

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ТЕМА РОБОТИ

**Модернізація автоматизованого електроприводу станції
підкачування питної води типового 9-поверхового будинку**

Виконав:

студент групи ЗЕЕМ-23-ск	_____	Мухін В.Д.
Керівник випускної роботи	_____	д.т.н., проф. В.К. Титюк
Нормоконтролер	_____	д.т.н., проф. В.К. Титюк
Декан ЕТФ	_____	к.т.н., доц. В.О. Федотов
Гарант освітньої програми	_____	к.т.н., доц. І.І. Пересунько

Кривий Ріг

2026 р.

**ЗАВДАННЯ НА
ВИПУСКНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Мухіну Владіславу Денисовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація автоматизованого електроприводу станції підкачування питної води типового 9-поверхового будинку
2. Строк подання здобувачем роботи: 10 червня 2026 р.
3. Мета та завдання випускної роботи:

Мета та завдання випускної роботи – дослідження технологічних характеристик процесу водопостачання при використанні частотно-регульованого електроприводу, аналіз статичних та енергетичних характеристик електроприводу насоса, розрахунок динамічних режимів електроприводу у MATLAB/Simulink, розрахунок елементів системи електропостачання станції підкачування.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) :
Опис технологічної схеми водопостачання житлового будинку; Опис технологічного устаткування; Електромеханічне обладнання станції підкачування; Розрахунки статичних режимів роботи електроприводу станції підкачування; Розрахунок динамічних режимів електроприводу станції підкачування. Розрахунок елементів системи електропостачання станції підкачування..

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Слайди презентації у кількості 9 штук _____

2.Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Титюк В.К.	05.05.2026	10.06.2026
II	Титюк В.К.	05.05.2026	10.06.2026
III	Титюк В.К.	05.05.2026	10.06.2026

7.Календарний план виконання роботи та консультацій

№	Назва етапів роботи	Дата виконання
1	Опис технологічної схеми водопостачання житлового будинку	11.05.2026
2	Електромеханічне обладнання станції підкачування багатоповерхневого будинку	15.05.2026
3	Визначення параметрів схеми заміщення, розрахунок природних статичних та енергетичних характеристик електроприводу насоса.	20.05.2026
4	Розрахунок штучних статичних та енергетичних характеристик електроприводу насоса при частотному керуванні	25.05.2026
5	Дослідження динамічних режимів електроприводу насоса у MATLAB/Simulink.	01.06.2026
6	Розрахунки елементів системи електропостачання станції підкачування	05.06.2026
7	Оформлення пояснювальної записки та презентації випускної роботи. Перевірка на антиплагіат.	10.06.2026

Дата видачі завдання 05.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ **Мухін В.Д.** _____

(підпис)(ПІБ)

Керівник роботи _____ **Титюк В.К.** _____

(підпис) (ПІБ)

ЗМІСТ

Реферат.....	5
Вступ	7
Розділ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ТА ПОДАЧІ ВОДИ.....	8
1.1 Типова технологічна схема системи міського водопостачання	8
1.2 Характеристика підкачувальної насосної станції для подачі води у 9-поверховий будинок.....	12
1.3 Насосні агрегати та їхні характеристики	14
1.4 Розрахунок потужності двигуна насоса. Вибір двигуна	16
1.5 Методи регулювання продуктивності насоса	17
1.6 Вимоги до електроприводу. Обґрунтування необхідності застосування регульованого електроприводу	21
Висновки до розділу 1	26
Розділ 2 АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІДКАЧУВАЛЬНОГО НАСОСА	27
2.1 Ідентифікація параметрів двигунів за даними каталогу	27
2.2 Розрахунок електромеханічних характеристик електропривода підкачувального насоса	33
2.3 Розрахунок пускових характеристик асинхронного двигуна у MATLAB/Simulink	37
2.4 Математичне моделювання підкачуючого насоса з частотно-регульованим електроприводом	38
Висновки до розділу 2	42
Розділ 3 ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СТАНЦІЇ ПІДКАЧКИ	43
3.1 Аналіз вхідних даних.....	43
3.2 Розрахунок електричних навантажень.....	43
3.3 Вибір схеми живлення та силових трансформаторів	44
3.4 Вибір перерізу струмопроводів та комутаційних пристроїв	44
3.5 Розрахунок струмів короткого замикання.....	45
3.6 Перевірка елементів схеми живлення на термічну та електродинамічну стійкість	46
3.7 Перевірка елементів схеми електропостачання на предмет допустимої втрати напруги	47
3.8 Забезпечення якості електричної енергії на затискачах перетворювальних установок.....	48
Висновки до розділу 3	48
Висновки по роботі	49
Перелік використаних джерел	51

					КНУ РБ.141.26.251с.4.3М			
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис		Зміст			
Розроб.		Мухін В.Д.						
Перевір.		Титюк В.К.						
Реценз.								
Н. Контр.		Титюк В.К.						
Затверд.		Пересулько І.І.			ЕМ гр. ЗЕЕМ-23ск			
					Літ.	Арк.	Аркушів	
						4		

Реферат

51 сторінка, 2 таблиці, 13 рисунків, 10 джерел літератури.

Тема випускної роботи: Модернізація автоматизованого електроприводу станції підкачування питної води типового 9-поверхового будинку.

Мета роботи: розробка математичної моделі та дослідження технологічних характеристик процесу підкачування питної води при використанні частотно-регульованого електроприводу насоса.

У випускній роботі у повному об'ємі використані різноманітні методи дослідження, такі як математичні розрахунки, графічні побудови, математичні залежності та теоретичні положення з курсів «Теорія електропривода», «Електричні машини», «Теоретичні основи електротехніки», «Теорія автоматичного керування». Також виконано моделювання системи привода у програмному пакеті Matlab для отримання графічних залежностей перехідних процесів у різних режимах роботи.

У вступі обґрунтовується актуальність обраної теми. Проведено огляд літератури щодо існуючих технологічних схем насосних станцій та виконано розрахунок потужності привода. Проаналізовано методи регулювання продуктивності насосних станцій та обґрунтовано обраний метод регулювання. Визначено параметри та характеристики електродвигунів насосів, виконано аналіз об'єкта дослідження за допомогою математичного моделювання. Розглянуто питання електропостачання привода станції підкачування

Ключові слова: ВОДОПОСТАЧАННЯ, НАСОСНА СТАНЦІЯ, НАПІРНА ХАРАКТЕРИСТИКА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ

					КНУ РБ.141.26.251с.4.РФ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Реферат	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Мухін В.Д.					5	
Перевір.		Титюк В.К.						
Реценз.								
Н. Контр.		Титюк В.К.				ЕМ гр. ЗЕЕМ-23ск		
Затверд.		Пересунько І.І.						

					Лист	
					6	
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис		КНУ РБ.141.26.251с.4.РФ	

Вступ

Системи подачі та розподілу води (СПРВ) належать до найбільш енергоємних об'єктів міського комунального господарства. Основними споживачами електроенергії в системах тепло-водопостачання є насосні станції (НС). Наразі більшість НС оснащені нерегульованим приводом на базі асинхронних і синхронних електродвигунів. Нерегульований привід в умовах різкої зміни тиску, зумовленої характером і режимами роботи споживачів, нерідко призводить до аварійності та збоїв у роботі СПВ. Автоматизація режимів роботи НС шляхом впровадження енергозберігаючого обладнання підвищить надійність роботи системи водопостачання, дозволить заощадити енерго- та водні ресурси.

Насоси належать до найбільш поширених та енергоємних механізмів на промислових підприємствах та у побутовій техніці, споживаючи близько 25 % електроенергії, що виробляється в країні. Номінальна потужність приводних електродвигунів насосів коливається від одиниць до десятків тисяч кіловат.

					КНУ РБ.141.26.251с.4.ВС						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Мухін В.Д.			Вступ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Титюк В.К.								7	
Реценз.								ЕМ гр. ЗЕЕМ-23ск			
Н. Контр.		Титюк В.К.									
Затверд.		Пересунько І.І.									

Розділ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ТА ПОДАЧІ ВОДИ

1.1 Типова технологічна схема системи міського водопостачання

Система водопостачання являє собою комплекс споруд, що виконують завдання водопостачання, тобто забір води з природних джерел, її очищення, транспортування та подачу різним споживачам у заданій кількості та при необхідному тиску [1]. Споживачами можуть бути населені пункти, міста, підприємства більшості галузей промисловості.

Забезпечення населення чистою, якісною водою має велике гігієнічне значення, оскільки захищає людей від різних епідемічних захворювань (що передаються через воду). Подача достатньої кількості води в населений пункт дозволяє підвищити загальний рівень його благоустрою. Для задоволення потреб сучасних великих міст у воді потрібні величезні її кількості, що вимірюються в мільйонах кубічних метрів на добу. Виконання цього завдання, а також забезпечення високих санітарних якостей питної води вимагають ретельного вибору природних джерел, їх захисту від забруднення та належного очищення води на водопровідних спорудах.

Слід зазначити, що окрім забезпечення водою населення та промисловості, яке здійснюється системами водопостачання, величезне значення для народного господарства має забезпечення водою сільського господарства для штучного зрошення земель з метою успішного вирощування сільськогосподарських культур та отримання високих врожаїв.

					КНУ РБ.141.26.251с.4.01.P1							
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Мухін В.Д.			Опис технологічного устаткування				Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Титюк В.К.									8	
Реценз.									ЕМ гр. ЗЕЕМ-23ск			
Н. Контр.		Титюк В.К.										
Затверд.		Пересунько І.І.										

У ряді районів таке штучне зрошення (іригація) є вкрай необхідним і широко застосовується. Іригація, з огляду на величезні обсяги споживаної води та специфічні методи її використання, становить окрему галузь водного господарства.

Система водопостачання (населеного пункту або промислового підприємства) повинна забезпечувати отримання води з природних джерел, її очищення, якщо це викликано вимогами споживачів, та подачу до місць споживання. Для виконання цих завдань служать такі споруди, що зазвичай входять до складу системи водопостачання:

- а) водоприймальні споруди, за допомогою яких здійснюється прийом води з природних джерел;
- б) водопідйомні споруди, тобто насосні станції, що подають воду до місць її очищення, зберігання або споживання;
- в) споруди для очищення води;
- г) водоводи та водопровідні мережі, що служать для транспортування та подачі води до місць її споживання;
- д) вежі та резервуари, що відіграють роль регулюючих та запасних ємностей у системі водопостачання.

Схема взаємного розташування основних споруд системи водопостачання показана на рис. 1.1.

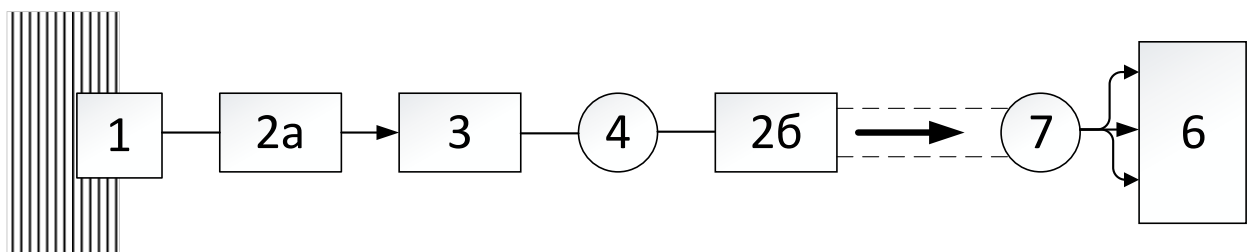


Рисунок 1.1 Схема взаємного розташування основних споруд системи водопостачання

Вода забирається з джерела за допомогою водозабірної споруди 1 і подається насосами, встановленими на станцію першого підйому 2а, на

очисні споруди 2. Після очищення вода надходить у збірний резервуар 4, з якого забирається іншою групою насосів, встановлених на станції другого підйому 2б, і по водогонах 5 подається в мережу труб 6, що розводять воду до місць споживання. Водонапірна вежа (або напірний резервуар) 7 може бути розташована на початку мережі, в кінці її або в будь-якій проміжній точці мережі. Порядок розташування інших споруд також може бути різним. Так, насоси першого та другого підйому можуть бути встановлені в окремих будівлях або розміщені в одній будівлі. Іноді насоси першого підйому встановлюються безпосередньо у водоприймальній споруді. У деяких випадках очисні споруди та пов'язані з ними резервуар і насосну станцію другого підйому розташовують не біля джерела, а поблизу об'єкта, що споживає воду (міста, селища або промислового підприємства).

1.1.1 Основі визначення та призначення насосних станцій

Гідравлічна машина, що створює напірне переміщення рідини при передачі їй енергії, називається насосом [2]. Насос у поєднанні з електроприводом і передавальним механізмом (муфтою, редуктором, шківом тощо) утворює насосний агрегат. Комплекс обладнання, що забезпечує роботу насосів у необхідному режимі та складається з одного або декількох насосних агрегатів, трубопроводів, запірної та регулюючої арматури, контрольно-вимірювальної апаратури, а також апаратури управління та захисту, утворює насосну установку. Споруда, до складу якої входять одна або кілька насосних установок, а також допоміжні системи, обладнання, побутові та виробничі приміщення, що забезпечують працездатність об'єкта в цілому, називається насосною станцією.

Склад споруд, їхні конструктивні особливості, тип та кількість основного й допоміжного обладнання визначаються виходячи з принципів комплексного використання водних ресурсів та охорони природи з

					КНУ РБ.141.26.251с.4.01.P1	Лист
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис			10

урахуванням призначення насосної станції та технологічних вимог, що до неї висуваються.

Основними параметрами, що характеризують режим роботи насосної установки, є напір і витрата. Напір – різниця питомих енергій рідини в напірному та всмоктувальному патрубках насоса, необхідна для підйому рідини на задану висоту та подолання сил тертя в трубопроводі. Подача – об’єм рідини, що перекачується насосною установкою за одиницю часу.

Режимом роботи насосної установки називається певний порядок роботи її обладнання відповідно до мінливих умов роботи системи в цілому. Режим роботи насосної установки визначається режимом споживання відповідно до потреб споживача.

Залежно від призначення та виду рідини, що перекачується, насосні установки поділяються на водопровідні, каналізаційні, меліоративні, теплофікаційні, нафтоперекачувальні та ін.

Насосні водопровідні станції, залежно від місця, яке вони займають у загальній схемі водопостачання, поділяються на станції I підйому, II підйому та підвищувальні.

Насосні станції I підйому забирають воду з джерела водопостачання і подають її на очисні споруди або, якщо очищення води не потрібне, безпосередньо в резервуари, розподільну мережу, водонапірну вежу або інші споруди залежно від прийнятої схеми водопостачання. На промислових підприємствах з процесами, що висувають різні вимоги до якості води, на одній і тій же насосній станції можуть бути встановлені насоси, що подають воду як на очисні споруди, так і безпосередньо на підприємства без очищення.

Насосні станції II підйому служать для подачі очищеної води споживачам, зазвичай з резервуарів чистої води.

У деяких випадках насоси I та II підйому можуть бути розміщені на одній станції, що дозволяє зменшити витрати на будівництво та експлуатацію. Однак таке рішення не завжди можливе і залежить від виду

					КНУ РБ.141.26.251с.4.01.P1	Лист
						11
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис			

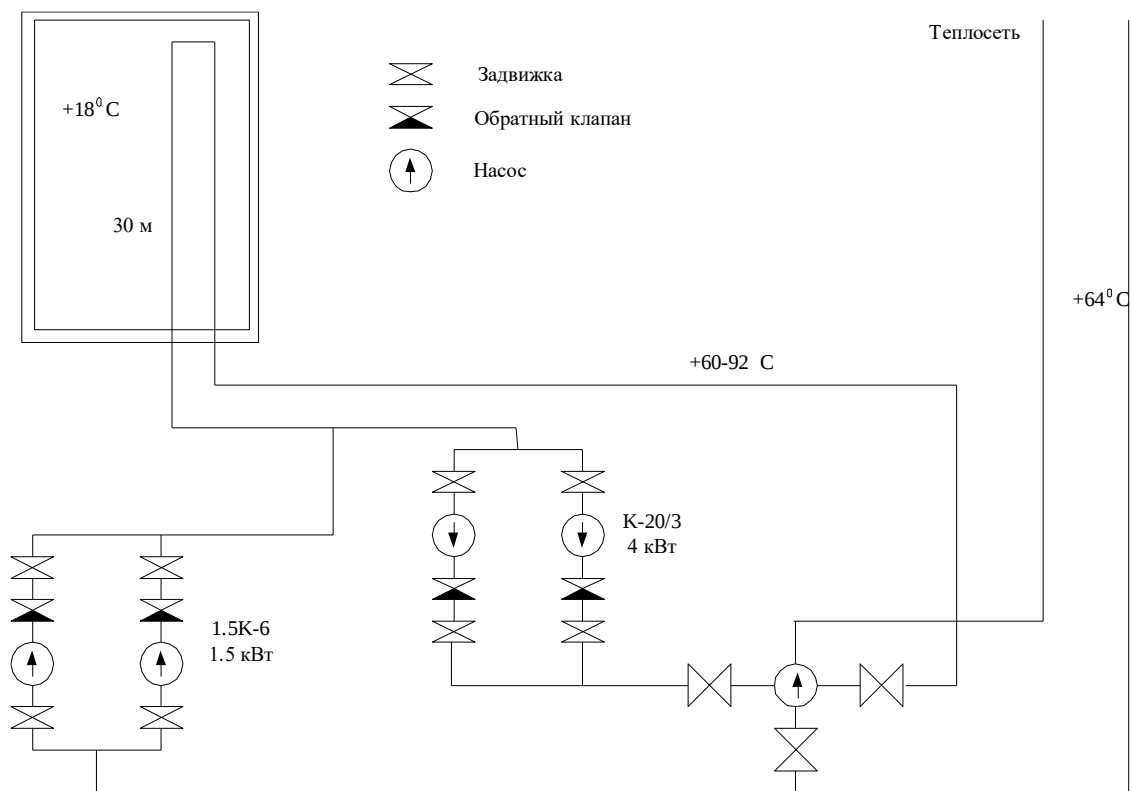
джерела води, наявності та типу очисних споруд, від рельєфу місцевості тощо.

Підвищувальні насосні станції (станції підкачування) призначені для підвищення напору у водопровідній мережі або у водогоні. У цьому випадку вода забирається з однієї мережі (ділянки водогону) і під підвищеним напором подається в іншу мережу (район міста, окремий цех промислового підприємства) або в наступну ділянку довгого водогону.

1.2 Характеристика підкачувальної насосної станції для подачі води у 9-поверховий будинок

Насосна станція підкачування 9-поверхового будинку забирає воду з мережі водопроводу низького тиску $2,5 \text{ кг/м}^2$ і подає її в мережу високого тиску $6,8 \text{ кг/м}^2$.

Технологічна схема насосної станції підкачки зображена на рис. 1.2.



1 — основний насос; 2 — резервний насос; 3 — засувка; 4 — зворотний клапан; 5 — манометр; 6 — водомір

Рисунок 1.2 - Технологічна схема підкачувальної насосної станції

У будівлі станції незаглибленого типу встановлено два відцентрові насоси консольного типу ТНП-066 у комплекті з асинхронними двигунами серії АІР. Вода забирається з міської мережі та подається в мережу будинку двома трубами діаметром 100 мм. Схема перемикання – колекторна, з розміщенням низьконапірного та високонапірного колекторів у приміщенні насосної станції. Усі внутрішньостанційні трубопроводи знаходяться на рівні вище підлоги.

До основного обладнання насосних установок належать насоси, приводи насосів (електродвигуни, двигуни внутрішнього згоряння), а також трубопроводи з регулюючою та запірною арматурою.

На сучасних насосних установках найбільшого поширення набули лопатеві насоси: відцентрові та осьові [2].

Усередині нерухомого корпусу відцентрового насоса, що має спіральну форму, знаходиться робоче колесо, закріплене на валу. Колесо складається з двох дисків, між якими розташовані лопаті. Корпус насоса з'єднаний з всмоктувальним і напірним трубопроводами патрубками. Якщо корпус насоса і його всмоктувальний трубопровід наповнити рідиною, а потім привести в обертання робоче колесо, то рідина під дією лопатей робочого колеса починає обертатися. Відцентрові сили переміщують рідину на периферію, де створюється підвищений тиск, а в центрі колеса – розрідження. За рахунок цієї різниці тисків рідина надходить у напірний трубопровід. Так здійснюється безперервна подача рідини насосом.

Відцентрові насоси можуть бути як одноступінчастими (з одним робочим колесом), так і багатоступінчастими (з декількома колесами). За своєю конструкцією, залежно від розташування вала, вони поділяються на горизонтальні та вертикальні насоси.

Для приводу насосів використовуються переважно асинхронні короткозамкнуті та синхронні двигуни змінного струму. У поодиноких випадках застосовуються асинхронні електродвигуни з фазним ротором.

					КНУ РБ.141.26.251с.4.01.Р1	Лист
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис			13

Електродвигуни потужністю до 350 кВт виготовляються на напругу 380–660 В, а потужніші — на 6–10 кВ.

Внутрішні трубопроводи насосних станцій (напірні та всмоктувальні лінії насосів, всмоктувальні та напірні колектори тощо) виготовляються зі сталевих труб. З'єднання сталевих труб здійснюється зварюванням. Як трубопровідну арматуру в насосних установках використовують засувки, заслінки, зворотні заслінки (клапани).

Залежно від конструкції засувки поділяються на паралельні та клинові. Засувки великого діаметра, а також ті, що працюють з дистанційним та автоматичним керуванням, оснащуються гідравлічними або електричними приводами. Для врівноваження тиску по обидва боки диска у великих засувках передбачається обвідна засувка (байпас).

В якості запірної та регулюючої арматури використовуються затвори. Широке застосування останнім часом отримали дискові затвори, які оснащуються електричними приводами.

1.3 Насосні агрегати та їхні характеристики

Типовим рішенням для насосної станції підкачування є використання відцентрового насоса консольного типу ТНП-066, технічні характеристики якого наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Технічні характеристики насоса ТНП-066

Марка насоса	Подача Q		Повний тиск	Частота обертання	Потужність N в кВт		КПД, %	Допустима висота всмоктування	Діаметр робочого колеса
	м ³ /ч	в л/с			на валу насоса	двигуна			
ТНП-066	20	5,5	30,8	2900	2,7	4,5	67	7,2	162

Характеристикою насоса називається графічно виражена залежність основних енергетичних показників від витрати при постійній частоті

обертання вала робочого колеса, в'язкості та щільності рідини на вході в насос [3].

Основні параметри лопатевих насосів - подача Q , напір H , потужність N , коефіцієнт корисної дії η та частота обертання вала робочого колеса n - знаходяться у певній залежності.

Значення напору, потужності та ККД для ряду значень витрати можуть бути представлені у вигляді системи точок у координатах Q - H , Q - N та Q - η .

Напірно-витратна характеристика нерегульованого насоса описується рівнянням другого ступеня:

$$H = H_0 - R_g \cdot Q^2 \quad (1.1)$$

де H - напір, що створюється насосом;

H_0 - напір, що створюється насосом при нульовій подачі;

R_g - внутрішній опір насоса;

Q - продуктивність (подача), що створюється насосом.

Для насоса з регульованою швидкістю:

$$H = H_0 \cdot \nu^2 - R_g \cdot Q^2 \quad (1.2)$$

де $\nu = \frac{\omega}{\omega_0}$ - відносна швидкість обертання насоса;

ω - поточна швидкість насоса;

ω_0 - швидкість ідеального холостого ходу.

Паспортні напірні характеристики насоса наведено на рис. 1.3.

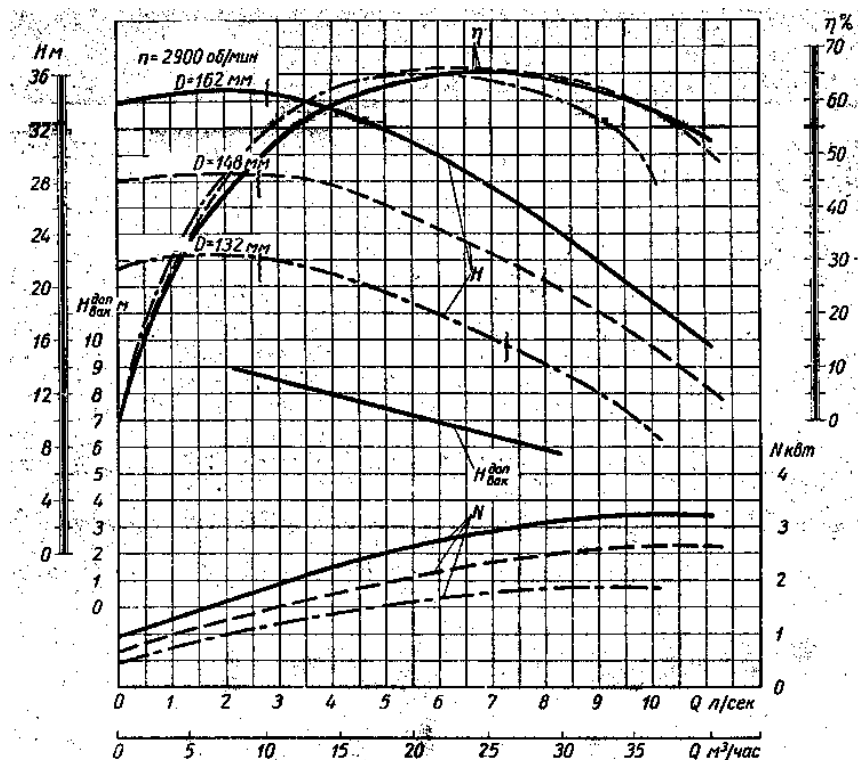


Рисунок 1.3 – Напірна характеристика насоса ТНП-066

Для насосного агрегату справедливі формули приведення

$$\frac{Q_1}{Q_{\max}} = \frac{n_1}{n_{\max}} \quad (1.3)$$

де Q_1 , n_1 - поточна подача та частота обертання насоса;

$Q_{\max}$, $n_{\max}$ - максимальна подача та частота обертання насоса.

$$\frac{H_1}{H_0} = \left(\frac{n_1}{n_{\max}} \right)^2 \quad (1.4)$$

$$\frac{N_1}{N_{\text{ном}}} = \left(\frac{n_1}{n_{\max}} \right)^3 \quad (1.5)$$

де N_1 , $N_{\text{ном}}$ - робоча та номінальна потужності насоса.

Ці формули дають змогу розрахувати основні параметри насоса за різних частот обертання.

1.4 Розрахунок потужності двигуна насоса. Вибір двигуна

Потужність, що споживається насосом, визначається за формулою

$$P = \frac{QH\rho k_3}{102\eta_n} \quad (1.6)$$

де Q - подача насоса, м³/с;

H - сумарний напір, м;

ρ - густина рідини, що перекачується, кг/м³;

k_3 - коефіцієнт запасу, що враховує фактори, які неможливо обчислити
(для двигунів потужністю до 50 кВт) $k_3=1,2$);

η_n - ККД насоса.

$$P = \frac{5,55 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 1000 \cdot 1,2}{102 \cdot 0,67} = 3,89 \text{ кВт}$$

Вибираємо асинхронний двигун з короткозамкненим ротором 4A100S2Y2. Асинхронний двигун серії 4А основного виконання, призначений для роботи від мережі трифазного змінного струму частотою 50 Гц, виконання за ступенем захисту IP44, спосіб охолодження ICA0141.

Паспортні дані двигуна наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Паспортні дані двигуна 4A100S2Y3

Двигун	Потужність, кВт	Ковзання, %	ККД, %	$\cos\varphi$	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_n}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\min}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_n}{I_{\text{ном}}}$
4A100S2Y3	4	4	86,5	0,89	2,2	2	1,2	5,5

1.5 Методи регулювання продуктивності насоса

Одним із найпоширеніших методів регулювання продуктивності є метод дроселювання за допомогою засувки, встановленої на напірній лінії насоса. Установка додаткового обладнання в цьому випадку не потрібна, що є основною перевагою даного методу.

Дросельне регулювання полягає у введенні додаткового опору в напірний трубопровід системи, завдяки чому характеристика Q-H мережі піднімається

більш круто (рис. 1.5) і перетинає характеристику насоса в режимній точці 2, що відповідає необхідній подачі Q_2 . При цьому необхідний напір у системі дорівнює H_3 , а насос розвиває напір H_2 . ККД насосної установки зменшується зі збільшенням різниці між напором, що розвивається насосом, і напором, необхідним у мережі.

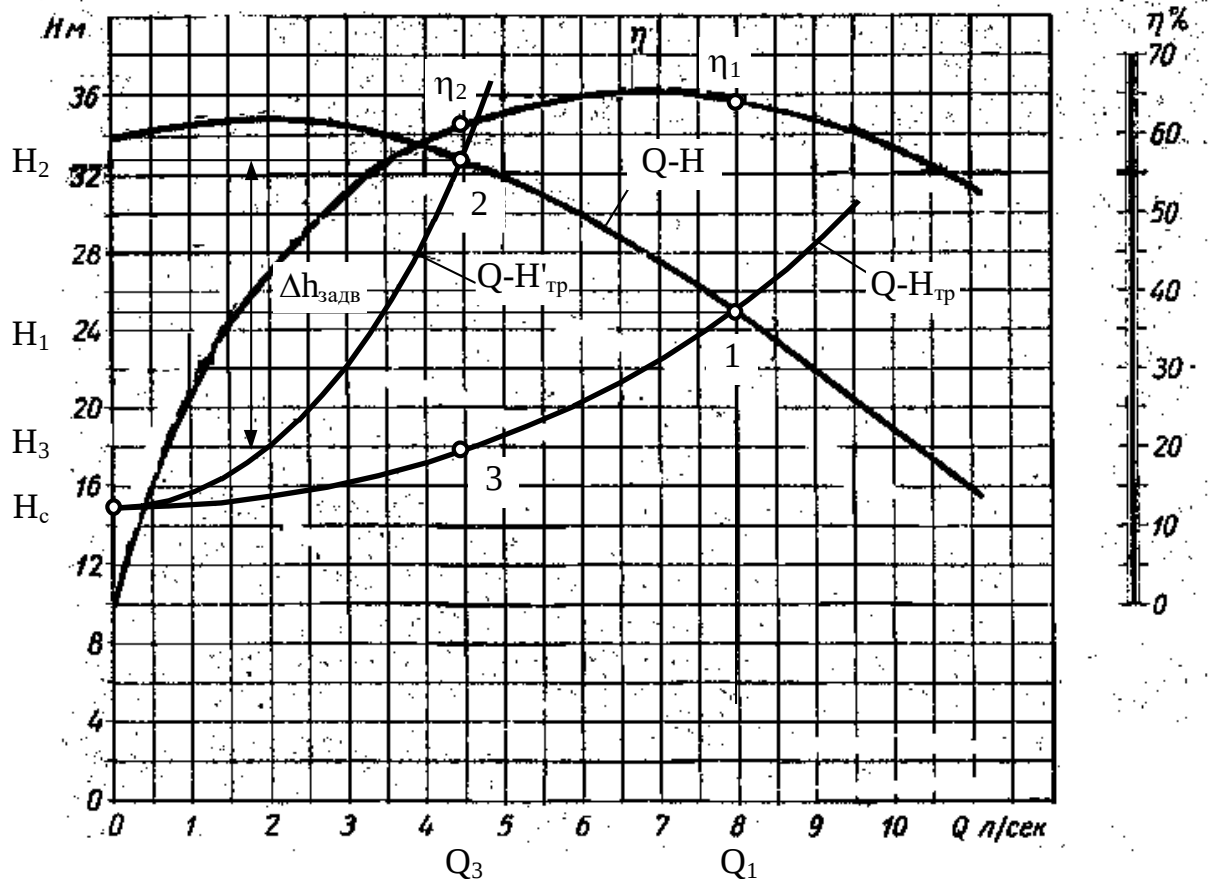


Рисунок 1.4 - Характеристика системи «насос-мережа» при регулюванні роботи за допомогою дроселювання

Основні недоліки: наявність непродуктивних втрат потужності на подолання опору засувки. При зміні характеристики мережі з точки 1 на точку 2 знижується ККД насоса з η_1 до η_2 , у засувці втрачається напір, рівний $\Delta h_{\text{завд}}$, що є неекономічним та неефективним.

Інший спосіб регулювання продуктивності – зміна кута повороту лопаток робочого колеса насоса. Характеристика при такому способі регулювання представлена на рис. 1.5.

Частота обертання робочого колеса насоса залишається незмінною, характеристики виходять з однієї точки і далі розходяться. Точки 1, 2 і 3 перетину характеристики мережі з характеристиками насоса утворюють лінію, що показує діапазон регулювання.

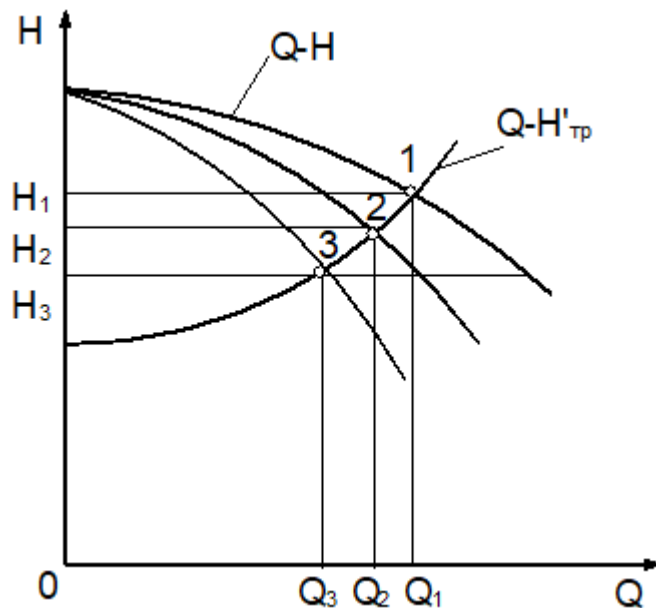


Рисунок 1.5 - Характеристика системи «насос-мережа» при регулюванні роботи шляхом зміни кута повороту лопаток робочого колеса насоса

Одним із найбільш раціональних способів регулювання продуктивності механізмів із вентиляторним моментом на валу є регулювання зміни частоти обертання робочого колеса насоса, що найпростіше здійснюється за рахунок впровадження регульованого приводу. На рис. 1.7 видно, що при зниженні швидкості обертання насоса продуктивність останнього при роботі на дану магістраль знижується.

Розглянемо перехід роботи насоса з паспортної частоти обертання n на іншу частоту обертання робочого колеса n_1 . Оскільки діаметр робочого колеса

по зовнішньому ободу залишається постійним, відношення $D_2/D_2'=1$. Тоді із закону подібності відцентрових насосів маємо:

$$Q/Q_1 = n/n_1; \quad (1.7)$$

$$H/H_1 = (n/n_1)^2; \quad (1.8)$$

$$N/N_1 = (n/n_1)^3. \quad (1.9)$$

Отримані вирази називаються законом пропорційності.

Встановлений закон пропорційності дозволяє на основі однієї експериментальної характеристики Q-H побудувати ряд характеристик насоса в широкому діапазоні змін частоти обертання.

Виключивши з рівнянь (1.7) і (1.8) частоту обертання, отримаємо:

$$H_1 = Q_1^2 H / Q^2 = \text{const} Q_1^2, \quad (1.10)$$

тобто рівняння параболи з вершиною в початку координат, що проходить через точку а з координатами Q_a та H_a . Парабола $0a_2a_1a$ (рис. 1.6) являє собою геометричне місце точок, що визначають режими роботи насоса, подібні до режиму в точці а, і називається параболою подібних режимів.

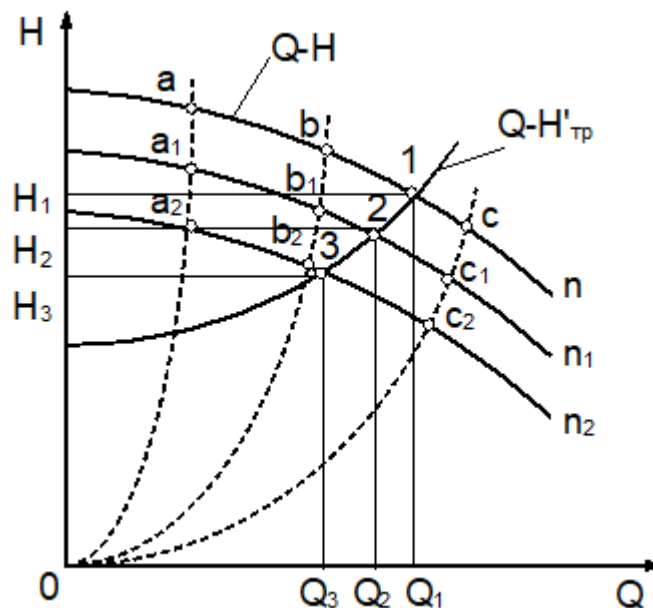


Рисунок 1.6 Характеристика системи «насос-мережа» при регулюванні роботи шляхом зміни частоти обертання робочого колеса насоса

Очевидно, що перерахунок координат точки а за законом пропорційності для будь-якої іншої частоти обертання дасть точки на параболах подібних режимів. Отже, перерахунок будь-якої іншої точки $b, c, \dots$ характеристики $Q-N$ при частоті обертання n на частоту обертання $n_1, n_2, \dots n_i$ дасть точки $b_1, b_2, \dots, b_i; c_1, c_2, \dots, c_i$ і т.д., які розташовані відповідно на параболах $Ob_1 \dots b; Oc_1 \dots c$. З'єднуючи точки $a_1, b_1, c_1, \dots$ плавною кривою, отримуємо характеристику Q_1-N_1 насоса для частоти обертання n_1 . Повторюючи подібні операції для точок $a_2, b_2, c_2, \dots a_i, b_i, c_i$, отримаємо відповідно характеристики $Q_2-N_2, \dots, Q_i-N_i$ (рис. 1.6).

Необхідно зазначити, що режим роботи насоса зі зниженою частотою обертання допускається, але підвищення частоти обертання більше, ніж на 10-15%, має бути узгоджено з заводом-виробником.

1.6 Вимоги до електроприводу. Обґрунтування необхідності застосування регульованого електроприводу

Відцентрові насоси є досить енергоємними механізмами, на привід яких витрачається близько 20 % електроенергії країни. Насоси водопостачання характеризуються більшою продуктивністю, тривалим режимом роботи з рідкісними пусками, який, як правило, відбувається в режимі холостого ходу. Насоси працюють у мережі з протитиском, причому статичний напір у мережі зазвичай становить не менше 20 % повного напору.

Для приводу насосів застосовують двигуни потужністю від десятків Ватт до декількох тисяч кВт. Електропривід з короткозамкненим АД є найбільш поширеним завдяки простоті та низькій вартості. Такий електропривід найпростіший в експлуатації, не вимагає постійного нагляду та забезпечує тривалу надійну роботу.

У системі водопостачання виникає необхідність регулювання продуктивності насосних агрегатів через мінливий характер водоспоживання.

					КНУ РБ.141.26.251с.4.01.Р1	Лист
						21
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис			

Найчастіше насоси оснащуються нерегульованим приводом, при цьому регулювання продуктивності здійснюється за допомогою дроселювання — неповного відкриття засувки на напірному трубопроводі насоса, що відповідає збільшенню опору мережі. Цей спосіб регулювання є досить простим, однак вкрай не вигідним з енергетичної точки зору, оскільки призводить до істотного зниження ККД агрегату та марного витрачання електроенергії.

Втрати через неекономічне регулювання становлять для міських водопровідних станцій 10-15% сумарного споживання електроенергії.

Насосні агрегати зазвичай об'єднуються в насосні станції, при цьому кілька насосів працюють паралельно на одну мережу. Регулювання витрати може бути досягнуто дроселюванням одного або обох насосів. При аналізі спільної роботи насосів падіння напору в засувці зручніше розглядати як внутрішні втрати напору в насосі. Тоді при дроселюванні насоса нахил його характеристики буде зростати.

Найефективнішим способом регулювання режимів роботи насосної станції водопроводу є плавне та автоматичне змінення швидкості обертання двигуна насоса з необхідними показниками пускових і пускорегулювальних характеристик. У зв'язку з цим спостерігається тенденція до ширшого використання регульованих і керованих електроприводів.

Якщо при регулюванні продуктивності насосної станції зміною швидкості обертання насосів два насоси з сумарною характеристикою працюють на мережу з певною продуктивністю і необхідно зменшити їхню продуктивність, то це можна зробити двома способами: або зменшити швидкість обертання обох насосів, або знизити, але більш істотно, швидкість одного з насосів. Регулювання продуктивності зміною швидкості обертання одночасно двох насосів за своїми показниками рівноцінне регулюванню швидкості насоса при його одиночній роботі.

З точки зору економічності регулювання дещо вигіднішим є одночасна зміна швидкості всіх насосів, що працюють паралельно. Однак це пов'язано зі

					КНУ РБ.141.26.251с.4.01.Р1	Лист
						22
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис			

збільшенням капітальних витрат на оснащення всіх агрегатів регульованим електроприводом. Тому для більшості насосних станцій достатньо мати лише один регульований агрегат, здійснюючи більш точне регулювання шляхом відключення окремих насосів.

Узагальнюючи розглянуті вище особливості роботи відцентрових насосів та вимоги до їхнього електроприводу, можна сказати:

- насоси є механізмами з тривалими режимами роботи, тому електроприводи насосів повинні бути розраховані на тривалу роботу з великою кількістю годин на рік; навантаження на вал приводного двигуна є рівномірним, перевантажень не виникає;
- відцентрові насоси є швидкохідними механізмами, номінальна швидкість приводного двигуна зазвичай не менше 600 об/хв; верхня межа швидкості для насосів обмежена величиною 3000 об/хв; у рідкісних випадках потрібна вища номінальна швидкість обертання;
- найдосконалішим способом регулювання продуктивності насосів є зміна швидкості їх обертання; діапазон регулювання швидкості невеликий, зазвичай не більше 10-15%; більш глибоке регулювання потрібне лише в окремих випадках;
- для насосів характерна істотна залежність моменту опору на валу від швидкості; оскільки насоси зазвичай працюють на протитиск, то ця залежність є більш різкою, ніж квадратична (вентиляторна);
- пуск насосів зазвичай здійснюється на закриту засувку, залежність моменту на валу від швидкості при пуску має вентиляторний характер (квадратична залежність) з максимальним моментом, який для більшості насосів лежить у межах 0,4-0,8 номінального.

Різноманітність умов застосування турбомеханізмів, їх конструкцій, режимів експлуатації визначає можливість і певну економічну доцільність використання різних систем регульованого електроприводу.

Регульований електропривід повинен використовуватися в таких випадках:

- коли за умовами експлуатації продуктивність турбомеханізму необхідно часто змінювати в широких межах (наприклад, насоси систем водопостачання, енергетичні та газові турбокомпресори);
- коли за умовами експлуатації механізм тривалий час працює з продуктивністю, що значно менша за номінальну (наприклад, шахтні вентилятори);
- для турбомеханізмів, що потребують автоматичного регулювання продуктивності з підвищеними вимогами до якості регулювання (наприклад, холодильні турбокомпресори, деякі циркуляційні та живильні насоси);

Найпростіші системи регульованого електроприводу забезпечують ступінчасте регулювання швидкості. Зазвичай використовуються схеми, що дають змогу отримувати дві швидкості обертання. Для турбомеханізмів малої потужності застосовуються багатошвидкісні асинхронні двигуни; для двигунів великої потужності застосовуються схеми з живленням асинхронних або синхронних двигунів від джерел різної частоти. Цікавим для приводу великих вентиляторів є схема синхронно-асинхронного приводу, що забезпечує двоступеневе регулювання швидкості.

Нижче наведено класифікацію систем регульованого електроприводу турбомеханізмів:

- 1) Електропривід зі ступінчастим регулюванням;
- 2) Електропривід із плавним регулюванням;
 - а) Електропривід з двигуном постійного струму;
 - б) Асинхронний частотно-керований електропривід;

					КНУ РБ.141.26.251с.4.01.Р1	Лист
						24
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис			

в) Електропривід з індукторною муфтою ковзання;

г) Асинхронний електропривід з регулюванням напруги на статорі двигуна;

д) Асинхронний каскадний електропривід.

Основною перевагою приводу з асинхронними каскадами (електромашинні, вентильно-машинні, вентильні) є те, що вартість каскадів залежить від глибини регулювання, оскільки перетворенню піддається не вся енергія, що споживається приводом, а лише її частина, пропорційна діапазону регулювання. Разом з тим, згаданий вид приводу вимагає застосування більш складного за конструкцією електродвигуна з фазним ротором і має вкрай низький коефіцієнт потужності.

Регульований ЕП з індукторною муфтою ковзання характеризується низькою вартістю, високою надійністю, технічною простотою, однак належить до енергетично збиткового типу електроприводу (відсутня рекуперація енергії ковзання).

У зв'язку з високою вартістю перетворювальних пристроїв для частотного керування та складністю в окремих випадках може використовуватися асинхронний привід з фазовим керуванням напругою на затискачах статора.

Частотно-керований двигун змінного струму є найбільш економічним способом регулювання швидкості асинхронних короткозамкнених двигунів, оскільки двигун у всьому діапазоні регулювання працює з невеликим ковзанням ротора. Такий регульований електропривід дозволяє зберегти високий ККД двигуна, забезпечує як рухові, так і гальмівні режими роботи, хорошу жорсткість характеристик. Основний недолік системи – складність створення та висока вартість перетворювача частоти.

Аналіз роботи насосної станції підкачування в мережу з протитискомпоказав доцільність використання в якості системи регулювання ЕП частотно-керованого ЕП, що дозволяє здійснювати регулювання в заданих

					КНУ РБ.141.26.251с.4.01.Р1	Лист
						25
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис			

межах (діапазон регулювання 1:0,7), а також забезпечує плавний пуск насосного агрегату.

Висновки до розділу 1

У першому розділі розглянуто структуру типової технологічної схеми системи міського водопостачання, наведено типову технологічну схему підкачувальної насосної станції для подачі води у 9-поверховий будинок.

Типовим рішенням для підкачувальної насосної станції є використання відцентрового насоса консольного типу ТНП-066. Наведено паспортні дані та напірні характеристики насоса ТНП-066.

Виконано розрахунок потужності електроприводу насоса ТНП-066.

Обрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4А100S2У3 потужністю 4 кВт з частотою обертання 3000 об/хв, виконання за ступенем захисту IP44.

Обґрунтовано переваги використання регулювання продуктивності насоса через зміну частоти обертання. На основі аналізу вимог до регульованого електроприводу турбомеханізмів обґрунтовано доцільність використання частотного керування асинхронного двигуна.

					КНУ РБ.141.26.251с.4.01.Р1	Лист
						26
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис			

Розділ 2 АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІДКАЧУВАЛЬНОГО НАСОСА

2.1 Ідентифікація параметрів двигунів за даними каталогу

Для визначення параметрів АД застосовуємо Т-подібну схему заміщення, наведену на рис. 2.1.

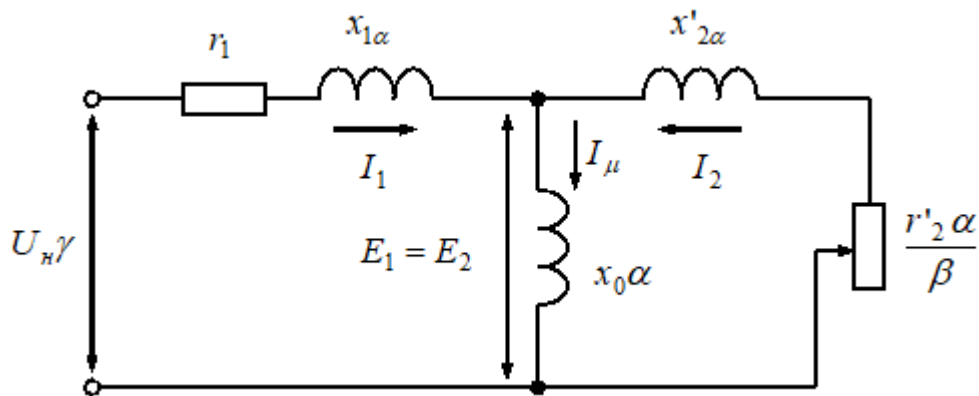


Рисунок 2.1 Схема заміщення фази асинхронного двигуна при частотному керуванні

Одними з найважливіших параметрів, що характеризують режим роботи асинхронного двигуна, є відповідні номінальні значення приведенного струму ротора $I'_{2,ном}$ та струму намагнічування $I_{0ном}$. Оскільки під час переходу від ідеального холостого ходу (ковзання $s=0$) до номінального режиму ($s=s_{ном}$) магнітний потік практично не змінюється, то $I_{0ном}$ його можна вважати рівним струму холостого ходу $I_{0х}$, вимірюваному під час роботи двигуна без навантаження на валу. Визначимо значення $I'_{2,ном}$ та $I_{0ном}$ за каталожними даними номінального струму статора $I_{1ном}$, кратності максимального моменту $b_{ном}$ та номінального коефіцієнта потужності двигуна $\cos \varphi_{ном}$.

					КНУ РБ.141.26.251с.4.02.Р2		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Режими роботи		
Розроб.		Мухін В.Д.					
Перевір.		Титюк В.К.					
Реценз.							
Н. Контр.		Титюк В.К.					
Затверд.		Пересунько І.І.			ЕМ гр. ЗЕЕМ-23ск		
					Літ.	Арк.	Аркушів
						27	

$$I_{1ном} = \frac{P_{1н}}{3U_{1н} \cos \varphi_{ном}} \quad (2.1)$$

$$I_{1ном} = \frac{4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,89} = 6,8 \text{ А}$$

На підставі основних співвідношень та векторної діаграми асинхронного двигуна струм статора можна представити як геометричну суму намагнічувального струму та приведенного струму ротора, а отже, у номінальному режимі:

$$I_{1ном} = \sqrt{(I_{0ном} \sin \varphi_{0ном} + I'_{2ном} \sin \varphi'_{ном})^2 + (I_{0ном} \cos \varphi_{0ном} + I'_{2ном} \cos \varphi'_{ном})^2} \quad (2.2)$$

або без урахування активних втрат у сталі ($\cos \varphi_{0ном} = 0$)

$$I_{1ном} = \sqrt{(I_{0ном} + I'_{2ном} \sin \varphi'_{ном})^2 + (I'_{2ном} \cos \varphi'_{ном})^2}; \quad (2.3)$$

а реактивна складова струму статора

$$I_{1р,ном} = I_{1ном} \sin \varphi_{ном} \approx I_{0ном} + I'_{2ном} \sin \varphi'_{ном} \quad (2.4)$$

та активна складова

$$I_{1а,ном} = I_{1ном} \cos \varphi_{ном} \approx I'_{2ном} \cos \varphi'_{ном}. \quad (2.5)$$

Виражаючи $\sin \varphi'_{ном}$ і $\cos \varphi'_{ном}$ через кратність максимального моменту, незважаючи на активний опір статора r_1 у порівнянні з $c_1 r_2' / s$ і r_1^2 у порівнянні з $(x_1 + c_1 x_2')^2$:

$$\operatorname{tg} \varphi'_{ном} = \frac{(x_1 + c_1 x_2') s_{ном}}{c_1 r_2'} \approx \frac{s_{ном}}{s_{кр}}, \quad (2.6)$$

При номінальному режимі ($M_* = 1,0$) з формули Клосса щодо $s_{кр} / s_{ном}$:

$$\frac{s_{кр}}{s_{ном}} = b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1} \quad (2.7)$$

$$s_{кр} = 0,04(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,16$$

що при підстановці в (2.5) дає шукані вирази:

$$\operatorname{tg} \varphi'_{ном} \approx \frac{1}{b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1}}; \quad (2.8)$$

$$\sin \varphi'_{ном} \approx \frac{1}{\sqrt{2b_{ном}(b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1})}}; \quad (2.9)$$

$$\cos \varphi'_{ном} \approx \sqrt{\frac{b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1}}{2b_{ном}}}. \quad (2.10)$$

Підставляючи (2.10) у (2.6), знаходимо номінальний приведений струм ротора

$$I'_{2ном} \approx \sqrt{\frac{2b_{ном}}{b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1}}} I_{1ном} \cos \varphi_{ном} \quad (2.11)$$

$$I'_{2ном} \approx \sqrt{\frac{2 \cdot 2,2}{2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}}} 6,8 \cdot 0,89 = 6,2 \text{ А}$$

та замінюючи $\sin \varphi'_{ном}$ згідно з (2.9), знайдемо з (2.5) після підстановки (2.11) номінальне значення струму намагнічування

$$I_{0ном} \approx I_{1ном} \left(\sin \varphi_{ном} \frac{\cos \varphi_{ном}}{b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1}} \right) \quad (2.12)$$

$$I_{0ном} \approx 6,8(0,456 \frac{0,89}{2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}}) = 0,66 \text{ А}$$

При $b_{ном} > 1,7$ можна прийняти

$$I'_{2ном} \approx I_{1ном} \cos \varphi_{ном}, \quad (2.13)$$

оскільки похибка порівняно з $I'_{2ном}$, знайденої згідно з (2.11), становитиме менше 5%.

У каталогах також зазвичай наводяться кратності початкового моменту $\frac{M_n}{M_{ном}} = M_{к*}$ (при $s=1,0$) та пускового струму $k = I_n / I_{1ном} = I_k / I_{1ном}$ при номінальній напрузі. За наведеними вище даними можна визначити активний та індуктивний опори обмоток статора та ротора.

За кратністю початкового пускового струму знаходимо повний опір двигуна при нерухомому роторі ($s=1,0$):

$$z_{\kappa 1} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}kI_{1ном}}, \quad (2.14)$$

де $U_{1ном}$ - номінальна лінійна напруга статора.

$$z_{\kappa 1} = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 7,5 \cdot 6,8} = 2,49 \text{ Ом}$$

За кратністю початкового моменту $M_{\kappa*}$ визначаємо наведений активний опір ротора при $s=1$, механічні втрати приймаємо рівними 1%, тобто $\Delta P_{мех} = 0,01\Delta P_{ном}$:

$$r'_{21} = \frac{(P_{ном} + \Delta P_{мех})M_{\kappa*}}{3(1 - s_{ном})I_{2\kappa}^2} \approx \frac{(P_{ном} + \Delta P_{мех})M_{\kappa*}}{3(1 - s_{ном})k^2 I_{1ном}^2}. \quad (2.15)$$

$$r'_{21} = \frac{4 \cdot 1,01 \cdot 10^3 \cdot 2}{3(1 - 0,04)7,5^2 \cdot 6,8^2} = 1,07 \text{ Ом}$$

За кратністю максимального моменту $b_{ном}$ визначаємо індуктивний опір для наведеного струму ротора при $s=0$, нехтуючи r_1^2 порівняно з $(x_1 + c_1 x'_{20})^2$:

$$x_1 + c_1 x'_{20} \approx \frac{U_{1ном}^2 (1 - s_{ном})}{2c_1 (P_{ном} + \Delta P_{мех})b_{ном}} - r_1 \quad (2.16)$$

Підставляючи критичне ковзання згідно з рівнянням (2.6), визначаємо приведенний активний опір ротора при $s=0$:

$$r'_{20} \approx \frac{(x_1 + c_1 x'_{20})s_{кр0}}{c_1} = \frac{(x_1 + c_1 x'_{20})s_{ном}(b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1})}{c_1}, \quad (2.17)$$

де $(x_1 + c_1 x'_{20})$ замінюються за рівністю (2.16).

Якщо невідомий активний опір статора, то з достатнім ступенем точності можна вважати, що $r_1 = r'_{20}$. У цьому випадку, вирішуючи (2.15) і (2.16) щодо r'_{20} , отримуємо

$$r'_{20} = \frac{U_{1ном}^2 (1 - s_{ном})}{2c_1 (P_{ном} + \Delta P_{мех})b_{ном} \left[1 + \frac{c_1}{s_{ном}b_{ном} + \sqrt{b_{ном}^2 - 1}} \right]} \quad (2.18)$$

$$r'_{20} = \frac{220^2(1 - 0,04)}{2 \cdot 1,03 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 1,01 \cdot 2,2 \left[1 + \frac{1,03}{0,04(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1})} \right]} = 0,35 \text{ Ом}$$

При номінальній напрузі статора 220–380 В отримане значення опору слід збільшити в 1,3–1,8 рази.

$$r'_{20} = 0,35 \cdot 1,8 = 0,63 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір статора та ротора при $s=1$ без урахування намагнічувального струму не завжди дає позитивний результат, тому краще скористатися виразом для критичного ковзання та отримати з нього значення X_k

$$s_k = \frac{R_2^l}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \quad (2.19)$$

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{R_2^l}{s_k}\right)^2 - R_1^2} = \sqrt{\left(\frac{1,07}{0,16}\right)^2 - 0,63^2} = 6,65 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір контуру намагнічування

$$X_\mu = \frac{U_{1.ном}}{\sqrt{3}I_{\mu.ном}}$$

$$X_\mu = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 0,66} = 192,4 \text{ Ом}$$

Спільне розв'язання рівнянь (2.15) і (2.18) дозволяє визначити значення x_1 , x'_{20} и x'_{21} , з огляду на ставлення x_1 / x_{20} .

За даними таблиці можна визначити окремі втрати двигуна, знаючи ККД при номінальному навантаженні та опір обмотки статора r_1 .

Приймаємо додаткові втрати в статорі рівними $\Delta P_\sigma = 0,005 P_{ном}$.

Втрати в обмотці статора та додаткові втрати

$$\Delta P_{1ном} = P_{1м.ном} + 0,005 P_{ном} = 3 I_{1ном}^2 r_1 \cdot 10^{-3} + 0,005 P_{ном} . \quad (2.20)$$

$$\Delta P_{1ном} = 3 \cdot 6,8^2 \cdot 0,63 \cdot 10^{-3} + 0,005 \cdot 4 = 0,1 \text{ кВт}$$

Механічні втрати

$$\Delta P_{мех} = 0,01 P_{ном} . \quad (2.21)$$

$$\Delta P_{мех} = 0,01 \cdot 4 = 0,04 \text{ кВт}$$

Втрати в роторі

$$\Delta P_{2ном} = \frac{(P_{ном} + \Delta P_{мех}) s_{ном}}{1 - s_{ном}} = \frac{1,01 P_{ном} s_{ном}}{1 - s_{ном}} . \quad (2.22)$$

$$\Delta P_{2ном} = \frac{1,01 \cdot 4 \cdot 0,04}{1 - 0,04} = 0,16 \text{ кВт}$$

Сумарні втрати двигуна

$$\sum \Delta P_{ном} = \frac{P_{ном} (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}} . \quad (2.23)$$

$$\sum \Delta P_{ном} = \frac{4(1 - 0,865)}{0,865} = 0,62 \text{ кВт}$$

Втрати в сталі ротора

$$\Delta P_{1с,ном} = \sum \Delta P_{ном} - (3 I_{1ном}^2 r_1 \cdot 10^{-3} + 0,005 P_{ном} + 0,01 P_{ном} + \frac{0,01 P_{ном} s_{ном}}{1 - s_{ном}}) \quad (2.24)$$

$$\Delta P_{1с,ном} = 0,62 - (3 \cdot 6,8^2 \cdot 0,63 \cdot 10^{-3} + 0,005 \cdot 4 + 0,01 \cdot 4 + \frac{0,01 \cdot 4 \cdot 0,04}{1 - 0,04}) = 0,32 \text{ кВт}$$

При визначенні втрат у роторі слід враховувати, що номінальне ковзання, визначене за табличними даними, може значно відрізнятися від фактичного значення. Тому бажано визначити номінальне значення ковзання на основі практичного досвіду. З цією метою при навантаженні, яке є, по можливості, найближчим до номінального, визначають потужність, що споживається двигуном P_1 та ковзання s .

2.2 Розрахунок електромеханічних характеристик електропривода підкачувального насоса

Для розрахунку необхідних характеристик асинхронного електродвигуна скористаємося символьним методом комплексним методом розрахунку кіл змінного струму для Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна.

Комплексний опір ротора

$$Z_2(s) = \frac{r_2}{s} + j \cdot x_2$$

Комплексний опір кола намагнічування

$$Z_\mu = j \cdot x_\mu$$

Комплексний опір роторного кола схеми заміщення

$$Z_{20}(s) = \frac{Z_2(s) \cdot Z_\mu}{Z_2(s) + Z_\mu}$$

Комплексний опір кола статора

$$Z_1(s) = r_1 + j \cdot x_1$$

Повний комплексний опір схеми заміщення

$$Z_0(s) = Z_1(s) + Z_{20}(s)$$

Струм статора АД

$$I_1(s) = \frac{U_1}{Z_0(s)}$$

Напруга на затисках роторного кола

$$E_{20}(s) = U - I_1(s) \cdot Z_1(s)$$

Струм ротора АД

$$I_2(s) = \frac{E_{20}(s)}{Z_2(s)}$$

Електромагнітний момент АД

$$M_{\text{ем}}(s) = 3 \cdot (|I_2(s)|)^2 \cdot \frac{r_2}{\omega_0 \cdot s}$$

Активна та реактивна потужності, споживані АД з мережі :

$$P_{AD}(s) = 3 \cdot \text{Re} \left(U_1 \cdot \hat{I}_1(s) \right); Q_{AD}(s) = 3 \cdot \text{Im} \left(U_1 \cdot \hat{I}_1(s) \right)$$

Коефіцієнт корисної дії АД:

$$\eta(s) = \frac{M_{em}(s) \cdot \omega_0 \cdot (1 - s)}{P_{AD}(s)}$$

Коефіцієнт потужності АД:

$$k_m(s) = \cos \left(\arg(Z_0(s)) \right)$$

Розрахунки по приведених вище формулах були виконані за допомогою сценарію MATLAB.

Результати розрахунку природних статичних та енергетичних характеристик наведено на рис.2.2.

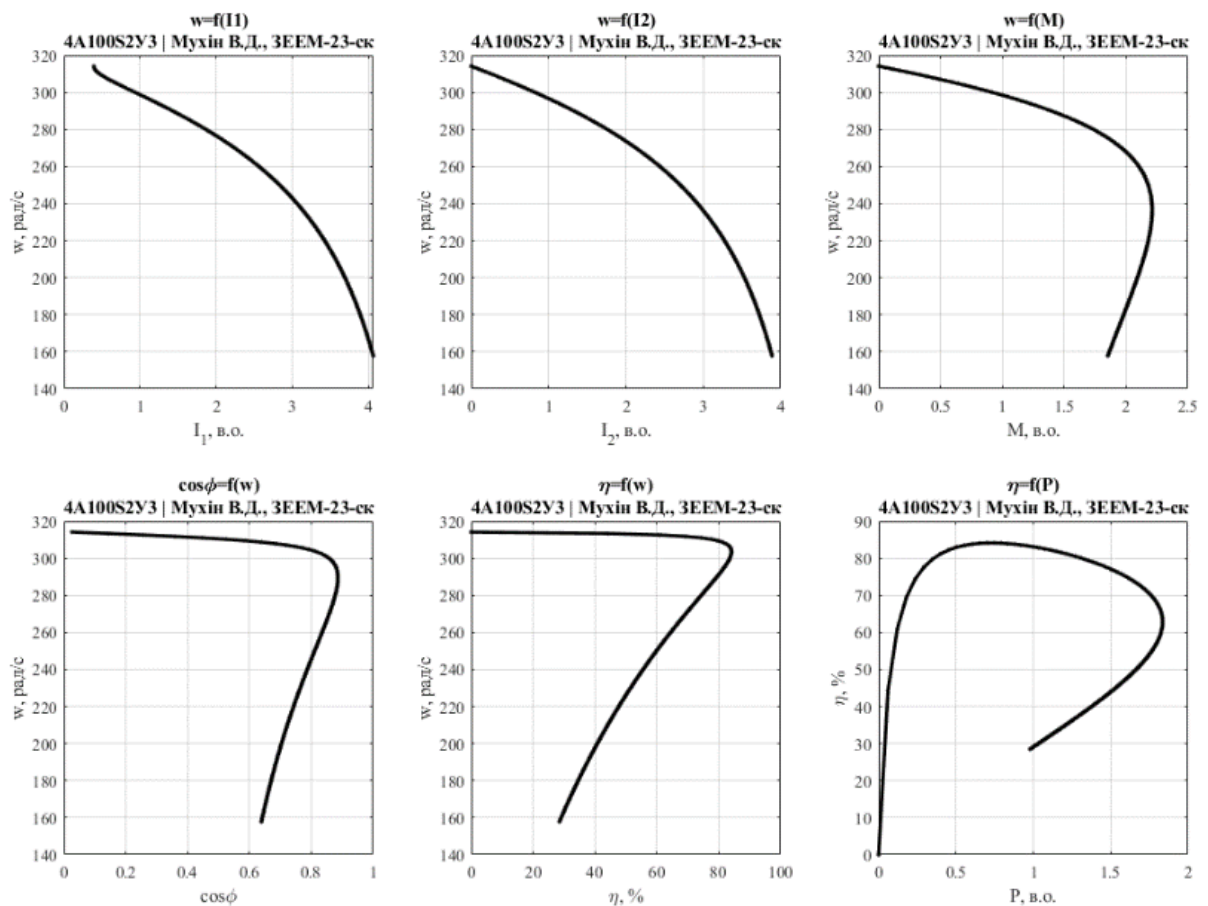


Рисунок 2.2 - Природна швидкісна характеристика асинхронного двигуна підкачувального насоса.

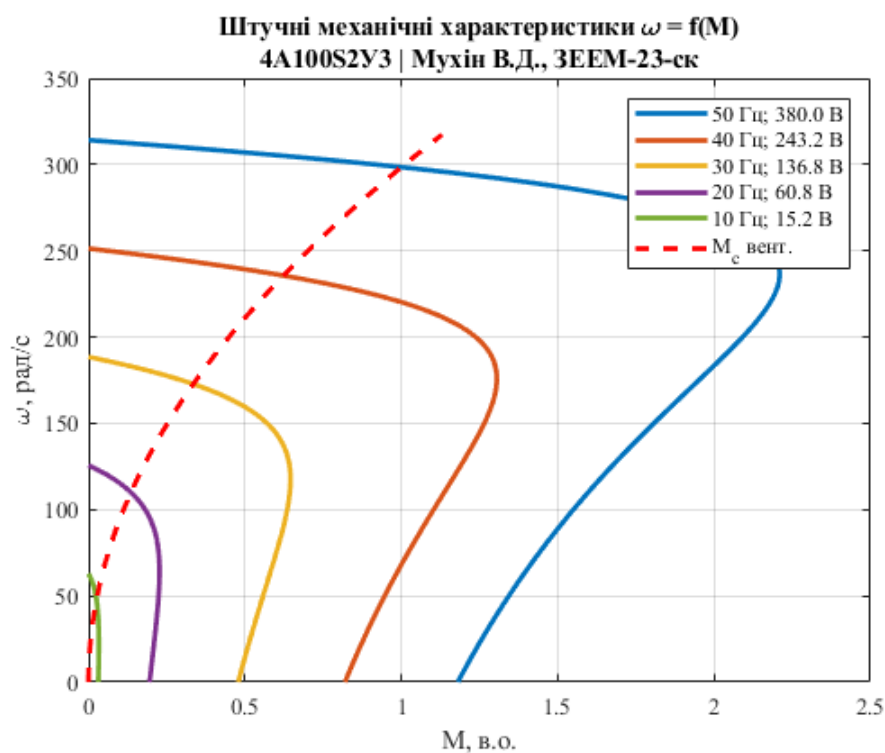


Рисунок 2.3 - Штучні механічні характеристики асинхронного двигуна підкачувального насоса при частоті живлячої напруги 50, 40, 30, 20, 10 Гц

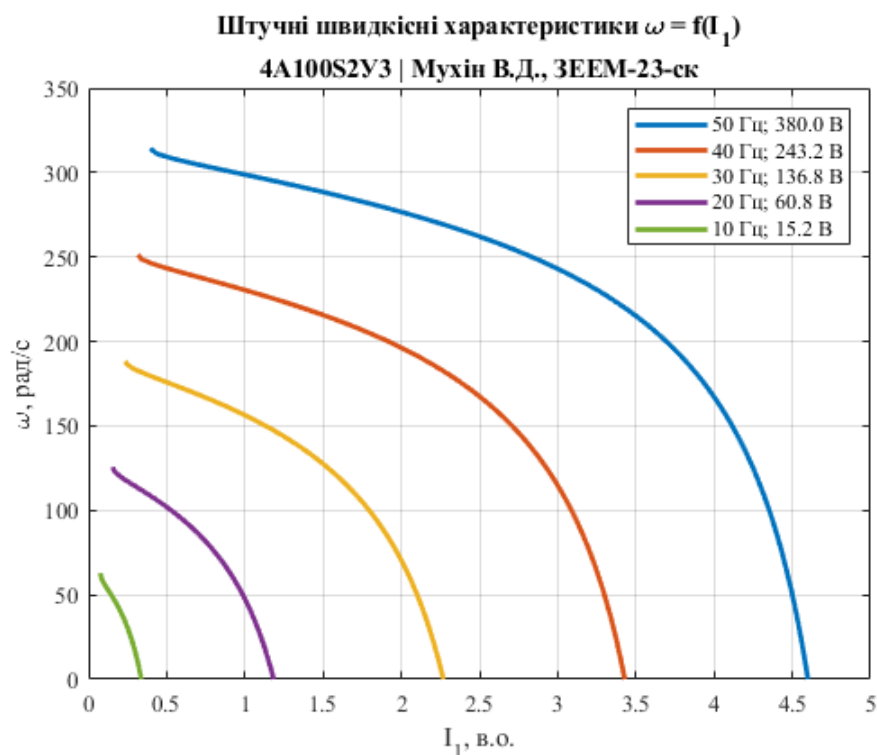


Рисунок 2.4 - Штучні швидкісні характеристики по струму статора асинхронного двигуна підкачувального насоса при частоті живлячої напруги 50, 40, 30, 20, 10 Гц

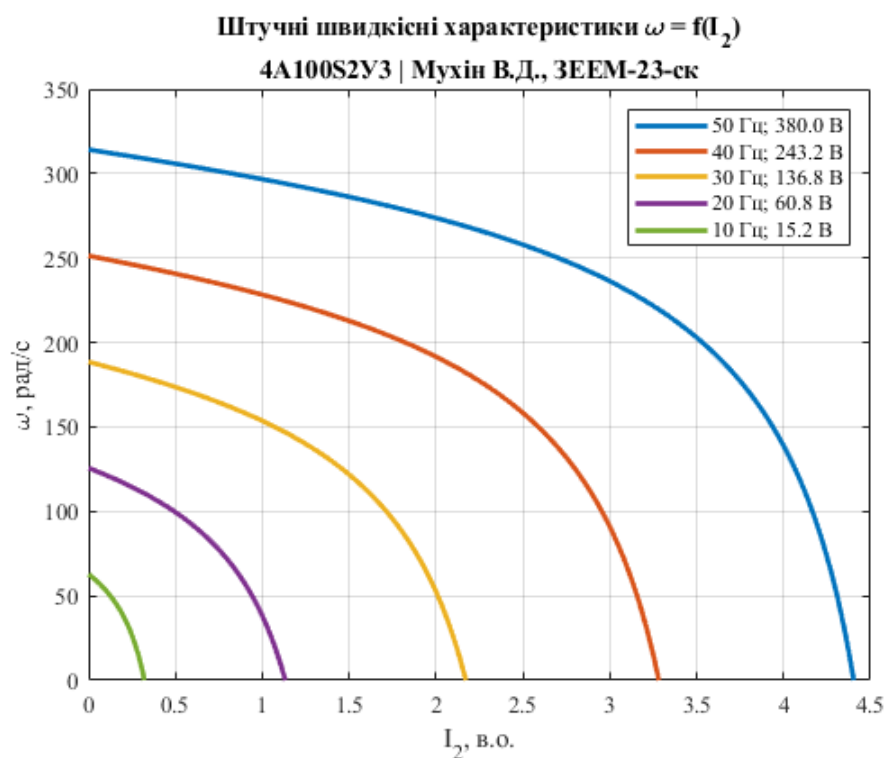


Рисунок 2.5 - Рисунок 2.4 - Штучні швидкісні характеристики по струму ротора асинхронного двигуна підкачувального насоса при частоті живлячої напруги 50, 40, 30, 20, 10 Гц

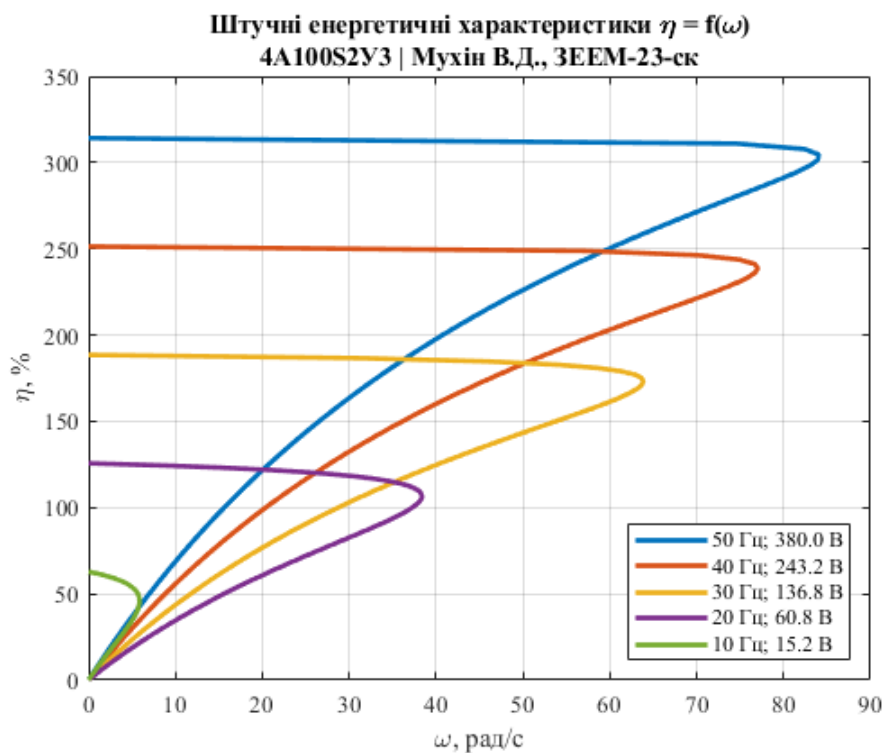


Рисунок 2.6 - Штучні енергетичні характеристики асинхронного двигуна підкачувального насоса при частоті живлячої напруги 50, 40, 30, 20, 10 Гц

2.3 Розрахунок пускових характеристик асинхронного двигуна підкачувального насоса у MATLAB/Simulink

Математична модель асинхронного двигуна з урахування вентиляторного характеру моменту опору з використанням елементів бібліотеки SimPower наведена на рис.2.7.

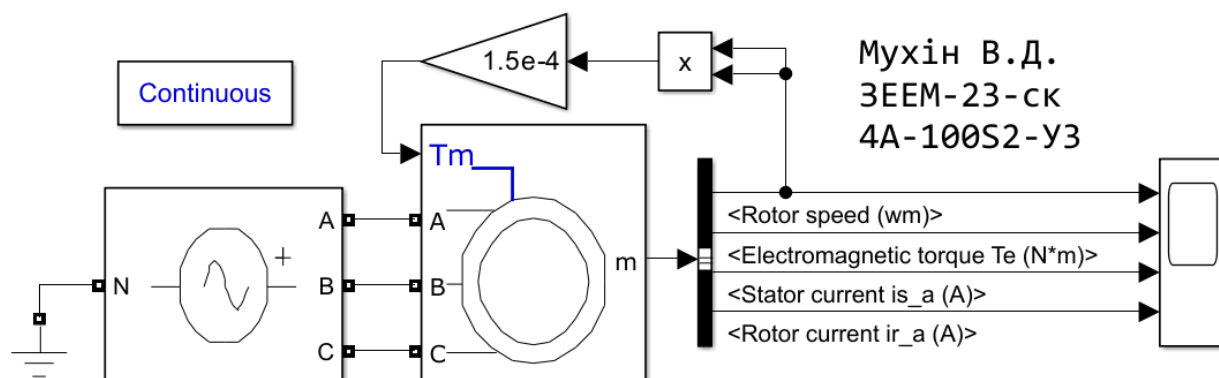


Рисунок 2.7 - Математична модель асинхронного двигуна підкачувального насоса з урахування реактивного характеру моменту опору

Отримані результати розрахунків прямого пуску та накиду навантаження асинхронного двигуна підкачувального насоса наведено на рис.2.8.

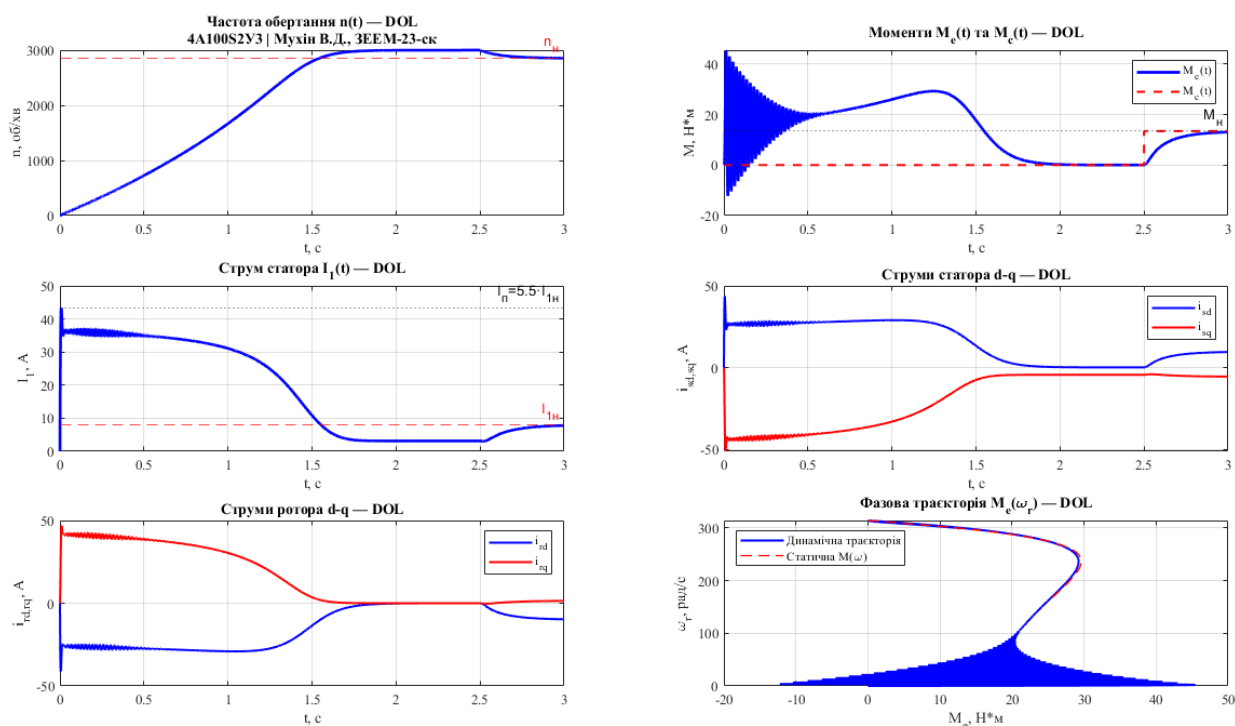


Рисунок 2.8 – Прямий пуск електродвигуна підкачувального насоса з реактивним моментом опору

2.4 Математичне моделювання підкачуючого насоса з частотно-регульованим електроприводом

Для дослідження динамічних режимів підкачуючого насоса з частотно-регульованим електроприводом використано створений на кафедрі електромеханіки віртуальний лабораторний стенд для дослідження насоса з гідротранспортною системою.

Загальний вигляд віртуального лабораторного стенду для дослідження енергоспоживання насосної установки зображено на рис. 2.8.

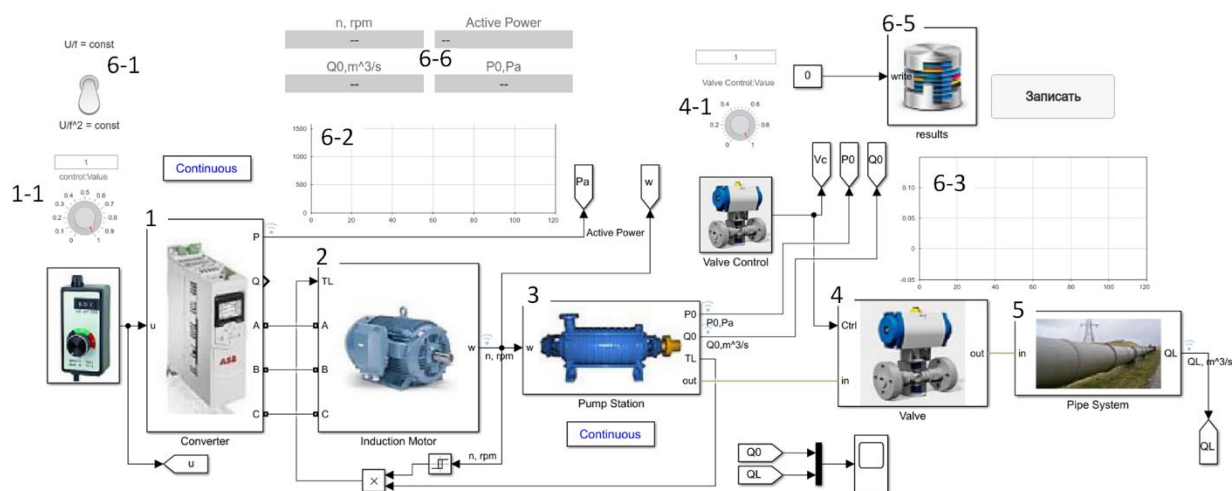


Рисунок 2.8 – Лицьова панель віртуального лабораторного стенду для дослідження роботи насосної станції

Віртуальний лабораторний стенд складається з наступних основних елементів:

- 1 – перетворювач частоти з системою завдання кутової швидкості;
- 2 – приводний асинхронний електродвигун;
- 3 – відцентровий насос з системою внутрішніх трубопроводів;
- 4 – засувка для регулювання подачі насосу при його постійній швидкості з системою регулювання положення засувки;
- 5 – трубопровідна система, яка виконує функцію навантаження для насосної станції;
- 6 – допоміжні елементи – вимірювання електричної потужності, кнопка збереження даних у робочому просторі MATLAB, осцилографи для відображення руху електродвигуна та гідравлічних показників роботи насосу, елементи керування електроприводом та засувкою.

Структурна схема насосної станції з урахуванням внутрішніх трубопроводів зображено на рис. 2.9.

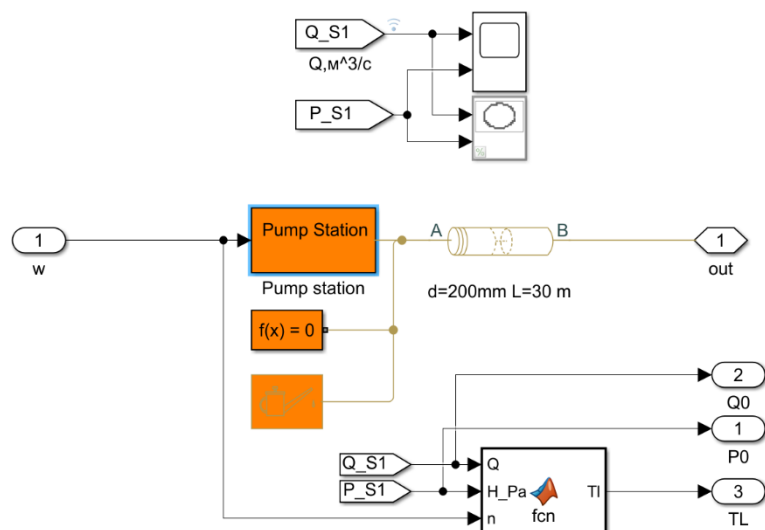


Рисунок 2.9 – Математична модель насосної станції

Функціональний блок обчислює момент навантаження, який створюється насосом, виходячи з тиску та витрату насоса у його вихідному патрубку. Структурна схема моделі власне відцентрового насоса зображена на рис. 2.10.

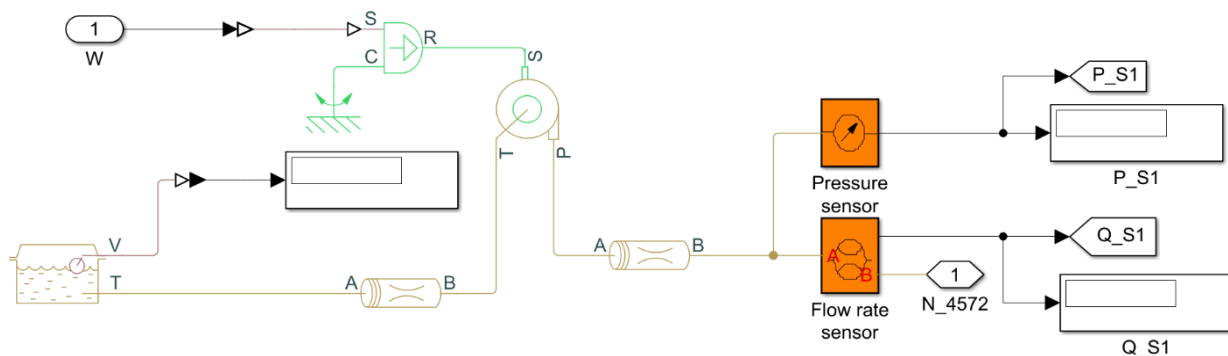


Рисунок 2.10 - Математична модель відцентрового насоса

Модель трубопроводної системи з використанням блоку Segmented Pipe Line, який найбільш достовірно описує рух реальної рідини.

Для налаштування віртуального лабораторного стенду необхідно задати параметри асинхронного двигуна в блоці Induction Motor, налаштувати параметри відцентрового насоса в блоці Pump Station, та параметрів трубопроводної системи в блоці Pipe System.

За допомогою верньєра 1-1 (рис. 2.8) виконується завдання кутової швидкості електроприводу. За допомогою верньєра 4-1 (рис. 2.8) виконується завдання положення засувки (одиничне значення відповідає роботі з повністю відкритою засувкою).

На рисунку 2.11 зображено лицьову панель віртуального лабораторного стенду при дослідженні роботи підкачувальної насосної станції з насосом ТНП-066.

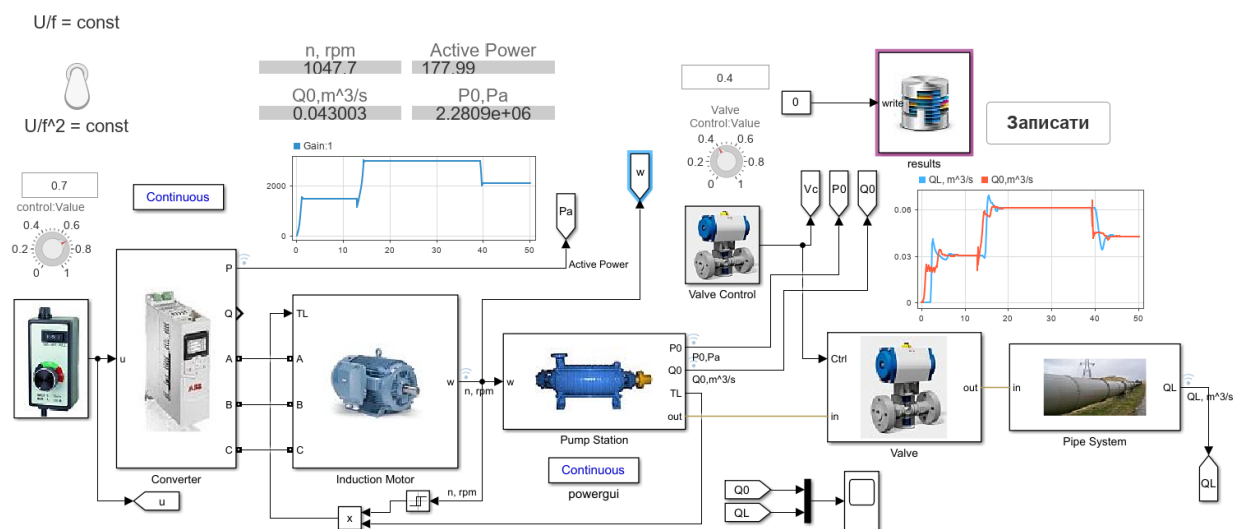
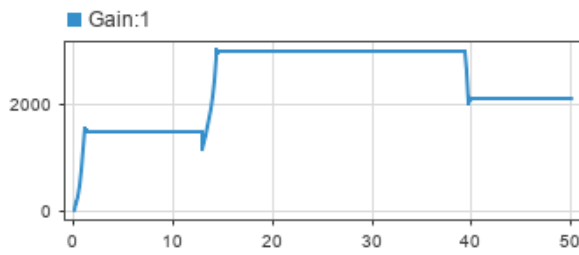


Рисунок 2.11 - Лицьова панель віртуального лабораторного стенду при дослідженні роботи електроприводу підкачувальної насосної станції з насосом ТНП-066

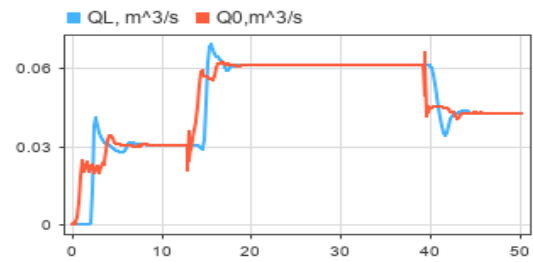
Досліджено режим запуску електропривода насоса ТНП-066 до 1500 об/хв, потім відбувається розгін до номінальної швидкості 3000 об/хв, на третьому етапі відбувається гальмування до 2100 об/хв.

В процесі роботи стенда розраховується видаток насоса у початковому та кінцевому перетинах трубопровода.

На рис.2.12 зображено діаграми роботи електромеханічної системи підкачувальної насосної станції.



а)



б)

Рисунок 2.12 - Діаграми роботи електромеханічної системи підкачувальної насосної станції: а – частота обертання насоса; б – видаток рідини в початковому перетині трубопроводу Q_0 , та у кінцевому перетині Q_L .

Висновки до розділу 2

У другому розділі для приводного асинхронного двигуна підкачувальної насосної станції наведено Т-подібну схему заміщення, виконано розрахунки її параметрів. Для електропривода насоса виконано розрахунок природних швидкісних, електромеханічних та енергетичних характеристик електроприводу, та штучних характеристик електроприводу при частотному керуванні.

З використанням MATLAB/Simulink та бібліотеки SimPower створено симуляційну модель приводного асинхронного двигуна підкачувальної насосної станції, розраховано пускові характеристики асинхронного двигуна.

З використанням віртуального лабораторного стенда розраховано електромеханічні та гідравлічні перехідні процеси при регулюванні частоти обертання насоса.

Розділ 3 ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СТАНЦІЇ ПІДКАЧКИ

3.1 Аналіз вхідних даних

Споживачем електроенергії є насосна станція для підкачування води у 14-поверховий будинок, розташована поруч із будинком у житловому міському районі. Двигун насосного агрегату - трифазний асинхронний із номінальною напругою 380 В, встановлена потужність 4 кВт. Режим роботи двигуна - тривалий. Інші споживачі - тиристорний перетворювач частоти, мікроконтролер, освітлювальні лампи напругою 220 В. Електроенергія надходить від розподільного щита будинку, далі від трансформаторної підстанції 6 кВ/0,4 кВ мікрорайону.

3.2 Розрахунок електричних навантажень

Тривалий режим роботи електродвигуна відповідає номінальному постійному навантаженню двигуна, яке триває досить довго, так що температура всіх його частин досягає встановленого значення.

Скористаємося методом впорядкованих діаграм (методом коефіцієнта максимуму), який дає 10% точність розрахунків на всіх рівнях електропостачання.

В якості розрахункової потужності (струму) $P_p = P_{\max}$ ($I_p = I_{\max}$) для кожного електроприймача з тривалим режимом роботи при виборі. Для комутаційної апаратури та струмопроводів використовується її номінальна (встановлена) потужність $P_p = P_{\max} = P_{\text{ном}} = P_y$. Зміною ККД та коефіцієнта потужності при зміні навантаження нехтуємо. Розрахунковий струм визначається таким чином:

$$I_p = P_{\max} / (\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi_n) \quad (3.1)$$

					КНУ РБ.141.26.251с.4.03.РЗ						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Мухін В.Д.			Електропостачання			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Титюк В.К.								43	
Реценз.								ЕМ гр. ЗЕЕМ-23ск			
Н. Контр.		Титюк В.К.									
Затверд.		Пересунько І.І.									

$$I_p = 4000 / (\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,89) = 6,8 \text{ A}$$

Таким чином, розрахунок електричних навантажень споживачів першого рівня для цілей електропостачання практично не проводиться. Вибір електрообладнання для зазначеного рівня (для окремих електроприймачів) здійснюється за формулою $P_p = P_{\max} = P_u$. Визначення різних коефіцієнтів (попиту, використання, максимуму, форми) та виділення резервів електроприймачів не потрібні. Поняття найбільш навантаженої зміни не використовується.

3.3 Вибір схеми живлення та силових трансформаторів

Обираємо магістральну схему живлення 380/220 В із глухим заземленням нейтралі. Магістральні схеми живлення мають вищу експлуатаційну надійність і потребують меншої кількості захисних та комутаційних пристроїв.

Силові трансформатори є основним електричним обладнанням, що забезпечує передачу енергії від електричних станцій до споживачів та її розподіл.

Використовуємо силовий трансформатор типу Т-315-12 потужністю 315 кВА, напруга 10/0,4 кВ, напруга короткого замикання $5,5 \pm 10\%$ кВ, частота 50 Гц, з'єднання обмоток групи 12 Y/Y0, струм холостого ходу 25 А.

3.4 Вибір перерізу струмопроводів та комутаційних пристроїв

Відповідно до ПУЕ, переріз проводів, жил кабелів та шинопроводів у мережах напругою до 1000 В обирається з урахуванням умов нагрівання струму в розрахунковому режимі за співвідношенням:

$$I_m \leq K_{np} I_{\text{доп}} \quad (3.2)$$

де K_{np} — коефіцієнт прокладки; $I_{\text{доп}}$ — допустимий струм нагрівання.

А потім перевіряється за умовами захисту від КЗ (для вибухонебезпечних приміщень), а також за допустимою втратою напруги (відхилення напруги) у

					КНУ РБ.141.26.251с.4.03.РЗ	Лист
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис			44

робочому та післяаварійному режимах і під час пусків, коли по лініях проходять пікові струми. Зі сказаного випливає, що перерізи провідників цехових мереж, а також окремих ліній повинні визначатися одночасно з вибором комутаційної (рубильники, вимикачі, контактори) та захисної апаратури (запобіжники, пускачі, автоматичні вимикачі), включаючи визначення номінальних струмів плавких вставок запобіжників та струмів налаштувань автоматичних вимикачів.

3.5 Розрахунок струмів короткого замикання

Активний відносний опір трансформатора

$$R_t^* = \frac{\Delta P_{\text{к.з.}}}{S_{\text{мн}}} \quad (3.3)$$

$$R_t^* = \frac{1,97}{400} = 4,925 \cdot 10^{-3}$$

Реактивний відносний опір трансформатора

$$X_t^* = \sqrt{(U_{\text{к.з.}} \% / 100)^2 - R_t^{*2}} \quad (3.4)$$

$$X_t^* = \sqrt{(4,5 / 100)^2 - (4,925 \cdot 10^{-3})^2} = 2 \cdot 10^{-3}$$

$$R_t = \frac{R_t^* \cdot U_n^2}{S_{\text{н.тр-ра}}} \quad (3.5)$$

$$R_t = \frac{4,925 \cdot 10^{-3} \cdot 380^2}{400 \cdot 10^3} = 1,777 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$X_t = \frac{X_t^* \cdot U_n^2}{S_{\text{н.тр-ра}}} \quad (3.6)$$

$$X_t = \frac{0,044 \cdot 380^2}{400 \cdot 10^3} = 0,016 \text{ Ом}$$

Опір шини – довідкові дані.

Перемикачі

$R_{\text{ш}} = 0,11 \text{ мОм}$ (з урахуванням довжини) активний опір

$R_a = 0,12 \text{ мОм}$ (активне вимкнення котушок)

$X_a = 0,094 \text{ мОм}$

$$X_{ш}=0,425 \text{ мОм}$$

$$R_{\kappa}=0,25 \text{ мОм} - \text{перехідний опір контактів}$$

Підсумуємо активний та індуктивний опори

$$R_{\Sigma} = R_t + R_{ш} + R_a + R_{\kappa} + R_p \quad (3.7)$$

$$R_{\Sigma} = 1,777 \cdot 10^{-3} + 0,11 \cdot 10^{-3} + 0,12 \cdot 10^{-3} + 0,25 \cdot 10^{-3} + 0,2 \cdot 10^{-3} = 2,457 \cdot 10^{-3}$$

Ом

$$X_{\Sigma} = X_t + X_{ш} + X_a \quad (3.8)$$

$$X_{\Sigma} = 0,016 + 0,425 + 0,094 = 0,535 \text{ Ом}$$

Визначаємо струм короткого замикання

$$I_{\kappa.з.} = \frac{U_n}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}} \quad (3.9)$$

$$I_{\kappa.з.} = \frac{380}{\sqrt{(2,457 \cdot 10^{-3})^2 + 0,535^2}} = 710 \text{ А}$$

$$I_{\text{уд.}} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa.з.} \cdot k_y \quad (3.10)$$

$$I_{\text{уд.}} = \sqrt{2} \cdot 710 \cdot 1,18 = 1184 \text{ А}$$

3.6 Перевірка елементів схеми живлення на термічну та електродинамічну стійкість

Кабелі та шини перевіряють на термічну та електродинамічну стійкість під час короткого замикання. Оскільки процес короткого замикання є короткочасним, можна вважати, що все тепло, яке виділяється у провіднику кабелю, йде на його нагрівання. Температура кабелю визначається його питомим опором, теплоємністю та робочою температурою. Температура нагрівання кабелю в нормальному робочому режимі:

$$t_p = t_0 + (t_{\text{доп}} - t_0)(I_{\text{ном}} / I_{\text{доп}})^2, \quad (3.11)$$

де t_0 - температура навколишнього середовища (ґрунту); $t_{\text{доп}}$ - допустима температура за нормальних умов, прийнята за рівну 60 °С; $I_{\text{доп}}$ - допустимий струм для обраного перерізу.

Максимально допустимі короточасні перевищення температури під час короткого замикання для силових кабелів становлять: для кабелів із просоченою паперовою ізоляцією напругою до 10 кВ з мідними та алюмінієвими жилами — 200 °С; те саме для напруги 20–35 кВ з мідними жилами — 175 °С.

Перевірка перетину кабелю на термічну стійкість до струмів КЗ проводиться за виразом

$$q_{\min. \text{доп}} = (I_{\infty} \sqrt{t_{\text{п}}}) / C = \sqrt{B_{\text{к}}} / C, \quad (3.12)$$

де $B_{\text{к}}$ — тепловий імпульс; $C = A_{\text{кінц}} - A_{\text{поч}}$ - коефіцієнт, що відповідає різниці виділеного тепла у провіднику після короткого замикання та до нього. Для кабелів напругою 6—10 кВ з паперовою ізоляцією та мідними жилами $C = 141$, з алюмінієвими жилами $C = 85$; для кабелів з полівінілхлоридною або гумовою ізоляцією з мідними жилами $C = 123$, з алюмінієвими жилами $C = 75$.

3.7 Перевірка елементів схеми електропостачання на предмет допустимої втрати напруги

Допустимі втрати напруги на окремих ділянках кранових мереж змінного струму 380 В приймаються: для ліній живлення — 5 %, для тролейної лінії — 10 %. Розрахунок тролейних ліній на втрату напруги повинен проводитися при найбільш несприятливому, але реальному розміщенні кранів. У практичних розрахунках втрата напруги в троліях визначається за формулою, %:

$$\Delta V = KLI_{\text{нік}}, \quad (3.13)$$

де K — питомі (на одиницю довжини та струму) втрати напруги; L — довжина тролієв в один кінець від точки прикладання. Значення коефіцієнта K наведено в довідковій літературі.

3.8 Забезпечення якості електричної енергії на затискачах перетворювальних установок

Вихідними даними є принципові схеми електричної мережі, на яких вказано параметри розподільних ліній та ліній, що живлять електроустановку (перетин, довжина тощо), відомості про рівні напруги на джерелах живлення в максимальному та мінімальному режимах і потужність короткого замикання на шинах цехової підстанції, дані про перетворювачі – джерела високих гармонік, зварювальні агрегати – джерела коливань потужності конденсаторних установок, які передбачені для розміщення в мережі 0,38–0,66 кВ.

Висновки до розділу 3

Третій розділ містить розрахунок елементів системи електропостачання електроприводу станції підкачки. Виконано розрахунки потужності силового трансформатора, виконано вибір силових трансформаторів та основного комутаційного обладнання. Виконано розрахунки струмів короткого замикання на землю. Обрано захисну апаратуру.

Висновки по роботі

У першому розділі розглянуто структуру типової технологічної схеми системи міського водопостачання, наведено типову технологічну схему підкачувальної насосної станції для подачі води у 9-поверховий будинок.

Типовим рішенням для підкачувальної насосної станції є використання відцентрового насоса консольного типу ТНП-066. Наведено паспортні дані та напірні характеристики насоса ТНП-066.

Виконано розрахунок потужності електроприводу насоса ТНП-066.

Обрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4А100S2У3 потужністю 4 кВт з частотою обертання 3000 об/хв, виконання за ступенем захисту IP44.

Обґрунтовано переваги використання регулювання продуктивності насоса через зміну частоти обертання. На основі аналізу вимог до регульованого електроприводу турбомеханізмів обґрунтовано доцільність використання частотного керування асинхронного двигуна.

У другому розділі для приводного асинхронного двигуна підкачувальної насосної станції наведено Т-подібну схему заміщення, виконано розрахунки її параметрів. Для електропривода насоса виконано розрахунок природних швидкісних, електромеханічних та енергетичних характеристик електроприводу, та штучних характеристик електроприводу при частотному керуванні.

З використанням MATLAB/Simulink та бібліотеки SimPower створено симуляційну модель приводного асинхронного двигуна підкачувальної насосної станції, розраховано пускові характеристики асинхронного двигуна.

					КНУ РБ.141.26.251с.4.ВН			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Мухін В.Д.			Висновки	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Титюк В.К.					49	
Реценз.						ЕМ гр. ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.		Титюк В.К.						
Затверд.		Пересулько І.І.						

З використанням віртуального лабораторного стенда розраховано електромеханічні та гідравлічні перехідні процеси при регулюванні частоти обертання насоса.

Третій розділ містить розрахунок елементів системи електропостачання електроприводу станції підкачки. Виконано розрахунки потужності силового трансформатора, виконано вибір силових трансформаторів та основного комутаційного обладнання. Виконано розрахунки струмів короткого замикання на землю. Обрано захисну апаратуру.

					КНУ РБ.141.26.251с.4.ВН	Лист
						50
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис			

Перелік використаних джерел

1. І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Л. С. Червінський, Д. А. Абдураманов, А. В. Торопов, О. В. – Регульований електропривод [Текст]: підручник. – Київ: Ліра-К, 2015. – 504 с.
2. О. М. Возняк – Сучасні системи електроприводів [Текст]: навчальний посібник: у 2 ч. – Вінниця: ТВОРИ, 2021. – Ч. 1. – 280 с.
3. С. П. Денисюк – Системи силової електроніки та засоби електромеханіки [Текст]: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 120 с.
4. Chorny, O. Tolochko, V. Tytyuk., D. Rodkin, G. Chekavskiy Mathematical models and specifics of numerical calculations of dynamic characteristics of electric drives with induction motors: monograph / – Kremenchuk: PE Shcherbatykh O.V. – 302 p. [in Ukrainian], 2016.
5. Браславський І. Я. Енергозберігаючий асинхронний привід. - М.: АКАДЕМІА, 2004. – 250с.
6. Мелешин В. І. Транзисторна перетворювальна техніка. - М.: Техносфера, 2005. – 632с.
7. Широтно-імпульсна модуляція в електроприводі змінного струму [Електронний ресурс]/Пересада С.М., Король С.В. Режим доступу: http://www.el-drive.com.ua/index.php?adr=5_article_el.
8. Казачковський М. М. Комплектний електропривод. – Дніпропетровськ: НГУ, 2002. – 226 с.
9. Довідник з електричних машин: Навч. посібник для студ. освітніх установ середньої проф. освіти / Кацман М. М. - М.: "Академія", 2005. – 480с.
10. Зеленов А.Б. Теорія електропривода. Луганськ: Ноулідж, 2010, с. 670.

					КНУ РБ.141.26.251с.4.ДЖ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Перелік використаних джерел		
Розроб.		Мухін В.Д.					
Перевір.		Титюк В.К.					
Реценз.							
Н. Контр.		Титюк В.К.					
Затверд.		Пересунько І.І.			ЕМ гр. ЗЕЕМ-23ск		
					Літ.	Арк.	Аркушів
						51	

