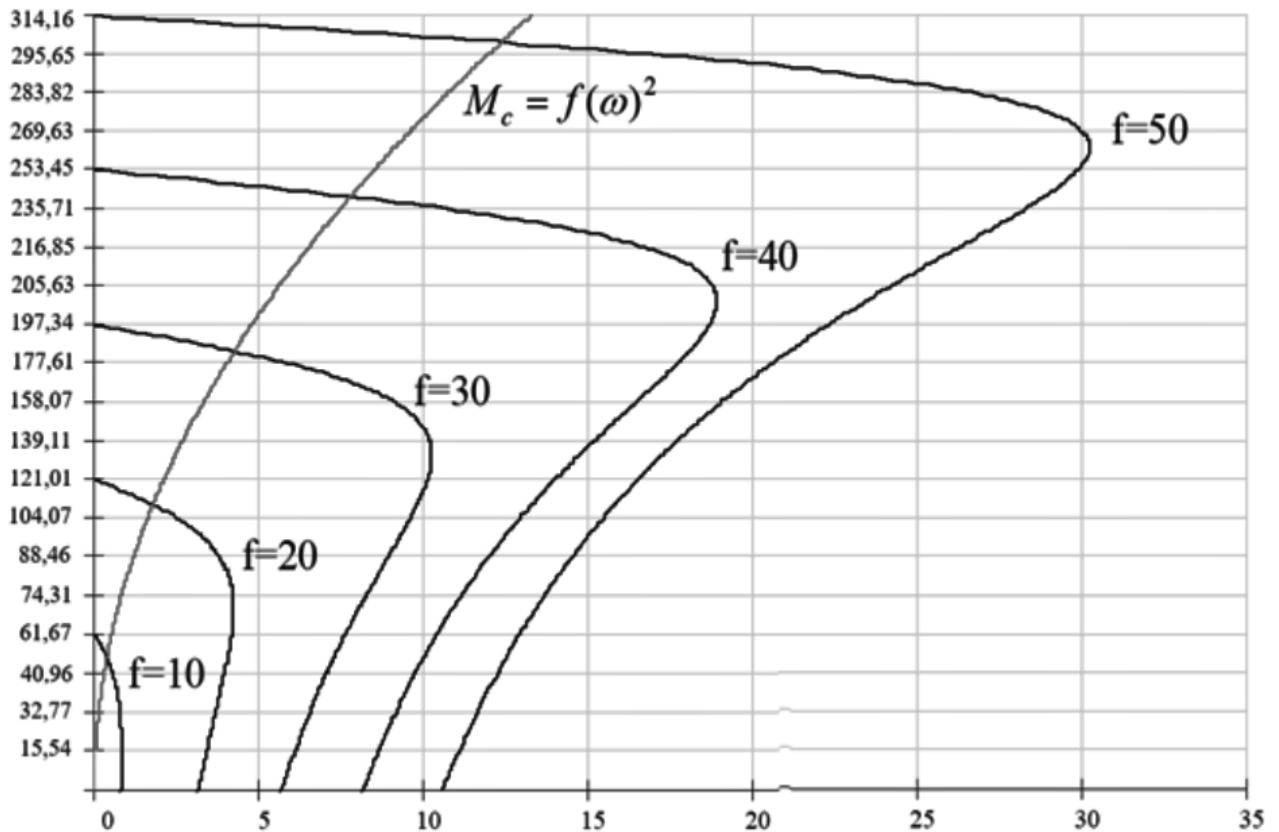


Рисунок 1.12 – Механічні характеристики АД при різних частотах

### 1.14.3 Розрахунок механічної характеристики при частотному регулюванні АД

Відносна частота статора виражається в наступному відношенні:

$$\alpha = f_1 / f_{1\text{НОМ}} \quad (1.91)$$

Також отримуємо вираз для параметру абсолютного ковзання відносно синхронної швидкості АД при номінальній частоті:

$$\alpha s = \frac{\Delta\omega}{\omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_{1\text{НОМ}}} = \frac{f_2}{f_{1\text{НОМ}}}, \quad (1.92)$$

де  $\alpha s$  застосовується у якості параметру ковзання  $s_{\text{НОМ}}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_1} = \frac{f_2 f_{1\text{НОМ}}}{f_1 f_{1\text{НОМ}}} = \frac{\alpha s}{\alpha} \quad (1.93)$$

Знаходимо постійні коефіцієнти рівнянь:

$$a = \frac{R'_2}{X_\mu} = \frac{1,07}{364,02} = 0,0029 \quad (1.94)$$

$$d = \frac{R_1}{X_\mu} = \frac{0,62}{364,02} = 0,0017$$

Коефіцієнт розсіювання обмоток статора знаходимо за формулою:

$$\tau_1 = X_1/X_\mu = \frac{2,1}{364,02} = 0,0057 \quad (1.95)$$

Відповідно коефіцієнт розсіювання обмоток ротора знаходимо за формулою:

$$\tau_2 = X'_2/X_\mu = \frac{1,2}{364,02} = 0,0033 \quad (1.96)$$

Далі визначаємо загальний коефіцієнт розсіювання АД:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 = 0,0057 + 0,0033 + 0,0057 \cdot 0,0033 = 0,0091 \quad (1.97)$$

а також коефіцієнти:

$$b = R_1(1 + \tau_2) = 0,62 \cdot (1 + 0,0033) = 0,63$$

$$c = X_\mu \cdot \tau = 364,02 \cdot 0,0091 = 3,31 \quad (1.98)$$

$$e = 1 + \tau_1 = 1 + 0,0057 = 1,0057$$

Значення абсолютного ковзання знаходиться з відношення частоти струму ротора  $f_2$  до номінальної частоти струму статора  $f_{1\text{НОМ}}$ :

$$s_a = \frac{f_2}{f_{1\text{НОМ}}} \quad (1.99)$$

Частота струму ротора дорівнює:

$$f_2 = f_1 \cdot s, \quad (1.100)$$

де  $s = f_2/f$  – відносне ковзання.

Тоді абсолютне ковзання можна виразити як:

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$$s_a = \frac{f_2}{f_{1ном}} = \frac{f_1 \cdot s}{f_{1ном}} = f_{1*} \cdot s \quad (1.101)$$

Визначимо значення критичного абсолютного ковзання для розімкнутої системи частотного регулювання:

$$s_{ак} = \pm R'_2 \sqrt{\frac{d^2 + e^2 \cdot \dot{f}_1^2}{c^2 + c^2 \cdot \dot{f}_1^2}} \quad (1.102)$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 1.5, а побудований графік на рисунку 1.13.

Таблиця 1.5 – Результати розрахунків відносної частоти джерела живлення та критичного абсолютного ковзання.

$f_{1*}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$s_{ак}$	0,032	0,064	0,094	0,12	0,14	0,16	0,18	0,203	0,21	0,23

З даного графіка ми можемо зробити висновок, що критичне абсолютне ковзання зменшується зі зниженням частоти, а сама залежність у першому наближенні може бути представлена двома прямими з різними нахилами та точкою сполучення при  $f_{1*}=0,6$  (рис. 1.13).

У формулі (1.71) критичного моменту АД знак "плюс" у знаменнику відноситься до критичного моменту в руховому режимі  $M_{кд}$ , знак "мінус" - в режимі гальмування рекуперативного  $M_{кг}$ .

Критичний момент у руховому режимі:

$$M_{кд} = M'_{кд} \cdot U_1^2(f_{1*}) \quad (1.103)$$

Критичний момент у режимі рекуперативного гальмування:

$$M_{кг} = M'_{кг} \cdot U_1^2(f_{1*}) \quad (1.104)$$

де  $M'_{кд}$ ,  $M'_{кг}$  – відповідно критичні моменти АД в руховому режимі та рекуперативному гальмуванні при варіації частоти  $f_{1*}$ , і напрузі  $U_1=1$ .

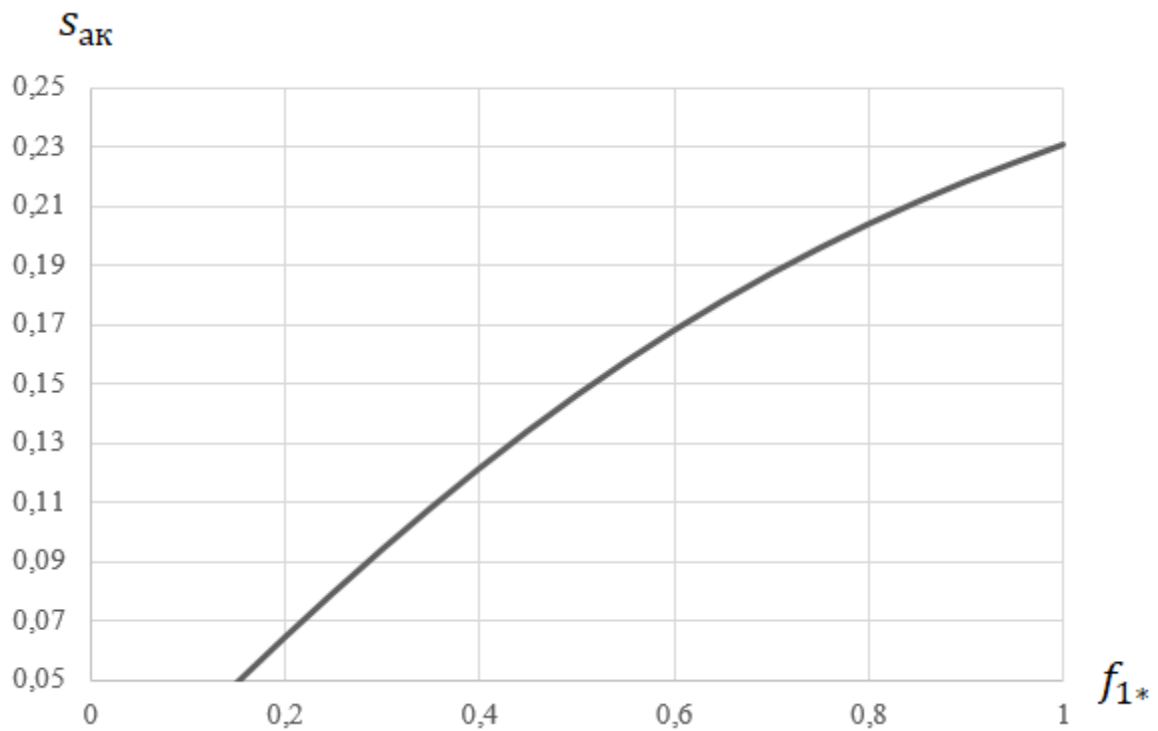


Рисунок 1.13– Залежність критичного абсолютного ковзання від частоти джерела живлення

Таким чином, критичні моменти двигуна надалі визначатимуться законом зміни напруги при частотному регулюванні. Характер залежностей  $M'_{кд}$  та  $M'_{кг}$  від частоти напруги живлення  $f_{1*}$ , представлений на рис.1.14, з якого видно, що при постійному значенні напруги критичні моменти знижуються зі зростанням частоти струму, а модулі критичних моментів, значно відрізняючись в області низьких частот.

Жорсткість механічних характеристик на робочій ділянці можна прийняти постійною та рівною похідною від моменту двигуна за швидкістю в точці ідеального холостого ходу ( $S_a = 0$ )[10]:

$$\beta_c = \frac{m \cdot U_1^2}{\omega_{1ном}^2} \cdot \frac{1}{(d^2 + e^2 \cdot f_{1*}^2) R_2'} \quad (1.105)$$

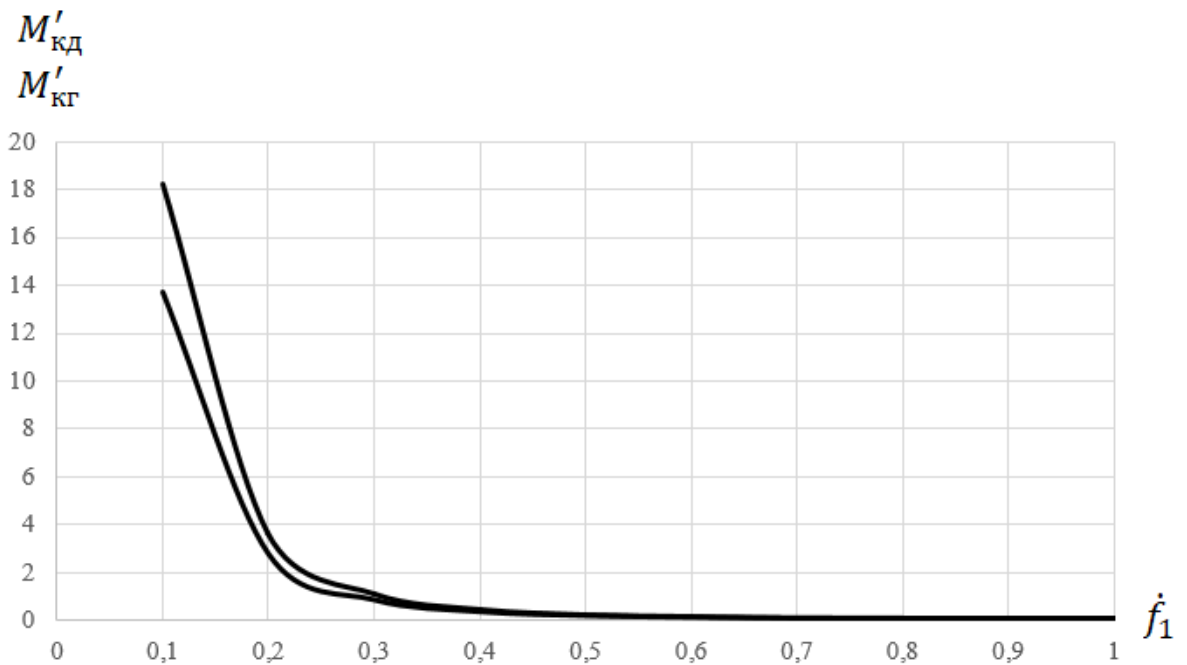


Рисунок 1.14 - Залежність  $M'_{кд}$  та  $M'_{кг}$  від частоти напруги живлення  $f_1$

Як випливає з (1.105), жорсткість механічної характеристики значною мірою визначається величиною прикладеної напруги та частотою струму.

Таким чином, величини критичного моменту (1.84) та жорсткості механічної характеристики (1.105) залежать не тільки від частоти, а й від напруги на обмотці статора, отже, характер зміни критичного моменту та жорсткості механічної характеристики буде залежати від закону частотного регулювання.

Розглянемо особливості найчастіше застосовуваного номінального закону частотного регулювання.

Як свідчать дослідження, підтверджені розрахунками, поширений досить часто при регулюванні нижче за основну частоту закон  $U_1/f_1 = \text{const}$  може використовуватися для двигунів середньої та великої потужності в межах зміни частоти  $(0,5 - 1,5) f_{1н}$ . При цьому  $\lambda_1 = (0,8 - 1,1) \cdot \lambda_n$ , де  $\lambda_n$  - перевантажувальна здатність двигуна при  $f_{1н}$  і  $U_{1н}$ . Для двигунів малої потужності цей закон застосовний в діапазоні частот  $(0,7 - 1,3) f_{1н}$  за тих же умов перевантажувальної здатності.

Зокрема, для двигуна, що розглядається, його критичний момент при регулюванні за номінальним законом змінюється згідно табл.1.6.

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.6 – Зміна критичного моменту за частотою джерела живлення

$f_{1*}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
$M_{кд},$ Н·м	1,37	2,75	4,12	5,5	6,87	8,25	9,63	11	12,38	13,75	15,13	16,51
$M_{кг},$ Н·м	1,66	3,32	4,99	6,65	8,32	9,98	11,65	13,31	14,97	16,64	18,30	19,97

Оскільки  $\tau_1$  та  $\tau_2$  малі, то у випадку їх знехтування критичний момент при  $f_{1*} = 1$  дорівнює:

$$M_{кд} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_{1ном} f_{1*}} \cdot \frac{1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2 f_1^2}} = 60,47 \text{ Н·м} \quad (1.106)$$

Або розрахуємо критичний момент за допомогою індуктивного опору короткого замикання. Для цього скористаємося наступною формулою:

$$M_{кд} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_{1ном} f_{1*}} \cdot \frac{1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кз}^2 f_1^2}} \quad (1.107)$$

де  $X_{кз} = \gamma_{кз} \cdot c_1 \cdot R_2'$  - індуктивного опору короткого замикання

Розрахуємо коефіцієнти  $\beta$  та  $\gamma_{кз}$ :

$$\beta = \frac{R_1}{c_1 \cdot R_2'} = \frac{0,62}{1,89 \cdot 1,07} = 0,307 \quad (1.108)$$

$$\gamma_{кз} = \sqrt{\left(\frac{1}{S_{кр}^2}\right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,24^2}\right) - 0,307^2} = 4,103 \quad (1.109)$$

Визначимо індуктивний опір короткого замикання:

$$X_{кз} = \gamma_{кз} \cdot c_1 \cdot R_2' = 4,103 \cdot 1,89 \cdot 1,07 = 8,33 \text{ Ом} \quad (1.110)$$

Підставляємо значення з (1.110) до (1.111) та отримуємо:

$$M_{кд} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_{1ном} f_{1*}} \cdot \frac{1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кз}^2 f_1^2}} = 26,85 \text{ Н·м} \quad (1.111)$$

												Арк.
												52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								

Розрахунки свідчать, що при визначенні критичного моменту при регулюванні за номінальним законом доцільно користуватися індуктивними опорами з урахуванням насичення зубців від полів розсіювання і витіснення струму в стрижнях.

#### 1.14.4 Розрахунок струму намагнічування та струму статора при регулюванні швидкості АД за частотою.

Для розрахунку використовується Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна. Наведені вирази отримані шляхом розв'язання комплексних рівнянь, записаних для Т-подібної схеми.

Вираз для електрорушійної сили:

$$E_{1a} = E'_{2a} = U_{\text{ном}} \gamma \alpha \sqrt{\frac{R_2'^2 + X_2'^2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2R_1 R_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) R_2'^2}} =$$

$$= U_{\text{ном}} \gamma \alpha \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}} \quad (1.112)$$

Вираз для потоку у повітряному зазорі:

$$\Phi_a = \frac{U_{\text{ном}}}{c_1 f_{1\text{ном}}} \gamma \sqrt{\frac{R_2'^2 + X_2'^2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2R_1 R_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) R_2'^2}} =$$

$$= \frac{U_{\text{ном}}}{c_1 f_{1\text{ном}}} \gamma \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}} \quad (1.113)$$

Вираз для струму статора:

$$I_{1a} = U_{\text{ном}} \gamma \sqrt{\frac{\frac{R_2'^2}{X_\mu'} + (1 + \tau_2)^2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2R_1 R_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) R_2'^2}} =$$

$$= U_{\text{ном}} \gamma \sqrt{\frac{C(\beta)}{A(\alpha, \beta)}} \quad (1.114)$$

Вираз для приведенного струму ротора:

$$I'_{2a} = U_{\text{НОМ}} \gamma \frac{\beta}{\sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2R_1 R'_2 \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) R'_2{}^2}} =$$

$$= U_{\text{НОМ}} \gamma \frac{\beta}{\sqrt{A(\alpha, \beta)}} \quad (1.115)$$

Вираз для струму намагнічування:

$$I_{\mu a} = U_{\text{НОМ}} \gamma \sqrt{\frac{\frac{R'_2{}^2}{X'_\mu} + \tau_2^2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2R_1 R'_2 \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) R'_2{}^2}} =$$

$$= U_{\text{НОМ}} \gamma \sqrt{\frac{D(\beta)}{A(\alpha, \beta)}} \quad (1.116)$$

Вираз для електромагнітного моменту двигуна:

$$M_a = \frac{m_1 U_1^2}{\omega_{1\text{НОМ}}} \gamma^2 \frac{R'_2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2R_1 R'_2 \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) R'_2{}^2} =$$

$$= \frac{m_1 U_1^2}{\omega_{1\text{НОМ}}} \gamma^2 \frac{R'_2 \beta^2}{A(\alpha, \beta)} \quad (1.117)$$

Для параметрів А, В, С, D,  $\gamma$  та для  $\omega$  використаних у виразах (1.112-1.117) приймаємо такі позначення:

$$A(\alpha, \beta) = (b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2R_1 R'_2 \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) R'_2{}^2 \quad (1.118)$$

$$B(\beta) = R'_2{}^2 + X'_\mu{}^2 \beta^2 \quad (1.119)$$

$$C(\beta) = \frac{R'_2{}^2}{X'_\mu} + (1 + \tau_2)^2 \beta^2 \quad (1.120)$$

$$D(\beta) = \frac{R'_2{}^2}{X'_\mu} + \tau_2^2 \beta^2 \quad (1.121)$$

$$\gamma = U / U_{\text{НОМ}} \quad (1.122)$$

$$\omega = \omega_{1\text{НОМ}} (\alpha - \beta) \quad (1.123)$$

Характеристика струму намагнічування для різних частот наведена на рисунку 1.15

З останнього виразу (1.123) можемо зробити висновок, що для режиму короткого замикання виконується умова  $\beta = \alpha$ . Скориставшись нею підставляємо значення  $\beta$  до наведених вище виразів. Отримуємо вираз для струму статора при короткому замиканні:

$$I_{1Па} = U_{ном} \gamma \sqrt{\frac{\frac{R_2'^2}{X_\mu'} + (1 + \tau_2)^2 \alpha^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \alpha^2 + 2R_1 R_2' \alpha^2 + (d^2 + e^2 \alpha^2) R_2'^2}} \quad (1.124)$$

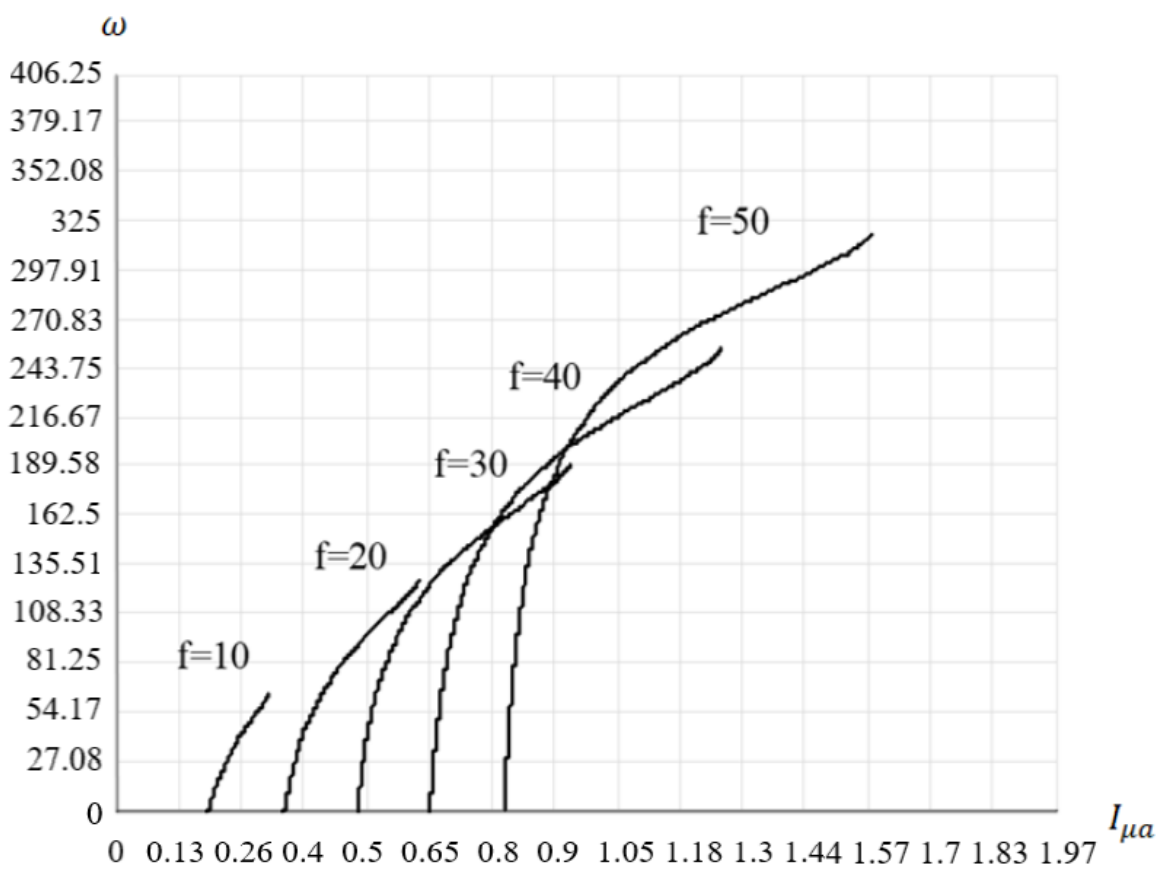


Рисунок 1.15 – Струми намагнічування при різних частотах

Також подібним методом одержуємо вираз для початкового пускового моменту:

$$M_{Па} = \frac{m_1 U_1^2}{\omega_{ном}} \gamma^2 \frac{R_2' \alpha}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \alpha^2 + 2R_1 R_2' \alpha^2 + (d^2 + e^2 \alpha^2) R_2'^2} \quad (1.125)$$

Проводимо розрахунок та представляємо результат у вигляді графіка, який зображено на рисунку 1.16.

В свою чергу для визначення струму статора при ідеальному холостому ході застосовується наступна формула:

$$I_{10a} = I_{\mu 10a} = \frac{U_{\text{ном}} \gamma}{X_{\mu} \sqrt{d^2 + e^2 \alpha^2}} = \frac{U_{\text{ном}} \gamma}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\mu} + X_2')^2 \alpha^2}} \quad (1.126)$$

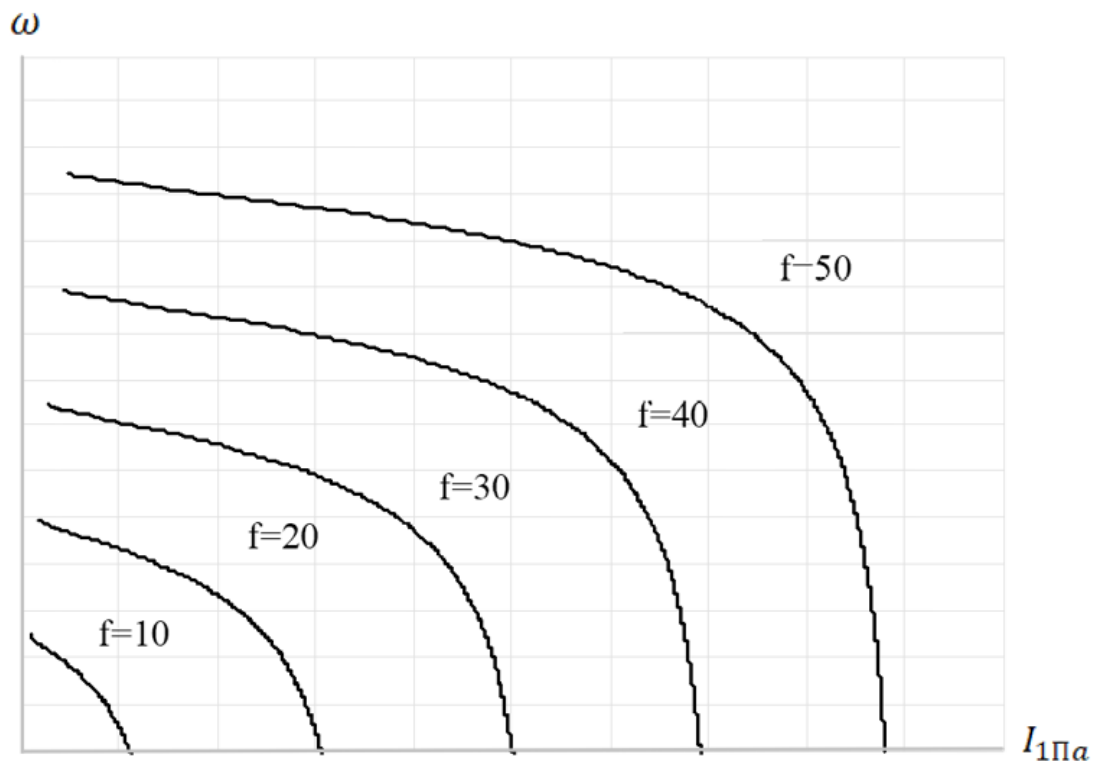


Рисунок 1.16 – Струми статора при різних частотах

Динамічне гальмування АД описується формулами частотного керування.

За умови, що  $\alpha = 0$  у виразах (1.113) – (1.117) отримуємо:

$$E_{1(a=0)} = E'_{2(a=0)} = 0 \quad (1.127)$$

$$\Phi_{(\alpha=0)} = \frac{U_{\text{ном}} \gamma}{R_1 c_1 f_{1\text{ном}}} \sqrt{\frac{R_2'^2 + X_2'^2 \beta^2}{\frac{R_2'^2}{X_{\mu}'} + (1 + \tau_2)^2 \beta^2}} = \frac{U_{\text{ном}} \gamma}{R_1 c_1 f_{1\text{ном}}} \sqrt{\frac{B(\beta)}{C(\beta)}} \quad (1.128)$$

Параметр  $\Phi_{\alpha}$  розраховується за формулою (1.113).

У випадку живлення АД від джерела струму основні співвідношення зручно представити в наступному вигляді [11]:



$$U_{\text{НОМ}}\gamma = I_1 = \frac{\sqrt{A(\alpha, \beta)}}{\sqrt{C(\beta)}} \quad (1.129)$$

Виконавши підстановку (1.129) до формул (1.112), (1.113), (1.115)-(1.117), отримуємо наступні вирази [11]:

$$E_{1a} = E'_{2a} = \alpha I_1 \frac{\sqrt{B(\beta)}}{\sqrt{C(\beta)}} \quad (1.130)$$

$$\Phi(\beta) = \frac{1}{c_1 f_{1\text{НОМ}}} I_1 \frac{\sqrt{B(\beta)}}{\sqrt{C(\beta)}} \quad (1.131)$$

$$I'_{2a}(\beta) = I_1 \frac{\beta}{\sqrt{C(\beta)}} \quad (1.132)$$

$$I_{\mu}(\beta) = I_1 \frac{\sqrt{D(\beta)}}{\sqrt{C(\beta)}} \quad (1.133)$$

$$M(\beta) = \frac{m_1 I_1^2 R'_2 \beta}{\omega_{1\text{НОМ}} C(\beta)} \quad (1.134)$$

#### 1.14.5 Розрахунок втрат та ККД АД при частотному регулюванні

Втрати заліза можна поділити на гістерезисні втрати та втрати вихрового струму. Втрати вихрового електричного струму мінімізуються рахунок використання нашарування на сердечнику. Раз застосовується нашарування на сердечнику, зменшується область, і тому збільшується опір, внаслідок чого зменшуються вихрові струми.

Гістерезисні втрати мінімізуються за допомогою кремнистої сталі високої якості. Втрати сердечника залежать від частоти напруги, що надходить. Частота статора завжди є частотою, що подається, а частота ротора є прослизанням, помноженим на частоту, що подається, яка завжди менше частоти статора.

Механічні втрати мають місце у підшипнику, втрати тертя щіток виникають в асинхронному двигуні з обмотаним ротором. Дані втрати на старті дорівнюють нулю. У міру того, як зростає швидкість, ці втрати збільшуються. У

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

трифазних двигунах швидкість зазвичай залишається незмінною. Звідси випливає, що ці втрати майже залишаються постійними.

Магнітні втрати  $P_M$  в асинхронному двигуні викликані втратами на гістерезис і втратами на вихрові струми, що відбуваються в сердечнику при його перемагнічуванні. Величина магнітних втрат пропорційна частоті перемагнічування:

$$P_M = f^\beta, \quad (1.135)$$

де  $\beta = 1,3 \div 1,5$

Частота перемагнічування сердечника статора дорівнює частоті струму мережі ( $f = f_1$ ), а частота перемагнічування сердечника ротора  $f = f_2 = f_{1s}$ . При частоті струму в мережі  $f_1 = 50$  Гц при номінальному ковзанні  $s_{\text{НОМ}} = 1 - 8\%$  частота перемагнічування ротора  $f = f_2 = 2 - 4$  Гц, тому магнітні втрати в сердечнику ротора настільки малі, що їх у практичних розрахунках не враховують.

Електричні втрати в асинхронному двигуні викликані нагріванням обмоток статора і ротора струмами, що проходять по них. Величина цих втрат пропорційна квадрату струму в обмотці (Вт).

Електричні втрати в обмотці статора визначаються за формулою:

$$P_{e1} = m_1 I^2 R_1 \quad (1.136)$$

Електричні втрати в обмотці ротора визначаються за формулою:

$$P_{e2} = m_2 I_2^2 R_2 \quad (1.137)$$

де  $R_1$  та  $R_2$  – активні опори обмоток фаз статора і ротора перераховані на робочу температуру  $\theta_{\text{роб}}$ :

$$R_1 = R_{1,20} [1 + \alpha(\theta_{\text{роб}} - 20)] \quad (1.138)$$

$$R_2 = R_{2,20} [1 + \alpha(\theta_{\text{роб}} - 20)] \quad (1.139)$$

де  $R_{1,20}$  та  $R_{2,20}$  – активні опори обмоток при температурі  $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт, для міді та алюмінію  $\alpha = 0,004$ .

Електричні втрати в роторі прямо пропорційні ковзанню:

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{e2} = sP_{em}, \quad (1.140)$$

де  $P_{em}$  – електромагнітна потужність асинхронного двигуна, Вт:

$$P_{em} = P_1 = (P_m + P_{e1}) \quad (1.141)$$

З (1.140) можемо зробити висновок, що робота асинхронного двигуна більш економічна при малих ковзаннях, оскільки зі зростанням ковзання зростають електричні втрати у роторі.

В асинхронних двигунах з фазним ротором крім перерахованих електричних втрат мають місце ще й електричні втрати в контактні щіток:

$$P_{e.щ} = 3I_2\Delta U_{щ}, \quad (1.142)$$

де  $U_{щ} = 2,2$  - перехідне падіння напруги на пару щіток.

Механічні втрати  $P_{мех}$  – це втрати на тертя в підшипниках і на вентиляцію. Розмір цих втрат пропорційна квадрату частоти обертання ротора ( $P_{мех} = n_2^2$ ). В асинхронних двигунах із фазним ротором механічні втрати відбуваються ще й за рахунок тертя між щітками та контактними кільцями ротора.

Додаткові втрати включають всі види втрат, що важко враховуються, які викликані дією вищих гармонік МРС (магніторушійних сил), пульсацією магнітної індукції в зубцях та іншими причинами. Відповідно до ГОСТу додаткові втрати асинхронних двигунів приймають рівними 0,5% від потужності, що підводиться до двигуна:

$$P_{дод} = 0,005P_1 \quad (1.143)$$

При розрахунку додаткових втрат для неномінального режиму слід скористатися виразом:

$$P'_{дод} = P_{дод}\beta^2, \quad (1.144)$$

де  $\beta = I_1/I_{1ном}$  – коефіцієнт навантаження.

Сума всіх втрат асинхронного двигуна визначається за формулою:

$$\sum P = P_{e.m} + P_{e1} + P_{e2} + P_{мех} + P_{дод} \quad (1.145)$$

На рис. 1.17 представлена енергетична діаграма асинхронного двигуна, з якої видно, що частина потужності  $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi$ , що підводиться до

двигуна, витрачається в статорі на магнітні  $P_{m1}$  електричні  $P_{e1}$  втрати. Електромагнітна потужність  $P_{e,m}$ , яка залишається після цього, передається на ротор, де частково витрачається на електричні втрати  $P_{e2}$  і перетворюється на повну механічну потужність  $P_2'$ . Частина потужності йде на покриття механічних  $P_{мех}$  додаткових втрат  $P_{доб}$ , а частина цієї потужності  $P_2$ , що залишилася, становить корисну потужність двигуна.

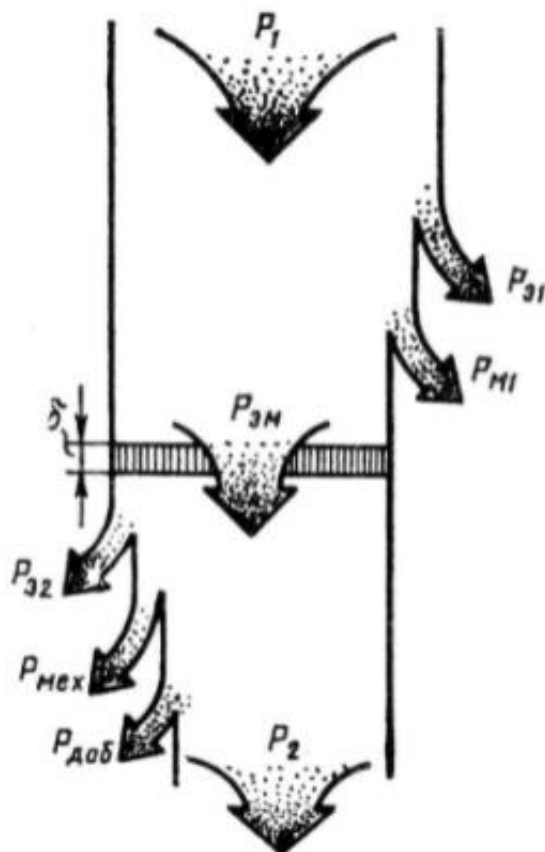


Рисунок 1.17 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

У асинхронного двигуна механічний ККД визначається за формулою:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \sum P \quad (1.146)$$

Електричні втрати в обмотках  $P_{e1}$  та  $P_{e2}$  є змінними втратами, тому що їх величина залежить від навантаження двигуна, тобто від значень струмів в обмотках статора та ротора. Змінними також є додаткові втрати. Що до магнітних  $P_m$  і механічних  $P_{мех}$ , всі вони практично залежать від навантаження.

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна зі змінами навантаження також змінює свою величину: в режимі холостого ходу ККД дорівнює нулю, а потім зі зростанням навантаження він збільшується, досягаючи максимуму при навантаженні  $(0,7 \div 0,8) P_{\text{ном}}$ . При подальшому збільшенні навантаження ККД трохи знижується, а при перевантаженні ( $P_2 > P_{\text{ном}}$ ) він різко зменшується, що пояснюється інтенсивним зростанням змінних втрат ( $P_{e1} + P_{e2} + P_{\text{дод}}$ ), величина яких пропорційна квадрату струму статора, і зменшенням коефіцієнта потужності. Графік ККД асинхронного двигуна при частотному регулюванні представлений на рисунку 1.18.

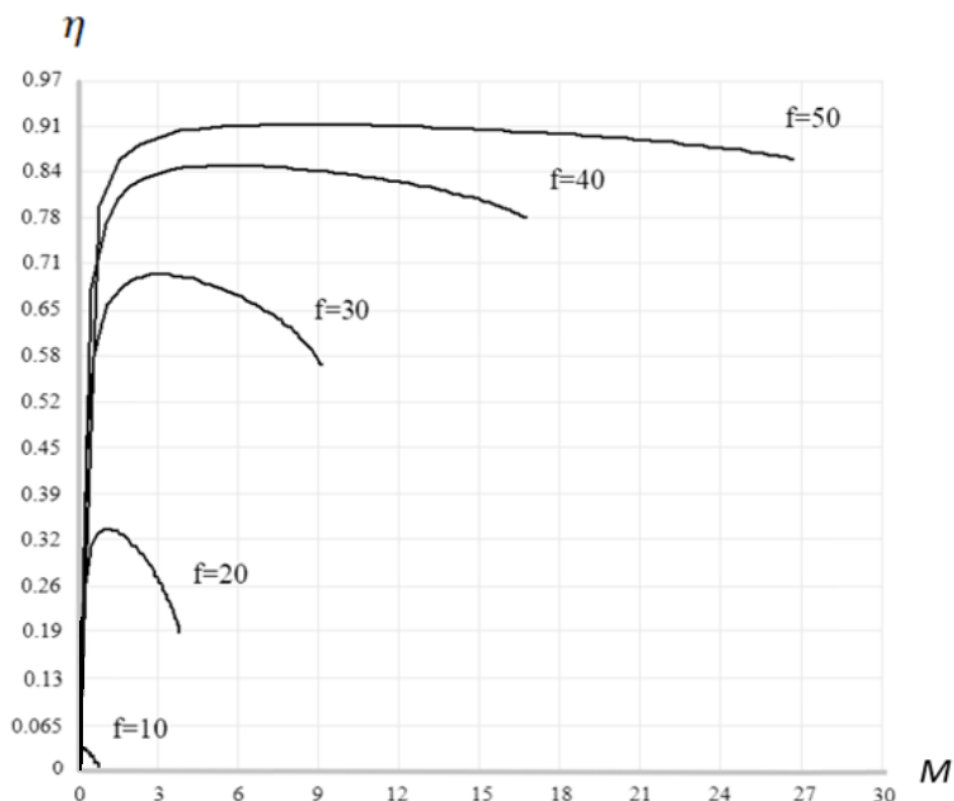


Рисунок 1.18 - ККД асинхронного двигуна при частотному регулюванні

#### 1.14.6 Розрахунок пускових характеристик АД

Аналітичний розгляд перехідних режимів має досить суттєве значення з погляду на можливість одержання загальних висновків. Тому, що розв'язок рівняння руху, навіть при  $M_c = const$ , виконується доволі складно й кінцеві формули виходять у важкій для аналізу формі, то попередньо розглянемо випадок  $M_c = 0$  [12].

Відповідно до формули (1.89) отримуємо рівняння руху:

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{2M_k(1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + 2\varepsilon} = -J\omega_0 \frac{ds}{dt} \quad (1.147)$$

Дане рівняння виконується для всіх режимів окрім динамічного гальмування.

Вираз (1.147) по  $dt$  буде мати наступний вигляд:

$$dt = -\frac{J}{2} \cdot \frac{\omega_0}{M_k(1 + \varepsilon)} \left( \frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + 2\varepsilon \right) ds \quad (1.148)$$

Для даного виразу необхідно винести  $s'_{кр}$  за дужки та ввести наступне позначення:

$$Q = \frac{J\omega_0}{M_k} s_{кр} \quad (1.149)$$

Тут  $Q$  виступає у якості постійної часу для приводу з АД, який має нелінійну механічну характеристику. Виконавши підстановку  $B = \frac{J\omega_0}{M_{ном}} s_{ном}$  до (1.149) отримуємо:

$$Q = B \frac{s_{кр}}{s_{ном}} \cdot \frac{M_{ном}}{M_k} \quad (1.150)$$

За допомогою приведених коефіцієнтів  $\frac{s_{кр}}{s_{ном}} \cdot \frac{M_{ном}}{M_k}$  здійснюється визначення кривизни побудованої характеристики.

Проводячи інтегрування отриманого виразу (1.150) від  $s_1$  до  $s_2$  маємо наступну формулу:

$$t_0 = \frac{Q}{2(1 + \varepsilon)} \int_{s_2}^{s_1} \left( \frac{s}{s_{кр}^2} + \frac{1}{s} + \frac{2\varepsilon}{s_{кр}} \right) ds \quad (1.151)$$

або

$$t_0 = \frac{Q}{2(1 + \varepsilon)} \left[ \frac{s_1^2 - s_2^2}{2s_{кр}} + \ln \frac{s_1}{s_2} + \frac{2\varepsilon}{s_{кр}} (s_1 - s_2) \right] \quad (1.152)$$

Опираючись на визначені з попередніх розрахунків значення струмів обмоток ротора та статора знаходимо відносне значення пускового струму та пускового моменту за наступними виразами:

$$I_{\Pi} = \frac{I_1}{I_{1\text{НОМ}}} \quad (1.153)$$

$$M_{\Pi} = \left( \frac{I'_2}{I'_{2\text{НОМ}}} \right)^2 K_R \frac{s_{\text{НОМ}}}{s}, \quad (1.154)$$

де  $K_R$  – коефіцієнт загального збільшення опору фази ротора з урахуванням впливу витиснення струму.

Результати розрахунків представлено у вигляді графіка на рисунку 1.18.

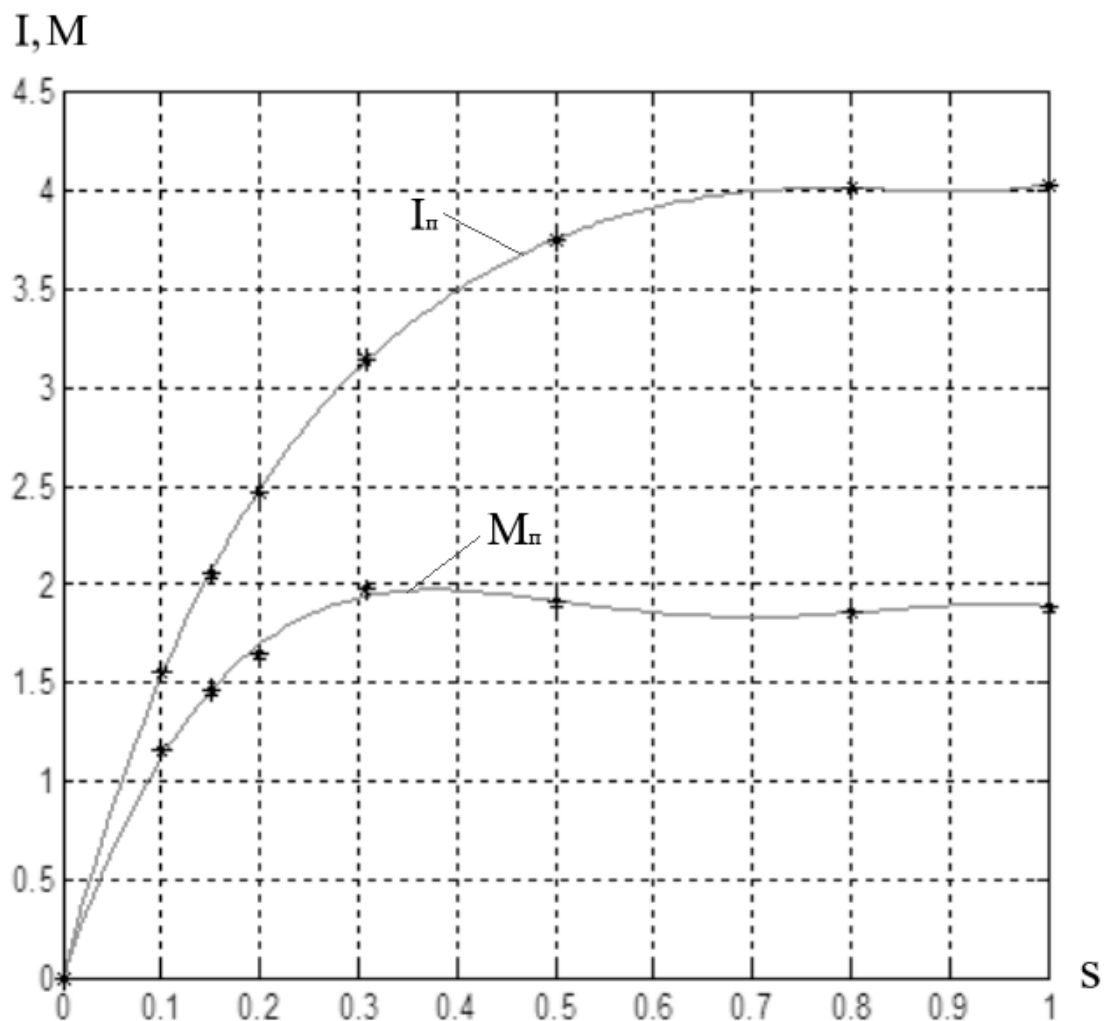


Рисунок 1.18 – Пускова характеристика АД

### 1.14.7 Розрахунок енергетичних характеристик АД

Беручи до уваги вже відомі з попередніх розрахунків формули втрат, можемо виразити їх через  $\cos\varphi$ . У результаті отримуємо:

$$\begin{aligned} \cos\varphi_{1\alpha} &= \frac{P_1}{S_1} = \\ &= \frac{M_{\text{НОМ}}\omega_{\text{НОМ}}}{m_1 I_{1\text{НОМ}} U_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{(\mu_{\text{В}}\omega/\omega_{\text{НОМ}}) + p'_{\text{НОМ}}(\rho_2 i^2 + \sigma_2(\alpha)\varphi^2 + a_{\text{э.о}} i_{\mu}^2 + a_{\text{М}} a^n)}{\gamma \frac{\sqrt{(1+2\tau_2)i^2 + k_{\mu}^2 i_{\mu}^2}}{\sqrt{(1+2\tau_2) + k_{\mu}^2}}} \end{aligned} \quad (1.155)$$

або

$$\begin{aligned} \cos\varphi_{1\alpha} &= \frac{M_{\text{НОМ}}\omega_{\text{НОМ}}}{m_1 I_{1\text{НОМ}} U_{\text{НОМ}}} \cdot \\ &\cdot \frac{\mu\omega/\omega_{\text{НОМ}} + p'_{\text{НОМ}}(\rho_2 i^2 + \sigma_2(\alpha)\varphi^2 + a_{\text{э.о}} i_{\mu}^2)}{\gamma \sqrt{(1+2\tau_2)i^2 + k_{\mu}^2 i_{\mu}^2}} \sqrt{(1+2\tau_2) + k_{\mu}^2} \end{aligned} \quad (1.156)$$

де  $k_{\mu} = I_{\mu\text{НОМ}}/I'_{2\text{НОМ}} \approx 0,26 \div 0,6$

Опираючись на Т-подібну схему заміщення (рис. 1.10, а) отримуємо рівняння залежності  $\cos\varphi_{1\alpha}$  від  $\alpha$  і  $\beta$ :

$$\cos\varphi_{1\alpha} \approx \frac{R_1 C(\beta) + \alpha R'_2 \beta}{\sqrt{A(\alpha, \beta)} \sqrt{C(\beta)}} \quad (1.157)$$

де  $A(\alpha, \beta)$  та  $C(\beta)$  розраховуються за виразами (1.118) та (1.120) відповідно.

Отримане рівняння (1.147) є наближеним тому, що втрати в сталі у ній не враховуються. Виконавши розрахунки для декількох частот представляємо результати у вигляді графіка зображеного на рисунку 1.19.

										Арк.
										64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						



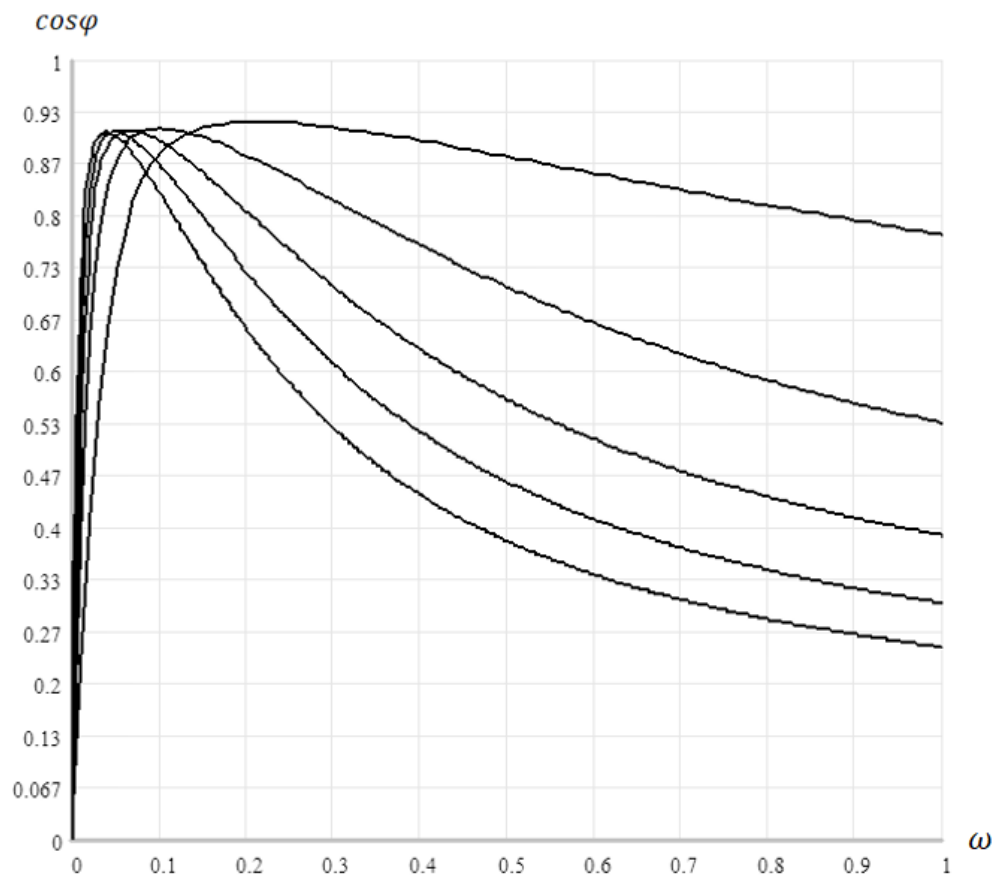


Рисунок 1.19 – Характеристика залежності  $\cos \phi$  від ковзання при частотному регулюванні

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НС

У програмному середовищі MathLab була розроблена структурна схема ЧП-АД в системі підтримання тиску води, яка зображена у додатку 1.

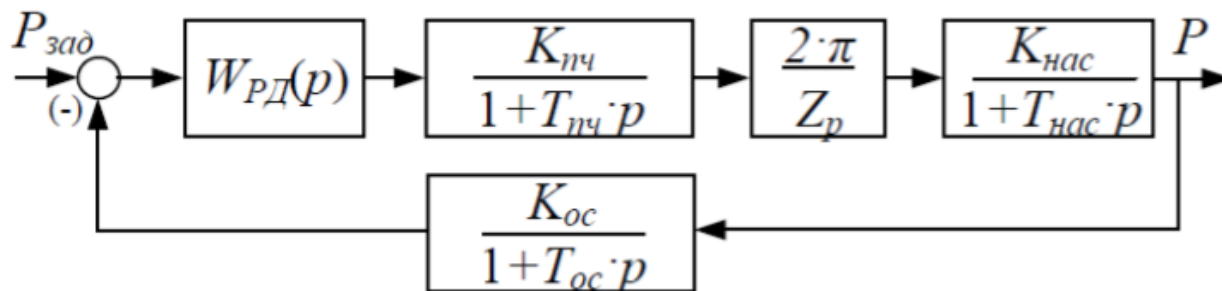


Рисунок 2.1 – Схема контуру тиску

$W_{PD}(p)$  – передатна функція регулятора тиску;

$K_{пч}$  – коефіцієнт передачі перетворювача частоти (приймаємо  $K_{пч} = 1$ );

$T_{пч}$  – постійна часу запізнення автономного інвертора напруги, де

$$T_{пч} = \frac{1}{5000} = 0,0002 \text{ с} \quad (2.1)$$

$K_{нас}$  – коефіцієнт передачі насоса;

$$K_{нас} = \frac{p}{\omega_{ном}} = \frac{4,839}{314,16} = 0,0154 \quad (2.2)$$

де  $p = 4,839$  атм. – номінальне при  $\omega_{ном}$ .

$T_{нас}$  – постійна часу запізнення насоса (приймаємо  $T_{нас} = 0,1$  с);

$K_{ос}$  – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку (приймаємо  $K_{ос} = 1$ );

$T_{ос}$  – постійна часу запізнення зворотного зв'язку (приймаємо  $T_{ос} = 0,1$  с).

Розімкнений контур тиску (рис.2.2) з ПІ-регулятором (рис.2.3), налаштований на модульний оптимум, повинен мати таку передатну функцію:

$$W_{TO}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}, \quad (2.3)$$

де  $T_{\mu}$  – мала постійна часу контуру тиску.

					МР 3.8.141.222 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Фесенко Б.Р.			Проектування системи електропостачання та електропривода насосної станції адміністративної будівлі	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.		Василега П.О.					66	88
Реценз.						СумДУ ЕТ.м-01		
Н. Контр.		Никифоров М.						
Затверд.		Лебединський ІЛ						

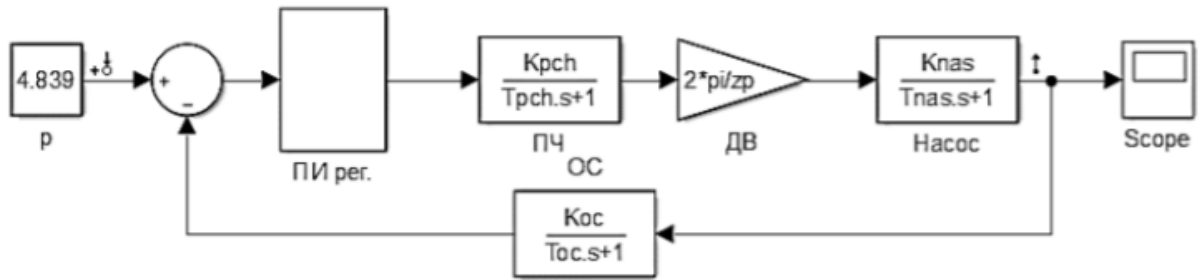


Рисунок 2.2 – Імітаційна модель контуру тиску

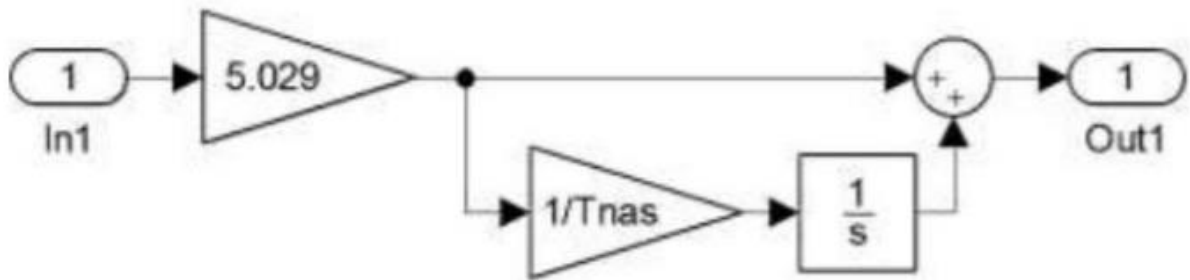


Рисунок 2.3 – Імітаційна модель ПІ-регулятора

Передатна функція розімкнутого контуру тиску системи визначається за наступним виразом:

$$W_{\text{РАЗ КД}}(p) = W_{\text{РД}}(p) \frac{2\pi}{z_p} \cdot \frac{K_{\text{ПЧ}}}{1 + T_{\text{ПЧ}}p} \cdot \frac{K_{\text{нас}}}{1 + T_{\text{нас}}p} \cdot \frac{K_{\text{ос}}}{1 + T_{\text{ос}}p}, \quad (2.4)$$

звідси отримуємо наступний вираз:

$$W_{\text{РД}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{(1 + T_{\text{ПЧ}}p) \cdot (1 + T_{\text{нас}}p) \cdot (1 + T_{\text{ос}}p)}{K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{нас}} \cdot K_{\text{ос}}} \cdot \frac{z_p}{2\pi} \quad (2.5)$$

При оптимізації, інерційність у каналі зворотного зв'язку відноситься до «малих», і за малу некомпенсовану постійну часу всього контуру приймають:

$$T_{\mu} = T_{\mu} + T_{\text{ос}} = 0,0002 + 0,1 = 0,1002 \quad (2.6)$$

$$T_{\text{об}} \gg T_{\mu\text{к}} \quad (2.7)$$

$$T_{\text{ПЧ}} = T_{\mu} \quad (2.8)$$

$$W_{\text{РД}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{(T_{\mu\text{к}}p + 1) \cdot (1 + T_{\text{нас}}p)}{K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{нас}} \cdot K_{\text{ос}}} \cdot \frac{z_p}{2\pi} \quad (2.9)$$

$$W_{pD}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p} \cdot \frac{(1 + T_{нас}p)}{K_{пч} \cdot K_{нас} \cdot K_{ос}} \cdot \frac{z_p}{2\pi} \quad (2.10)$$

$$W_{pD}(p) = \frac{T_{нас} \cdot z_p}{2 \cdot T_{\mu k} \cdot K_{пч} \cdot K_{нас} \cdot K_{ос} \cdot 2\pi} \cdot \frac{(1 + T_{нас}p)}{T_{нас}p} \quad (2.11)$$

Виконаємо розв'язок виразу (2.11):

$$\begin{aligned} W_{pD}(p) &= \frac{0,1 \cdot 1}{2 \cdot 0,1002 \cdot 0,0154 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3,14} \cdot \frac{(0,1p + 1)}{0,1p} \\ &= 5,159 \cdot \frac{(0,1p + 1)}{0,1p} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Аналізуючи отриману передатну функцію регулятора, робимо висновок, що надалі в моделюванні необхідно використовувати ПІ-регулятор.

Використовуючи інструмент Linear Analysis програмного середовища MatLAB Simulink, було отримано перехідний процес контуру тиску та його показники якості. Результати подані у вигляді графіка на рисунку 2.4.

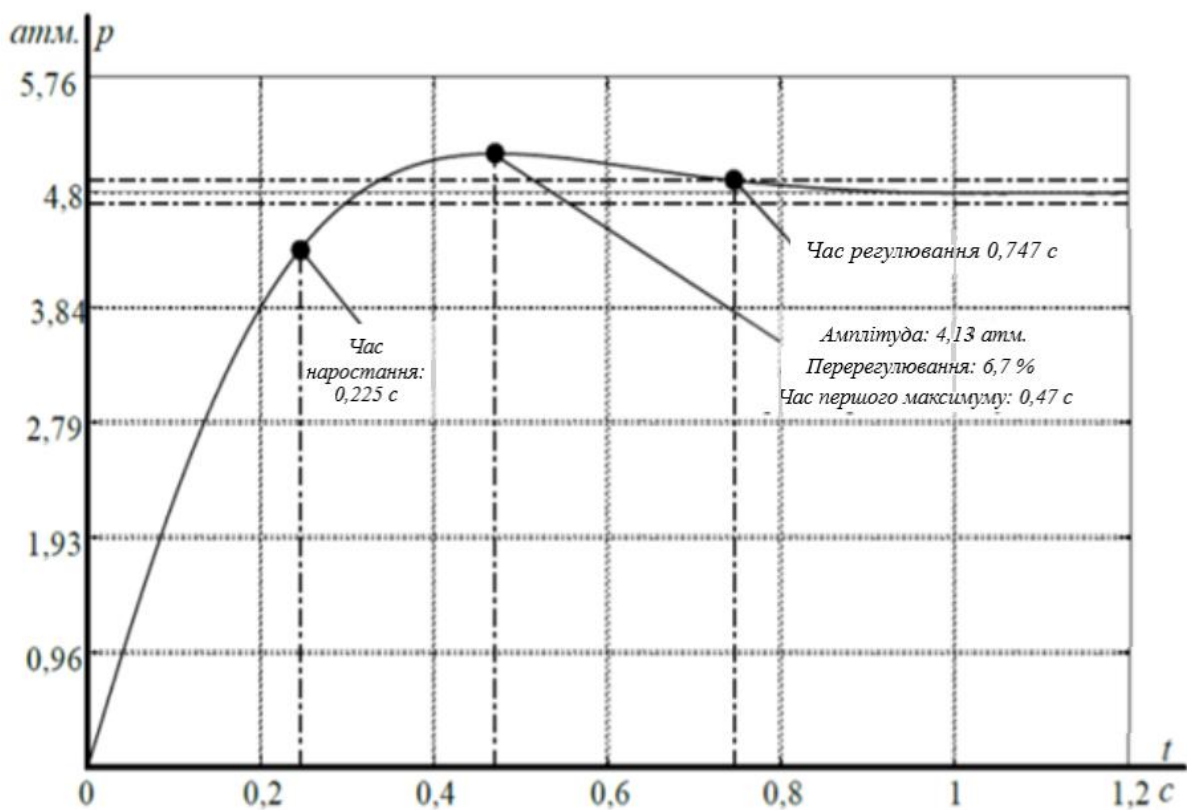


Рисунок 2.4 – Графік перехідних процесів контуру тиску

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Розрахуємо очікувані показники роботи контуру струму:

$$t_{py1}^{(5)} = t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot (0,0002 + 0,1) = 0,41082 \text{ с} \quad (2.21)$$

Отже робимо висновок, що в результаті моделювання перехідних процесів, контур тиску налаштований вірно.

Модель імітації роботи асинхронного частотнорегульованого електроприводу насоса наведена у додатку 2. Відповідно до неї було розроблено моделі окремих елементів системи які представлені на рисунках (2.5 – 2.7).

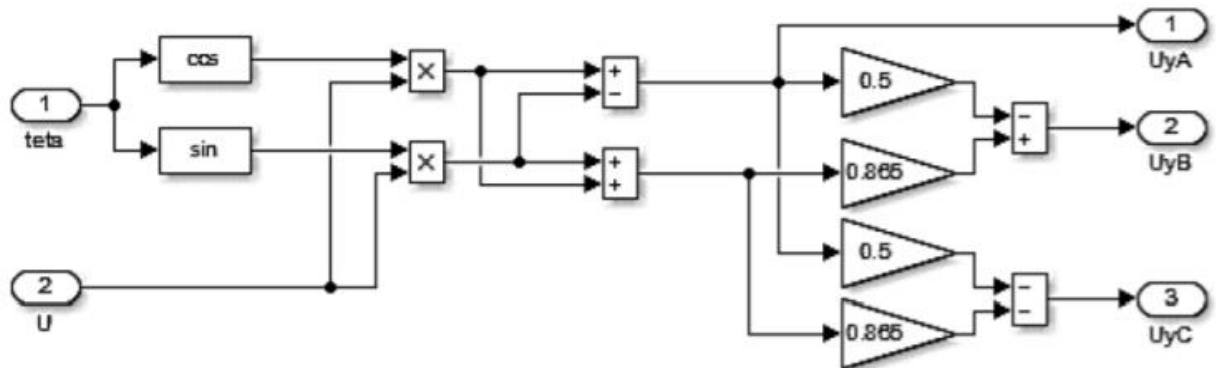


Рисунок 2.5 – Імітаційна модель прямого координатного перетворювача

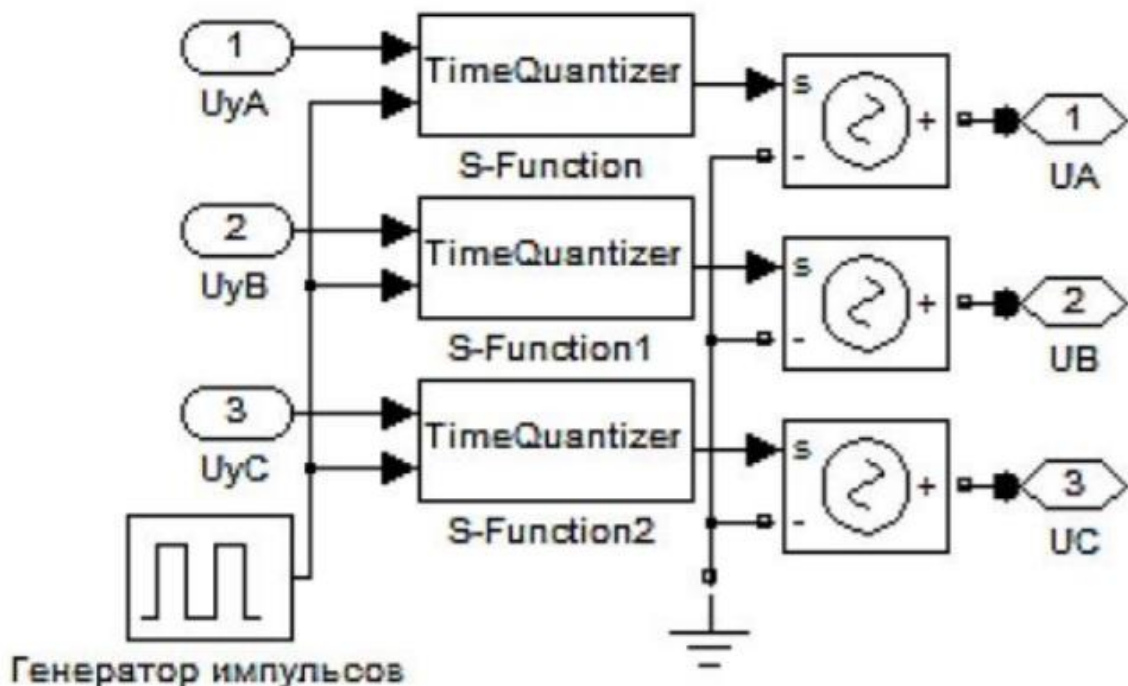


Рисунок 2.6 – Імітаційна модель перетворювача частоти

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

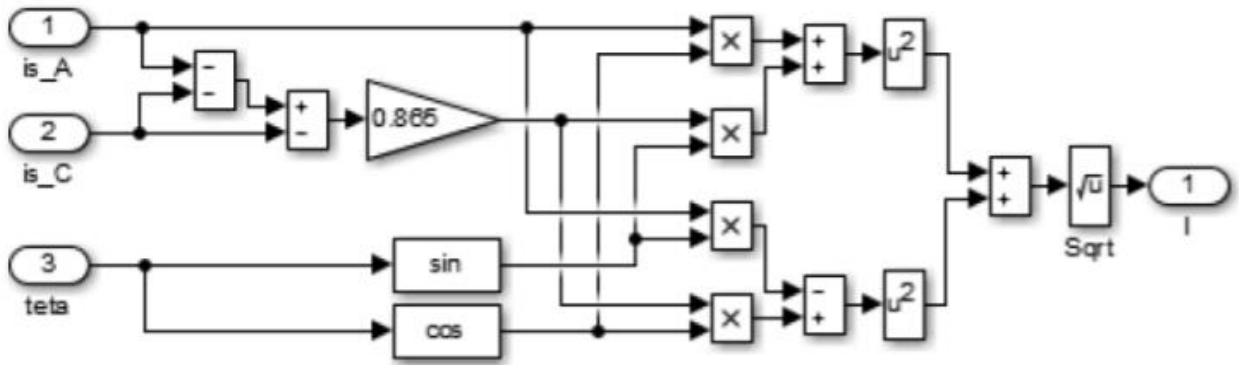


Рисунок 2.7 – Імітаційна модель зворотного координатного перетворювача

Проводимо моделювання наведених вище імітаційних моделей (рис. 2.5) – (рис. 2.7) та представляємо результати у вигляді графіків.

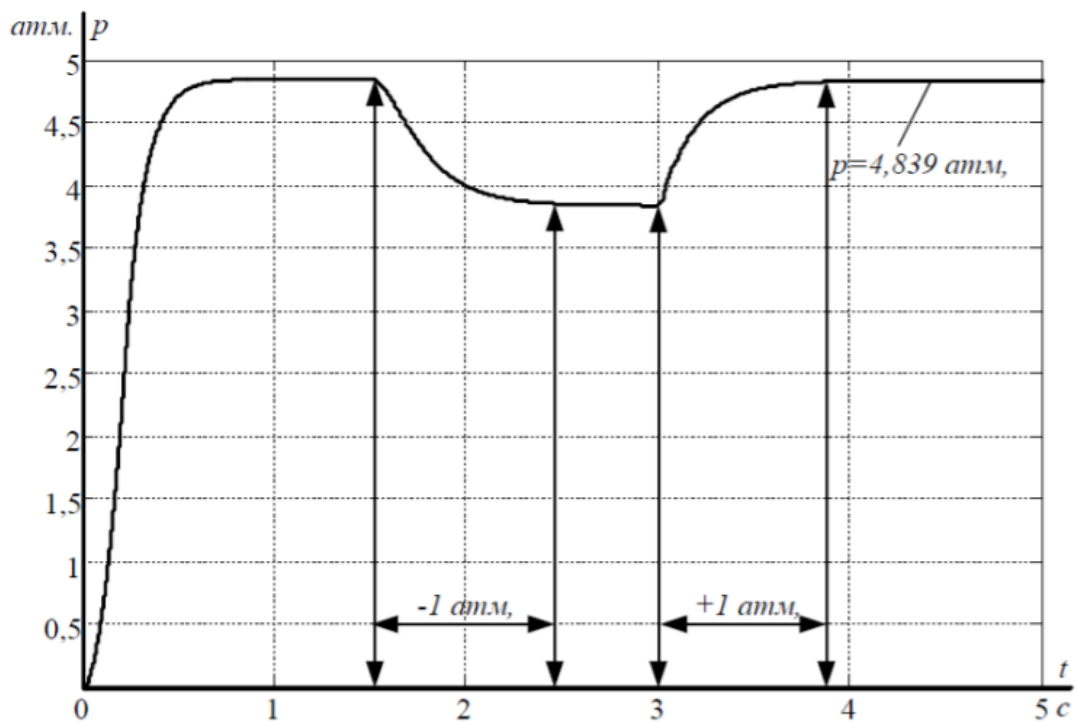


Рисунок 2.8 – Перехідна характеристика тиску насоса, при пуску та зміні тиску на  $\pm 1$  атм.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

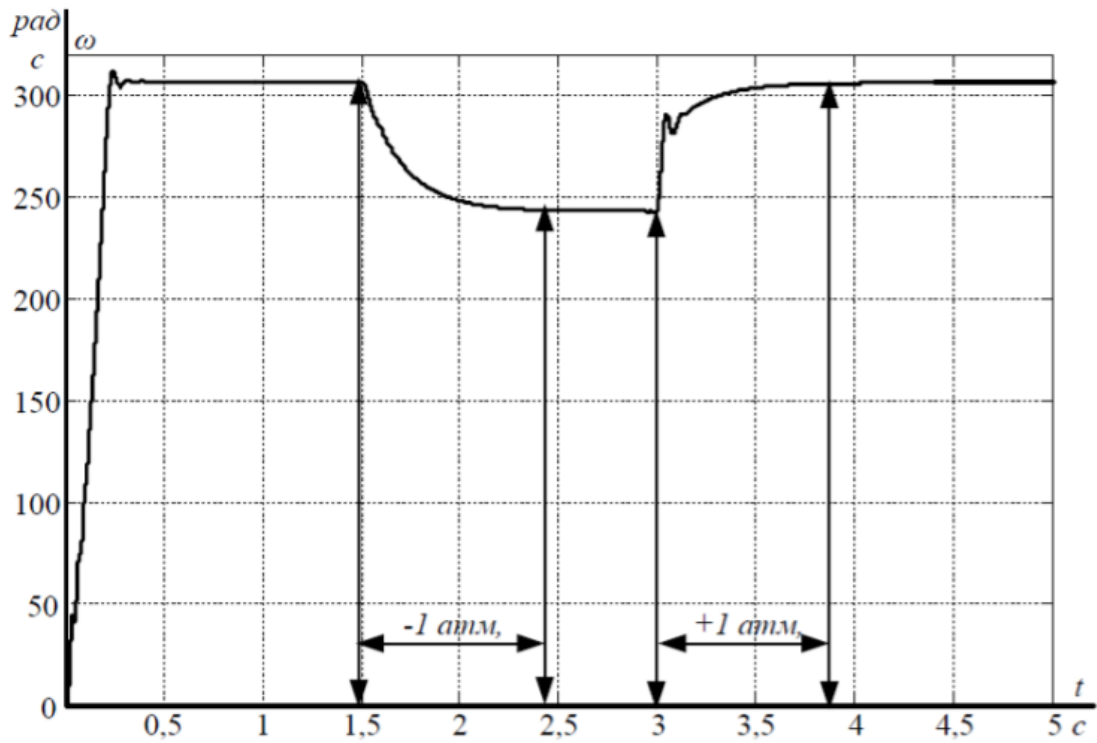


Рисунок 2.9 – Перехідна характеристика швидкості двигуна, при пуску та зміні тиску на  $\pm 1$  атм

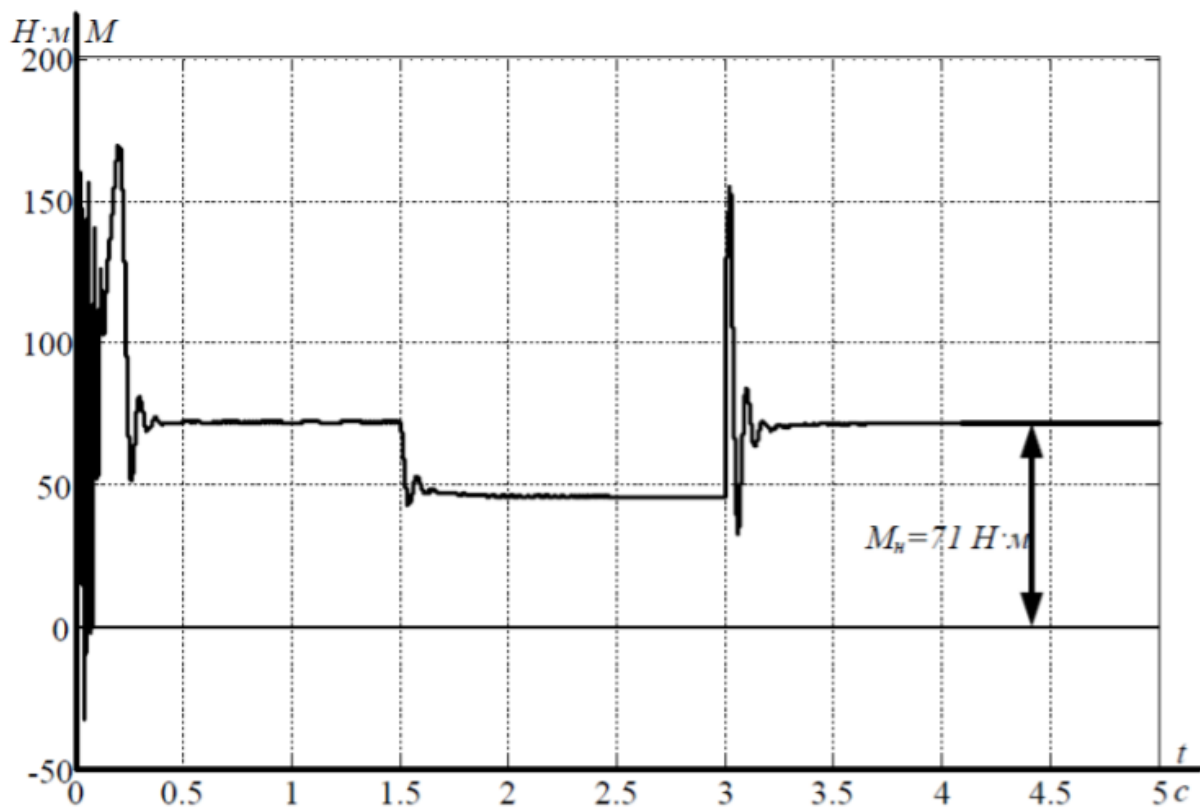


Рисунок 2.10 – Перехідна характеристика електромагнітного моменту двигуна, при пуску та зміні тиску на  $\pm 1$  атм.

В результаті проведених досліджень можна зробити висновок про те, що розроблена система працює адекватно і реагує на різні зміни тиску.

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72



### 3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Економічне обґрунтування використання ЧП для електроприводу НС

Метою даного розділу є економічне обґрунтування використання ЧП Hitachi NES1-040HBE для електроприводу НС при регулюванні рдачі води 9-ти поверхового будинку з ціллю зменшення витрат при регулюванні в порівнянні з базовим варіантом. У якості базового варіанту використовується дросель для регулювання подачі води.

Беремо до уваги, що швидкість обертання валу насоса залишається постійною, в той час як змінюється опір зовнішньої мережі.

Характеристика роботи центробіжного насосу К20/30 з асинхронним електроприводом:

- 1) навантаження 100% протягом 20% робочого дня;
- 2) навантаження 70% протягом 50% робочого дня;
- 3) навантаження 50% протягом 30% робочого дня.

Результати аналізу викладено у таблицю 3.1.

№	Конструктивне виконання		Зміна показників
	Базовий варіант	Проектний варіант	
1	Електропривод насоса містить асинхронний двигун. Регулювання подачі води здійснюється дроселем.	Електропривод насоса містить ПЧ. Регулювання подачі води здійснюється зміною швидкості валу через ПЧ.	Зменшуються витрати електроенергії яку споживає електропривод.
2	Час простою при аварійній ситуації становить приблизно 4 години	Час простою при аварійній ситуації становить приблизно 2 години	Зниження часу налаштування та діагностики при ремонтних роботах

					MP 3.8.141.222 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Фесенко Б.Р.			Проектування системи електропостачання та електропривода насосної станції адміністративної будівлі	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.		Василега П.О.					73	88
Реценз.						СумДУ ЕТ.м-01		
Н. Контр.		Никифоров М.						
Затверд.		Лебединський І Л						

3	Кількість аварій за рік: 10	Кількість аварій за рік: 5	Підвищення надійності електропривода
---	--------------------------------	-------------------------------	--

### 3.2 Розрахунок економії при використанні проектованої НС

Розрахунок економії електричної енергії буде проводитися для НС, яка досягається шляхом частотного регулювання електроприводу.

Відповідно до технологічної схеми НС зображеної на рисунку 1.5 першого розіду, у нас є два агрегата (робочий та резервний) з потужністю 4 кВт кожний. Вони забезпечують подачу води в 9-ти поверховій будівлі цивільного призначення. Насоси працюють на номінальні потужності в такі часові періоди:

- 1) з 1:00 до 7:00;
- 2) з 10:00 до 16:00.

Решту часу продуктивність становить 50% від номінальної.

Беручи до уваги, що споживана потужність ЕД прямо пропорційна кубу продуктивності насоса, а ККД насосної установки приблизно дорівнює 0,64, можемо розрахувати втрати потужності НС:

$$P_{\text{вит}} = \frac{P_{\text{ном.д}} \cdot 0,5}{\eta_{\text{нс}}} = \frac{4 \cdot 0,5}{0,64} = 3,125 \text{ кВт}, \quad (3.1)$$

де  $P_{\text{ном.д}}$  – номінальна потужність двигуна;

0,5 – 50% продуктивності двигуна від номінального значення;

$\eta_{\text{нс}}$  – ККД насосної станції.

Станом на 1 жовтня 2021 року ціна за 1 кВт становить 1,68 грн при споживанні більше ніж 250 кВт енергії за місяць (1,44 грн – для тих, хто споживає менш ніж 250 кВт за місяць).

Проведемо розрахунок електроенергії, яку можна зекономити за добу за виразом:

$$\Delta W_{\text{доб}} = \Delta P \cdot t = (P_{\text{ном.д}} - P_{\text{вит}}) \cdot t = (4 - 3,125) \cdot 12 = 10,5 \text{ кВт}, \quad (3.2)$$

						Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $t$  – кількість годин за добу, коли насоси працюють на номінальній потужності.

Тепер можемо визначити економію за одну добу:

$$E_{\text{доб1}} = \Delta W_{\text{доб}} \cdot V_{\text{еє}} = 10,5 \cdot 1,68 = 17,64 \text{ грн}, \quad (3.3)$$

де  $V_{\text{еє}}$  – вартість за 1 кВт електроенергії.

На основі результату розв'язку формули (3.3), розрахуємо економію за один рік:

$$E_{\text{рік1}} = E_{\text{доб1}} \cdot 365 = 17,64 \cdot 365 = 6438,60 \text{ грн} \quad (3.4)$$

Окремо проведемо розрахунки економії за рахунок використання енергозберігаючих характеристик перетворювача частоти Hitachi NES1-040HBE загальна додаткова економія якого складає 15%.

Розрахуємо економію за добу:

$$E_{\text{доб2}} = V_{\text{еє}} \cdot 0,15 \cdot P_{\text{ном,д}} \cdot t = 1,68 \cdot 0,15 \cdot 4 \cdot 12 = 12,10 \text{ грн}, \quad (3.5)$$

В такому разі економія за рік буде складати:

$$E_{\text{рік2}} = E_{\text{доб2}} \cdot 365 = 12,10 \cdot 365 = 4415,04 \text{ грн} \quad (3.6)$$

Виконаємо розрахунок загальної економії електроенергії за рік за наступною формулою:

$$\Delta E_{\text{рік}} = E_{\text{рік1}} + E_{\text{рік2}} = 6438,60 + 4415,04 = 10853,64 \text{ грн} \quad (3.7)$$

Проведемо розрахунок основних фінансових показників:

1. ЧДД (NPV) – чистий дисконтований дохід:

$$\begin{aligned} \text{NVP} &= \sum_{r=1}^n \frac{\Delta E_{\text{рік}}}{(1+i)^r} - (I_2 - I_1) = \\ &= \frac{10853,64}{(1+0,09)^1} + \frac{10853,64}{(1+0,09)^2} + \frac{10853,64}{(1+0,09)^3} + \\ &+ \frac{10853,64}{(1+0,09)^4} - (76315 - 44274) = 3121,75 \text{ грн}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

де  $I_1$  – вартість насосної установки при дроселюванні;

$I_2$  – вартість насосної установки при частотному регулюванні;

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$n$  – термін реалізації проекту;

$i$  – норма дисконта (приймаємо рівною 9%).

2. ІД (PI) – індекс дохідності:

$$PI = \frac{\sum_{r=1}^n \frac{\Delta E_{\text{рік}}}{(1+i)^r}}{(I_1 - I_2)} =$$
$$= \frac{\frac{10853,64}{(1+0,09)^1} + \frac{10853,64}{(1+0,09)^2} + \frac{10853,64}{(1+0,09)^3} + \frac{10853,64}{(1+0,09)^4}}{76315 - 44274} = 1,097 \quad (3.9)$$

3.  $T_{\text{ок}}$  – дисконтний термін окупності:

$$NPV_1 = \frac{10853,64}{(1+0,09)^1} - (76315 - 44274) = -22083,50 \text{ грн} \quad (3.10)$$

$$NPV_2 = \frac{10853,64}{(1+0,09)^1} + \frac{10853,64}{(1+0,09)^2} -$$
$$-(76315 - 44274) = -12948,20 \text{ грн} \quad (3.10)$$

$$NPV_3 = \frac{10853,64}{(1+0,09)^1} + \frac{10853,64}{(1+0,09)^2} + \frac{10853,64}{(1+0,09)^3} -$$
$$-(76315 - 44274) = -4567,24 \text{ грн} \quad (3.10)$$

З діаграми на рисунку 3.1 ми можемо бачити, що НС з частотним регулюванням окупиться приблизно через 1 рік та 7 місяців.

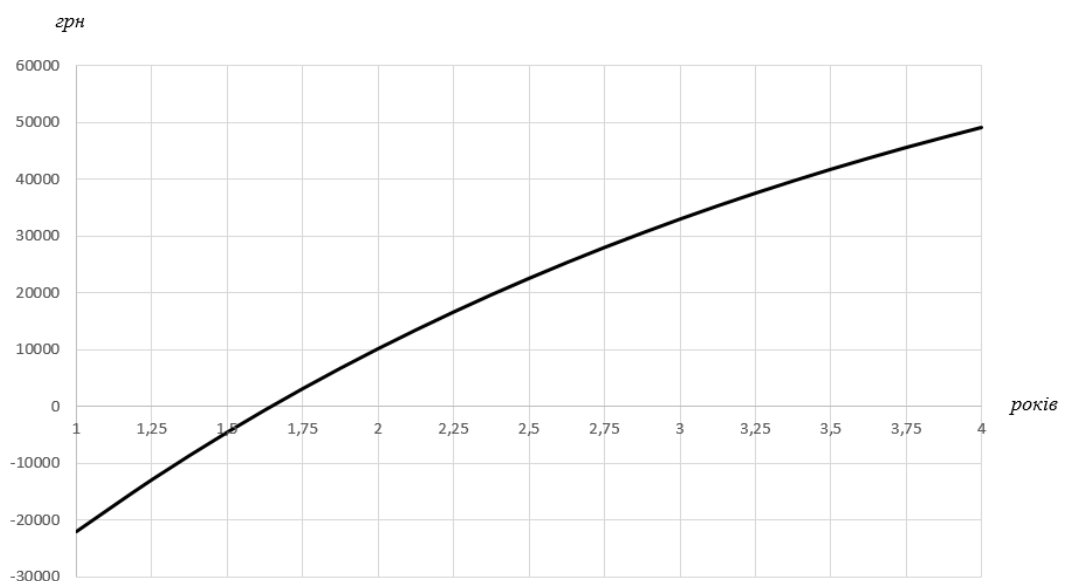


Рисунок 3.1 – Період окупності НС

За результатами розрахунків можемо спостерігати, що встановлення ЧП для НС є вигідним кроком. Незважаючи на те, що такий варіант є значно дорожчим, ніж при дроселюванні, дана установка окуплюється приблизно за 1 рік та 7 місяців та пряцює у 3-4 рази довше. Також використання ПЧ забезпечує значну економію грошей на електроенергії, капітальних ремонтах та обслуговуванні НС.

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Правила з охорони праці при експлуатації електроустановок встановлюють державні нормативні вимоги охорони праці при експлуатації електроустановок.

Дані правила розповсюджуються на працедавців (юридичних та фізичних осіб незалежно від їх організаційно-правових норм) та працівників із числа електротехнічного, електротехнологічного та неелектротехнічного персоналу організацій, які займаються технічним обслуговуванням електроустановок, які проводять в них оперативні підключення, які організують та виконують будівельні, монтажні, налагоджувальні, ремонтні роботи, дослідження та вимірювання.

Вимоги охорони праці, обумовлені особливістю експлуатації спеціалізованих електроустановок, встановлюються галузевими правилами по охороні праці, а також відображаються в нормативних документах по обслуговуванню даних електроустановок.

### 4.1 Вимоги до безпеки працівників при обслуговуванні електроустановок

Основні вимоги безпеки для працівників, які займаються обслуговуванням електроустановок [15]:

1. Порядок навчання і перевірки знань працівників має бути відповідним до галузевого положення про навчання, інструктаж і перевірку знань з питань охорони праці, узгодженого з Держнаглядом охорони праці, а також до вимог до електротехнічної обслуги, які містяться в ПТЕ.

2. Первинний (під час прийняття на роботу) та періодичний (протягом трудової діяльності) медичний огляд працівників проводиться згідно з Положенням про медичний огляд працівників певних категорій, затвердженим наказом Міністерства охорони здоров'я України від 31.03.94 №45, зареєстрованим в Міністерстві юстиції України за №136/345.

3. Працівники, що обслуговують електроустановки, зобов'язані знати ці

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МР 3.8.141.222 ПЗ			
Розроб.		Фесенко Б.Р.			Проектування системи електропостачання та електропривода насосної станції адміністративної будівлі	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Василега П.О.					78	88
Реценз.						СумДУ ЕТ.м-01		
Н. Контр.		Никифоров М.						
Затверд.		Лебединський І.Л.						

правила відповідно до займаної посади чи роботи, яку вони виконують, і мати відповідну групу з електробезпеки згідно з такими вимогами:

3.1. Для одержання групи I, незалежно від посади і фаху, необхідно пройти інструктаж з електробезпеки під час роботи в даній електроустановці з оформленням в журналі реєстрації інструктажів з питань охорони праці. Інструктаж з електробезпеки на I групу має провадити особа, відповідальна за електрогосподарство, або, за її письмовим розпорядженням, – особа зі складу електротехнічних працівників з групою III. Мінімальний стаж роботи в електроустановках і видання посвідчень працівникам з групою I не вимагаються:

3.2. Особам молодшим за 18 років не дозволяється присвоювати групу вище II;

3.3. Для присвоєння чергової групи з електробезпеки необхідно мати мінімальний стаж роботи в електроустановках з попередньою групою, зазначеній у додатку 1 цих Правил;

3.4. Для одержання груп II–III працівники мають:

- а) чітко усвідомлювати небезпеку, пов'язану з роботою в електроустановках;
- б) знати і уміти застосувати на практиці ці та інші правила безпеки в обсязі, потрібному для роботи, яка виконується;
- в) знати будову і улаштування електроустановок;
- г) уміти практично надавати першу допомогу потерпілим в разі нещасних випадків, в тому числі застосовувати способи штучного дихання і зовнішнього масажу серця;

3.5. Для одержання груп IV–V додатково необхідно знати компонування електроустановок і уміти організувати безпечне проведення робіт, уміти навчити працівників інших груп Правилам безпеки і наданню першої допомоги потерпілим від електричного струму;

3.6. Для одержання групи V необхідно також розуміти, чим викликані вимоги пунктів Правил безпечної експлуатації електроустановок. Працівнику, який пройшов перевірку знань Правил, видається посвідчення встановленої додатком 2 до цих Правил форми, яке він зобов'язаний мати при

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

собі під час роботи. Посвідчення про перевірку знань працівника є документом, який засвідчує право на самостійну роботу в електроустановках на зазначеній посаді за фахом. Посвідчення про перевірку знань видається працівникові комісією з перевірки знань підприємства, організації після перевірки знань і є дійсним тільки після внесення відповідних записів. Під час виконання службових обов'язків працівник повинен мати з собою посвідчення про перевірку знань. За відсутності посвідчення або за наявності посвідчення з простроченими термінами перевірки знань працівник до роботи не допускається. Посвідчення про перевірку знань підлягає заміні у випадку зміни посади або за відсутності місця для записів. Посвідчення про перевірку знань вилучається у працівника комісією з перевірки знань в разі незадовільних знань, керівником структурного підрозділу – в разі вигасання терміну дії медичного огляду. Посвідчення про перевірку знань складається з твердої обкладинки і блоку сторінок.

4. Забороняється допускати до роботи в електроустановках осіб, які не пройшли навчання і перевірку знань цих Правил. Ті працівники, зайняті виконанням спеціальних видів робіт, до яких висуваються додаткові вимоги безпеки, мають бути навчені безпечному виконанню таких робіт і мати відповідний запис про це у посвідченні з перевірки знань з питань охорони праці. Перелік робіт з підвищеною небезпекою затверджується керівництвом підприємства.

Результати перевірки знань фіксуються в журналі. Сторінки журналу мають бути пронумеровані, прошнуровані і скріплені печаткою підприємства на аркушах формату А4. Під час перевірки знань групи працівників в один день і за незмінного складу комісії допускається підписувати протокол один раз після перевірки усієї групи екзаменованих у цей день, перевірку знань яких проведено. В графі 4 зазначається: допускається працівник до роботи в електроустановках до 1000 В, або до і вище 1000 В. Для інспектувальних працівників і фахівців з охорони праці зазначається: “допускається як інспектувальна особа”. Відповідальність за оформлення, стан і цілісність журналу перевірки знань

					МП 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



покладається на особу, відповідальну за електрогосподарство. Термін зберігання журналу – 3 роки після останнього запису. Перевірка знань з технології робіт (правила експлуатації, виробничі інструкції) може провадитися Держенергоспоживнаглядом окремо від перевірки знань з безпечної експлуатації електроустановок, в цьому разі робиться окремий запис в журналі.

5. Забороняється допускати до роботи працівників з ознаками алкогольного або наркотичного сп'яніння, а також з явними ознаками захворювання.

6. Забороняється виконання розпоряджень та завдань, що суперечать вимогам цих Правил.

7. Кожний працівник особисто відповідає за свої дії в частині дотримання вимог цих Правил. У випадку, якщо працівник самостійно не спроможний вжити дійових заходів з усунення виявлених ним порушень Правил, він зобов'язаний негайно повідомити про це безпосереднього керівника, а у випадку його відсутності – керівника вищого рівня.

8. В разі нещасних випадків з людьми зняття напруги для звільнення потерпілого від дії електричного струму має бути виконано негайно, без попереднього дозволу.

9. Працівники, що порушили вимоги цих Правил, усуваються від роботи і несуть відповідальність (дисциплінарну, адміністративну, кримінальну) згідно з чинним законодавством.

10. Працівники, що припустилися порушення вимог цих Правил, без позачергової перевірки знань до робіт в електроустановках не допускаються.

#### 4.2 Охорона праці при виконанні робіт на електродвигунах

Для виконання робіт в електродвигунах необхідно дотримуватись наведених нижче вимог [16]:

1. Виводи обмоток, кабельні воронки і всі частини електродвигунів, що обертаються (контактні кільця, шків, муфти, вентилятори) слід огороджувати. Забороняється знімати ці огороження під час роботи електродвигуна.

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

2. Вмикати та вимикати електродвигуни пусковою апаратурою з приводами ручного керування необхідно в діелектричних рукавичках.

3. При виконанні роботи на електродвигуні або механізмі, який наводиться їм у рух, що пов'язано з дотиком до струмоведучих або обертових частин, з електродвигуна слід зняти напругу, а кабель, що живить його, слід заземлити. Роботи, не пов'язані з дотиком до струмоведучих або обертових частин електродвигуна або механізму, що наводиться ним у рух, можуть проводитися на працюючому електродвигуні за розпорядженням або в порядку поточної експлуатації.

4. При виконанні роботи на електродвигуні заземлення можна встановлювати на будь-якій ділянці кабельної лінії, що з'єднує двигун з РУ (складанням).

5. При виконанні робіт на механізмі, не пов'язаних з дотиком до обертових, і у разі роз'єднання сполучної муфти заземляти кабельну лінію не потрібно.

6. У разі від'єднання кабелю від електродвигуна необхідно на жили кабелю з боку електродвигуна встановити переносне заземлення. У тому випадку, коли перетин жил кабелю не дозволяє застосовувати переносні заземлення, допускається в електродвигунах напругою до 1000 В заземлювати кабельну лінію мідним провідником перетином, не менше перетин жили кабелю, або з'єднувати між собою жили кабелю та ізолювати їх. Таке заземлення та з'єднання жил кабелю слід враховувати в оперативній документації нарівні із переносним заземленням.

7. Перед допуском працівників до роботи на електродвигунах насосів, димососів та вентиляторів, якщо можливе обертання електродвигунів від з'єднаних з ними механізмів, слід закрити та замкнути на замок засувки та шибери останніх, а також вжити заходів щодо гальмування роторів електродвигунів.

8. На однотипних або близьких за габаритом електродвигунах, встановлених поряд з тим, на якому проводиться робота, слід вивішувати

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

плакати "Стій! Напруга" незалежно від того, перебувають вони в роботі або в резерві.

9. Випробування електродвигуна разом із виконавчим механізмом слід проводити з дозволу начальника зміни технологічного цеху, де вони встановлені. Про видачу дозволу слід робити запис в оперативному журналі технологічного цеху, а про отримання цього дозволу - в оперативному журналі цеху (ділянки), що проводить випробування.

10. Ремонт та налагодження схеми керування електродвигуном, не з'єднаним з виконавчим механізмом, можна проводити за розпорядженням. Випробування схеми управління виконується з дозволом працівника, який видав розпорядження. Запис про це слід зробити, коли реєструється розпорядження.

					МП 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВОК

В результаті виконання магістерської роботи був досліджений технологічний процес підтримання тиску води. Також було проведено дослідження насосних станцій та обрано технологічну схему за якою проводилося подальше проектування.

Були проведені розрахунки електричних навантажень НС відповідно до параметрів обраних насосів та електродвигунів. Також було проведено розрахунок навантаження електричного освітлення приміщення НС.

На основі вихідних даних був виконаний розрахунок та вибір основних силових елементів системи, зокрема перетворювального пристрою для системи регульованого електроприводу.

Були розраховані та побудовані механічні та електромеханічні характеристики обраного АД, а також розраховано регулювання координат електропривода в системі “перетворювач частоти – двигун” (ПЧ-АД).

Системи скалярного керування мають ряд переваг перед іншими системами: простота, надійність, вимагається мінімум інформації про двигун, немає необхідності у використанні датчиків швидкості та положення ротора.

Була розроблена система керування електропривода НС з використанням ПІ-регулятора та проведено дослідження режимів її роботи у програмному середовищі моделювання MathLab. Отримані результати, що були отримані у вигляді графіків, показують, що робота моделі з ПІ- регулятором виконується без помилок, що свідчить про коректність налаштування розробленої системи.

Було проведене економічне обґрунтування використання ЧП для електроприводу НС у порівнянні з дрослюванням. Також було проведено розрахунок економії при використанні проектової НС та визначено термін окупності даної установки, який складає приблизно 1 рік та 7 місяців.

У розділі з охорони праці був проведений аналіз основних вимоги до безпеки працівників при обслуговуванні електроустановок та в частості електродвигунів.

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сохнич А.Я. Використання земель населених пунктів з основами містобудування. – Львів: Видавництво «Ліга-Прес», 2010. – 168 с.
2. Душкін С.С., Краєв І.О. Експлуатація водопостачання та водовідведення, 2003. – 72с.
3. Сашко В.О., Терещенко Т.М. Водопостачання. Навчальний посібник, 2019. – 114 с.
4. Технічний каталог трифазних електродвигунів WEG, 2011. – 80 с.
5. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным, 2012. – 7 с.
6. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/ Под ред. Л.Г. Мамякоянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с., ил.
7. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2007. – 350с
8. Электротехнический справочник: в 3-х т. Т.2. Электротехнические изделия и устройства/ Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов) и др -7-е изд., испр. и доп. – М: Энергоатомиздат, 1986. – 712с.
9. Бекишев Р.Ф. Электропривод [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <https://stud.com.ua/84176/tehnika/elektroprivod>
10. Регулируемый асинхронный электропривод [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: [https://ozlib.com/907527/tehnika/reguliruemyy\\_asinhronnyy\\_elektroprivod](https://ozlib.com/907527/tehnika/reguliruemyy_asinhronnyy_elektroprivod)
11. Сандлер А.С. и Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М., "Энергия", 1974. – 328 с.
12. В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин Основы электропривода, 1963. – 772 с.
13. Лыкин А. В. Электрические системы и сети: учебное пособие / А. В. Лыкин. - М. : Университетская книга; Логос, 2008. - 254 с.

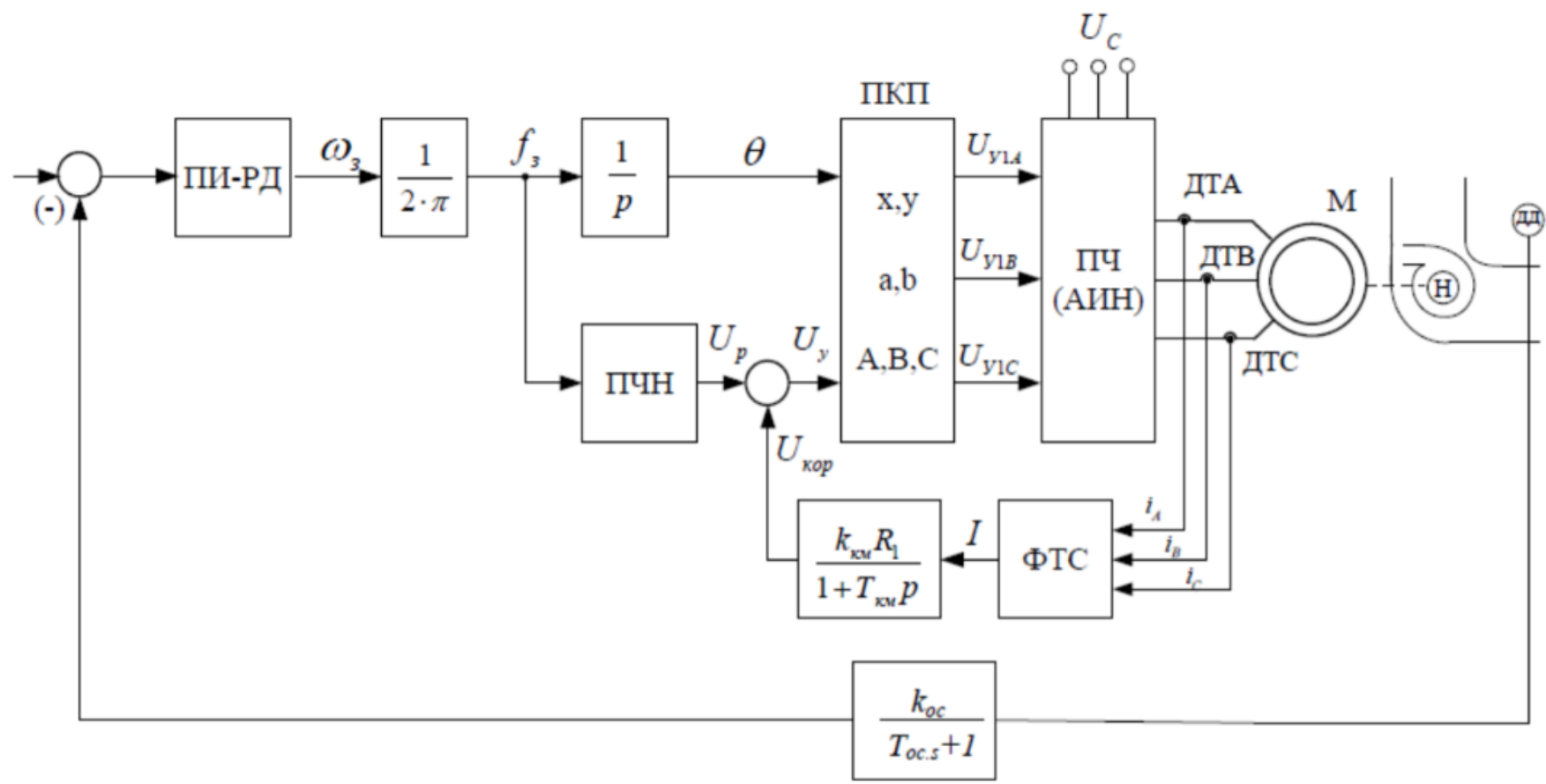
					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

14. Розрахунок компенсації реактивної потужності [Електронний ресурс].  
– Режим доступу до ресурсу: <https://vp-alliance.ru/kalkulyatory-rascheta-moshchnosti-krm>

15. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://leg.co.ua/knigi/pravila/pravila-bezpechnoyi-ekspluataciyi-elektrostanovok-spozhyvachiv-2.html>

16. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безопасной эксплуатации электроустановок.

					MP 3.8.141.222 ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Позначено

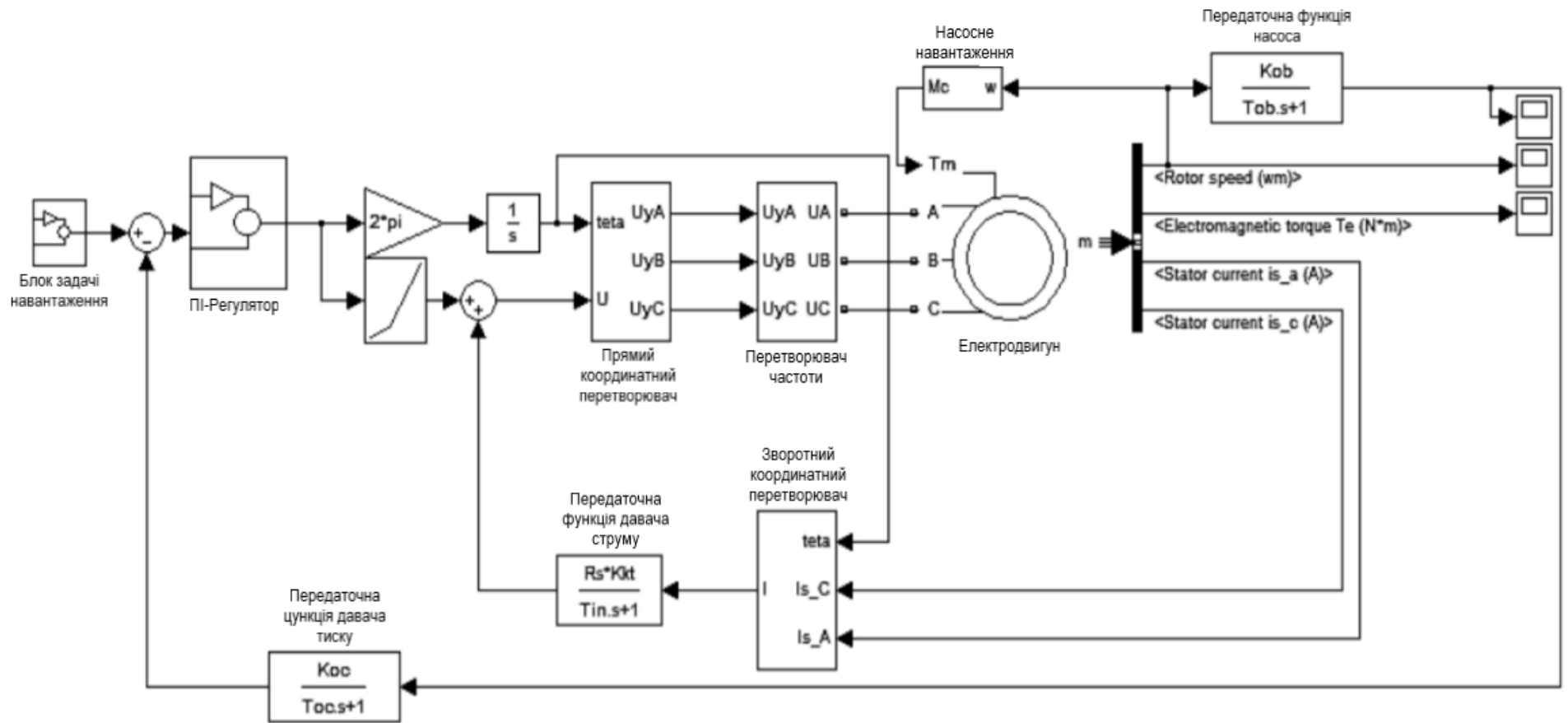
Інв. № 00.	Підпис: Л.В.В.	Зав. інв. №

Зм.	Кіт.	Арк.	Напок.	Підпис	Дата
Розробив:		Фасенко Б.Р.			
Теревірив:		Басюлега П.О.			
П.контроль:		Навифороз М.А.			

MP 3.8.141.222 ГЧ

Схема ЧП-АД в системі підтримання тиску води

Лист	Маса	Маштаб
СумДУ ЕТ.м-01		



Позначено				
Зроблено				
Перевірено				
Інв. N ф.				
Інв. N д.				

Зм.	К.г.к.	Арх.	Непог.	Підпис	Дата
Розробник	Фасенко Б.Р.				
Перевірив	Бачинська П.О.				
Контроль	Евдокимов В.А.				

MP 3.8.141.222 ГЧ						
Імітаційна модель асинхронного частотнорегульованого електроприводу насоса				Лист	Маса	Маштаб
СумДУ ЕТ.м-01						