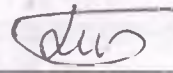


Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри


(підпис)

І. С. Білюк

« 20 » 12 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

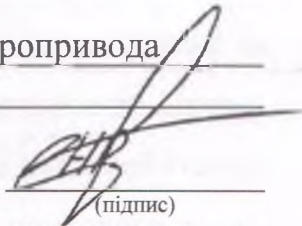
освітня програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(назва освітньої програми)

на тему: Дослідження ефективності регульованого електропривода
насосної установки водопостачання

Виконав: студент групи 6372м

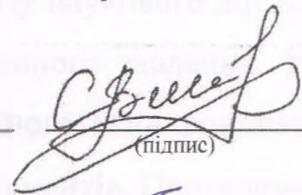
Немченко Роман Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

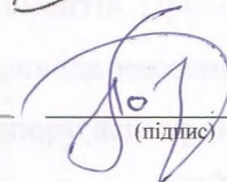
Керівник доц. каф. автоматики, к.е.н.
Шевчук С. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

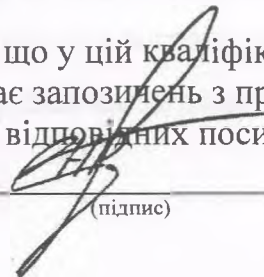
Рецензент доц. каф. СЕЕС, к.т.н.,
доц. Новогрецький С. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2024 року

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 88 с., 4 р., 32 рис., 8 табл., 2 дод., 17 джерел.

Ключові слова: асинхронний електропривод, відцентровий насос, моделювання, насосна установка, перехідна характеристика.

Об'єкт дослідження – перехідні процеси в частотно-регульованому асинхронному електроприводі насосної установки водопостачання.

Мета роботи – розробка системи керування асинхронного електропривода насосної установки водопостачання та дослідження її динаміки.

Методи дослідження – моделювання перехідних процесів в електроприводі насосної установки водопостачання з використанням сучасної теорії автоматичного керування та електропривода, імітаційне моделювання в Scilab, обробка та аналіз отриманих результатів.

У першому розділі досліджено типи насосних установок водопостачання та водовідведення, склад обладнання та режими роботи насосної установки. Проведено аналіз систем керування насосних установок. Наведено опис насосної станції 3 NKVE 15/8 T. Розділі 2 містить вибір та обґрунтування методу наукового дослідження, алгоритм дослідження та метод розв'язання поставленого завдання. У розділі 3 наведено функціональну схему частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та обґрунтовано вибір її елементів. Проведено моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки в Scilab та досліджено вплив параметрів регулятора напору асинхронного електропривода насосної установки водопостачання на якість керування. В розділі 4 розглянуті питання з охорони праці. Додатки містять програму розрахунку та побудови механічних характеристик електродвигуна при частотному регулюванні та слайди мультимедійної презентації.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ	7
1.1 Типи насосних установок водопостачання та водовідведення	7
1.2 Склад обладнання та режими роботи насосної установки	12
1.3 Аналіз систем керування насосних установок.....	18
1.4 Опис насосної установки.....	19
1.5 Висновки до розділу 1	22
2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ І ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	24
2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження.....	24
2.2 Структурно-логічна схема.....	26
2.3 Вибір методів розв’язання поставленої задачі.....	28
2.4 Висновки до розділу 2	32
3 АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	33
3.1 Функціональна схема частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки	33
3.2 Побудова динамічної моделі частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки	45
3.3 Моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки.....	55
3.4 Оцінка ефективності регульованого електропривода насосної установки.....	68
3.5 Висновки до розділу 3	70
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	71
4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів	71
4.2 Електробезпека насосної установки.....	77
4.3 Техніка безпеки при роботі насосної установки.....	81
4.4 Висновки до розділу 4	83
ВИСНОВКИ.....	84

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	86
ДОДАТОК А. Програма розрахунку та побудови механічних характеристик електродвигуна при частотному регулюванні	89
ДОДАТОК Б. Мультимедійна презентація	90

ВСТУП

Актуальність теми. Основний сенс використання регульованого електропривода і систем автоматичного керування в насосних установках полягає в тому, щоб привести у відповідність режим роботи насосів з режимом роботи водопровідної або каналізаційної мереж. Регулюванням частоти обертання насоса його робочі параметри приводяться у відповідність з режимом роботи водопровідної або каналізаційної мережі. Щоб змінити частоту обертання насоса, його оснащують регульованим приводом, тобто регульований привід є свого роду виконавчим пристроєм, що змінює частоту обертання насоса [1].

Необхідність стабілізації напору в системах водопостачання та водовідведення обумовлена змінним характером режиму водоспоживання, що вимагає безперервних змін в режимі роботи насосних агрегатів. Зміни повинні бути здійснені таким чином, щоб підтримувалися необхідні значення технологічних параметрів (витрати, напору) в системі в цілому і одночасно забезпечувалося мінімально можливе енергоспоживання насосної установки.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження ефективності регульованого електропривода насосної установки водопостачання. Щоб досягти поставленої мети, слід розв'язати наступні завдання:

- 1) розглянути типи насосних установок водопостачання та водовідведення, склад обладнання та режими роботи насосної установки. Провести аналіз систем керування насосних установок;
- 2) скласти функціональну схему частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та обґрунтувати вибір її елементів;
- 3) побудувати динамічну модель частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та виконати розрахунок параметрів її елементів;
- 4) провести моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки в Scilab та проаналізувати якість керування.

Об'єкт дослідження. Перехідні процеси в частотно-регульованому асинхронному електроприводі насосної установки водопостачання.

Предмет дослідження. Параметри регулятора напору асинхронного електропривода насосної установки водопостачання, які впливають на якість керування.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані із залученням сучасної теорії електропривода, методів теорії автоматичного керування та комп'ютерного моделювання в Scilab.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Типи насосних установок водопостачання та водовідведення

1.1.1 Призначення насосних станцій [2]

Насосні станції систем водопостачання і каналізації є комплекс споруд і обладнання, що забезпечує водоподачу або водовідведення відповідно до потреб споживача. Склад споруд, їх конструктивні особливості, тип і число основного і допоміжного обладнання визначаються виходячи з принципів комплексного використання водних ресурсів та охорони природи з урахуванням призначення насосної станції і висунутих до неї технологічних вимог.

За своїм призначенням і розташуванням в загальній схемі водопостачання насосні станції поділяються на станції I підйому, II підйому, підвищувальні і циркуляційні.

Насосні станції I підйому забирають воду з джерела водопостачання і подають її на очисні споруди або, якщо не потрібно очищення води, безпосередньо в резервуари, розподільну мережу, водонапірну башту або інші споруди в залежності від прийнятої схеми водопостачання. На промислових підприємствах з процесами, що пред'являють 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 і II підйому можуть бути розміщені на одній станції, що дозволяє зменшити витрати на будівництво і експлуатацію. Однак таке рішення не завжди можливо і залежить від виду водопостачання, наявності і типу очисних споруд, від рельєфу місцевості і т.п.

Підвищувальні насосні станції (станції підкачки) призначені для підвищення напору у водопровідній мережі або в водоводі. В цьому випадку вода забирається

з однієї мережі (ділянки водоводу) і під підвищеним тиском подається в іншу мережу (район міста, окремого цеху промислового підприємства) або до наступної ділянки довгого водоводу.

Циркуляційні насосні станції входять в схеми оборотного технічного водопостачання промислових підприємств і теплових електростанцій. На цих станціях одні насоси подають відпрацьовану на підприємстві воду на охолоджуючі або очисні пристрої, а інші насоси повертають підготовлену воду знову до виробничих установок.

Призначення насосних станцій в схемах каналізації полягає в підйомі стічної води на очисні споруди, якщо рельєф місцевості не дозволяє подавати ці води самотпливом. Каналізаційні насосні станції влаштовують також для того, щоб уникнути великого заглиблення самотпливного колектора. У цьому випадку стічні води з заглибленого колектора подаються в інший, розташований вище.

По розташуванню в загальній схемі каналізації насосні станції поділяються на головні, які служать для перекачування стічних вод з усієї території населеного пункту або промислового підприємства, і районні, призначені для перекачування стічних вод тільки з частини території населеного пункту або промислового підприємства.

1.1.2 Типи насосних станцій [2]

Тип водопровідної насосної станції визначається її призначенням і подачею, а також залежить від виду і режиму джерела водопостачання, розташування будівлі насосної станції по відношенню до водозабірної споруди, типу і характеристик основного насосного обладнання та систем привода, кліматичних умов, рельєфу і гідрогеології місцевості.

Тип каналізаційної насосної станції диктується головним чином глибиною закладення підвідного колектора, об'ємом стічних вод і регулярністю їх надходження, гідрогеологічними умовами (зокрема, наявністю ґрунтових вод), типом установлюваних насосів і двигунів.

В значній мірі тип насосної станції залежить від способу керування агрегатами.

Всілякі поєднання зазначених умов визначили наявність великого числа ознак, за якими можуть бути класифіковані типи і конструкції насосних станцій систем водопостачання і каналізації.

За характером основного обладнання насосні станції можуть бути:

- з відцентровими горизонтальними або вертикальними насосами;
- з осьовими і діагональними горизонтальними, похилими або вертикальними насосами;
- з об'ємними насосами;
- з водопідйомниками різних типів.

За розташуванням лопатевих насосів щодо рівня води в приймальному резервуарі або в підвідному колекторі насосні станції підрозділяються:

на станції, де насоси встановлені з позитивною висотою всмоктування;

на станції, де насоси встановлені з підпором.

За розташуванням щодо поверхні землі насосні станції можуть бути:

- заглибленими (шахтного типу),
- частково заглиблені;
- наземними.

За характером керування насосні станції можуть бути:

- з ручним керуванням — всі операції по увімкненню і вимкненню агрегатів виконуються обслуговуючим персоналом;
- автоматичними — всі операції по керуванню виконуються відповідними приладами та пристроями;
- дистанційними — увімкнення і вимкнення агрегату здійснюється з диспетчерського пункту, значно віддаленого від станції.

Особливу групу представляють собою нестационарні насосні станції, які влаштовують в основному для нетривалої сезонної роботи. Вони використовуються для водопостачання тимчасових селищ і господарств, будівельних майданчиків, а також для місцевого зрошення відносно невеликих площ.

На закінчення слід сказати, що в будь-якому випадку остаточний вибір того чи іншого типу насосної станції зазвичай здійснюють шляхом техніко-економічного порівняння кількох варіантів.

1.1.3 Принцип роботи насосної станції [3]

Насосне обладнання повинно забезпечувати певну витрату середовищ, що перекачуються, долаючи гідравлічні опори систем трубопроводів. При збільшенні ширини смуги необхідної витрати можливе використання груп паралельно встановлених насосів замість одного великого. В цьому випадку, підключаючи і відключаючи необхідну кількість насосів, можна забезпечити необхідний рівень витрати в певний період часу. Це рішення давно відомо і повсюдно використовується практично на всіх підприємствах. Насоси при цьому частіше працюють в зонах високого гідравлічного ККД, а система в цілому має більшу надійність з позиції резервування. Таке групове керування насосів в структурі станцій піддалося істотній зміні в приводній частини з появою сучасних перетворювачів частоти.

Сучасна насосна станція – це група насосів і їх система керування, яка працює за певним законом в автоматичному режимі, володіє повним набором електричних і технологічних захистів. На рисунку 1.1 наведено функціональну схему станції водопостачання. До складу станції входять: гідропневматичний бак 1 з обв'язкою і запобіжним клапаном; датчик тиску 2 з обв'язкою; запірна арматура 3; зворотний клапан 4; манометр 5 з обв'язкою; віброкомпенсатор 6; перетворювач частоти 7; насос 8, проточна частина з електродвигуном; реле тиску 9.

В основі автоматичної роботи лежить паралельна робота насосів на єдиний вихідний колектор в функції технологічного параметра, в даному випадку тиску. Всі насоси в групі розвивають однаковий напір. При зміні продуктивності системи по відхиленню вимірюваної фізичної величини виробляється автоматичне включення або відключення додаткових насосів. Кількість насосів в реальних системах варіюється від двох до семи і визначається оптимумом між зоною ККД, діапазоном витрат середовищ, що перекачуються, витрат на систему керування, необхідної надійністю і резервуванням.

У схемі відсутній вхідний фільтр, оскільки в більшості систем він присутній на вході в водомірному вузлі або в системі обліку витрати води. Пунктиром вказані елементи силової та інформаційної електричних частин.

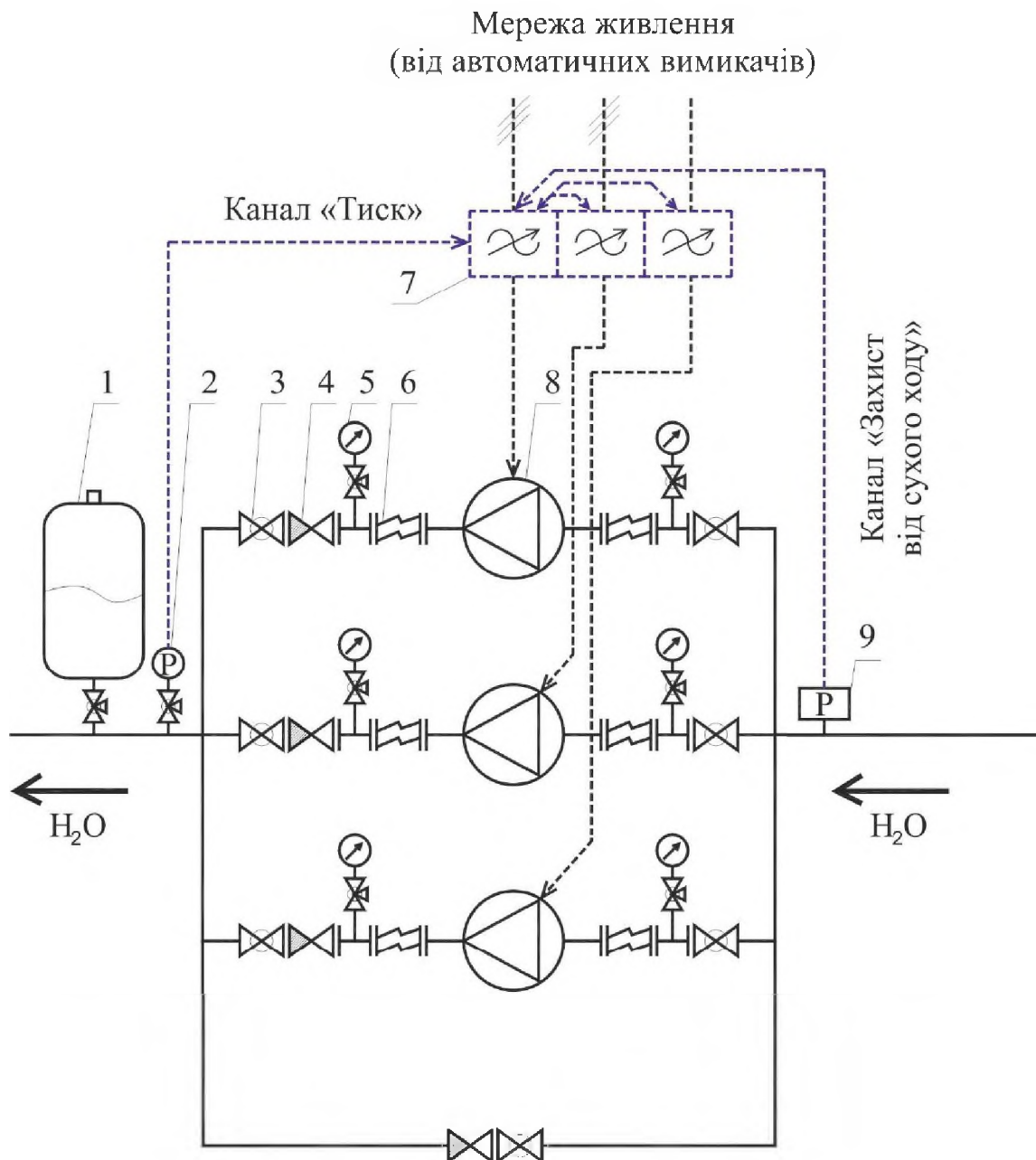


Рисунок 1.1 – Функціональна схема насосної станції системи водопостачання

1.2 Склад обладнання та режими роботи насосної установки

1.2.1 Склад обладнання насосних станцій [2]

Для здійснення головної функції насосної станції – подачі води – призначене різне обладнання, від якого залежать ефективність і надійність експлуатації станції. У зв'язку з цим одним з найбільш відповідальних етапів проектування насосної станції є підбір типів і параметрів обладнання з урахуванням його характеристик, взаємозв'язків і зручності експлуатації. Обладнання і системи насосних станцій зазвичай поділяють на наступні групи.

1.2.1.1 Основне енергетичне обладнання включає насоси і приводні двигуни. Залежно від необхідного напору на станції встановлюються осьові, діагональні і відцентрові лопатеві насоси або насоси витіснення. Привід насосів найчастіше здійснюється за допомогою електродвигунів, рідше двигунів внутрішнього згоряння, ще рідше парових турбін. Комплекс, що складається з насоса і приводного двигуна, називають гідроагрегатом або просто агрегатом насосної станції. Число агрегатів насосної станції може бути різним і залежить від розрахункової (максимальної) подачі станцій і потужності агрегату. При необхідній великій подачі станції прагнуть знизити число агрегатів за рахунок збільшення їх одиничної потужності.

1.2.1.2 Механічне обладнання насосних станцій включає в себе сміттєзатримуючі пристрої, затвори і підйомно-транспортні механізми.

Сміттєзатримуючі пристрої необхідні для захисту насосів від попадання в них сміття і плаваючих тіл, здатних порушити нормальну експлуатацію агрегату, а також для попереднього очищення води відповідно до вимог споживача.

Затвори забезпечують зміну режиму роботи насосної станції, а також періодичні огляди і ремонти її агрегатів і окремих споруд.

Підйомно-транспортні механізми на водопровідних та каналізаційних насосних станціях служать в основному для монтажу і демонтажу обладнання, трубопроводів і фасонних частин, а також для проведення ремонтних робіт. На насосних

станціях, суміщених з водозабірними спорудами, робота вантажопідіймальних механізмів пов'язана і з технологічними операціями – систематичний підйом і опускання затворів, сміттєзатримуючих пристроїв і т.д.

1.2.1.3 Допоміжне обладнання включає в себе системи технічного водопостачання, дренажно-осушувального, масляного і пневматичного господарств, вакуум-систему.

Система технічного водопостачання призначена для подачі технічно чистої води до пристроїв для водяного змащення напрямних підшипників і сальникових ущільнень насосів, а також до теплообмінників допоміжного обладнання (компресорів, великих електродвигунів, маслонапірних установок та ін.).

Дренажно-осушувальна система призначена для відкачування води з камер, самопливних і всмоктувальних труб насосів, розташованих нижче максимального рівня води в нижньому б'єфі, спорожнення напірних трубопроводів, а також для видалення дренажної води з підземних приміщень.

Система маслостачання служить для забезпечення маслами відповідних марок масляних ванн і підшипників електродвигунів, механізмів системи регулювання, сервомоторів і гідропідйомників затворів, силових трансформаторів і маслорозподільних електричних апаратів розподільних пристроїв. Ця система включає в себе ємності для зберігання оперативних запасів чистого масла і для зливу відпрацьованого масла, комунікаційні трубопроводи, маслонапірні установки, маслонасосні агрегати і апаратуру для очищення масла.

Система пневматичного господарства необхідна для живлення стисненим повітрям пристроїв для зарядки котлів маслорозподільної установки, гальмування агрегатів і віджимання води з камер робочих коліс насосів для роботи агрегатів в режимі синхронного компенсатора, апаратури контролю, пневмоприводів затворів, масляних і повітряних вимикачів, а також для технічних потреб станції (робота пневмоінструменту і т.п.).

Система складається з компресорів, повітроприймачів (ресиверів) і повітропроводів відповідного тиску.

Вакуум-система призначена для заливки водою насосів, встановлених вище рівня води в нижньому б'єфі.

Контрольно-вимірювальні прилади і системи автоматизації включають в себе пристрої контролю за станом основних агрегатів та іншого обладнання (вимірювання потужності, тиску, витрати, температури різних частин, подачі мастила, охолоджувальної води і т.д.), зосереджені в спеціальних щитах і при відхиленнях режиму понад допустимі значення дають сигнал, а при необхідності і імпульс на автоматичну зупинку агрегату. У систему контрольно-вимірювальних приладів входять також органи керування, що забезпечують можливість комплексної автоматизації насосної станції, що працює з мінімальною кількістю чергового персоналу або без нього. На великих станціях всі найбільш важливі органи керування і контролю виводяться на центральний пульт керування, з якого здійснюється керування агрегатами станції.

Ступінь автоматизації технологічних процесів і склад контрольно-вимірювальних приладів на насосній станції залежать від її призначення і вимог системи водопостачання.

До допоміжного обладнання насосних станцій відносяться також труби і фасонні частини, що забезпечують під'єднання насосів до всмоктувальних і напірних трубопроводів.

Електричні пристрої насосної станції включають в себе силові трансформатори, виходи високої та низької напруги, розподільчий пристрій, струмопроводи до електродвигунів, системи контролю і власних потреб.

Система власних потреб забезпечує електропостачання електродвигунів ма-слонапірної установки, системи технічного водопостачання і дренажу, освітлення, пристроїв автоматики і захисту та інших споживачів електроенергії. Надійність системи власних потреб повинна бути досить високою, що досягається відповідним резервуванням.

Протипожежні та санітарно-технічні пристрої. У будівлі насосної станції знаходяться установки і пристрої, що мають підвищену вибухо- і пожежонебезпеку.

До них відносяться електродвигуни, силові трансформатори, кабелі, масляне господарство, акумуляторна та ін. На великих насосних станціях влаштовується окрема система протипожежного водопостачання.

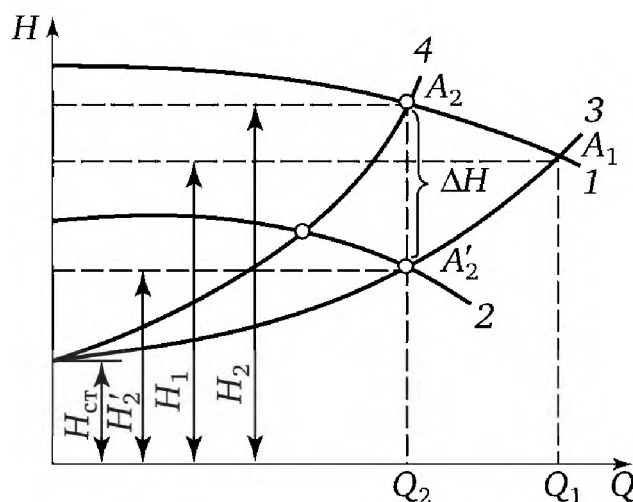
Для забезпечення нормальних умов експлуатації будівлю насосної станції у відповідності з діючими нормативними положеннями має бути обладнано системами опалення, питного водопостачання, вентиляції і кондиціювання повітря і іншими санітарно-технічними пристроями.

1.2.2 Режими роботи насосних установок

Навмисна зміна подачі і напору насосів відповідно до умов, що змінюються режимом роботи системи називається регулюванням. Відцентрові насоси регулюються дроселюванням, тобто зміною ступеня відкриття засувки (затвора) на напірної лінії, зміною частоти обертання робочих коліс (рисунок 1.2), а також байпасуванням. Розглянемо кожний з цих способів регулювання.

1.2.2.1 Дроселювання. Прикриваючи затвор, збільшують крутизну характеристики трубопроводу, при цьому робоча точка насоса A_1 переміщується в положення A_2 . У цьому випадку подача зменшується до значення Q_2 , напір, що розвивається насосом, зростає до значення H'_2 , а напір на трубопроводі за затвором знижується до значення H_2 . Зниження напору за затвором відбувається за рахунок втрат напору ΔH в затворі.

Збільшуючи ступінь відкриття затвора, зменшують крутизну характеристики трубопроводу. Внаслідок цього подача збільшується, напір, що розвивається насосом, зменшується, а натиск в трубопроводі за затвором зростає. Цей спосіб регулювання, іменований дроселюванням, вважається неекономічним, так як на подолання додаткового гідравлічного опору в затворі потрібні додаткові витрати енергії.



1 – характеристика насоса при номінальній частоті обертання; 2 – те ж при зменшеній частоті обертання; 3 – характеристика трубопроводу при повному відкритті затвора; 4 – те ж при зменшенні ступеня відкриття затвора; H_1 , H_2 – напори, відповідні подачам Q_1 , Q_2 ; $H_{ст}$ – статична складова напору

Рисунок 1.2 – Регулювання режиму роботи відцентрового насоса

1.2.2.2 Зміна частоти обертання робочих коліс. Більш економічним способом регулювання є зміна частоти обертання насосів. При цьому змінюється положення напірно-витратної характеристики насоса. Зменшуючи частоту обертання, переміщують характеристику насоса вниз. При цьому робоча точка, переміщуючись по характеристиці трубопроводу, займає становище A_2 , отже, подача зменшується. Одночасно зменшується напір в мережі і напір, що розвивається насосом. Збільшення частоти обертання збільшує подачу і напір насоса, а також напір в мережі. Цей спосіб регулювання більш економічний, але вимагає застосування регульованого електропривода.

1.2.2.3 Байпасування. При регулюванні подачі насоса перепуском (байпасуванням) необхідна витрата рідини в системі забезпечується за рахунок відводу частини перекачуваної насосом рідини з напірного трубопроводу у всмоктуючий по перепускному трубопроводу. Засувка байпасного (перепускного) трубопроводу встановлюється паралельно з насосом і використовується для регулювання його параметрів (рисунок 1.3). У порівнянні зі звичайною засувкою, яка встановлюється

за насосом, байпасування забезпечить певну мінімальну витрату $Q_{\text{бп}}$ насоса, незалежно від характеристик системи. Витрата насоса $Q_{\text{н}}$ дорівнює сумі витрат системи $Q_{\text{с}}$ і витрати через байпасний трубопровід $Q_{\text{бп}}$. Засувка на байпасі буде забезпечувати максимально допустимий напір в системі $H_{\text{макс}}$. Навіть якщо необхідне значення витрати в системі дорівнює нулю, насос ніколи не буде працювати на закрити засувку. Як і у випадку з дросельним регулюванням, необхідне значення витрати системи $Q_{\text{с}}$ може бути забезпечено меншим насосом і без перепуску; в результаті витрата через насос буде нижче і, отже, споживання електроенергії теж знизиться.

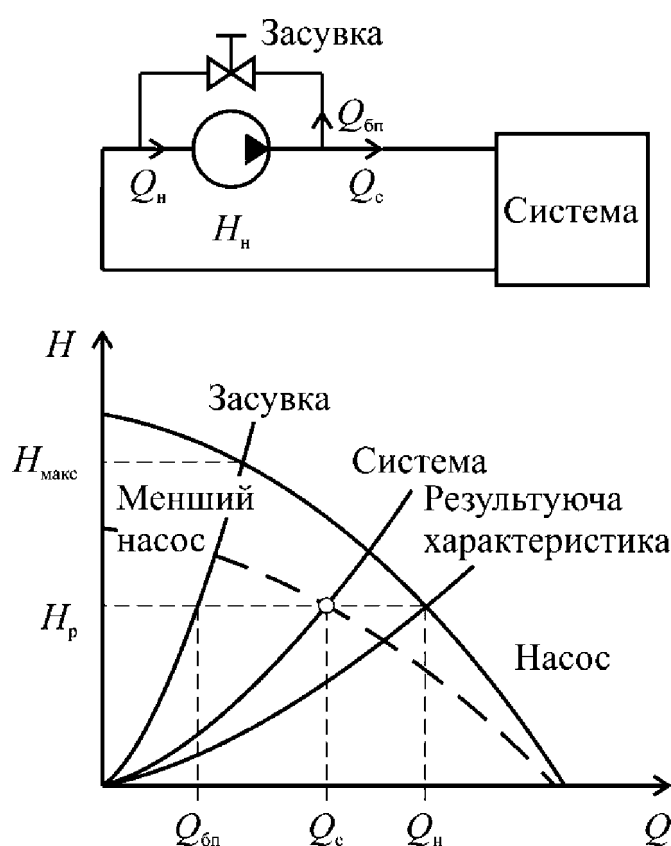


Рисунок 1.3 – Регулювання байпасуванням

На підставі проведеного аналізу способів регулювання режимів роботи насосних агрегатів можна зробити висновок, що найбільш поширеним на сьогоднішній день є регулювання частоти обертання роторів приводних двигунів, відповідно і робочих коліс насосів. Застосування регульованого асинхронного електропривода для керування насосними агрегатами дозволяє забезпечити:

- плавний пуск електродвигуна, відсутність механічних навантажень на двигун і кидків струму в мережі;
- відсутність гідравлічних ударів;
- ефективне використання споживаної насосним агрегатом потужності у всьому діапазоні регулювання;
- зниження рівня шуму при пуску і роботі;
- забезпечення автономної та безпечної роботи.

1.3 Аналіз систем керування насосних установок

Провідні виробники насосних станцій та їх систем керування пропонують номенклатурні ряди різного виконання, серед яких можна виділити п'ять основних схем побудови систем керування [4]:

1.3.1 Електродвигуни насосів в станції підключаються безпосередньо до мережі через пускачі. Контур регулювання виконано на зовнішньому контролері. До нього ж підключається датчик тиску напірного і всмоктувального колектора, а також котушки пускачів.

1.3.2 Один з насосів в станції має вбудований децентралізований перетворювач частоти. Контур регулювання виконано на базі зовнішнього контролера з ПІ-регулятором, який змінює продуктивність головного насоса по шині зв'язку. При збільшенні необхідної витрати системи регулятор за допомогою вбудованих реле контролера комутує котушки пускачів додаткових насосів.

1.3.3 Всі насоси станції мають вбудовані перетворювачі частоти. Контур регулювання виконано на базі ПІ-регулятора одного з перетворювачів частоти. Регулятор по єдиній шині здійснює підключення і відключення підпорядкованих перетворювачів частоти, а також формує для них завдання швидкості обертання.

1.3.4 У системі керування присутній зовнішній перетворювач частоти, який має додаткову можливість перемикавання на будь-який з електродвигунів насосів

станції за допомогою комутації пускачів силових вихідних ланцюгів. Контур регулювання також виконано на його програмному ПП-регуляторі. Котушки пускачів додаткових насосів комутуються від декількох реле перетворювача частоти.

1.3.5 Всі електродвигуни насосів керуються від зовнішніх перетворювачів частоти. Контур регулювання виконано на базі ПП-регулятора одного з перетворювачів частоти. Регулятор здійснює підключення і відключення підлеглих перетворювачів частоти, а також по єдиній шині формує для них завдання швидкості обертання.

У приписі до підбору станцій зазначено, що вибір того чи іншого типу системи керування пов'язаний з безліччю вимог з боку технологічного процесу.

1.4 Опис насосної установки

Підвищувальна насосна станція 3 NKVE 15/8 T [5, 6] (станція підкачки) призначена для підвищення тиску води цивільного, сільськогосподарського та промислового призначення. Загальний вигляд станції представлено на рисунку 1.4.

Насосна станція компонується 3 вертикальними багатоступінчатими відцентровими насосами типу NKVE 15, кожен з яких укомплектовано асинхронним електродвигуном.

Перекачувана рідина – чиста, без твердих включень і мінеральних мастил, не в'язка, хімічно нейтральна, за характеристиками аналогічна воді. Температура – від мінус 15 °С до плюс 80 °С.

Основні матеріали: рама з листової сталі з гальванічним покриттям, всмоктуючий і напірний колектори з нержавіючої сталі, з фланцевими з'єднаннями, знімний кронштейн з гальванізованої сталі для електричної шафи керування. Монтаж: у вертикальному положенні.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд насосної станції 3 NKVE 15/8 Т

Залежність напору насоса NKVE 15/8 від його об'ємної подачі наведено на рисунку 1.5.

Технічні характеристики станції представлено у таблиці 1.1.

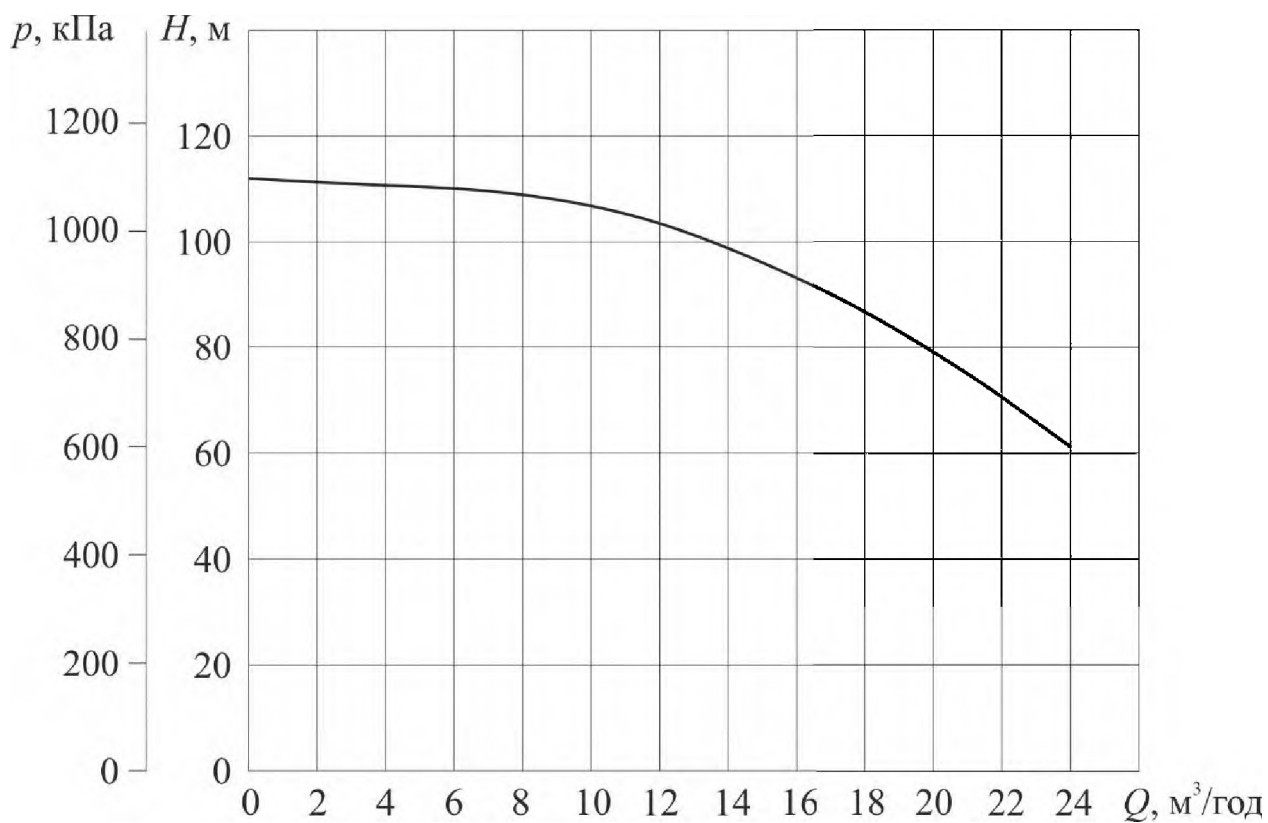


Рисунок 1.5 – Напірна характеристика насоса NKVE 15/8

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики насосної станції 3 NKVE 15/8 Т

Параметр	Значення
Продуктивність Q , м³/год	72
Напір $H_{\max}$, м	108,8
Максимальний робочий тиск $p_{\max}$, МПа (бар)	1,1 (11)
Робочий тиск p , МПа (бар)	1 (10)
Електричні параметри:	
– джерело живлення, В	3×400
– потужність, кВт	3×7,5
– струм, А	3×16,5
– ступінь захисту	IP 54
– клас ізоляції	F

Залежність напору насосної станції від її об'ємної подачі наведено на рисунку 1.6.

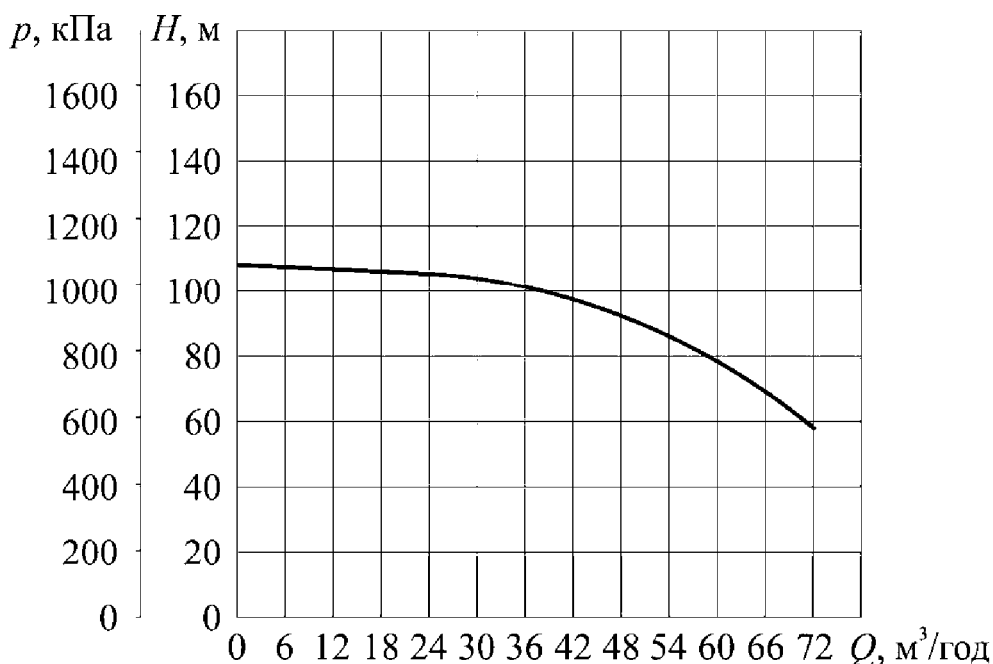


Рисунок 1.6 – Напірна характеристика насосної станції 3 NKVE 15/8

1.4 Висновки до розділу 1

1.4.1 Розглянуто типи насосних установок водопостачання та водовідведення. Виявлено, що насосні установки прийнято класифікувати за характером основного обладнання, за розташуванням лопатевих насосів щодо рівня води в приймальному резервуарі або в підвідному колекторі, за розташуванням щодо поверхні землі, за характером керування. В значній мірі тип насосної станції залежить від способу керування агрегатами.

1.4.2 Проаналізовано склад обладнання та режими роботи насосної установки. Встановлено, що до складу обладнання насосних станцій відносять основне енергетичне, механічне та допоміжне обладнання. Насоси і приводні двигуни прийнято відносити до енергетичного обладнання.

1.4.3 Проведено аналіз режимів роботи та систем керування насосних установок. Виявлено, що найбільш ефективний спосіб регулювання передбачає зміну

швидкості обертання робочого колеса насоса. Встановлено також, що провідні виробники насосних станцій та їх систем керування пропонують номенклатурні ряди різного виконання, серед яких можна виділити п'ять основних схем побудови систем керування.

1.4.4 Складено опис насосної станції 3 NKVE 15/8 Т. Встановлено, що насосна станція призначена для підвищення тиску води цивільного, сільськогосподарського та промислового призначення, компонується 3 вертикальними багатоступінчатыми відцентровими насосами типу NKVE 15, кожен з яких укомплектовано асинхронним електродвигуном.

2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ І ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження

Метод (від грецького *methodos* – шлях до чого-небудь) – в найбільш загальному випадку означає засіб досягнення мети, спосіб дослідження явища, який визначає планомірний підхід до їх наукового пізнання та встановлення істини. Науковий метод – це спосіб пізнання явищ дійсності в їх взаємозв'язку та розвитку, спосіб досягнення поставленої мети і завдань дослідження і відповідає на запитання: «Як пізнавати?».

Методика дослідження – це система правил використання методів, прийомів та способів для проведення будь-якого дослідження. Свідоме застосування науково-обґрунтованих методів слід розглядати як найсуттєвішу умову отримання нових знань.

Кожний метод наукового пізнання слід розглядати як систему регулятивних принципів практичної і теоретичної діяльності людини. Методів пізнання об'єктивної дійсності відомо дуже багато. Правильний вибір методів дослідження потребує знання їх класифікації.

Досить поширеним є поділ основних типів методів за двома ознаками: мети і способу реалізації.

За першою ознакою виділяються так звані первинні методи, що використовуються з метою збору інформації, вивчення джерел, спостереження, опитування та ін. Вторинні методи використовуються з метою обробки та аналізу отриманих даних – кількісний та якісний аналіз даних, їх систематизація, шкалювання та ін.

Візуальні, або графічні, методи – графи, схеми, діаграми, картограми та ін. дають змогу отримати синтезоване уявлення про досліджуваний об'єкт і водночас наочно показати його складові, їхню питому вагу, причинно-наслідкові зв'язки, інтенсивність розподілу компонентів у заданому об'ємі. Ці методи тісно пов'язані з комп'ютерними технологіями.

У прикладних аспектах гуманітарних наук доцільно використовувати математичні методи. Математичний апарат теорії ймовірностей дає можливість вивчати масові явища в соціології, лінгвістиці. Математичні методи відіграють важливу роль при обробці статистичних даних, моделюванні.

Сучасна методологія вкладає новий зміст у традиційне уявлення про теоретичні (математичні) та емпіричні (експериментальні) методи дослідження в природних і технічних науках.

Складовою частиною наукових досліджень є експеримент.

Експеримент представляє собою науково поставлений дослід або спостереження явища або процесу в точно враховуваних умовах, що дозволяють стежити за ходом експерименту, керувати ним, відтворювати його щоразу при повторенні цих умов.

Серед відомих методів дослідження складних електромеханічних систем можна виділити фізичне, імітаційне, аналогове та математичне моделювання.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, яка відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні та функціональні характеристики та властивості оригіналу (але не обов'язково всі властивості) та має великі можливості з визначення різноманітних якостей електромеханічних систем ті їх елементів.

Метод математичного моделювання ґрунтується на здатності математично описувати рівняннями різні за природою явища (процеси) та виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи.

Аналогове моделювання базується на однаковому для моделі та натури математичному описі та використовується для імітації на основі аналогової фізичної системи по її елементам. При цьому кожному з фізичних елементів натури в моделі відповідає певний еквівалент. У якості моделей використовуються електричні кола, складені з пасивних та активних елементів.

При математичному моделюванні застосовуються аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число факторів, завжди

потребують деяких припущень та спрощень. Проте вони більше пристосовані для пошуку оптимальних рішень.

Комп'ютерна модель (або чисельна) – комп'ютерна програма, яка реалізує абстрактну модель деякої системи. Комп'ютерні моделі використовуються для отримання нових знань про об'єкт, що моделюється або для приблизної оцінки поведінки математичних систем, які досить складні для аналітичного дослідження. Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення складних систем. Комп'ютерні моделі простіші та їх зручніше досліджувати в силу можливості проводити обчислювальні експерименти в тих випадках, коли реальні експерименти немає можливості проводити через фінансові труднощі або фізичні перешкоди. Для підтримки математичного моделювання розроблені системи комп'ютерної математики, наприклад, Maple, Mathematica, Mathcad, MATLAB, Scilab, VisSim та інші. В даній роботі використовується програма Xcos пакету Scilab.

2.2 Структурно-логічна схема

Методологія – це система базисних принципів, методів, методик, способів і засобів їх реалізації в організації та побудові науково-практичної діяльності. Вона включає в себе методи теоретичного та емпіричного пізнання і являє собою алгоритм пошуку і досягнення мети.

Основне призначення методики дослідження полягає у тому, щоб на основі відповідних принципів (вимог, умов, обмежень тощо) забезпечити успішне вирішення визначених мети і завдань наукового дослідження.

Алгоритм магістерського дослідження представлений структурно-логічною схемою у вигляді табличної інформаційної моделі (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Структурно-логічна схема магістерського дослідження

Дослідження ефективності регульованого електропривода насосної установки водопостачання	
Складання індивідуального календарного плану роботи	
Пошук літератури за темою, її аналіз, складання бібліографії	
Підготовка теоретичної частини	Дослідження типів насосних установок водопостачання та водовідведення, складу обладнання та режимів роботи насосної установки
	Аналіз систем керування насосних установок
	Опис насосної станції 3 NKVE 15/8 T
	Побудова функціональної схеми частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та обґрунтування вибору її елементів
	Побудова динамічної моделі частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та розрахунок параметрів її елементів
Опис процесу дослідження	Моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки в Scilab
	Дослідження впливу параметрів регулятора напору асинхронного електропривода насосної установки водопостачання на якість керування
	Оцінка ефективності регульованого електропривода насосної установки
Узагальнення результатів моделювання	Аналіз і узагальнення результатів досліджень
	Інтерпретація отриманих результатів дослідження
	Формулювання висновків
Узагальнення науково-теоретичних результатів	
Розробка заходів з охорони праці, охорони навколишнього середовища	

Дана схема складена на підставі головних завдань магістерського дослідження і наочно відображає його послідовність: мотивацію; формулювання проблеми дослідження; пошук теоретичної основи розв'язання проблеми; розв'язання проблеми. Вона показує процедуру (алгоритм) дослідження і установлює логічну послідовність виконання структурних розділів і підрозділів магістерської роботи.

Спочатку вибирається тема дослідження та обґрунтовується її актуальність, далі виконується вибір літератури за темою. Підготовка теоретичної частини роботи містить дослідження типів насосних установок водопостачання та водовідведення, складу обладнання та режимів роботи насосної установки. Проводиться аналіз систем керування насосних установок. Здійснюється побудова функціональної схеми частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та обґрунтовується вибір її елементів. На базі функціональної схеми розробляється динамічна модель частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та виконується розрахунок параметрів її елементів. Потім проводиться моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки в Scilab. За допомогою програми Xcos досліджуються перехідні характеристики системи при зміні параметрів регулятора напору.

На підставі виконаних розрахунків та отриманих характеристик проводиться узагальнення отриманих теоретичних результатів.

2.3 Вибір методів розв'язання поставленої задачі

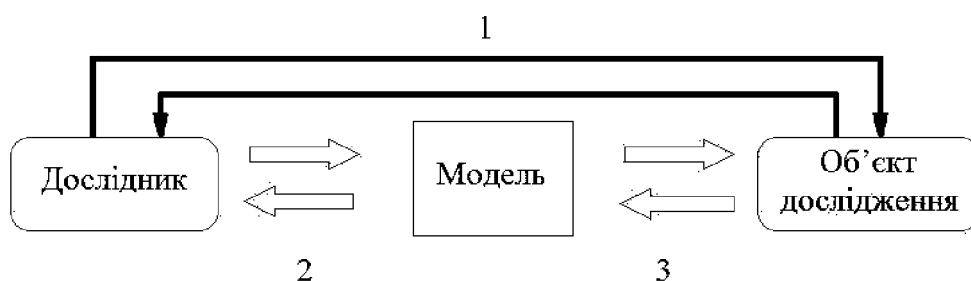
Дана робота не передбачає проведення експериментальних досліджень, має теоретичний характер, тому основним методом для відображення отриманих результатів є моделювання.

Моделювання як метод наукового пізнання виникло в зв'язку з необхідністю вирішення завдань, які з тих чи інших причин не можуть бути вирішені безпосередньо. Вони виникають у випадках, коли об'єкт або недосяжний для дослідника, або він ще не існує і потрібно обрати оптимальний варіант його створення, або дослі-

дження реального об'єкта вимагає багато часу та економічно не вигідне тощо. Таким чином, модель виконує функцію проміжної ланки між дослідником та об'єктом пізнання. Метод моделювання передбачає, що об'єкт вивчається не безпосередньо, а шляхом дослідження іншого об'єкта, який є аналогом першого (рисунок 2.1).

Модель (від лат. *modulus* – міра) – це певний умовний образ об'єкта дослідження, котрий замінює останній і перебуває з ним у такій відповідності, яка дозволяє отримати нове знання. Модель будується для того, щоб відобразити характеристики об'єкта (елементи, взаємозв'язки, структурні та функціональні властивості), суттєві з точки зору мети дослідження. Отже, моделювання пов'язане зі спрощенням, огрубленням прототипу, абстрагуванням від ряду його властивостей, ознак, сторін.

Характерною ознакою моделей можна вважати їх спрощеність стосовно оригіналу або реальної життєвої ситуації, яку моделюють. Спрощеність моделей є неминучою, тому що оригінал лише в обмеженій кількості відношень відображується в моделі.



1 – первинна інформація (інформаційні потоки) про об'єкт дослідження;

2 – інформаційні потоки, що виникають в процесі пізнання моделі;

3 – інформаційна взаємодія між моделлю та об'єктом дослідження

Рисунок 2.1 – Схема взаємозв'язків між дослідником та об'єктом дослідження при використанні методу моделювання

Отже, моделювання з точки зору наукового дослідження – це метод опосередкованого пізнання за допомогою штучних або природних систем, які зберігають

певні особливості об'єкта і, таким чином, заміщуючи його, дають змогу отримати нове знання про оригінал.

У системному аналізі моделі є дуже важливим компонентом дослідження та проектування нових систем. Не менш важливий і прагматичний аспект моделювання, при якому модель розглядається як засіб керування системою.

Модель є цільовим відображенням об'єкта-оригінала, що виявляється у множинності моделей одного й того ж об'єкта, тобто для різної мети або завдань дослідження можна будувати різні моделі, тому мета або завдання дослідження визначають, які саме ознаки системи мають бути відображені в моделі. Процес дослідження реальних систем, що охоплює побудову моделі, дослідження її властивостей і перенесення одержаних відомостей на реальну систему, називають моделюванням.

Основна функція моделі – це її використання як засобу пізнання. До конкретизованих (похідних від основної) функцій належать: засіб наукового осмислення дійсності, засіб спілкування, засіб навчання і тренування, інструмент прогнозування, засіб постановки та проведення експерименту.

Головними рівнями дослідження та моделювання систем є мікро- та макро-рівень. Мікрорівневе моделювання системи пов'язане з детальним описом кожного компонента системи, дослідженням її структури, функцій, взаємозв'язків, тощо.

Макрорівневе моделювання полягає в ігноруванні детальної структури системи та вивченні лише загальної поведінки системи як єдиного цілого.

Для детальнішого опису систем використовують моделі складу та моделі структури. Модель складу системи відображає, з яких елементів і підсистем складається система, а модель структури застосовується для відображення відношень між елементами та зв'язків між ними.

Модель структури описує суттєві зв'язки між елементами та підсистемами. При використанні графічних моделей будову систем подають у вигляді так званих структурних схем. Структурні схеми наглядні та містять інформацію про велику кількість властивостей системи.

Залежно від форми подання об'єкта моделювання поділяють на реальне та абстрактне.

При реальному моделюванні використовують можливість дослідження характеристик на реальному об'єкті чи на його частині, а при натурному – проводять дослідження на реальному об'єкті з подальшим обробленням результатів експерименту на основі теорії подібності.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, що відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні і функціональні властивості "оригіналу" і володіє великими можливостями по визначенню різних якостей електро-механічних систем та їх елементів.

Абстрактне моделювання має різні види: наочне, символічне, математичне. Метод математичного моделювання заснований на здатності математично описувати рівняннями різноманітні за природою явища (процеси) і виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи.

При математичному моделюванні застосовують аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число чинників, завжди вимагають деяких припущень і спрощень, проте вони більш пристосовані для пошуку оптимальних рішень. Статистичні методи в порівнянні з математичними громіздкі і погано осяжні.

Дослідження математичної моделі дає змогу отримати характеристики реального об'єкта чи системи. Вигляд математичної моделі залежить як від природи системи, так і від завдань дослідження. Математична модель системи містить, як правило, опис множини можливих станів системи та закон переходу з одного стану в інший. Математичне моделювання охоплює імітаційне, інформаційне, структурне, ситуаційне тощо.

На етапі вибору математичної моделі встановлюються: лінійність і не лінійність об'єкта, процесу або системи, динамічність або статичність, стаціонарність або не стаціонарність, а також ступінь детермінованості досліджуваного об'єкта чи процесу. При математичному моделюванні свідомо відволікаються від конкретної

фізичної природи об'єктів, процесів або систем і, в основному, зосереджуються на вивченні кількісних залежностей між величинами, що описують ці процеси.

Розрахунок задач магістерського дослідження проводиться за допомогою електронної обчислювальної техніки за допомогою програми Scilab. На базі складених диференціальних рівнянь проводиться математичне моделювання системи керування електропривода. За допомогою програми Xcos досліджуються перехідні характеристики системи при зміні задавальних параметрів.

Слід зазначити, що метод моделювання – вивчення явищ за допомогою моделей – сьогодні має особливе значення для вирішення складних фізичних завдань, чому значною мірою сприяє зростанню продуктивності комп'ютерної техніки. Саме тому в цьому магістерському дослідженні як основа використаний метод моделювання.

2.4 Висновки до розділу 2

2.4.1 Вибрано та обґрунтовано метод наукового дослідження.

2.4.2 Побудовано структурно-логічну схему магістерського дослідження.

2.4.3 Обґрунтовано вибір методу розрахунку задачі і показано, що метод математичного моделювання дозволяє досліджувати перехідні режими в електроприводі насосної установки водопостачання.

3 АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Функціональна схема частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки

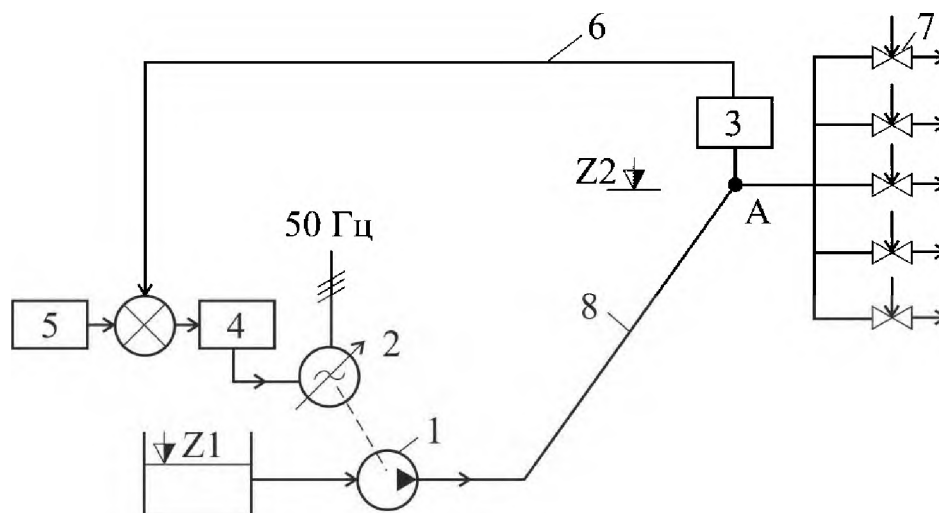
3.1.1 Побудова функціональної схеми автоматизованого електропривода насосного агрегату

Щоб насосна установка працювала без перевищення напору при будь-якому водоспоживанні, необхідно оснастити її відповідною системою автоматизованого керування, що має в своєму складі регульований електропривод. Це завдання вирішується системою автоматичного керування насосної установки, стабілізуючою напір в мережі по заданому значенню. Така система складається з насосного агрегату, укомплектованого регульованим електроприводом, датчика тиску, регулятора тиску, задавального пристрою і каналів зв'язку між перетворювачем і регулятором (рисунок 3.1). Задавальний пристрій (задатчик значення регульованого параметра) визначає необхідне значення напору в диктувальній точці (точка А) водопровідної мережі.

Для нормального водопостачання споживачів в диктувальній точці А повинен підтримуватися так званий вільний напір H_v . Точка А розташована на позначці Z2 вище рівня води в резервуарі. Втрати напорів в водоводі залежать від значень витрати в другій степені. Отже, насосу, щоб підняти воду з позначки Z1 на позначку Z2, подолати гідравлічний опір і забезпечити заданий вільний напір, необхідно розвинути напір води

$$H=(Z2 - Z1)+H_v+SQ^2.$$

Сигнали від датчика тиску, встановленого в диктувальній точці мережі, і від задавального пристрою надходять до ПД-регулятора, де вони порівнюються між собою, відповідним чином обробляються і потім передаються в систему керування електропривода насосного агрегату [7].



- 1 – відцентровий насос; 2 – регульований електропривод; 3 – датчик тиску;
 4 – регулятор тиску; 5 – задавальний пристрій; 6 – канал зв'язку;
 7 – водорозподільні пристрої; 8 – водовід

Рисунок 3.1 – Принципова схема стабілізації напору в диктувальній точці А водопровідної мережі

На рисунку 3.2 наведено функціональну схему системи частотного керування насосного агрегату. На схемі введені такі позначення: Н – насос; АД – асинхронний двигун; ПЧ – перетворювач частоти; ФП – функціональний перетворювач; ФС – функціональний перетворювач струму; РТ, ДТ – регулятор та датчик тиску відповідно.

На схемі сигнали i_{sa} і i_{sc} пропорційні миттєвим значенням струмів фаз А і С обмоток статора, з виходу датчиків ДТ_а і ДТ_с надходять в функціональний перетворювач струму, де формуються вихідні сигнали I_1 і I_{1a} , пропорційні відповідно діючому значенню струму статора та активній складовій цього струму. У вузлах Σ_1 та Σ_2 підсумовуються сигнали керування і зворотних зв'язків, що надходять з функціональних пристроїв А1 і А3. Пристрій А4 забезпечує проходження сигналу I_1 на вихід А3 лише при його перевищенні на суматорі Σ_3 сигналу I_{1max} , пропорційного діючим значенням максимально допустимого струму статора АД.

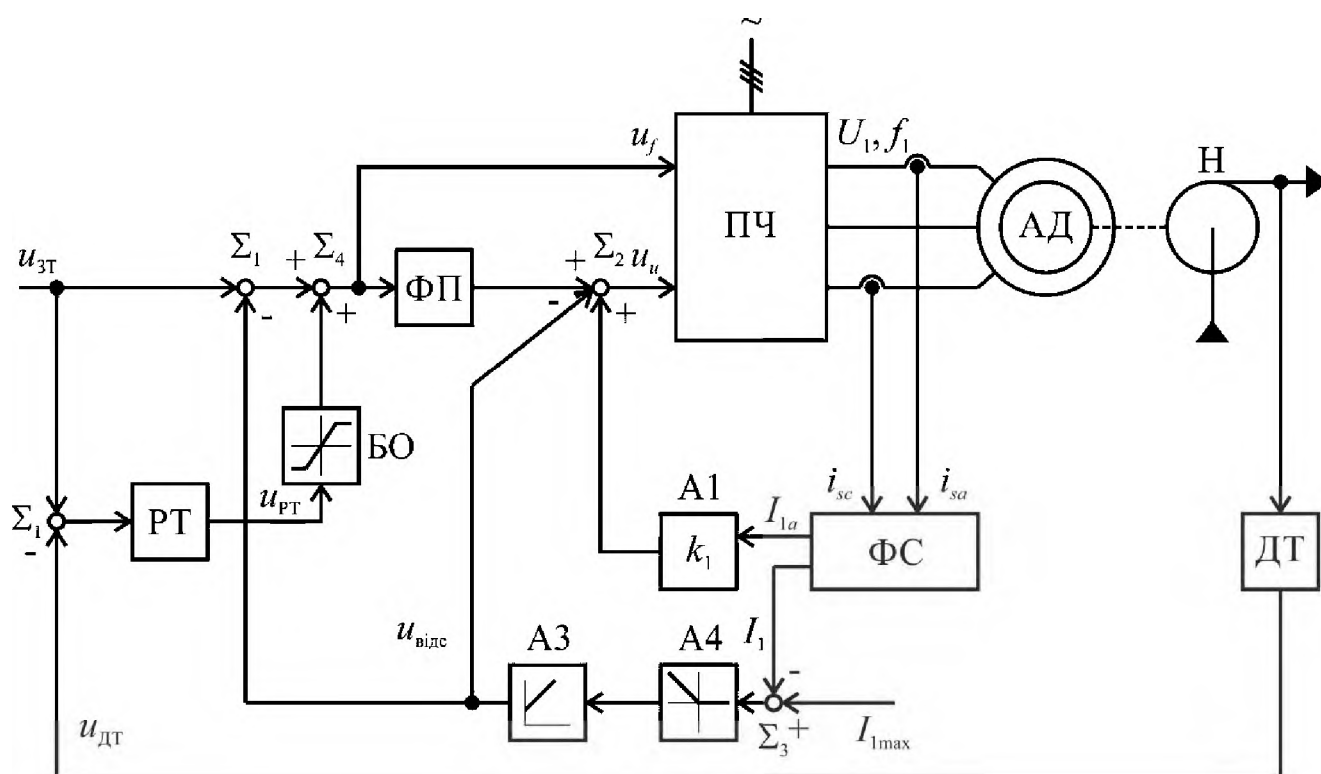


Рисунок 3.2 – Функціональна схема автоматизованого електропривода насосного агрегату

Призначення кожного з контурів зворотних зв'язків та їх вплив на властивість електропривода доцільно розглянути окремо. Так, при дії лише позитивного зворотного зв'язку за струмом з боку А1 по мірі збільшення моменту статичного навантаження АД і відповідного збільшення струму статора на вхід суматора Σ_2 надходить додатковий сигнал u_i , що збільшує сигнал u_u . Отже, в міру збільшення струму статора збільшується і вихідна напруга ПЧ. При цьому його вихідна частота, яка визначається сигналом u_f , залишається постійною, підвищення напруги на обмотках статора АД сприяє компенсації падіння напруги на повному їх опорі і, в результаті, збільшенню потоку намагнічування АД.

Ступінь компенсації визначається коефіцієнтом посилення k_1 ланцюга позитивного зворотного зв'язку за струмом. Очевидно, чим більше k_1 , тим більше буде потік при цьому ж абсолютному ковзанні. Межа збільшення k_1 визначається умовами стійкості замкненої системи керування та допустимими значеннями потоку намагнічування і напруги живлення АД.

У міру зниження частоти напруги живлення повний опір ланцюга намагнічування а, отже, падіння напруги в статорі АД зменшуються. Тому для стабілізації і обмеження потоку намагнічування в замкненій за повним струмом системи ступінь компенсації падіння напруги, тобто коефіцієнт k_1 , треба зменшувати в бік зниження частоти вихідної напруги ПЧ.

Для захисту перетворювача частоти і двигуна від перевантажень за струмом використовується режим струмового відсічення за допомогою суматора Σ_3 . Вихідний сигнал АЗ $u_{\text{відс}}$ може впливати як на зменшення вихідної напруги ПЧ (вузол Σ_2), так і одночасно на зменшення частоти живлення АД (вузол Σ_1).

Канал від'ємного зворотного зв'язку за тиском містить у собі датчик тиску, вузол Σ_5 підсумовування напруг керування тиском (швидкістю АД) $u_{\text{ЗТ}}$ й зворотного від'ємного зв'язку за тиском $u_{\text{ДТ}}$, регулятор тиску РТ, блок БО обмеження його вихідної напруги $u_{\text{РТ}}$, а також вузол Σ_4 підсумовування напруги $u_{\text{РТ}}$ і результуючої напруги з виходу суматора Σ_1 .

У міру збільшення навантаження на валу АД за рахунок зменшення швидкості АД й, отже, сигналу $u_{\text{РТ}}$ збільшується сигнал неузгодженості $\square = u_{\text{ЗТ}} - u_{\text{ДТ}} \equiv p_0 - p$. Тут p_0 – заданий тиск, що відповідає вихідному сигналу керування $u_{\text{ЗТ}}$; p – дійсний тиск. При $\square \neq 0$ сигнал $u_{\text{РТ}}$ на виході регулятора тиску, підсумовуючись із сигналом $u_{\text{ЗТ}}$ (при $I_1 < I_{1\text{max}}$), за рахунок інтегральної передавальної функції РТ забезпечує збільшення сигналу керування u_f перетворювачем частоти. Одночасно із зміною частоти за рахунок функціонального перетворювача струму ФП змінюється у порівнянні з початковою напругою U_{10} і вихідна напруга перетворювача U_1 . При цьому тиск в системі відновлюється до заданого значення p_0 , тобто забезпечується сталість тиску.

3.1.2 Основні елементи системи частотного керування

3.1.2.1 Привод багатоступінчастих відцентрових насосів типу NKVE MCE

здійснюється від трифазних короткозамкнених асинхронних електродвигунів MDEMA XX 132-2 2. Форма виконання IM 3001 (B5), ступінь захисту IP54. Всі мотори забезпечені датчиками температури, які використовуються для моніторингу температури обмоток і відповідають температурному класу F.

Технічні характеристики електродвигуна наведено в таблиці 3.1 [8].

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики електродвигуна MDEMA XX 132-2 2

Параметр	Значення
Номінальна потужність P_n , Вт	7500
Номінальна частота обертання n_n , об/хв	1455
Номінальна напруга U_n , В	400
Частота мережі f_{1n} , Гц	50
Кількість пар полюсів p_n	2
Номінальний струм I_n , А	16,5
Кратність I_p/I_n	5,9
Номінальний момент M_n , Н□м	49,2
Пусковий момент M_p , Н□м	100
Критичний момент M_k , Н□м	150
Кратність M_p/M_n	2,033
Кратність M_k/M_n (□)	3,049
Активний опір статора R_1 , Ом	0,697393
Активний опір ротора R_2 , Ом	0,475044
Реактивний опір статора X_1 , Ом	0,906590
Реактивний опір ротора X_2 , Ом	1,251957
$\cos\varphi$	0,76
Коефіцієнт корисної дії:	
– $\eta_{100\%}$	0,88
– $\eta_{75\%}$	0,87
Момент інерції $J_{дв}$, кг□м ²	0,0336

3.1.2.2 Для електропривода насосного агрегату використано перетворювач частоти МСЕ/Р – це новітня розробка в сімействі перетворювачів частоти DAB, оптимальна для професійного застосування і важких умов експлуатації. Призна-

чені для роботи з насосами до 15 кВт. Даний тип перетворювачів частоти об'єднує в собі зручність і надійність конструкції. Зовнішній вигляд перетворювача частоти МСЕ/Р представлено на рисунку 3.3.



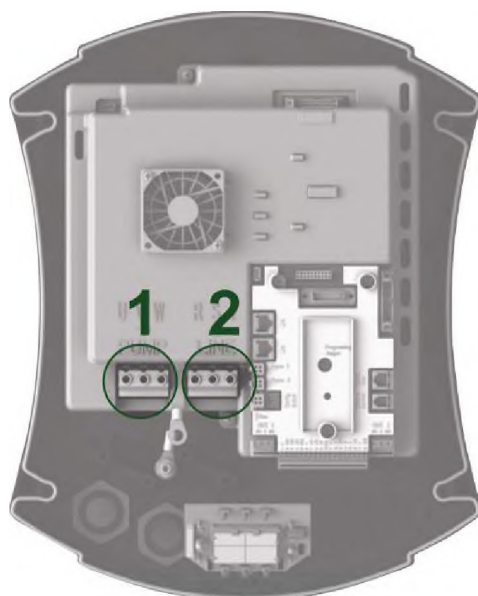
Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд перетворювача частоти МСЕ/Р

Перетворювачі МСЕ/Р монтуються на кришці електродвигуна і комплектуються датчиками тиску, а також датчиками витрати при необхідності. Використання датчика витрати покращує регулювання тиску в системі.

МСЕ/Р повинен міцно приєднуватися до двигуна за допомогою спеціальних систем кріплення. Комплект для кріплення слід вибирати відповідно до двигуна, до якого він повинен приєднуватися. Існують 2 способи механічного кріплення інвертора до двигуна:

- кріплення тягами;
- кріплення гвинтами.

МСЕ/Р можна легко встановити в системах підвищення тиску завдяки стандартному кабельному з'єднанню. З'єднання між інвертором і електронасосом та між трифазною лінією живлення і перетворювачем здійснюється за допомогою чотирижильного кабелю (3 фази + заземлення). Вихідні клеми помічені надписами UVW PUMP (рисунок 3.4, поз. 1), вхідні клеми – надписами RST LINE (рисунок 3.4, поз. 2).



1 – вихідні клеми для підключення електронасоса;

2 – клеми підключення живлення перетворювача частоти

Рисунок 3.4 – Підключення силової частини перетворювача частоти MCE110/P

Технічні характеристики перетворювача MCE110/P наведено в таблиці 3.2 [9].

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики перетворювача MCE110/P

Параметр	Значення
Потужність, Вт	11000
Живлення інвертора:	
– напруга мережі U_m , В	3×400
– частота мережі, Гц	50
– струм, А	32,5-26,0
Вихід інвертора:	
– напруга, В	0- U_m
– частота, Гц	0-200
– струм, А	24,0

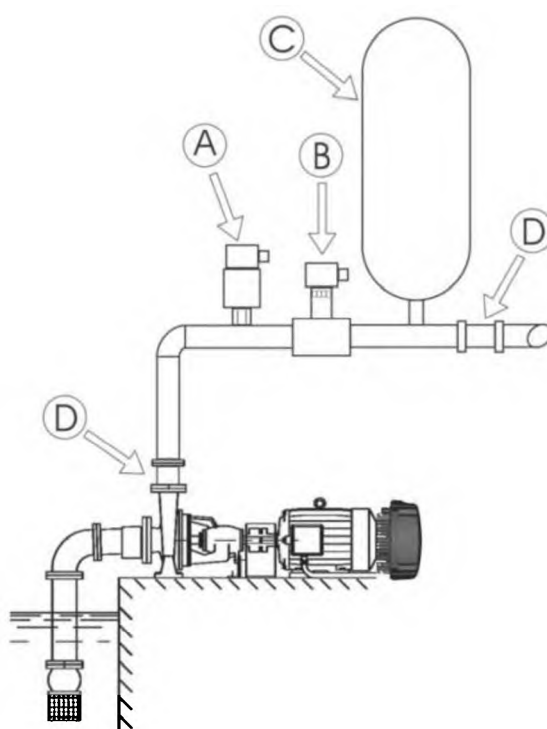
Продовження таблиці 3.2

Параметр	Значення
Вид захисту	IP55
Температура навколишнього середовища, град	-20...+ 40 °С
Гідравлічні характеристики регулювання та роботи: – діапазон регулювання тиску – опція	1-95 % діапазону шкали датчику тиску датчик витрати
Датчик тиску: – тип датчика – шкала, МПа	ратіометричний, 4-20 мА 1,6; 2,5; 4,0
Функції та захист: – функції	– U/F-керування (лінійне, квадратичне); – послідовний інтерфейс; – з'єднання мульти-інверторів; – ПД-регулятор
– захист	– хід без води; – амперометричний на вихідних фазах; – перегрів внутрішньої електроніки; – аномальна напруга живлення; – пряме коротке замикання між вихідними фазами; – несправність датчика тиску

3.1.2.3 Перетворювач частоти з'єднується з гідравлічною частиною за допомогою датчиків тиску і витрати. Датчик тиску входить до комплекту поставки за замовчуванням, датчик витрати є опцією. Обидва датчика встановлюються на по-

дачу насоса (рисунок 3.5) і з'єднуються за допомогою кабелів з відповідними входами на платі перетворювача (рисунок 3.6).

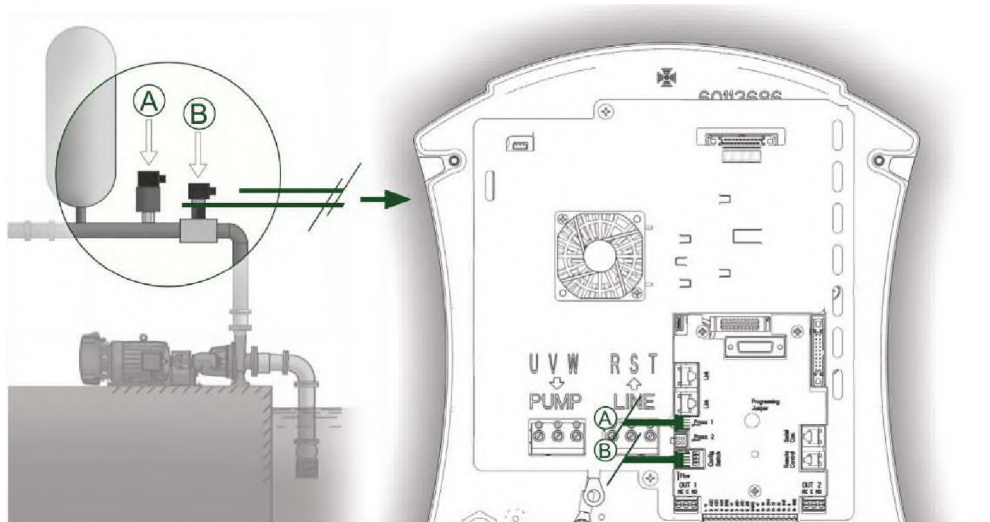
На трубі всмоктування електронасоса встановлюється зворотній клапан, на подачі – гідропневматичний бак. На всіх установках, на яких існує небезпека виникнення гідравлічного удару рекомендується встановлювати додатковий зворотній клапан після насоса і монтувати датчики і гідропневматичний бак між насосом і клапаном. Гідравлічне з'єднання між електронасосом і датчиками не повинно мати відгалужень.



A – датчик тиску; B – датчик витрати; C – гідропневматичний бак;

D – зворотній клапан

Рисунок 3.5 – Схема гідравлічної частини



А – датчик тиску; В – датчик витрати

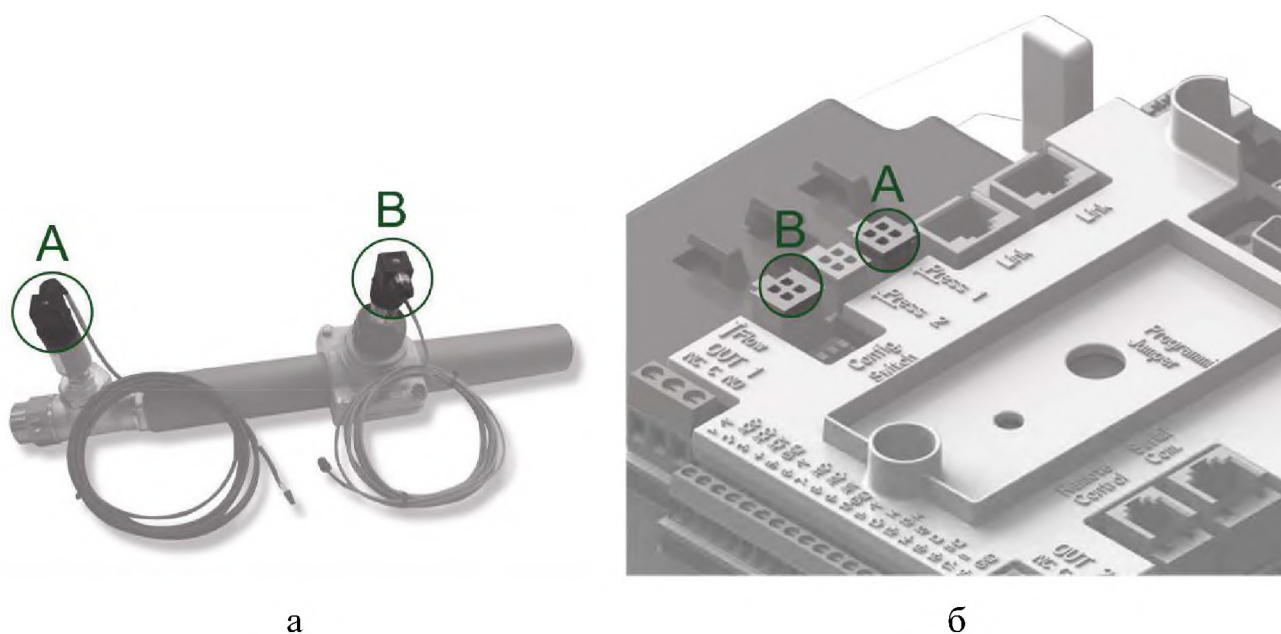
Рисунок 3.6 – Схема підключення датчиків до перетворювача частоти MCE110/P

Перетворювач MCE110/P працює з двома типами датчиків тиску:

- ратіометричний;
- 4-20 мА.

Датчик тиску поставляється разом з власним кабелем (рисунок 3.7, а). Кабель датчика і вхід на платі перетворювача змінюються в залежності від використовуваного типу датчика (рисунок 3.7, б). За замовчуванням поставляється датчик ратіометричного типу.

Кабель повинен з'єднуватися з одного боку з датчиком і з іншого боку від'єднуватися до спеціального входу датчика тиску перетворювача, позначеного написом «Press 1» (див. рисунок 3.7, б). Кабель має два різних закінчення, з обов'язковим спрямуванням входів: з'єднувач для промислових застосувань (DIN 43650) з боку датчика і 4-х полюсний з'єднувач з боку перетворювача.



А – датчик тиску; В – датчик витрати

Рисунок 3.7 – Комплект поставки датчиків (а) та входи для датчиків на платі (б) перетворювача частоти MCE110/P

3.1.2.4 Побудова механічних характеристик електродвигуна [10]

Сімейство механічних характеристик являють собою залежності кутової частоти обертання ротора електродвигуна в функції моменту навантаження при різних частотах. Тому процес дослідження і проектування систем електроприводів з частотним керування повинен супроводжуватися побудовою механічних характеристик.

Як відомо, частотне скалярне керування швидкості асинхронного електропривода здійснюється шляхом зміни частоти і модуля напруги, що подається на статор електродвигуна. Співвідношення між величиною напруги і частотою визначається вимогами, що пред'являються до статичного і динамічного режимів роботи робочого механізму. У системах скалярного частотного керування досить поширеними є загальнопромислові установки, що вимагають різного керування електроприводом: з постійним моментом, постійною потужністю або з урахуванням особливостей вентиляторного навантаження.

Розрахунок та побудову механічних характеристик електродвигуна при частотному регулюванні його швидкості обертання з урахуванням особливостей вен-

тиляторного навантаження, що характерно для приводів насосного обладнання, виконаємо за допомогою Scilab. Програму (script-файл) приведено в додатку А.

При складанні програми у вікно ссе-файлу послідовно заносяться такі номінальні дані асинхронного електродвигуна, як фазна напруга U_{sn} та частота f_{sn} статора; кількість пар полюсів p ; активні опори R_s , R_r і індуктивні опори розсіювання x_s , x_r фаз статора і ротора.

У відносних одиницях задається діапазон і крок варіювання ковзання $s=[0.001: 0.005: 1]$, що визначає межі зміни ковзання від 0,001 до 1. Після цього у вікно програми вносяться блоки команд для обчислення конкретних механічних характеристик, що задаються відносною величиною вихідної частоти $f=f_s/f_{sn}$ і напруги $h=U_s/U_{sn}$ перетворювача. Так, зокрема, за рівності $f=1$ і $h=1$ розрахунок $\omega=f(M)$ ведеться для напруги живлення $U_s=U_{sn}$ і частоти, що дорівнює $f_s=f_{sn}$, а при $h=0,04$ і $f=0,2$ – відповідно для $U_s=0,04 \cdot U_{sn}$ і $f=0,2 \cdot f_{sn}$.

Кожен розрахунковий блок містить вираз для кутової швидкості обертання ротора ω і формулу електромагнітного моменту M

$$\omega = \omega_{sn}(1 - s), \quad (3.1)$$

$$\text{де } \omega_{sn} = \frac{2\pi f_{sn}}{p}.$$

$$M = \frac{3h^2 U_{sn}^2 R'_r s}{f \omega_{sn} ((R_s s + R'_r)^2 + (h(x_s + x'_r)s)^2)}. \quad (3.2)$$

Відповідно до формул (3.1) та (3.2) вирази розрахункових блоків ссе-файлу мають вигляд

$$[w1]=wsn*f*(1-s);$$

$$[M1]=3*h.^2*Usn.^2*Rr*s./(((Rs*s+Rr).^2+s.^2*h.^2*(xs+xr).^2)*wsn*f).$$

Конкретна функціональна залежність $h=f(f)$ для побудови характеристик визначається з урахуванням особливостей вентиляторного навантаження, тобто $\frac{h}{f^2} = 1$.

Виведення результатів розрахунку на екран здійснюється командою plot.

Результати побудови механічних характеристик представлені на рисунку 3.8.

Отримані графіки дають можливість оцінювати статичні показники якості регулювання швидкості при заданому законі керування і порівнювати отримані результати з параметрами навантажувального механізму.

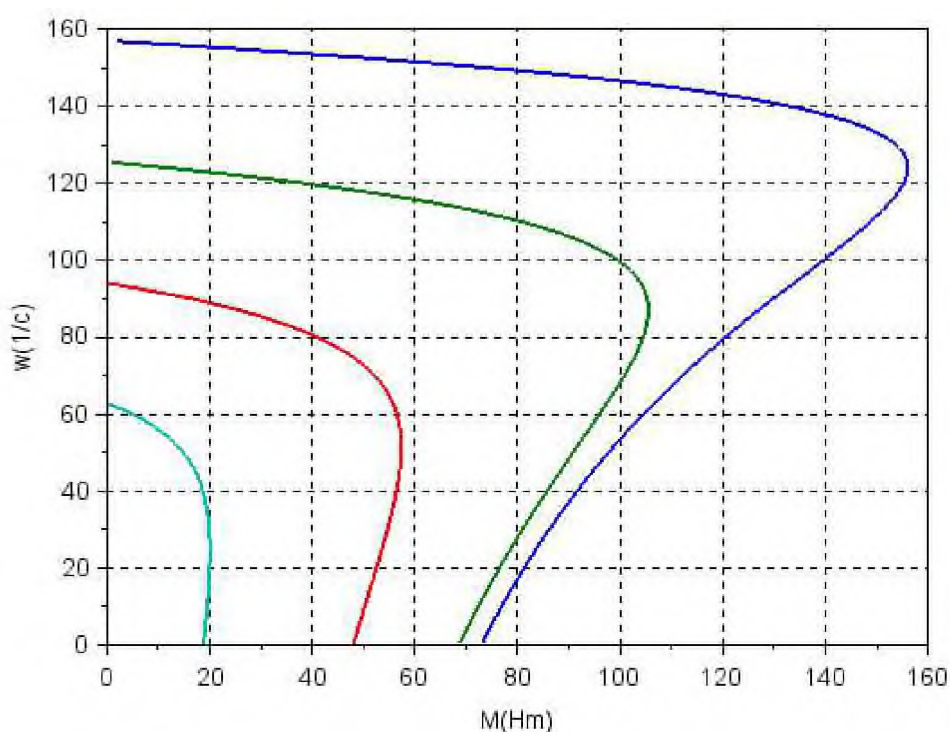


Рисунок 3.8 – Механічні характеристики електродвигуна

3.2 Побудова динамічної моделі частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки

Оскільки при стабілізації напору (тиску) система працює в малих відхиленнях щодо робочої точки стабілізації, можливе використання лінійної моделі асинхронного двигуна, яку наведено на рисунку 3.9 [11]. На схемі прийнято наступні позначення: $\omega_3(p)$, $\omega(p)$ – задана та дійсна кутові швидкості обертання валу асинх-

ронного двигуна, рад/с; $M(p)$, $M_o(p)$ – механічний момент двигуна і момент опору відповідно, Н·м.

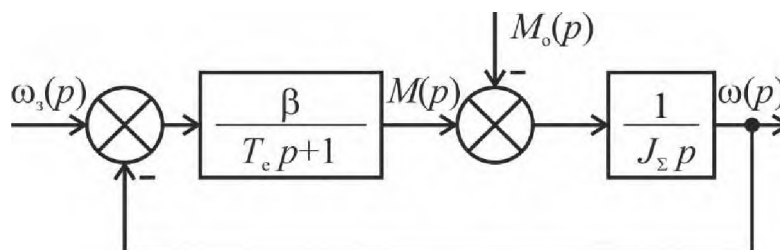


Рисунок 3.9 – Структурна схема лінеаризованої моделі асинхронного двигуна

Передавальна функція лінеаризованої моделі асинхронного двигуна $W_{\text{дв}}(p)$ буде мати вигляд

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{\frac{\beta}{J_{\Sigma}p(T_e p + 1)}}{1 + \frac{\beta}{J_{\Sigma}p(T_e p + 1)}} = \frac{\beta}{J_{\Sigma}T_e p^2 + J_{\Sigma}p + \beta} = \frac{1}{T_m T_e p^2 + T_m p + 1}, \quad (3.3)$$

де β – модуль статичної жорсткості (жорсткість лінійної ділянки механічної характеристики асинхронного двигуна), Н·м·с;

J_{Σ} – сумарний момент інерції, який приведено до валу двигуна, кг·м²

T_e – електромагнітна стала часу, с;

T_m – електромеханічна стала часу, с.

Модуль статичної жорсткості β , Н·м·с,

$$\beta = \frac{2M_K}{\omega_0 s_K}, \quad (3.4)$$

де ω_0 – кутова швидкість холостого ходу асинхронного двигуна, рад/с;

s_K – критичне ковзання.

Швидкість холостого ходу ω_0 , рад/с,

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_{\text{лн}}}{p_{\text{п}}},$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157,08 \text{ рад/с.}$$

Критичне ковзання s_k

$$s_k = s_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}), \quad (3.5)$$

де s_H – номінальне ковзання двигуна.

Номінальне ковзання двигуна s_H розраховуємо за формулою

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}, \quad (3.6)$$

де ω_H – номінальна кутова швидкість асинхронного двигуна, рад/с.

Номінальна кутова швидкість ω_H , рад/с,

$$\omega_H = \frac{2\pi n_H}{60},$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 145}{60} = 152,367 \text{ рад/с.}$$

Розраховуємо за формулою (3.6) номінальне ковзання двигуна s_H

$$s_H = \frac{157,08 - 152,367}{157,08} = 0,03.$$

За формулою (3.5) знаходимо s_k

$$s_k = 0,03 \cdot (3,049 + \sqrt{3,049^2 - 1}) = 0,178.$$

Отже знаходимо за формулою (3.4) модуль статичної жорсткості β

$$\beta = \frac{2 \cdot 150}{157,08 \cdot 0,178} = 10,738 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с.}$$

Електромагнітна стала часу T_e , с,

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0ел} S_K},$$

де $\omega_{0ел}$ – кутова швидкість електромагнітного поля АД при його номінальній частоті напруги живлення $f_{1н}=50$ Гц, $\omega_{0ел}=314$ рад/с;

Отже знаходимо електромагнітну сталу часу T_e

$$T_e = \frac{1}{314 \cdot 0,178} = 0,018 \text{ с.}$$

Електромеханічна стала часу T_m , с,

$$T_m = \frac{J_\Sigma}{\beta}, \quad (3.7)$$

де J_Σ – сумарний момент інерції, кг·м².

Сумарний момент інерції J_Σ , кг·м²

$$J_\Sigma = J_{дв} + J_{нас},$$

де $J_{нас}$ – момент інерції насоса, $J_{нас}=0,08$ кг·м².

$$J_\Sigma = 0,0336 + 0,08 = 0,114 \text{ кг·м}^2.$$

За формулою (3.7) знаходимо T_m

$$T_m = \frac{0,114}{10,738} = 0,011 \text{ с.}$$

На основі результатів розрахунків параметрів асинхронного двигуна, передавальна функція двигуна (3.3) буде мати вигляд

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{1}{0,00019p^2 + 0,011p + 1}. \quad (3.8)$$

Навантаження відцентрових і осьових насосів, вентиляторів та інших механізмів вентиляторного типу називається вентиляторним навантаженням. Статичний момент в подібних механізмах залежить від швидкості обертання робочого колеса в другій степені, тому в даній роботі момент опору двигуна приймаємо

$$M_o(p) = k_n \omega^2(p),$$

де k_n – коефіцієнт навантаження, $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$.

Коефіцієнт навантаження k_n , $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, розраховуємо за формулою

$$k_n = \frac{M_n}{\omega_n^2},$$

$$k_n = \frac{49,2}{152,367^2} = 0,00212 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2.$$

Як відомо, перетворювач частоти являє собою нелінійний дискретний динамічний об'єкт з обмеженою керованістю. Однак можна говорити, що специфіка перетворювача, як нелінійного об'єкта суттєво не позначається на роботі системи. Частота зрізу контуру регулювання в якому він знаходиться, значно нижче частот, суттєвих для динаміки самого перетворювача, при цьому час перехідних процесів у системі помітно перевищує період дискретизації системи. Найчастіше, перетворювач частоти при розрахунках систем керування електроприводів представляють у вигляді аперіодичної ланки з передавальною функцією виду

$$W_{\text{ПЧ}}(p) = \frac{k_{\text{ПЧ}}}{T_{\text{ПЧ}}p + 1}, \quad (3.9)$$

де $k_{\text{ПЧ}}$ – коефіцієнт передачі перетворювача частоти, $1/\text{В} \cdot \text{с}$;

$T_{\text{ПЧ}}$ – стала часу перетворювача частоти, $T_{\text{ПЧ}}=0,01$ с.

Коефіцієнт передачі перетворювача частоти $k_{\text{ПЧ}}$, $1/\text{В} \cdot \text{с}$,

$$k_{\text{ПЧ}} = \frac{2\pi f_{1\text{H}}}{p_{\text{H}} U_{\text{РТ}}},$$

де $U_{\text{РТ}}$ – напруга на виході регулятора тиску, $U_{\text{РТ}}=10$ В.

$$k_{\text{ПЧ}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2 \cdot 10} = 15,708 \text{ } 1/\text{В} \cdot \text{с}.$$

Звідси передавальна функція перетворювача частоти (3.9) буде мати вигляд

$$W_{\text{ПЧ}}(p) = \frac{15,708}{0,01p+1}. \quad (3.10)$$

Насос являє собою інерційну ланку, яка може бути представлена передавальною функцією

$$W_{\text{нас}}(p) = \frac{k_{\text{нас}}}{T_{\text{нас}}p+1}, \quad (3.11)$$

де $k_{\text{нас}}$ – коефіцієнт передачі насоса, $\text{м} \cdot \text{с}$;

$T_{\text{нас}}$ – стала часу насоса, $T_{\text{нас}}=0,001$ с.

Сталою часу $T_{\text{нас}}$ допустимо знехтувати при синтезі системи і вважати насос безінерційною ланкою з передавальною функцією

$$W_{\text{нас}}(p)=k_{\text{нас}}. \quad (3.12)$$

Структурна схема насоса буде мати вигляд, який зображено на рисунку 3.10.

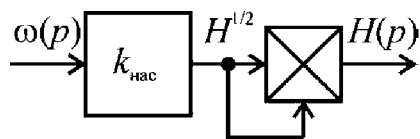


Рисунок 3.10 – Структурна схема насоса

Сталий коефіцієнт $k_{\text{нас}}$

$$k_{\text{нас}} = \sqrt{\frac{H_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}^2}}$$

де $H_{\text{н}}$ – номінальний напір насоса, $H_{\text{н}}=80$ м.

$$k_{\text{нас}} = \sqrt{\frac{80}{152,367^2}} = 0,059.$$

Коефіцієнт передачі датчика тиску $k_{\text{дт}}$, В/м,

$$k_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{дт}}}{H_{\text{н}}}. \quad (3.13)$$

Приймемо для подальших розрахунків $U_{\text{дт}}=U_{\text{зт}}=10$ В, тоді

$$k_{\text{дт}} = \frac{10}{80} = 0,125 \text{ В/м.}$$

На базі математичного опису елементів автоматизованого електропривода насосного агрегату складено структурну схему системи (рисунок 3.11).

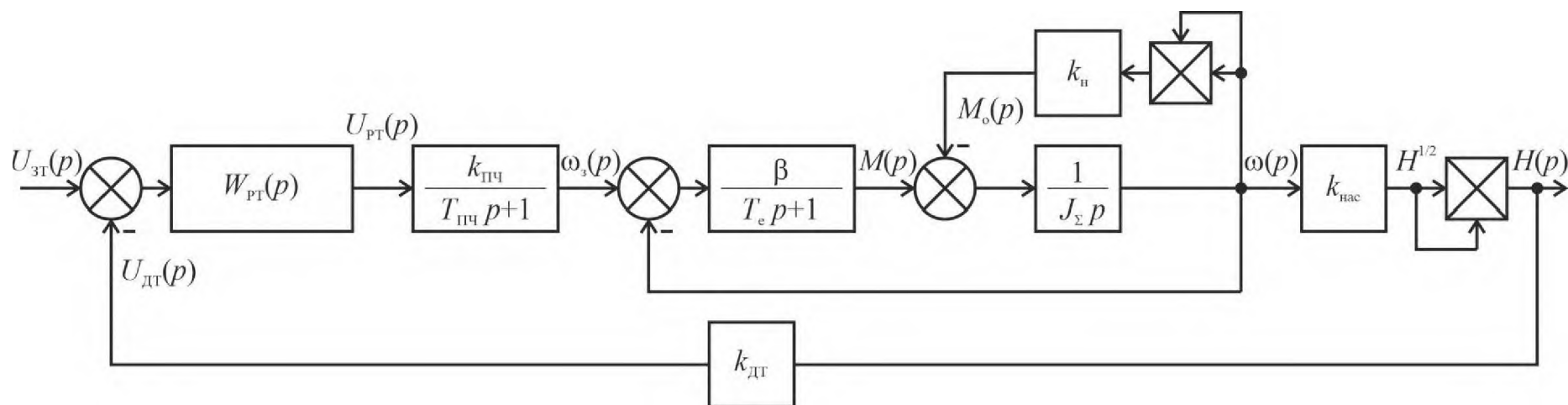


Рисунок 3.11 – Структурна схема автоматизованого електропривода насосного агрегату

Система на рисунку 3.11 являє собою одноконтурну систему керування, з одним зовнішнім контуром – контуром тиску. На рисунку прийняті наступні позначення: $U_{зт}(p)$ – напруга на виході задатчика тиску, В; $W_{рт}(p)$ – передавальна функція регулятора тиску; $U_{рт}(p)$ – напруга на виході регулятора тиску, В; $U_{дт}(p)$ – напруга на виході датчика тиску, В; $k_{дт}$ – коефіцієнт передачі датчика тиску (напору), В/м.

При оптимізації контурів регулювання систем керування електроприводів широке поширення набули два методи стандартного налаштування: оптимум по модулю і симетричний оптимум. В процесі синтезу регулятора надаються певні динамічні властивості, тобто здійснюється вибір його параметрів [12].

Передавальна функція скоригованої розімкненої системи

$$W_{роз}(p) = W_{рт}(p)W_{нч}(p),$$

де $W_{нч}(p)$ – передавальна функція незмінної частини системи.

$$W_{нч}(p) = W_{пч}(p)W_{дв}(p)W_{нас}(p)k_{дт} = \frac{k_{пч}k_{нас}H_{н}k_{дт}}{(T_{пч}p+1)(T_{м}T_{е}p^2+T_{м}p+1)}.$$

При налаштуванні на оптимум по модулю передавальна функція розімкненого контуру тиску буде мати вигляд

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

де T_{μ} – мала некомпенсована стала часу, $T_{\mu} = T_{пч} = 0,01$ с.

Тоді передавальна функція регулятора буде мати вигляд

$$W_{рт}(p) = \frac{W_{роз}(p)}{W_{нч}(p)},$$

$$W_{рт}(p) = \frac{\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}}{\frac{k_{пч}k_{нас}H_{н}k_{дт}}{(T_{пч}p+1)(T_{м}T_{е}p^2+T_{м}p+1)}} = \frac{(T_{пч}p+1)(T_{м}T_{е}p^2+T_{м}p+1)}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)k_{пч}k_{нас}H_{н}k_{дт}}.$$

Стала часу перетворювача частоти мала і становить 0,01 с, тому можна вважати, що $T_{\Gamma}=T_{\Pi\check{C}}$. Тоді передавальна функція регулятора буде мати вигляд

$$W_{PT}(p) = \frac{(T_M T_e p^2 + T_M p + 1)}{2T_{\mu} p k_{\Pi\check{C}} k_{\text{нас}} H_N k_{DT}}. \quad (3.14)$$

Очевидно, що передавальна функція (3.14) є передавальною функцією пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (ПІД-регулятора) з відповідними коефіцієнтами передачі пропорційної k_{Π} , інтегральної k_i і диференціальної k_d складових регулятора.

Коефіцієнт передачі пропорційної частини регулятора k_{Π}

$$k_{\Pi} = \frac{T_M}{2T_{\mu} k_{\Pi\check{C}} k_{\text{нас}} H_N k_{DT}},$$

$$k_{\Pi} = \frac{0,011}{2 \cdot 0,01 \cdot 15,708 \cdot 0,059 \cdot 80 \cdot 0,125} = 0,057.$$

Коефіцієнт передачі інтегральної частини регулятора k_i

$$k_i = \frac{1}{2T_{\mu} k_{\Pi\check{C}} k_{\text{нас}} H_N k_{DT}},$$

$$k_i = \frac{1}{2 \cdot 0,01 \cdot 15,708 \cdot 0,059 \cdot 80 \cdot 0,125} = 5,422.$$

Коефіцієнт передачі диференціальної частини регулятора k_d

$$k_d = \frac{T_M T_e}{2T_{\mu} k_{\Pi\check{C}} k_{\text{нас}} H_N k_{DT}},$$

$$k_d = \frac{0,011 \cdot 0,018}{2 \cdot 0,01 \cdot 15,708 \cdot 0,059 \cdot 80 \cdot 0,125} = 1,027 \cdot 10^{-3}.$$

Підставивши розраховані значення параметрів налаштування регулятора тиску в (3.14), отримаємо

$$W_{PT}(p)=0,057+\frac{5,422}{p}+0,001p.$$

3.3 Моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки

3.3.1 Побудова схеми моделювання

Для проведення досліджень було побудовано імітаційну модель системи в програмі Xcos пакету прикладних математичних програм Scilab [13, 14]. У відповідності зі структурною схемою системи (див. рисунок 3.11) складена модель для середовища Xcos. Схема моделювання представлена на рисунку 3.12. Модель складається зі стандартних блоків палітри інструментів Xcos. Всі параметри моделі системи стабілізації напору розраховано для обраного об'єкту керування в п. 3.2 та зведені в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Параметри елементів моделі автоматизованого електропривода

Коефіцієнт	$k_{ПЧ}$, 1/В·с	$T_{ПЧ}$, с	β , Н·м·с	T_e , с	J_{Σ} , кг·м ²	k_n , Н·м·с ²	$k_{нас}$	$k_{ДТ}$, В/м
Значення	15,708	0,01	10,738	0,018	0,114	$2,119 \times 10^{-3}$	0,059	0,125

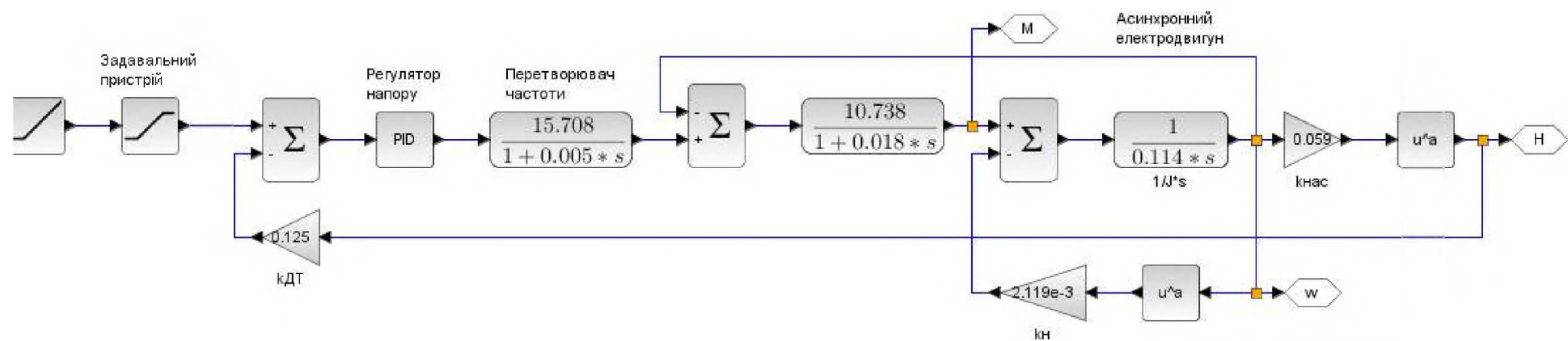


Рисунок 3.12 – Схема моделювання автоматизованого електропривода насосного агрегату

До складу моделі на рисунку 3.12 входять: задавальний пристрій (блоки Ramp та Saturation); суматор сигналів завдання за напором та зворотнього зв'язку за напором H (блок Summation); ПІД-регулятор напору (PID); перетворювач частоти, який реалізовано аперіодичною ланкою Clr; асинхронний електродвигун представлено в спрощеному вигляді, як аперіодична ланка другого порядку (Summation, блок моменту на аперіодичній ланці першого порядку Clr, суматор електромагнітного моменту двигуна та моменту статичного опору M_0 , створюваного насосом, блок швидкості двигуна на ланці Clr). Вихідна координата електропривода – кутова швидкість w .

Задавальний пристрій в розрахунковій схемі призначений для формування сигналу завдання тиску, що лінійно змінюється в часі з певним темпом. При різкій зміні завдання в системі відбувається форсування сигналу керування і, як наслідок, стрибки струму і моменту. Для того щоб уникнути цих неприємних явищ, використано задавальний пристрій.

Регулятор тиску представлений стандартним блоком PID з бібліотеки Xcos. Вікно налаштування параметрів блоку PID представлено на рисунку 3.13. Коефіцієнти Proportional, Integral та Derivative у вікні налаштування параметрів блоку відповідають коефіцієнтам передачі пропорційної k_p , інтегральної k_i і диференціальної k_d складових регулятора, які було розраховано в п. 3.2.

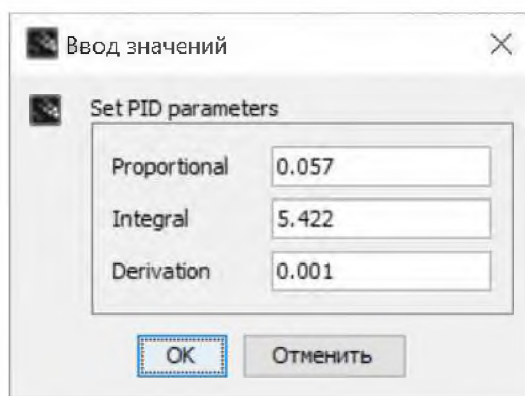


Рисунок 3.13 – Вікно налаштування параметрів блоку PID

В імітаційній моделі на рисунку 3.12 використано підхід, при якому спрощується процес дослідження, оскільки не враховано зміну витрати (подачі) в системі. А саме напір та витрата є координатами насоса, які визначають фактичний режим роботи насосної установки. Крім того, прийнято, що момент опору збільшується за нелінійним законом із збільшенням кутової частоти, тобто $M_o(\omega) = k_{\text{нас}} \cdot \omega^2$.

Для оцінки впливу робочих параметрів насосної установки на динаміку частотно-регульованого електропривода розглянемо модель насосного агрегату, в якій умовно можна виділити електромеханічну та механічну частини. До електромеханічної частини відносять регульований електропривод, а до механічної – мережевий насос [15].

Модель електромеханічної частини представлено на рисунку 3.14.

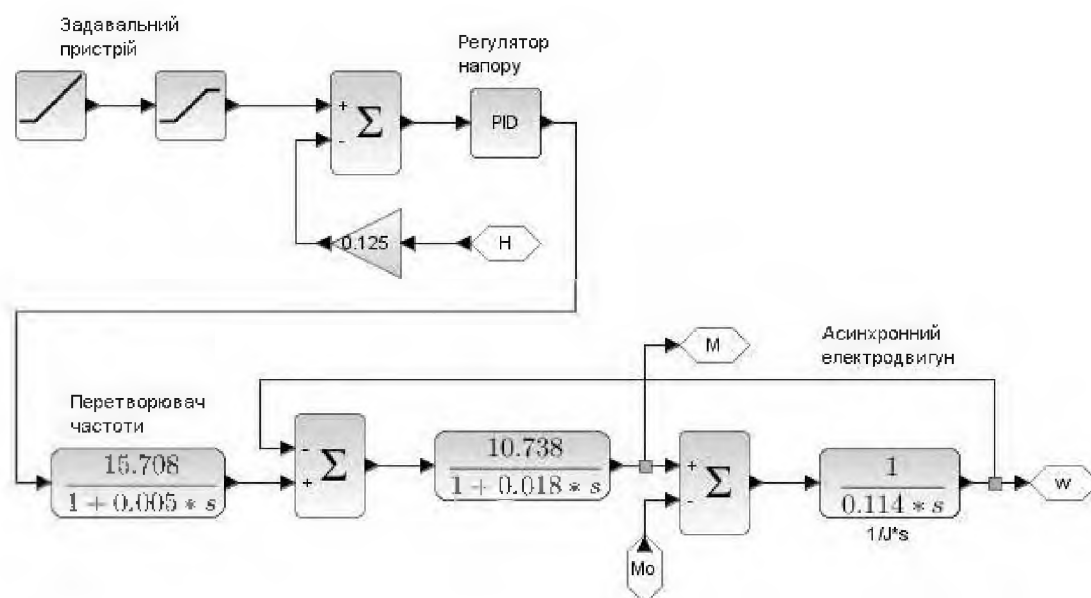


Рисунок 3.14 – Модель електромеханічної частини насосного агрегату

Для побудови моделі насоса в програмі Xcos складено схеми, які реалізують функціональні залежності робочих параметрів мережевого насоса: $Q=f(\omega)$, $H=f(\omega)$ та $M_o=f(\omega)$.

В роботі [16] наведено залежності для обчислення витрати, напору та статичного моменту насоса. Так залежність витрати насоса від його кутової швидкості $Q=f(\omega)$ має вигляд

$$Q=Q_n \cdot \sqrt{\frac{H_\phi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - H_c}{H_\phi - H_c}}, \quad (3.15)$$

де Q_n , ω_n – номінальні витрата та кутова швидкість насоса; H_ϕ – фіктивне значення напору при нульовій витраті (визначається за напірною характеристикою насоса); ω – поточне значення кутової швидкості насоса; H_c – статичний напір насоса.

Статичний напір насоса змінюється у відповідності до виразу

$$H_c = \frac{H - H_n \cdot \left(\frac{Q_{\text{випр}}}{Q_n}\right)^2}{1 - \left(\frac{Q_{\text{випр}}}{Q_n}\right)^2}, \quad (3.16)$$

де H – напір, що створюється насосом; H_n – номінальний напір насоса; $Q_{\text{випр}}$ – витрата рідини в гідросистемі.

Схему моделі насоса, яка реалізує функціональну залежність $Q=f(\omega)$ представлено на рисунку 3.15.

Залежність напору насоса від його кутової швидкості $H=f(\omega)$ визначається за формулою

$$H = H_c + \frac{(H_n - H_c) \cdot \left(H_\phi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - H_c\right)}{H_\phi - H_c}. \quad (3.17)$$

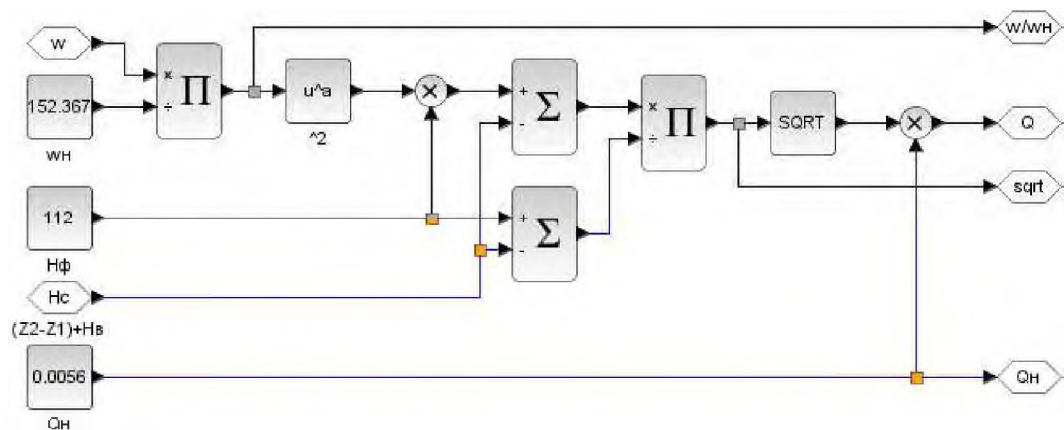


Рисунок 3.15 – Схема моделі за формулою (3.15)

Схему моделі насоса, яка реалізує функціональну залежність $H=f(\omega)$ представлено на рисунку 3.16.

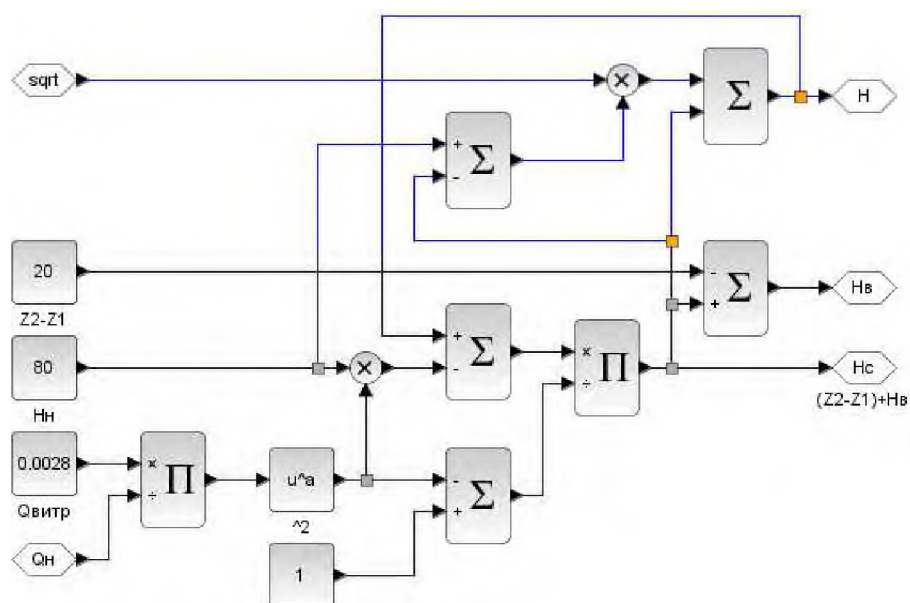


Рисунок 3.16 – Схема моделі за формулами (3.16) та (3.17)

Момент статичного опору, який створюється насосом $M_0=f(\omega)$

$$M_0 = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\omega \cdot \eta_{\text{нас}}}, \quad (3.18)$$

де ρ – щільність рідини, що перекачується; g – прискорення вільного падіння; $\eta_{\text{нас}}$ – ККД насоса.

ККД насоса в залежності від кутової швидкості насоса визначається за формулою

$$\eta_{\text{нас}} = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}}\right)^{0.36}}, \quad (3.19)$$

де $\eta_{\text{н}}$ – номінальний ККД насоса.

Схему моделі насоса, яка реалізує функціональну залежність $M_o = f(\omega)$ представлено на рисунку 3.17.

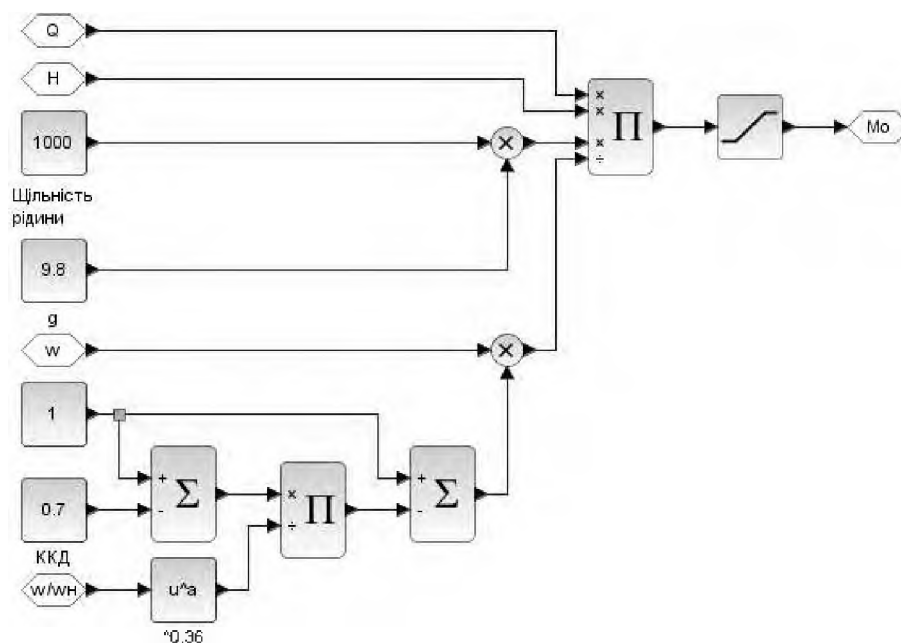


Рисунок 3.17 – Схема моделі за формулами (3.18) та (3.19)

3.3.2 Аналіз якості керування

У результаті моделювання були отримані перехідні характеристики регульованого електропривода насосної установки водопостачання, які представлені на рисунках 3.18-3.20.

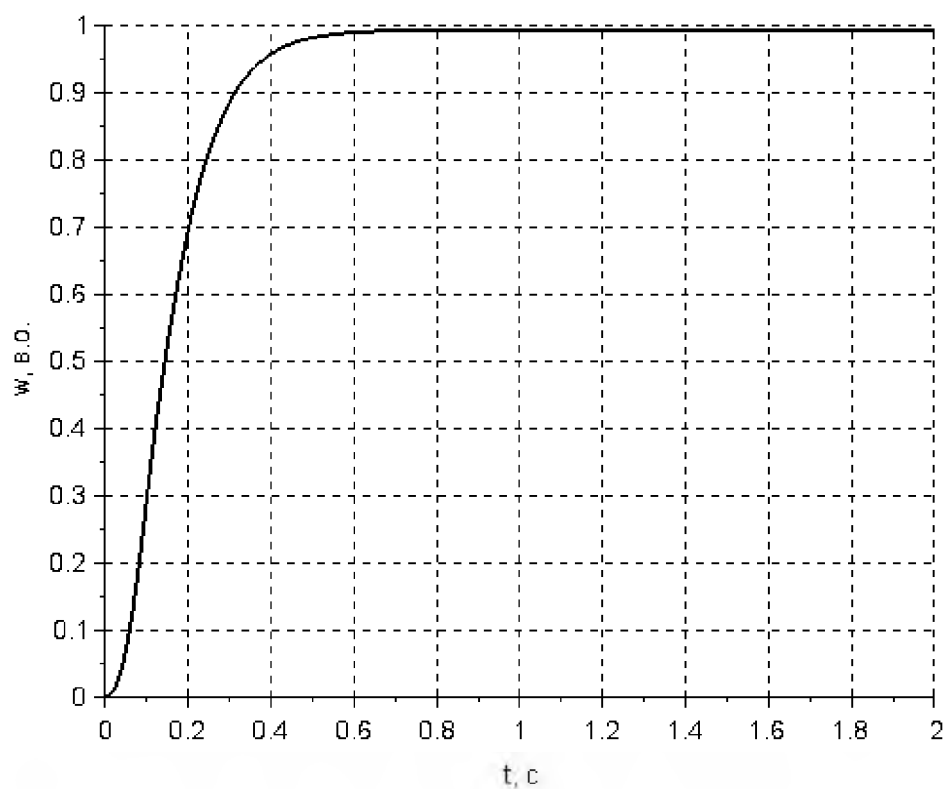


Рисунок 3.18 – Перехідна характеристика кутової швидкості електродвигуна

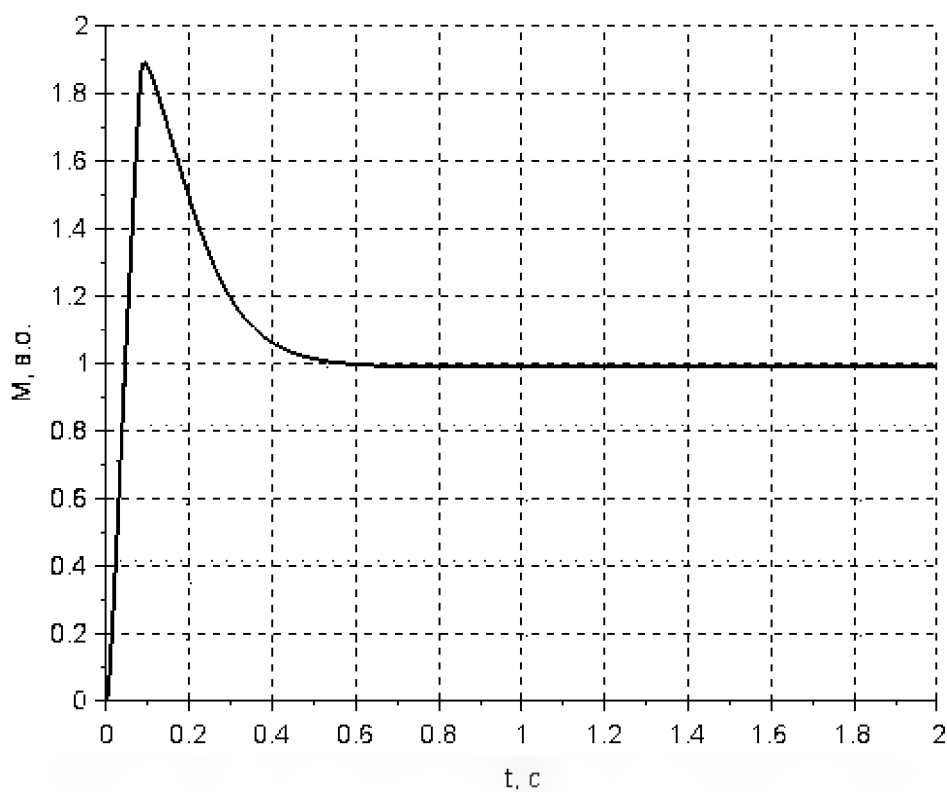


Рисунок 3.19 – Перехідна характеристика моменту електродвигуна

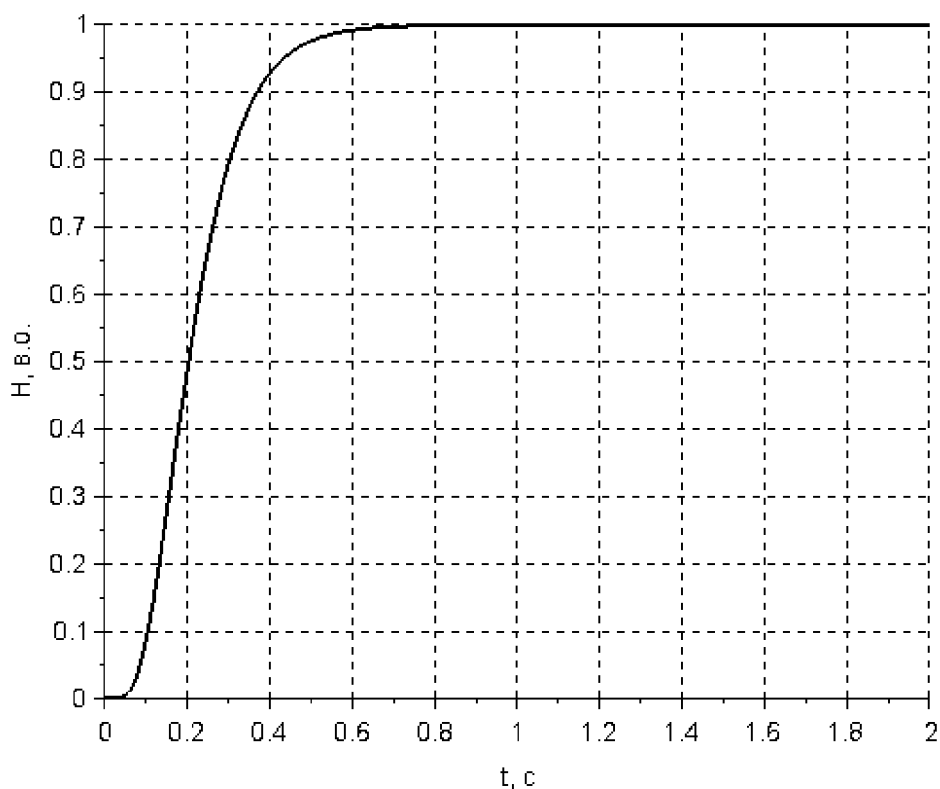


Рисунок 3.20 – Перехідна характеристика напору

На практиці при експлуатації насосних станцій отримали розповсюдження два режими роботи. Постійне водоспоживання, коли потрібно стабілізувати тиск в трубопроводі, тобто $Q=\text{const}$, та змінне водоспоживання з необхідністю підтримки сталим стабілізуючого напору $H=\text{const}$. Перехідні характеристики досліджуваної моделі регульованого електропривода мережевого насоса при зміні витрати в гідросистемі наведено на рисунках 3.21-3.24.

Для систем керування важливим є поняття якості перехідних процесів, тобто важливий сам характер протікання процесів, особливо такі фактори, як тривалість, коливальність і динамічне відхилення регульованої змінної від заданої величини.

До загальноприйнятих показників якості, які використовують для характеристики перехідного процесу, відносять відносне перерегулювання, час встановлення, час наростання, час максимуму та усталену похибку [16].

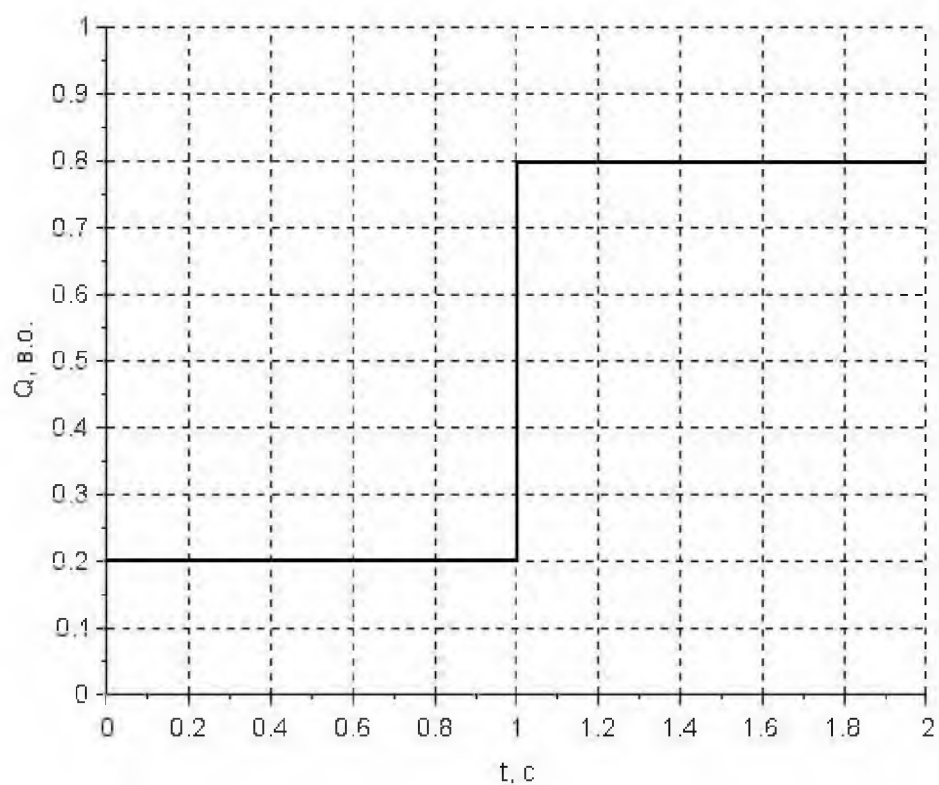


Рисунок 3.21 – Перехідна характеристика витрати

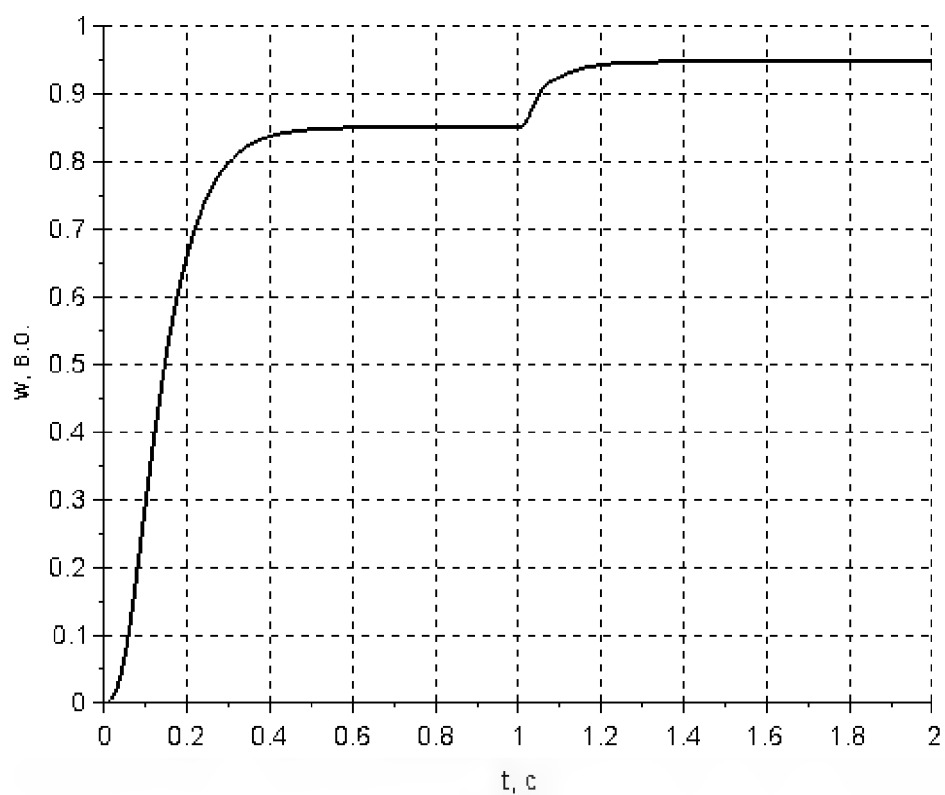


Рисунок 3.22 – Перехідна характеристика кутової швидкості електродвигуна

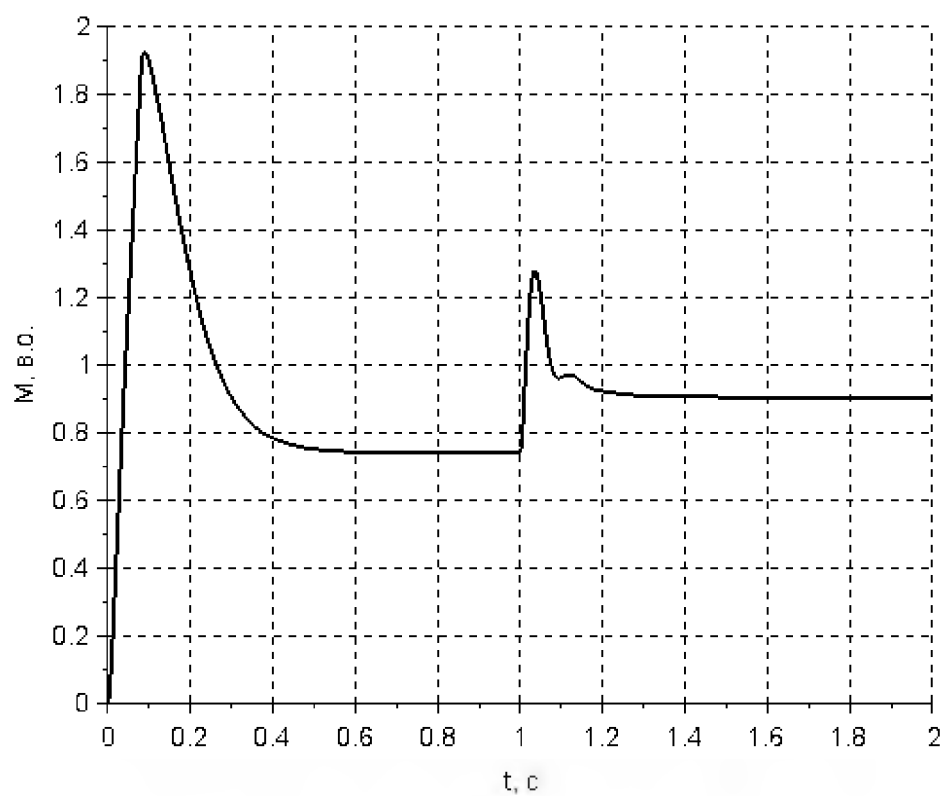


Рисунок 3.23 – Перехідна характеристика моменту електродвигуна

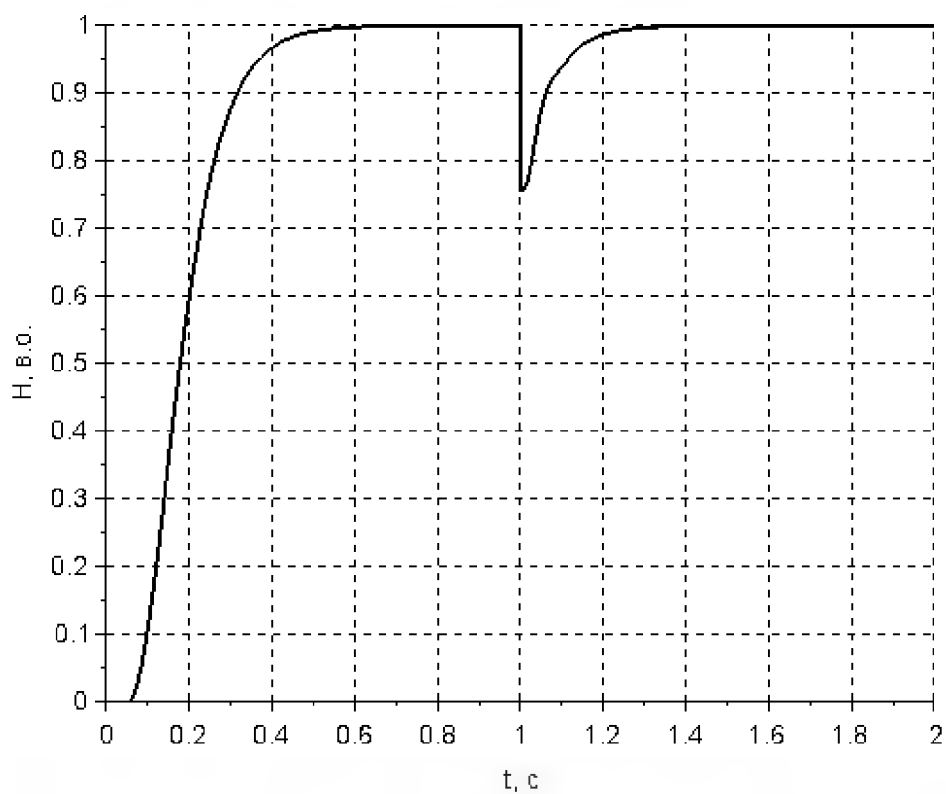


Рисунок 3.24 – Перехідна характеристика напору

Швидкодія системи напряму пов'язана з часом наростання t_n та часом максимуму перехідної характеристики t_m . Для недодемпфованих систем, перехідна характеристика яких має перерегулювання, час наростання визначається як час зміни реакції від 0 до 100 % заданого значення вихідної величини. Якщо система передемпфована, то перерегулювання відсутнє, час максимуму не має значення, а в якості часу наростання розглядається інтервал, протягом якого перехідна характеристика змінюється від 10 до 90 % її значення.

Наскільки добре дійсна реакція системи відповідає керуючому впливу, оцінюється по відносному перерегулюванню σ і часу встановлення t_p .

Відносне перерегулювання σ представляє собою максимальне відхилення від усталеного значення, яке виражається у відносних одиницях або процентах,

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100\%,$$

де $h_{\max}$ – максимальне значення вихідної величини;

$h_{\text{уст}}$ – усталене значення вихідної величини.

Час встановлення t_p визначається моментом, після якого перехідна характеристика залишається повністю в межах зони, яка відрізняється від усталеного значення на $\pm\delta$.

Отже, реакцію системи на керуючий вплив можна охарактеризувати двома факторами:

- швидкодією, яка визначається часом наростання і часом максимуму;
- близькістю до бажаного вигляду, яка визначається перерегулюванням і часом встановлення.

Наведені вище показники можуть бути доповнені іншими, якщо цього вимагають специфічні технічні завдання на розробку або дослідження систем керування.

Проаналізуємо реакцію системи керування на ступінчастий сигнал (рисунок 3.25). Отримані показники якості зведені в таблицю 3.4.

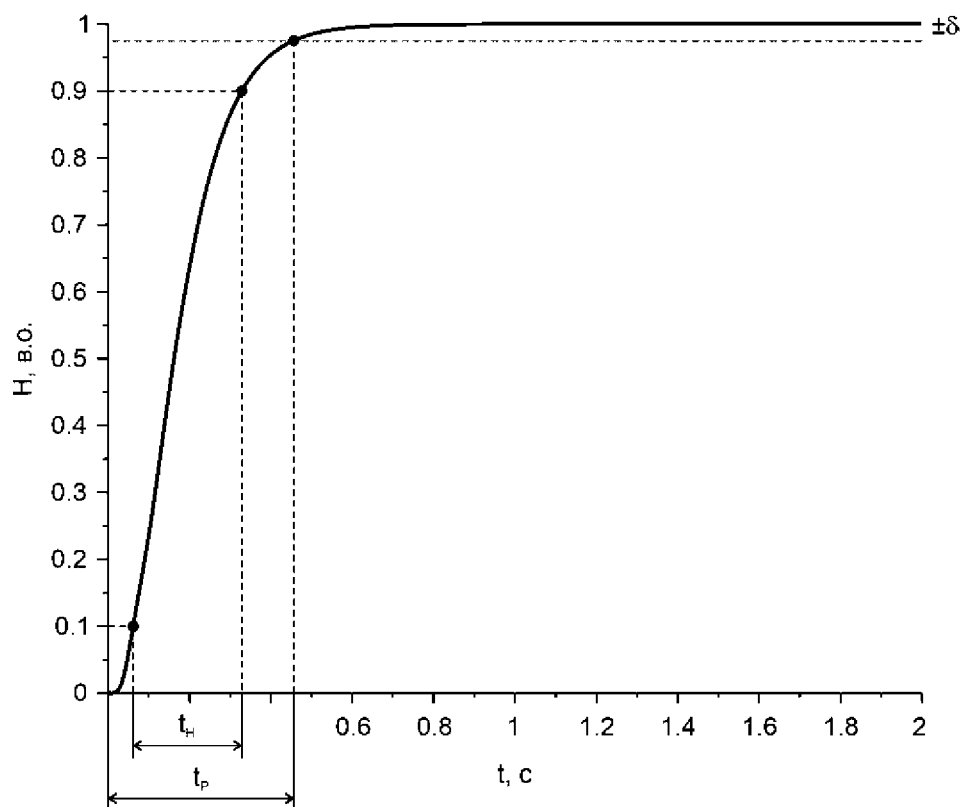


Рисунок 3.25 – Реакція системи керування на ступінчастий сигнал

Таблиця 3.4 – Показники якості

Параметр	Відносне перерегулювання σ , %	Час встановлення t_p , с	Час наростання t_n , с	Усталена похибка $\varepsilon_{уст}$
Значення	0	0,456	0,267	0

Відповідно завданню до роботи перехідний процес повинен відповідати таким показникам: $\sigma \leq 5\%$, $t_p \leq 1$ с. Згідно таблиці 3.4 отримані значення не перевищують задані, отже, перехідний процес задовольняє сформульованим у завданні вимогам.

3.4 Оцінка ефективності регульованого електропривода насосної установки

Для прийняття рішення про доцільність використання регульованого електропривода в насосних установках систем водопостачання та водовідведення необхідно визначити [17]:

- економію енергії в результаті застосування регульованого електропривода, зниження витрати чистої води, зменшення скидання стоків в каналізацію і відповідно скорочення експлуатаційних витрат;
- зміну капітальних витрат при використанні регульованого електропривода;
- термін окупності додаткових капітальних витрат за рахунок зниження експлуатаційних витрат.

Як показують дослідження, регульований електропривод сам по собі не забезпечує ефективну роботу насосної установки. Вона забезпечується належним технологічним режимом роботи насосної установки спільно з системою подачі і розподілу води або з системою водовідведення (для каналізаційних насосних станцій). Належний технологічний режим роботи насосної установки створюється спеціально розробленою системою автоматичного (автоматизованого) керування, в якій РЕП є хоча і важливим, але все-таки одним з елементів системи керування.

Насосні установки на різних об'єктах відрізняються один від одного за призначенням, продуктивністю, режимам роботи, потужності агрегатів, розташуванню на місцевості і по її рельєфу. Тому прогнозування енергетичної ефективності застосування регульованого електропривода і доцільності його використання для конкретного об'єкта не може бути зроблено на основі загальних міркувань. Для конкретних установок доцільність використання регульованого електропривода і його ефективність визначаються на підставі техніко-економічних розрахунків за порівнянними технічними та економічними показниками.

Критерії доцільності використання регульованого електропривода в насосних установках систем водопостачання та водовідведення

3.4.1 Критерій 1. Зниження енергоспоживання насосних установок, економія води в системах подачі і розподілу і зменшення скидання стоків в систему водовідведення повинні забезпечувати розумні терміни окупності витрат на створення енергозберігаючих систем автоматичного керування з використанням регульованого електропривода при існуючому співвідношенні цін на обладнання та тарифів на електроенергію і воду.

Розумні строки окупності $T_{ок}$ витрат на створення енергозберігаючих систем автоматичного керування з урахуванням регульованого електропривода в будь-якому випадку не повинні перевищувати термін служби основних елементів системи (в першу чергу частотних перетворювачів та іншого обладнання), тобто $T_{ок} < 10-12$ років. В сучасних економічних умовах на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства він становить 2-4 роки (залежно від конкретних умов).

3.4.2 Критерій 2. Використання регульованого електропривода в системах автоматичного керування насосною установкою не повинно знижувати загальної надійності системи подачі і розподілу води або системи водовідведення.

3.4.3 Критерій 3. Використання регульованого електропривода на одній з кількох насосних станцій, що працюють спільно, не повинно збільшувати сумарне енергоспоживання всіх насосних станцій, що подають воду в той же район системи подачі і розподілу води. Аналогічна вимога пред'являється до каналізаційних насосних станцій, які працюють в одній системі водовідведення.

Поряд з економією енергії і води застосування регульованого електропривода в енергозберігаючих установках дозволяє в ряді випадків при будівництві нових та модернізації існуючих об'єктів скоротити матеріаломісткість і вартість насосних станцій за рахунок укрупнення одиничної потужності основних агрегатів і зменшення їх кількості.

3.5 Висновки до розділу 3

3.5.1 Побудовано функціональну схему частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та обґрунтовано вибір її елементів. Встановлено, що застосування перетворювачів частоти в електроприводі насосних установок забезпечує наступні переваги:

- ефективне використання асинхронних електродвигунів, дешевих в експлуатації та ремонті;
- ККД електродвигуна у всьому діапазоні регулювання максимально відповідає ККД електродвигуна в номінальному режимі;
- плавний пуск електродвигуна, відсутність гідравлічних ударів;
- зниження рівня шуму під час пуску і роботи;
- автономна безпечна робота, інтеграція в АСК ТП.

При описі елементів системи частотного керування наведено технічні характеристики електродвигуна MDEMA XX 132-2 2 та перетворювача частоти MCE110/P, виконано побудову механічних характеристик електродвигуна при частотному керуванні.

3.5.2 Розроблено динамічну модель частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та виконано розрахунок параметрів її елементів. При вирішенні завдання синтезу регулятора для регульованого електропривода, з умов забезпечення бажаного/необхідного перехідного процесу, в роботі виконано налаштування на модульний (технічний) оптимум. Реалізація замкненого контуру регулювання тиску здійснюється за допомогою програмного ПД-регулятора перетворювача частоти.

3.5.3 Проведено моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки в Scilab та аналіз якості керування. Отримано перехідні характеристики. Аналіз результатів дослідження якості показав, що електропривод насосної установки має динамічні показники, які цілком задовольняють сформульованим у завданні вимогам: $\sigma=0\%$ (≤ 5), $t_p=0,456$ с (≤ 1).

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів

Небезпечним виробничим фактором називають такий виробничий фактор, вплив якого на працівника в певних умовах приведе до травми або до іншого раптового різкого погіршення здоров'я. Результатом впливу цього фактора на людину є нещасний випадок.

Шкідливим виробничим фактором називають такий виробничий фактор, вплив якого на працівника в певних умовах приведе до захворювання або зниження працездатності. Результатом впливу цього фактора є професійне захворювання.

Основними причинами травматизму при обслуговуванні і експлуатації насосних агрегатів являється:

- ураження електричним струмом, що можливе при пошкодженні ізоляції електрообладнання, порушенні технологічного обслуговування електроустаткування, несправності автоматики;
- травмування робітників обертовими елементами;
- незадовільні мікрокліматичні умови;
- ураження органів дихання і слизових оболонок мастильно-охолоджувальною рідиною;
- виникнення пожежі, при замиканні електропроводки або спалахуванні обтирального матеріалу;
- шум;
- вібрація;
- відсутність або незадовільне огороження робочої зони;
- відсутність або невикористання засобів індивідуального захисту.

До основних травмонебезпечних виробничих факторів, які можуть проявлятися в процесі експлуатації насосного агрегату:

- ріжучі інструменти, вони можуть нанести травму, в тому числі і з тяжкими наслідками, при випадковому торканні з ними в процесі роботи, у випадку захвату ними одєжі;
- приводні та передавальні механізми НА, особливо ходові гвинти приводів подач.

До шкідливих виробничих факторів при експлуатації НА також відноситься

- підвищений рівень шуму, послаблювальний увагу;
- недостатнє штучне освітлення;
- підвищена вібрація;
- наявність обертових частин насосних агрегатів.

Найбільш небезпечні фактори, з огляду на можливе викликання травм і професійних захворювань, наведені у таблиці 4.1.

4.1.1 Захист від шуму та вібрації. Насосні агрегати є перш за все джерелами шуму та вібрації. Шум – будь-який небажаний звук, який заважає. Виробничим шумом називається шум на робочих місцях, на ділянках або на територіях підприємств, який виникає під час виробничого процесу.

Наслідком шкідливої дії виробничого шуму можуть бути професійні захворювання, підвищення загальної захворюваності, зниження працездатності підвищення ступеня ризику травм та нещадних випадків, пов'язаних з порушенням сприйняття попереджувальних сигналів, порушенням слухового контролю функціонування технологічного обладнання, зниження продуктивності праці. Під час роботи в шумних умовах продуктивність ручної праці може знизитись до 60 %, а кількість помилок що трапляються при розрахунках, зростає більше, ніж на 50 %.

Таблиця 4.1 – Аналіз небезпечних факторів

Назва та визначення фактору	Небезпечний/шкідливий спосіб дії на людину	Можливі наслідки для працівника	Назва та документ, що її визначає	Запобіжні заходи
1	2	3	4	5
Електричний струм	Термічна дія, біологічна дія, електrolітична дія	Електричний удар, електрична травма, електричний шок	ПБЕ 2006 “Глава 1.7 – Заземлення і захисні заходи електробезпеки” НПАОП 40.1-1.32-01 – “Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок” НПАОП 40.1-1.21-98 – “Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів”	Заземлення, занулення, захисне відключення, організаційні заходи
Незадовільна освітленість	Погіршення зору, зниження уваги	Короткозорість, зниження уваги	ДБН В.2.5-28-2006 “Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення”	Загальне і місцеве освітлення

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
Запиленість повітря (крихкі деталі)	Запалення органів дихання і слизових оболонок	Силікози, захворювання шкіри і легень	ГОСТ 12.1.005-88 “Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»	Загально-обмінна і місцева вентиляція, ЗІЗ
Механічні ушкодження	Доторкання до обертових частин, робота з матеріалом	Травми різного ступеня	Вимоги до обладнання	Захисні екрани, кожухи, обгородження
Шум	Послаблення уваги, слуху	Нервові, серцево-судинні захворювання, порушення функціонування органів слуху	ДСН 3.3.6.037-99 “Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку”	Кожухи, екрани, ЗІЗ

Вібрація серед усіх видів механічних впливів для технічних об'єктів найбільш небезпечна. Знакозмінні напруження, викликані вібрацією сприяють накопиченню пошкоджень в матеріалах, появі тріщин та руйнуванню. Найчастіше і досить швидко руйнування об'єкта настає при вібраційних впливах за умов резонансу. Вібрації викликають також й відмови машин, приладів. Вібрація від устаткування передається через конструкцію і підлогу до людини і викликає загальну вібрацію його тіла. Особливо шкідливими є коливання з частотою 6-9 Гц, близькою до частоти коливань людини. Резонанс, що виникає, збільшує коливання внутрішніх органів, розширюючи або звужуючи їх. Систематична дія вібрації викликає вібраційну хворобу з втратою працездатності. Ця хвороба виникає поступово, викликаючи головний біль, роздратування, поганий сон, з'являється біль у суглобах, судоми пальців, спазми судин. У організмі виникають незворотні зміни, що призводять до інвалідності.

За способом передачі на тіло людини вібрацію поділяють на загальну, яка передається через опорні поверхні на тіло людини, та локальну, котра передається через руки людини. У виробничих умовах часто зустрічаються випадки комбінованого впливу вібрації-загальної та локальної.

Шум і вібрація несприятливо впливають на людину. Шум не лише негативно діє на слух, але і може викликати розлади серечно-судинної і нервової систем, травного тракту, а також гіпертонічні хвороби. Шум є однією з причин швидкого стомлення робітників, може викликати запаморочення, що призводить до нещасних випадків. Від постійної дії шуму з'являються професійна хвороба – глухота. Шум може бути причиною виразки шлунку, викликає підвищення рівня холестерину в крові, сприяє виникненню стресового стану, скорочує життя людини.

Допустимі рівні звукового тиску в октавних смугах частот і рівнів звуку на робочих місцях наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Допустимі рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Робоче місце	Рівні звукового тиску дБ, в октавних смугах з середньогометричними частотами								Рівні звуку, дБ
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Постійні робочі місця	95	87	22	78	75	73	71	69	80

4.1.2 Пожежна безпека. Поняття пожежна безпека означає стан об'єкта, при якому виключається можливість пожежі, а у випадках його виникнення запобігається вплив на людей небезпечних факторів пожежі і забезпечується захист матеріальних цінностей .

Пожежна безпека регламентується ГОСТ 12.1.0333-81 "Загальні вимоги", Будівельними Нормами і Правилами, міжгалузевими правилами і правилами пожежної безпеки, затвердженими міністерствами і відомствами.

Небезпечними факторами пожежі для людей є відкритий вогонь, іскри , підвищена температура повітря, токсичні продукти горіння, дим, знижена концентрація кисню, обвалення і пошкодження будівель, споруд, установок, а також вибух.

Для запобігання пожежі необхідні такі заходи:

- а) запобігання утворенню горючого середовища;
- б) запобігання утворенню в займистою середовищі джерел запалювання;
- в) підтримка температури і тиску займистою середовища нижче допустимих;
- г) зменшення визначального розміру займистою середовища.

Згідно з будівельними нормами і правилами (БНіП II – М.2-72) насосна станція належить до виробництв категорії Д, які характеризуються наявністю негорючих речовин і матеріалів в холодному стані.

При коротких замиканнях, перегріваннях і т.п. можливе загоряння електропроводки, електроустановок. Для гасіння пожежі в таких умовах необхідно засто-

совувати спеціальні засоби, неможливо використовувати воду та інші струмопровідні речовини. Тому приміщення насосної станції повинні бути обладнані засобами для гасіння електропроводок та електроустановок під напругою. Застосовуваний тип вогнегасників: ОУ-10 (вогнегасник вуглекислотний).

4.2 Електробезпека насосної установки

Електрична енергія – найбільш універсальна і дуже зручна для використання форма енергії. Без неї немислиме життя сучасної людини. Електрика – вірний помічник в праці і побуті, але вона стає небезпечною для життя, якщо з нею неправильно і недбало поводитись. Багато нещасних випадків відбувається при обслуговуванні найбільш поширеного електрообладнання, розрахованого на 127...380 В.

Людина починає відчувати змінний струм промислової частоти (50 Гц) приблизно з 1 мА (пороговий відчутний струм). При струмі 10...15 мА виникає судомне скорочення м'язів, яке весь час підсилюється, і людина не може звільнитися від контакту зі струмопровідною частиною (пороговий невідпускаючий струм). При 50 мА порушується дихання, а струм 100 мА призводить до фібриляції серцевих м'язів.

Сила струму залежить за законом Ома від електричного опору. Встановлено, що опір струму тіла людини може коливатись від 100000 Ом (при сухій неушкодженій шкірі) до 800 Ом (при вологій шкірі або порушеному поверхневому роговому її шарі). Найбільш небезпечним є шлях струму по таких петлях: права рука – ноги (через серце проходить 6,7 % загального уражального струму), ліва рука – ноги (3,7 %), рука – рука (3,3 %), а також голова – ноги (руки).

Повинні бути передбачені наступні заходи щодо забезпечення електробезпеки електроустановки:

- режим контролю мережі живлення;
- захист від випадкового проникнення до струмоведучих частин електроустановки;

- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- заземлення;
- захисне відключення;
- застосування захисних засобів;
- організаційні і технічні заходи.

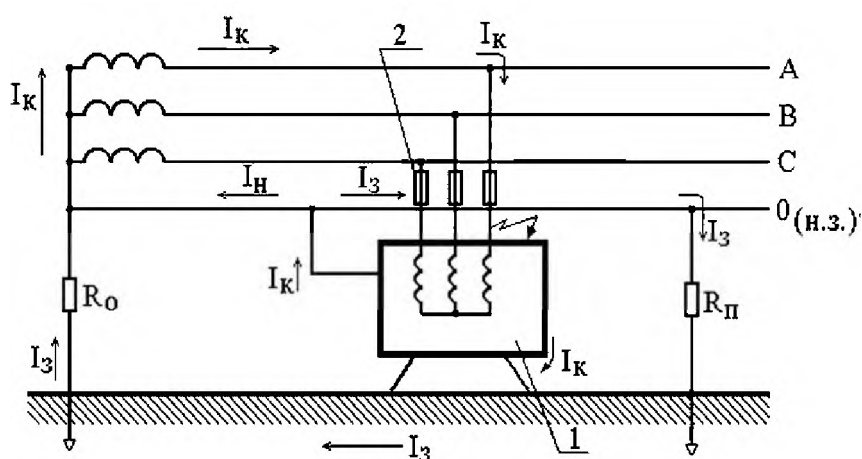
Підведення живлення до електродвигуна здійснюється за допомогою кабелю, укладеного в підземний кабельний канал.

Кабелі для живлення силового перетворювача і двигуна – броньовані для захисту від можливих механічних пошкоджень.

Захисне заземлення – навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою. Принцип дії захисного заземлення – зниження до безпечних значень напруг дотику і кроку, обумовлених замиканням на корпус або іншими причинами. Це досягається шляхом зменшення потенціалу на заземленому обладнанні (за рахунок зменшення опору заземлення), а також шляхом вирівнювання потенціалів основи, на якій стоїть людина, і заземленого обладнання.

У приміщенні, де експлуатується проектована установка, використовуються штучні заземлення: опір заземлюючого пристрою не більше 4 Ом.

Захисне занулення – це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих не струмоведучих частин електрообладнання, які можуть опинитися під напругою. Принцип дії занулення – перетворення замикання на корпус в однофазне коротке замикання (між фазним і нульовим провідником) з метою викликати великий струм, здатний забезпечити спрацювання захисту і автоматично відключити пошкоджене електрообладнання від мережі живлення. Схема захисного занулення наведена на рисунку 4.1.



1 – корпус; 2 – апарати захисту від струмів короткого замикання

(запобіжники і автомати); R_0 – опір заземлення нейтралі джерела струму;

R_{Π} – опір повторного заземлення нульового захисного провідника; I_K – струм к.з.;

I_H – частина струму короткого замикання, що протікає через нульовий провідник;

I_3 – частина струму короткого замикання, що протікає через землю

Рисунок 4.1 – Схема захисного занулення

Вимкнення пошкодженої установки від живильної мережі відбудеться, якщо значення струму однофазного короткого замикання (I_K), яке штучно створюється в ланцюзі, буде більше значення струму спрацювання автоматичного вимикача і виконуватиметься така умова

$$I_K \geq k \cdot I_{\text{ном}}, \quad (4.1)$$

де k – коефіцієнт кратності струму, вибирається залежно від типу захисту електроустановки.

Для перевірки забезпечення відключача здібності занулення необхідно перевірити наступне умова:

$$I_{K2} \geq I_{K1}, \quad (4.2)$$

де I_{K1} – найменше допустиме значення струму якого замикання;

I_{K2} – дійсне значення струму однофазного короткого замикання.

Необхідно визначити:

- найменше допустиме значення струму ($I_{к1}$) якого замикання, при якому відбудеться спрацювання захисту та пошкоджене обладнання відключиться від мережі;
- дійсне значення струму однофазного короткого замикання, яке матиме місце у схемі при виникненні аварії ($I_{к2}$).

Визначимо величину струму $I_{к1}$

$$I_{к1} = k \cdot I_{ном} = 1,25 \cdot 150 = 187,5 \text{ А},$$

де $I_{ном}$ – номінальний струм спрацювання автоматичного вимикача. Визначимо повний опір петлі «фаза-нуль», $I_{ном} = 150 \text{ А}$.

$$Z_{\Pi} = \sqrt{(R_{\phi} + R_{н})^2 + (X_{\phi} + X_{н} + X_{\Pi})^2}, \quad (4.3)$$

де R_{ϕ} – активний опір фазного захисного провідника, $R_{\phi} = 0,9 \text{ Ом}$ (алюміній);

$R_{н}$ – активний опір нульового захисного провідника, $R_{н} = 0,154 \text{ Ом}$ (сталь);

X_{ϕ} – внутрішній індуктивний опір фазного провідника, $X_{\phi} = 0,015 \text{ Ом}$;

$X_{н}$ – внутрішній індуктивний опір нульового провідника, $X_{н} = 0,154 \text{ Ом}$;

X_{Π} – зовнішній індуктивний опір петлі «фаза-нуль», $X_{\Pi} = 0,02 \text{ Ом}$.

$$Z_{\Pi} = 1,07 \text{ Ом}.$$

Знаходимо дійсне значення струму однофазного короткого замикання, що проходить у схемі в аварійному режимі:

$$I_{к2} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{\Gamma}}{3} + Z_{\Pi}},$$

де U_{ϕ} – фазна напруга, $U_{\phi} = 220 \text{ В}$;

Z_{Π} – повний опір ланцюга “фаза-нуль”, $Z_{\Pi} = 1,07 \text{ Ом}$;

Z_{Γ} – повний опір трансформатора, $Z_{\Gamma} = 0,12 \text{ Ом}$.

$$I_{к2} = \frac{220}{\frac{0,12}{3} + 1,07} = 198,2 \text{ А}.$$

Порівняємо дійсні (обчислені) значення струмів однофазного короткого замикання (I_{k2}) з найменшим, допустимим за умовами спрацьовування захисту струмом (I_{k1}): $198,2 \text{ A} > 187,5 \text{ A}$, тобто $I_{k2} \geq I_{k1}$, отже, відключає здатність системи занулення забезпечено і нульовий захисний провідник обраний правильно.

4.3 Техніка безпеки при роботі насосної установки

Для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу обертові частини електродвигунів і насосів повинні бути закриті захисними кожухами. Рівень вібрацій і шуму повинен бути обмежений в межах, зазначених ГОСТом. Недолік природного освітлення повинен компенсуватися штучним. Відповідно до ГОСТу повинна забезпечуватися електробезпека.

Технічна експлуатація діючих електроустановок насосної станції здійснюється електротехнічним персоналом відповідно до відомчими Правилами технічної експлуатації електроустановок (ПТЕ) і правилами технічної безпеки при експлуатації електроустановок (ПТБ). Чинними називають електроустановки або їх ділянки, які знаходяться під напругою або на які напруга можна подати включенням комутаційних апаратів (вимикачів, відокремлювачів, роз'єднувачів та ін.)

Розглянемо основні заходи безпеки при експлуатації:

Експлуатація насосних агрегатів забороняється при появі в агрегаті ясно чутого стуку, іскрінні або свічення в зазорі між статором і ротором електродвигуна, збільшенні вібрації вала, підвищення температури підшипників, обмоток статора і ротора вище допустимої.

Кожний насосний агрегат періодично, за графіком, затвердженим керуючим виробничим управлінням водопровідно-каналізаційним господарством, піддають оглядам, ревізіям, поточним і капітальним ремонтам. Періодичність і обсяг кожного виду робіт встановлюють на підставі інструкції заводу-виробника з урахуванням місцевих умов. Пуск і налагодження агрегату після ремонту виконують під наглядом особи, керівного ремонтом.

Обов'язки чергового персоналу визначаються посадовими інструкціями. Черговий персонал відповідає за правильне обслуговування та безперебійну роботу насосних агрегатів у відповідності з графіками, інструкціями та оперативними розпорядженнями.

4.3.1 На місці експлуатації насосного агрегату необхідно розробити правила його безпечної експлуатації.

4.3.2 Вимоги правил охорони праці повинні бути передбачені в проекті насосної станції, згідно з яким визначають розміщення обладнання і встановлюють проходи до агрегатів, вибирають освітлення, вентиляцію та ін.

4.3.3 Вмикання і вимикання насосних агрегатів повинно виконуватися з відома диспетчера або старшого зміни.

4.3.4 Якщо на агрегатах виконуються ремонтні роботи, необхідно вжити попереджувальних заходів щодо запобігання їх ввімкненню.

4.3.5 Джерелами шкідливих і небезпечних виробничих факторів електронасосного обладнання є: незахищені рухомі елементи агрегату; підвищена і знижена температура поверхонь деталей насоса; підвищений рівень вібрації; небезпечний рівень напруги електричної мережі.

4.3.6 Стропування насосного агрегату необхідно проводити згідно із схемою креслення.

4.3.7 При експлуатації агрегат необхідно заземлити.

4.3.8 При роботі агрегату всі рухомі частини повинні бути огорожені.

4.3.9 Робота насосного агрегату без запірної арматури не допускається.

4.3.10 При проведенні ремонтних робіт двигун повинен бути відімкнений від електричної мережі.

4.3.11 При роботі насоса необхідно регулярно контролювати витоки рідини через ущільнення. Якщо вони більші за норму, насосний агрегат необхідно зупинити і провести заміну набивки.

4.3.12 На робочих місцях у виробничих приміщеннях необхідно розробити заходи щодо зниження шуму і вібрації.

4.3.13 При нещасних випадках необхідно надати першу допомогу потерпілому, а потім повідомити особу, відповідальну за техніку безпеки.

4.3.14 У приміщенні насосної станції повинна бути аптечка з необхідними медикаментами для надання першої допомоги у разі нещасних випадків.

4.3.15 У приміщенні насосної станції повинні бути в робочому стані необхідні протипожежні засоби (ящик з піском, вогнегасник та ін.).

4.4 Висновки до розділу 4

4.4.1 Проведено аналіз шкідливих і небезпечних факторів, що впливають на людину при експлуатації насосної установки.

4.4.2 Розроблено заходи щодо забезпечення електробезпеки насосної установки та виконано розрахунок захисного заземлення.

4.4.3 Надано рекомендації щодо техніки безпеки при роботі насосної установки.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлені результати, які узагальнюють теоретичні дослідження ефективності регульованого електропривода насосної установки водопостачання.

1. Розглянуто типи насосних установок водопостачання та водовідведення, склад обладнання та режими роботи насосної установки. Проведено аналіз систем керування насосних установок. Виявлено, що в значній мірі тип насосної станції залежить від способу керування агрегатами, а остаточний вибір того чи іншого типу насосної станції зазвичай здійснюють шляхом техніко-економічного порівняння кількох варіантів. Аналіз способів регулювання режимів роботи насосних агрегатів показав, що найбільш поширеним на сьогоднішній день є регулювання частоти обертання роторів приводних двигунів, відповідно і робочих коліс насосів. Необхідне значення частоти обертання встановлюється системою керування автоматично в залежності від багатьох факторів. До числа факторів, що впливають на частоту обертання насоса, відноситься витрата води в системі.

2. Побудовано функціональну схему частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та обґрунтовано вибір її елементів. В роботі використано одноконтурну систему керування з негативним зворотним зв'язком за напором. Застосування перетворювача частоти дозволяє підтримувати тиск в гідросистемі незалежно від витрати за допомогою регулювання частоти обертання електродвигуна насоса, забезпечує ефективне використання асинхронного електродвигуна та його плавний пуск, виключає гідравлічні удари в гідросистемі.

3. Розроблено динамічну модель частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та виконано розрахунок параметрів її елементів. При побудові моделі асинхронного електропривода використано лінійну модель асинхронного електродвигуна, оскільки при стабілізації напору (тиску) система працює в малих відхиленнях щодо робочої точки стабілізації. При вирішенні завдання синтезу регулятора напору для автоматизованого електропривода насосної

установки водопостачання, з умов забезпечення бажаного/необхідного перехідного процесу, в роботі виконано налаштування на модульний (технічний) оптимум.

4. Проведено моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки в Scilab та проаналізовано якість керування. У результаті дослідження перехідних характеристик асинхронного електропривода насосної установки водопостачання при властивих їй зовнішніх впливах за допомогою програми Xcos з прикладного пакета Scilab було перевірено працездатність запропонованої системи електропривода. Аналізуючи отримані результати можна зазначити, що за умовами роботи пуск насосного агрегату, зміна тиску в мережі, не відбувається стрибкоподібно, а досить плавно і тривало. Модель системи швидко відпрацьовує заданий збурювальний вплив і повертається у вихідний стійкий стан із заданими показниками якості: $\sigma=0\%$, $t_p=0,456$ с.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Лезнов, Б. С.** Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудувных установках [Текст] / Б. С. Лезнов. – М: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. **Карелин, В. Я.** Насосы и насосные станции [Текст]: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.Я. Карелин, А.В. Минаев. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.
3. **Толпаров, Д. В.** Анализ систем управления насосных станций [Текст] / Д.В. Толпаров, Ю.Н. Дементьев // Известия Томского политехнического университета, 2007. – Т. 311. – № 4 – С.113-118.
4. **Чебаевский, В. Ф.** Проектирование насосных станций и испытание насосных установок [Текст] / В.Ф. Чебаевский. – М.: Колос, 2000. – 376 с.
5. Насосные станции с ПЧ 2-3-4 NKVE 10-15-20-32-45 MCE-P // Сайт DAB Water Technology Russia. – Режим доступа:
<https://dabpump.ru/upload/iblock/93b/93be1fd035d0147dflf2965498a151bc.pdf>
6. Центробежные насосы с ПЧ NKVE 10-15-20-32-45-65-95 // Сайт DAB Water Technology Russia. – Режим доступа:
<https://dabpump.ru/upload/iblock/db4/db466917fa9c6a29a80b2ec6a8143636.pdf>
7. **Лезнов, Б. С.** Частотно-регулируемый электропривод насосных установок [Текст] / Б. С. Лезнов. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
8. Асинхронные электродвигатели Lenze MD // Сайт Lenze. Приводная техника в Украине. – Режим доступа:
http://www.lenze.org.ua/pdf/motors/cat_mt_md_en.pdf

9. Блоки управления ПЧ MCE/P // Сайт DAB Water Technology Russia. – Режим доступа: https://dabpump.ru/upload/iblock/547/Cod_60145534.pdf
10. **Денисов, В. А.** Механические характеристики асинхронного электропривода с частотным управлением [Текст] / В.А. Денисов, М.Н. Третьякова // Вектор науки ТГУ, 2015. – № 1 (31). – С.19-24.
11. **Терехов, В. М.** Системы управления электроприводов [Текст] /В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Академия, 2005. – 300 с.
12. **Башарин, А. В.** Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов [Текст] / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
13. **Campbell Stephen L.** Modeling and Simulation in Scilab/Scicos with ScicosLab 4.4 / Campbell Stephen L., Chancelier Jean-Philippe, Nikoukhah Ramine. – New York: Springer. – 2009. – 332 p.
14. **Leros A.** Using Xcos as a Teaching Tool in a Simulation course / A. Leros, A. Andreatos // WORLD-EDU'12/CIT'12 Proceedings of the 6th international conference on Communications and Information Technology, and Proceedings of the 3rd World conference on Education and Educational Technologies. – 2012. – P. 121-126.
15. **Фащиленко, В. Н.** Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: учеб. пособие [Текст] В. Н. Фащиленко. – М.: Издательство «Горная книга», 2011. – 260 с.

16. **Дорф, Р.** Современные системы управления [Текст] / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с.

17. **Лезнов, Б. С.** Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках [Текст] / Б. С. Лезнов. – М.: Машиностроение, 2011. – 88 с.

ДОДАТОК А

**Програма розрахунку та побудови механічних характеристик
електродвигуна при частотному регулюванні**

$$\left(\frac{U_s}{f_s^2} = \text{const}\right)$$

%Паспортні дані електродвигуна

Usn=220;

fsn=50;

p=2;

wsn=2*3.14*fsn/p;

Rs=0.697346;

Rr=0.475056;

xs=0.906018;

xr=1.251168;

*%Розрахунок природної механічної характеристики при fs=50
Гц*

s=[0.001:0.005:1]; f=1; h=1; [w1]=wsn*f*(1-s);

[M1]=3*h.^2*Usn.^2*Rr*s./(((Rs*s+Rr).^2+s.^2*h.^2*(xs+xr).^2)*wsn*f);

*%Розрахунок моменту при зниженні частоти та вентиляторному
навантаженні*

s=[0.001:0.005:1]; f=0.8; h=0.64; [w2]=wsn*f*(1-s);

[M2]=3*h.^2*Usn.^2*Rr*s./(((Rs*s+Rr).^2+s.^2*h.^2*(xs+xr).^2)*wsn*f);

s=[0.001:0.005:1]; f=0.6; h=0.36; [w3]=wsn*f*(1-s);

[M3]=3*h.^2*Usn.^2*Rr*s./(((Rs*s+Rr).^2+s.^2*h.^2*(xs+xr).^2)*wsn*f);

s=[0.001:0.005:1]; f=0.4; h=0.16; [w4]=wsn*f*(1-s);

[M4]=3*h.^2*Usn.^2*Rr*s./(((Rs*s+Rr).^2+s.^2*h.^2*(xs+xr).^2)*wsn*f);

plot(M1,w1,M2,w2,M3,w3,M4,w4),grid

xlabel('M(Hm)'),ylabel('w(1/c)')

ДОДАТОК Б
Мультимедійна презентація

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий
Інститут автоматики та електротехніки

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня магістра
на тему:

**«Дослідження ефективності регульованого електропривода
насосної установки водопостачання»**

Студент магістратури:

Немченко Р. А.

Керівник кваліфікаційної роботи
магістра:

доц. каф. автоматики, к.е.н.
Шевчук С. В.

Миколаїв 2024

Рисунок Б.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

Мета роботи. Об'єкт і предмет дослідження

Мета роботи	Розробка системи керування асинхронного електропривода насосної установки водопостачання та дослідження її динаміки.
Об'єкт дослідження	Перехідні процеси в частотно-регульованому асинхронному електроприводі насосної установки водопостачання.
Предмет дослідження	Параметри регулятора напору асинхронного електропривода насосної установки водопостачання, які впливають на якість керування.

Рисунок Б.2 – Слайд 2 мультимедійної презентації

Завдання дослідження

- 1 Розглянути типи насосних установок водопостачання та водовідведення, склад обладнання та режими роботи насосної установки. Провести аналіз систем керування насосних установок.
- 2 Скласти функціональну схему частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та обґрунтувати вибір її елементів.
- 3 Побудувати динамічну модель частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та виконати розрахунок параметрів її елементів.
- 4 Провести моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки в Scilab та проаналізувати якість керування.

Рисунок Б.3 – Слайд 3 мультимедійної презентації

Функціональна схема насосної станції водопостачання

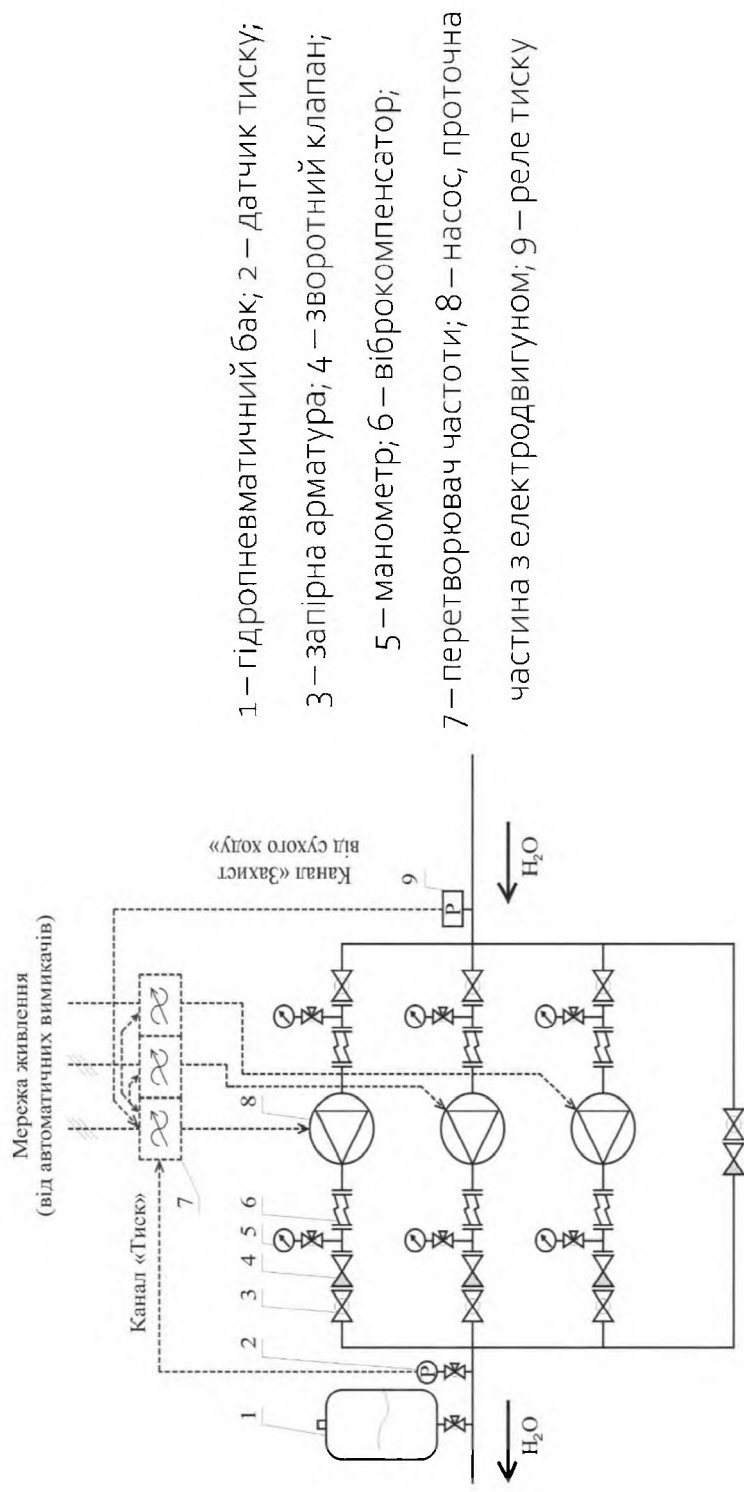


Рисунок Б.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації

Загальна характеристика об'єкта керування

Загальний вигляд насосної станції
3 NKVE 15/ 8 T



Технічні характеристики насосної станції
3 NKVE 15/8 T

Параметр	Значення
Продуктивність Q , м³/год	72
Напір H_{max} , м	108,8
Максимальний робочий тиск p_{max} , МПа (бар)	1,1 (11)
Робочий тиск p , МПа (бар)	1 (10)
Електричні параметри: – джерело живлення, В – потужність, кВт – струм, А – ступінь захисту – клас ізоляції	3×400 3×7,5 3×16,5 IP 54 F

Рисунок Б.5 – Слайд 5 мультимедійної презентації

Функціональна схема регулювання електропривода насосного агрегату

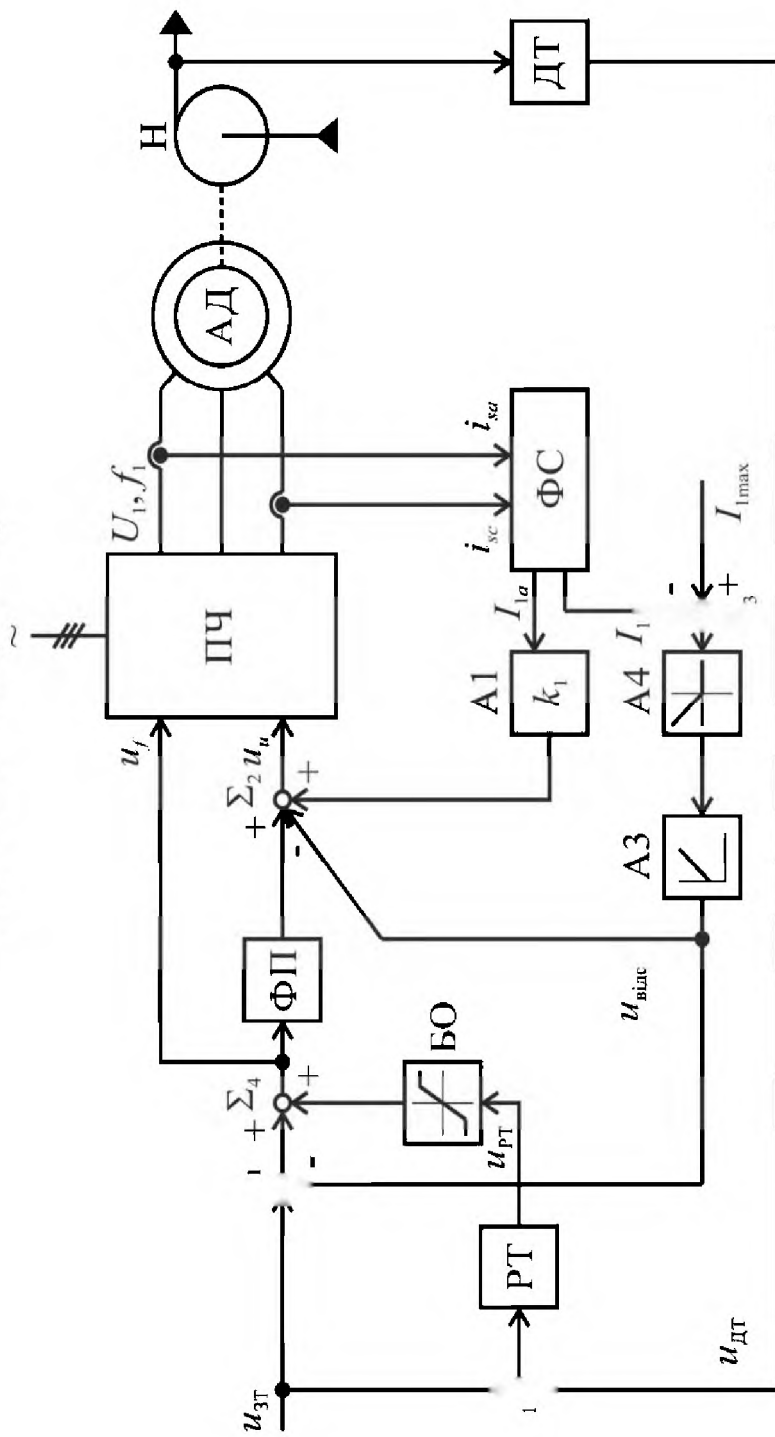


Рисунок Б.7 – Слайд 7 мультимедійної презентації

Механічні характеристики електродвигуна при частотному регулюванні ($\frac{U_s}{f_s^2} = const$)

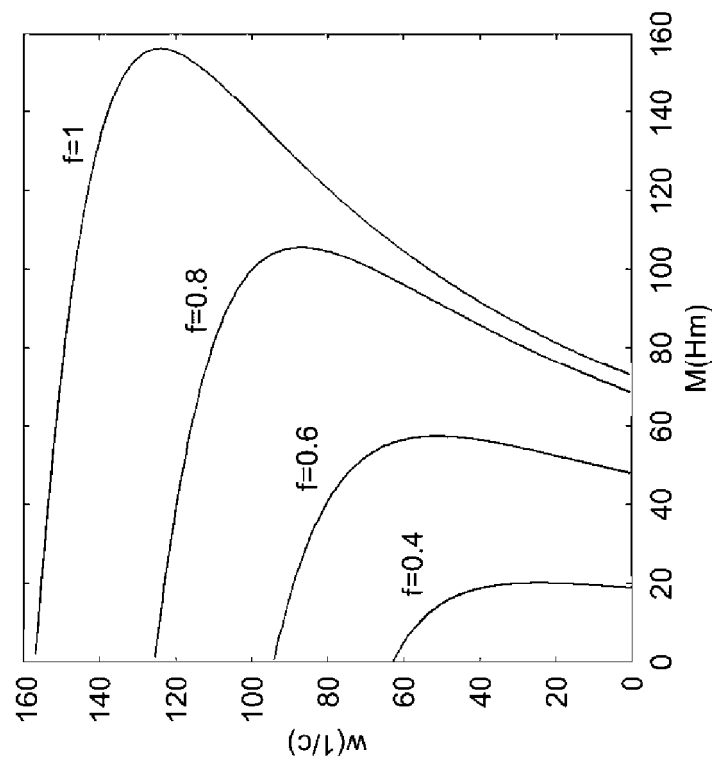


Рисунок Б.8 – Слайд 8 мультимедійної презентації

Дослідження динаміки електропривода насосної установки при постійній витраті ($Q=\text{const}$)

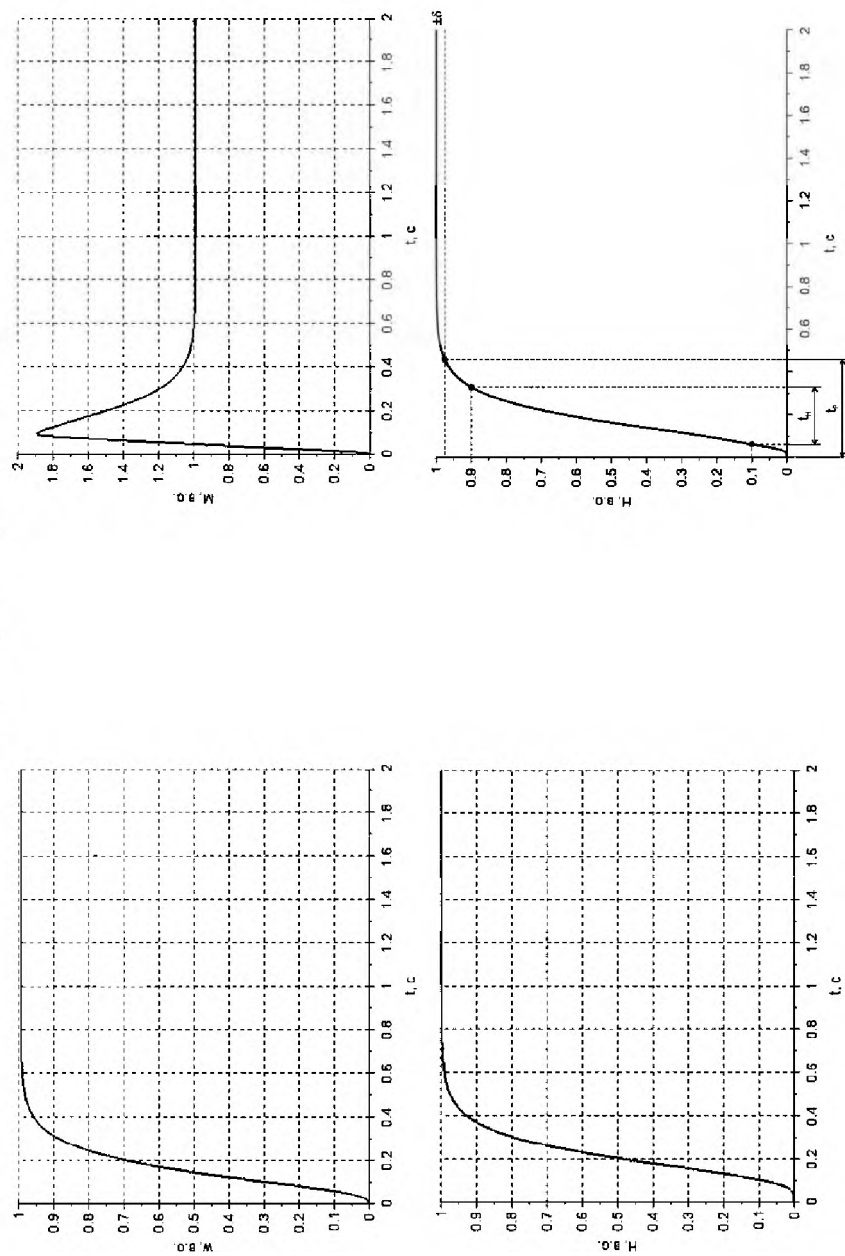


Рисунок Б.10 – Слайд 10 мультимедійної презентації

Динамічна модель асинхронного електропривода насосної установки (електромеханічна + механічна частини)

Модель електромеханічної частини насосного агрегату – регульованого привода

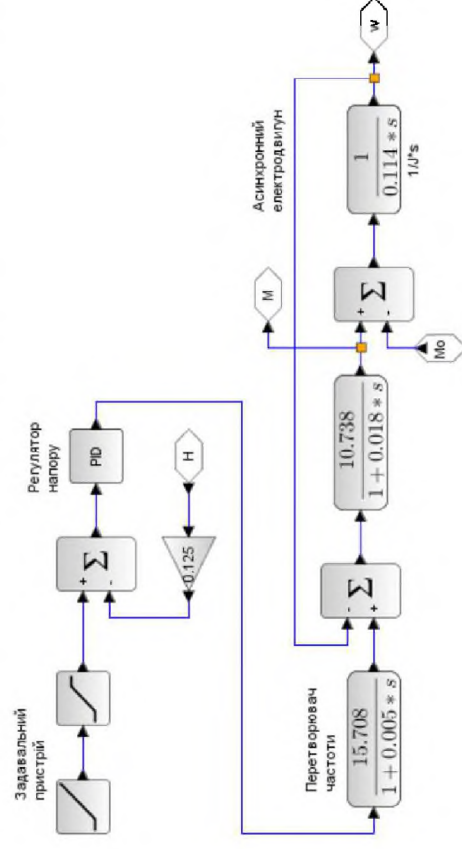


Рисунок Б.11 – Слайд 11 мультимедійної презентації

12

Динамічна модель асинхронного електропривода насосної установки (електромеханічна + механічна частини)

Модель механічної частини – мережевого насоса

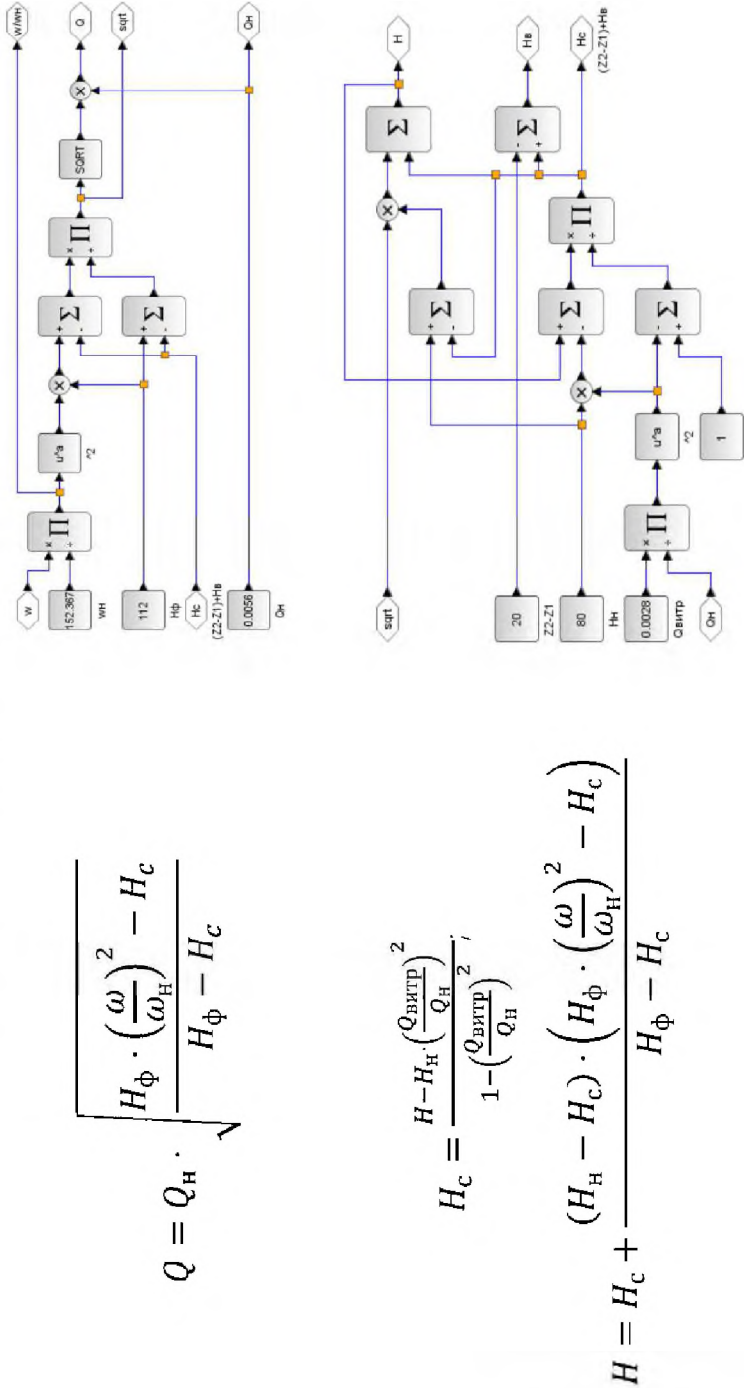


Рисунок Б.12 – Слайд 12 мультимедійної презентації

13

Динамічна модель асинхронного електропривода насосної установки (електромеханічна + механічна частини)

Модель механічної частини – мережевого насоса

$$M_0 = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\omega \cdot \eta_{\text{нас}}},$$
$$\eta_{\text{нас}} = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}}\right)^{0,36}}$$

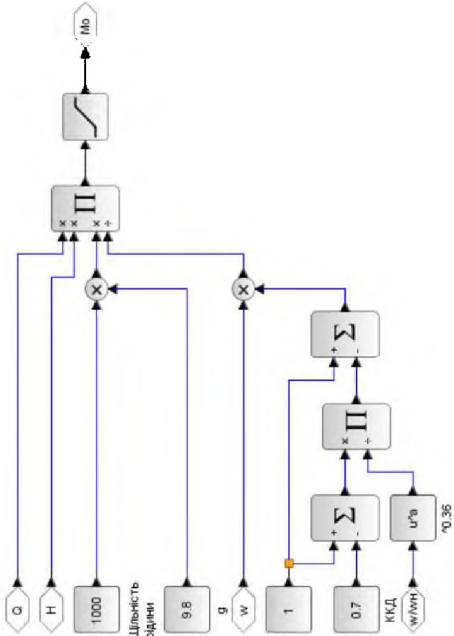


Рисунок Б.13 – Слайд 13 мультимедійної презентації

Дослідження динаміки електропривода насосної установки при зміні витрати ($H=\text{const}$)

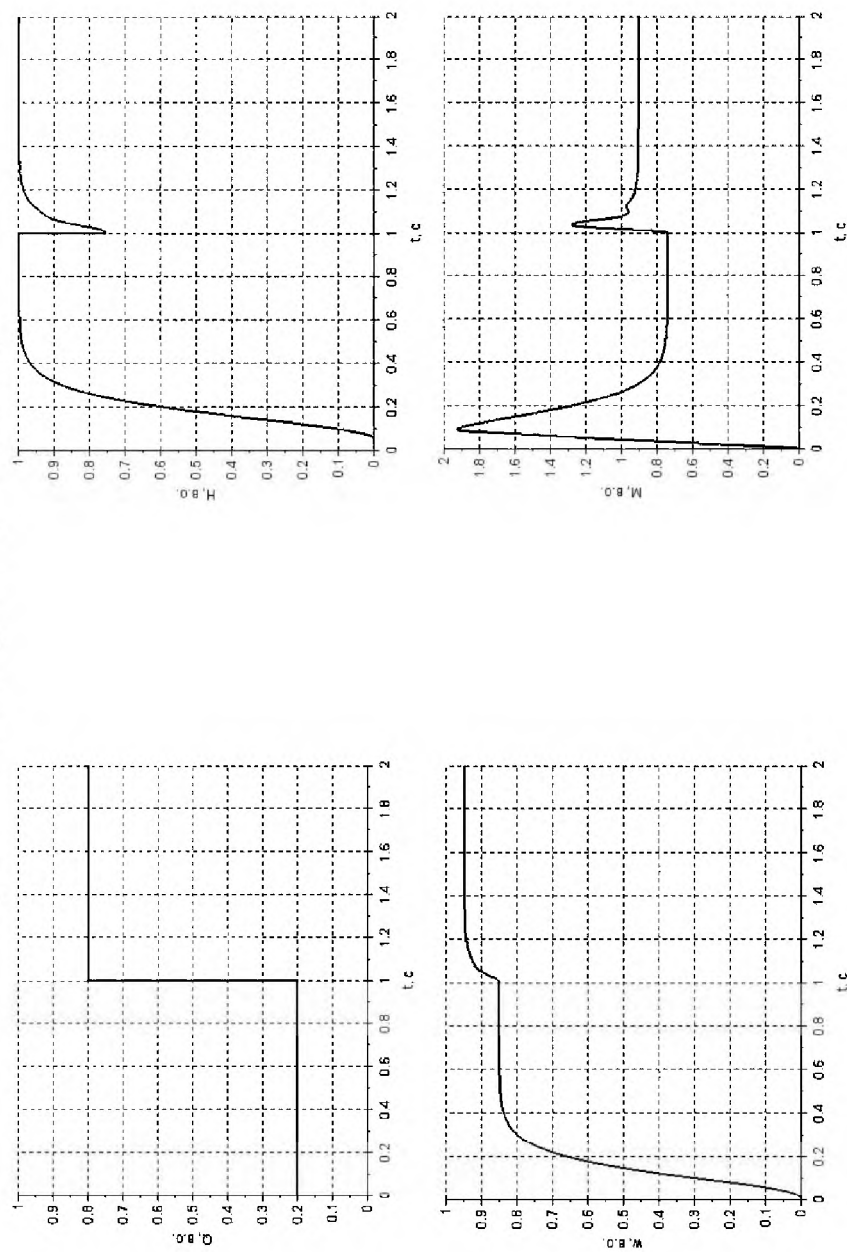


Рисунок Б.14 – Слайд 14 мультимедійної презентації

Висновки

- 1 Розглянуто типи насосних установок водопостачання та водовідведення, склад обладнання та режими роботи насосної установки. Проведено аналіз систем керування насосних установок. Виявлено, що в значній мірі тип насосної станції залежить від способу керування агрегатами, а остаточний вибір того чи іншого типу насосної станції зазвичай здійснюють шляхом техніко-економічного порівняння кількох варіантів. Аналіз способів регулювання режимів роботи насосних агрегатів показав, що найбільш поширеним на сьогоднішній день є регулювання частоти обертання роторів приводних двигунів, відповідно і робочих коліс насосів. Необхідне значення частоти обертання встановлюється системою керування автоматично в залежності від багатьох факторів. До числа факторів, що впливають на частоту обертання насоса, відноситься витрата води в системі.
- 2 Побудовано функціональну схему частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та обґрунтовано вибір її елементів. В роботі використано одноконтурну систему керування з негативним зворотним зв'язком за напором. Застосування перетворювача частоти дозволяє підтримувати тиск в гідросистемі незалежно від витрати за допомогою регулювання частоти обертання електродвигуна насоса, забезпечує ефективне використання асинхронного електродвигуна та його плавний пуск, виключає гідравлічні удари в гідросистемі.

Висновки

- 3 Розроблено динамічну модель частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки та виконано розрахунок параметрів її елементів. При побудові моделі асинхронного електропривода використано лінійну модель асинхронного електродвигуна, оскільки при стабілізації напору (тиску) система працює в малих відхиленнях щодо робочої точки стабілізації. При вирішенні завдання синтезу регулятора напору для автоматизованого електропривода насосної установки водопостачання, з умов забезпечення бажаного/необхідного перехідного процесу, в роботі виконано налаштування на модульний (технічний) оптимум.
- 4 Проведено моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода насосної установки в Scilab та проаналізовано якість керування. У результаті дослідження перехідних характеристик асинхронного електропривода насосної установки водопостачання при властивих їй зовнішніх впливах за допомогою програми Xcos з прикладного пакета Scilab було перевірено працездатність запропонованої системи електропривода. Аналізуючи отримані результати можна зазначити, що за умовами роботи пуск насосного агрегату, зміна тиску в мережі, не відбувається стрибкоподібно, а досить плавно і тривало. Модель системи швидко відпрацьовує заданий збурювальний вплив і повертається у вихідний стійкий стан із заданими показниками якості: $\sigma=0\%$, $t_p=0,456$ с.