

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повне найменування інституту, факультету)
Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 621.6.052

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **Сергій БОЙЧЕНКО**
(підпис) (ім'я, прізвище)

«_____» _____ 2023 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг інтелектуальних
електротехнічних та мехатронних комплексів»
зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)
на тему: «Електромеханічна система водопостачання житлового
багатоквартирного будинку»

Виконав:

Студент VI курсу, групи ОА-21мп Дорошенко Д. Р.
(шифр групи) (прізвище та ініціали) _____
(підпис)

Науковий керівник Д. Т. Н., професор Шевчук С. П.
(науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) _____
(підпис)

Нормоконтролер К. Т. Н., доцент Кулаковський Л.Я.
(науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) _____
(підпис)

Рецензент _____
(науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) _____
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2023 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повне найменування інституту, факультету)
Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Сергій** **БОЙЧЕНКО**
(підпис) (ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію

студенту _____ **Дорошенку Дмитру Романовичу**
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема дисертації «Електромеханічна система водопостачання житлового багатоквартирного будинку» науковий керівник дисертації
_____ **Шевчук Степан Прокопович, д. т. н., професор**
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання, посада)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____

2. Термін подання студентом дисертації «15 грудня 2023 р.
3. Об'єкт дослідження – режими роботи системи керування асинхронного електроприводу насосу.
4. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 1. Огляд технологічного процесу автоматичного підтримання тиску води у водопровідній системі
 2. Опис насосів та принципів їх роботи.
 3. Вибір і обґрунтування обладнання.
 4. Розрахунок параметрів і характеристик АД.
 5. Побудова природної механічної та електромеханічної характеристик АД.
 6. Розроблення системи скалярного керування насоса.

5. Орієнтовний перелік графічного матеріалу: 20-25 слайдів презентації.
6. Орієнтовний перелік публікацій:
1. Режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку
7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали, посада	Дата, підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проект	Шевчук Н. А., к.т.н., доцент		

8. Дата видачі завдання: «13» жовтня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Вибір і затвердження теми	13.10.23	виконано
2.	Підбір і ознайомлення з літературою	14.10.23-24.10.23	виконано
3.	Складання плану, розробка індивідуального завдання	25.10.23-30.10.23	виконано
4.	Поглиблене вивчення літературних джерел і написання теоретичної частини	31.10.23-7.11.23	виконано
5.	Збір і аналітична обробка матеріалу з теми дослідження	8.11.22-14.11.23	виконано
6.	Написання дисертації та її оформлення	15.11.23-15.12.23	виконано
7.	Подання магістерської дисертації до екзаменаційної комісії. Захист	16.12.23-10.01.24	виконано

Студент

Науковий керівник

(підпис)

(підпис)

Дмитро ДОРОШЕНКО

(ім'я, прізвище)

Степан ШЕВЧУК

(ім'я, прізвище)

Пояснювальна записка

до магістерської дисертації

на тему: «Електромеханічна система водопостачання житлового
багатоквартирного будинку»

Київ – 2023 року

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Електромеханічна система водопостачання житлового багатоквартирного будинку»: 86 с., 4 розділи, 39 рис., 22 табл., 41 джерело.

ВОДОПОСТАЧАННЯ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, НАСОС, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, СКАЛЯРНЕ КЕРУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ

Об'єкт дослідження – режими роботи системи керування асинхронного електроприводу насосу.

Мета роботи – створення енергоефективної системи водопостачання за допомогою використання керованого електроприводу.

Методи дослідження – узагальнення та аналіз щодо існуючих рішень використання регульованого електроприводу у системах водопостачання та вихідних даних, щодо параметрів будівлі, розробка на їх основі автоматизованої системи керування насосної станції.

У результаті роботи було досліджено принципи скалярного керування асинхронними двигунами. На основі закону Костенка М.П., було розраховано та побудовано механічні та електромеханічні характеристики АД для режиму без компенсації та з ІR-компенсацією.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у використанні регульованого електроприводу зі скалярною ІR-компенсацією у системі водопостачання .

ABSTRACT

Master's thesis on "Electromechanical water supply system of a residential apartment building": 86 p., 4 chapters, 39 figures, 22 tables, 41 sources.

WATER SUPPLY, FREQUENCY CONVERTER, PUMP, ASYNCHRONOUS
ELECTRIC DRIVE, SCALAR CONTROL, MODELING

The object of research - modes of operation of the control system of an asynchronous electric pump drive.

The purpose of the work - to create an energy-efficient water supply system by using a controlled electric drive.

Research methods - generalization and analysis of existing solutions for the use of a controlled electric drive in water supply systems and initial data on building parameters, development of an automated control system for a pumping station based on them.

As a result of the work, the principles of scalar control of induction motors were researched. Based on the law of Kostenko M.P., the mechanical and electromechanical characteristics of the motor were calculated and plotted for the mode without compensation and with IR compensation.

The scientific novelty of the results obtained is the use of a regulated electric drive with scalar IR compensation in the water supply system.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ПЧ – перетворювач частоти;

АД – асинхронний двигун;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МДН – метал-діелектрик-напівпровідник;

IGBT – біполярний транзистор з ізольованим затвором;

АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

ПЧН – перетворювач частота-напруга;

ПКП – прямий координатний перетворювач;

АІН – автономний інвертор напруги;

Зміст

Вступ.....	10
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА	12
1.1 Опис насосів та особливості їх роботи	12
1.1.1 Загальні відомості	12
1.1.2 Конструкція та основні параметри.....	14
1.2 Системи регульованих електроприводів насосів	17
1.3 Технологічний процес автоматичного підтримання тиску води у водопровідній системі.....	18
1.4 Загальні правила вибору насоса	22
Висновки з розділу 1	27
РОЗДІЛ 2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	28
2.1 Вибір двигуна	28
2.2 Вибір насосного агрегату	30
2.3 Вибір перетворювача частоти	31
2.4 Вибір і обґрунтування датчика тиску	34
2.5 Вибір контакторів та автоматів захисту	36
2.6 Розрахунок параметрів і характеристик АД	38
2.7 Розрахунок і побудова природної механічної та електромеханічної характеристик АД	42
Висновки з розділу 2	44
РОЗДІЛ 3 СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	46
3.1 Скалярне керування. Закон Костенко	46
3.2 Розрахунок і побудова механічних і електромеханічних характеристик АД для закону	48
3.3 Розрахунок і побудова природних механічних та електромеханічних характеристик замкненої системи "перетворювач частоти - асинхронний двигун" з IR-компенсацією.....	52
3.4 Розроблення системи скалярного керування насоса в системі MatLab ..	57
Висновки з розділу 3	68

РОЗДІЛ 4 СТАРТАП-ПРОЕКТ	69
4.1 Цілі та етапи реалізації стартап-проекту.....	69
4.2 Обґрунтування актуальності та новизна інноваційної ідеї стартап-проекту	70
4.3 Аналіз конкурентного середовища	71
4.4 SWOT – аналіз.....	72
4.5 Обґрунтування ресурсного забезпечення проекту	74
4.5 Ключові види діяльності	75
4.6 Обґрунтування рівня рентабельності (прибутковості) інноваційної ідеї.....	76
4.7 Обґрунтування вартості виробництва інноваційної техніки (технології).....	76
4.8 Цільові групи потенційних споживачів	78
4.9 Канали збуту.....	79
4.10 Бізнес-модель проекту	80
Висновки з розділу	80
ВИСНОВКИ	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	83

Вступ

Енергозбереження (або раціоналізація виробництва, розподілу та використання всіх видів енергії) стало останніми роками одним із основних пріоритетних напрямів технічної політики у всіх розвинених країнах світу. Енергозбереження у будь-якій сфері зводиться до зниження марних втрат. Аналіз структури втрат у сфері виробництва, розподілу та споживання електроенергії показує, що визначальна втрата (до 90%) припадає на сферу споживання [1].

Електропривод, будучи енергосиловою основою сучасного виробництва, споживає близько 60% усієї електроенергії, що виробляється, отже, основний ефект енергозбереження може бути отриманий у цій сфері. Більшість електроенергії споживається електроприводами на основі повсюдно використовуваних асинхронних двигунів (АД) з короткозамкненим ротором, для яких основним напрямком енергозбереження є перехід від нерегульованого електроприводу до регульованого. Цей напрямок прийнято у світовій практиці і інтенсивно розвивається, чому активно сприяють дві події, що збіглися в часі: дефіцит енергоресурсів, що намітився, і відчутне зростання їх вартості і видатні успіхи силової електроніки і мікроелектроніки.

Зі спектру різних рішень, що застосовуються для енергозбереження, одне з найбільш ефективних і швидкоокупних, що вимагають відносно невеликих капіталовкладень - впровадження високотехнологічної та наукомісткої енергозберігаючої техніки - частотно-регульованих асинхронних приводів, що дозволяють оптимізувати режими роботи турбомеханізмів у широкому діапазоні зміни навантаження. Відцентрові вентилятори, насоси та компресори об'єднуються в один клас навантажувальних механізмів для електроприводу, оскільки їх характеристики, з погляду вимог та умов роботи електроприводу, мають багато спільного. Традиційні способи регулювання подачі насосних і вентиляторних

установок полягають у дроселюванні напірних ліній та зміні загальної кількості працюючих агрегатів по одному з технологічних параметрів - тиску на колекторі або в диктуючій точці мережі, рівню в приймальному або регулюючому резервуарі та інших технологічних завдань та практично не враховують енергетичних аспектів транспорту води. Гідравлічне та електротехнічне обладнання насосних установок зазвичай вибирається за максимальними технічними параметрами (подачею, напором та ін.). Однак у реальному житті виявляється, що ці установки, що знову вводяться в експлуатацію, виходять на проектні режими протягом декількох років. Тому існуючі станції нерідко працюють у режимах, що відрізняються від розрахункових. Крім того, мають місце добові, тижневі та сезонні коливання витрат і напорів, обумовлені змінним водоспоживанням, в результаті цього робочі режими насосів виявляються поза робочими зонами їх характеристик. Тому з появою надійного регульованого електроприводу створилися передумови розробки принципово нової технології транспорту води чи газу з плавним регулюванням робочих параметрів насосної чи вентиляторної установок без непродуктивних витрат електроенергії і з широкими можливостями підвищення точності та ефективності технологічних критеріїв роботи систем подачі.

В даний час у приводах насосів використовуються асинхронні двигуни, які живляться від частотних перетворювачів. Таким чином, застосування регульованого електроприводу турбомеханізмів дозволяє створити нову технологію енергозбереження, в якій економиться не тільки електроенергія, але і зберігається теплова енергія і скорочується витрата води за рахунок її витоків при перевищенні тиску в магістралі, коли витрата мала. При частотному регулюванні насосів можна значною мірою уникнути аварійних ситуацій за рахунок запобігання гідравлічним ударами, що виникають при зміні режимів роботи та пуску системи при нерегульованому електроприводі.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Опис насосів та особливості їх роботи

1.1.1 Загальні відомості

Насосами називаються машини, що слугують для перекачування і створення напору рідин усіх видів, механічної суміші рідин із твердими і колоїдними речовинами та газів. Слід зауважити, що машини для перекачування і створення напору газів (газоподібних рідин) виділено в окремі групи і вони дістали назву вентиляторів і компресорів.

Насосні агрегати (насоси) застосовуються в усіх галузях промисловості, сільському та комунальному господарстві, на транспорті та в побутових цілях. Насоси належать до класу енергетичних машин, у яких механічна енергія приводу перетворюється на енергію потоку рідини (зокрема і з певним відсотком твердих включень).

За принципом дії насоси поділяються на дві основні групи: динамічні та об'ємні.

До динамічних відносять насосні агрегати, де рідина під впливом гідродинамічних сил переміщається в камері, що постійно сполучаються з входом і виходом насоса.

В об'ємних - переміщення робочого середовища здійснюється під впливом поверхневого тиску під час періодичної зміни об'єму насосної камери, що поперемінно сполучається з входом і виходом насоса. До групи динамічних відносять: лопатеві (відцентрові й осьові насоси), насоси тертя (вихрові, дискові, черв'ячні гідроструменеві), інерційні (вібраційні).

До об'ємних насосів також відносяться насоси зворотно-поступальної дії (поршневі, плунжерні), а також ротаційні (шестерні та гвинтові).

Відцентрові насоси класифікують за:

1) числом коліс (одноколісні, багатоколісні); крім того, одноколісні насоси виконують із консольним розташуванням вала - консольні;

2) напором (низького напору до 2 кгс/см^2 ($0,2 \text{ МН/м}^2$), середнього напору від 2 до 6 кгс/см^2 (від 0,2 до $0,6 \text{ МН/м}^2$), високого напору понад 6 кгс/см^2 ($0,6 \text{ МН/м}^2$));

3) способу підведення води до робочого колеса (з одностороннім входом води на робоче колесо, з двостороннім входом води (подвійного всмоктування);

4) розташуванню вала (горизонтальні, вертикальні);

5) способу роз'єму корпусу (з горизонтальним роз'ємом корпусу, з вертикальним роз'ємом корпусу);

6) способом відводу рідини з робочого колеса в спіральний канал корпусу (спіральні і турбінні). У спіральних насосах рідина відводиться безпосередньо в спіральний канал; у турбінних рідина, перш ніж потрапити в спіральний канал, проходить через спеціальний пристрій - напрямний апарат (нерухоме колесо з лопатками);

7) ступенем швидкохідності робочого колеса (тихохідні, нормальні, швидкохідні);

8) родом рідини, яку перекачують (водопровідні, каналізаційні, кислотні та лужні, нафтові тощо);

9) способом з'єднання з двигуном (приводні (з редуктором або зі шківом), безпосереднього з'єднання з електродвигуном за допомогою муфт). Насоси зі шківним приводом зустрічаються нині рідко [2].

1.1.2 Конструкція та основні параметри

Основними частинами відцентрового насоса (рис. 1.1) є: корпус 6 насоса зі всмоктувальним 1 і нагнітальним 3 патрубками. У середині корпусу є робоче колесо 4, жорстко посаджене на вал 2. У корпусі навколо робочого колеса змонтовано напрямний апарат 5.

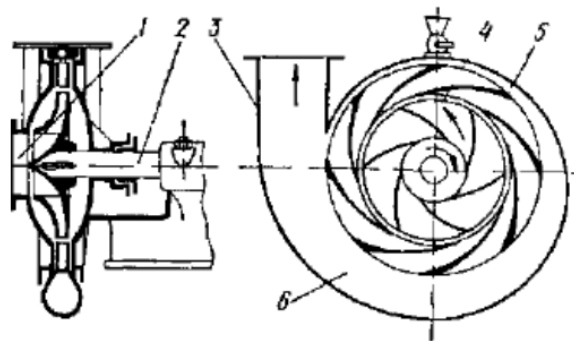


Рисунок 1.1 – Схема відцентрового насоса [3]

Корпус насоса з патрубками служить для підходу рідини до робочого колеса (рис. 1.2) і для відведення рідини після робочого колеса в нагнітальний трубопровід. Під час обертання робоче колесо своїми лопатями безпосередньо впливає на рідину, а також створює всередині насоса поле відцентрових сил завдяки енергії двигуна

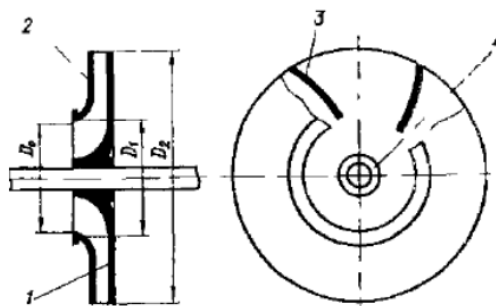


Рисунок 1.2 – Робоче колесо насоса

Зазвичай робоче колесо відцентрового насоса являє собою два диски: один плоский із втулкою, а другий має вигляд широкого кільця 2. Між дисками змонтовані лопаті 3 робочого колеса, що утворюють канали, які розширюються. У центральній частині колеса є втулка 4, за допомогою якої воно монтується на валу [4].

За своєю конструкцією робочі колеса бувають закритими або відкритими, тобто без покривного диска з відкритими лопатками. Лопатки можуть бути циліндричними або просторовими з поверхнею подвійної кривизни. Відкриті колеса, як правило, застосовуються за низьких тисків і особливо густих або забруднених рідин, що зручно в сенсі доступності каналів робочого колеса для очищення.

У нормальних відцентрових насосах колеса робляться закритого типу, оскільки відсутність покривного диска знижує створюваний колесом натиск і збільшує щілинні перетікання рідини. У закритих колесах обидва його диски зазвичай відливаються заодно з лопатками, хоча зустрічаються клепані колеса, переважно в малих розмірах.

На валу (рис 1.3) робоче колесо закріплюється зазвичай однією або двома шпонками, рідше за допомогою різьблення.

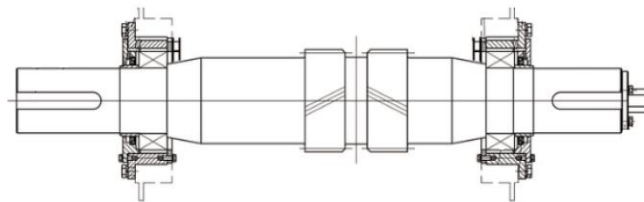


Рисунок 1.3 – Вал насоса [5]

Зважаючи на високі числа обертів відцентрових насосів, їхні вали розраховуються на критичне число обертів. Вали бувають жорсткі, якщо їхні робочі числа обертів лежать нижче за критичні, і гнучкі, якщо вони вищі за критичні.

Гнучкі вали в насосах застосовуються рідко. Для забезпечення спокійного ходу, а також можливості переходу через критичне число обертів ротор насоса, тобто вал із насадженими на нього деталями (колеса, муфта, диски), має бути ретельно статично, а іноді й динамічно відбалансований на особливих верстатах. Досить дуже невеликої невірноваженості обертових мас, щоб виникли коливання вала, що викликають додатковий його прогин, небезпечний для міцності вала.

Для приєднання арматури - манометра, вакуумметра, повітряних кранів для випускання повітря під час заливання насоса, заливальних пристроїв, спускних кранів - корпус забезпечується відповідними отворами.

Напрямний апарат у більшості випадків, крім суто спеціальних цілей, роблять литим із чавуну. Бронзовий апарат кращий у сенсі можливості отримання більш гладких поверхонь його каналів і легкості їхнього зачищення.

Виходячи з функціонального призначення насоса, визначальними технічними параметрами є подача і напір (тиск):

Подача - це об'єм рідини, що подається насосом за одиницю часу, вираженої в м³/год або л/сек. Позначається Q.

Напір - це різниця питомих енергій рідини в перерізах після і до насоса, виражена в метрах водного стовпа. Позначається H.

У насосах об'ємного типу користуються поняттям "тиск", вираженим в атмосферах (кгс/см²) або мегапаскалях (МПА) (один мегапаскаль дорівнює 10 атмосферам).

1.2 Системи регульованих електроприводів насосів

Технічний прогрес у царині регульованого асинхронного електроприводу став можливим із появою потужних напівпровідникових приладів - тиристорів (одноопераційних і замикаємих), потужних транзисторів (польові МОП-транзистори та біполярні транзистори з ізольованим затвором).

За нерегульованого електроприводу насосів можливі такі методи регулювання тиску у водопроводі системи водопостачання:

- підтримання тиску за допомогою додаткових резервуарів води на певній висоті. При цьому за допомогою насоса підтримується певний рівень води шляхом періодичного увімкнення і вимкнення двигуна насоса;

- регулювання вихідного напору з підвищувальної водонасосної станції шляхом переміщення засувки трубопроводу. При цьому двигун і насос працюють постійно з номінальною частотою обертання;

- ступінчасте регулювання кількості працюючих насосів паралельно або послідовно [6].

Перераховані методи мають недоліки:

- наявність дорогих споруд водяних резервуарів;
- втрати електроенергії при неповному навантаженні двигуна при дросельному регулюванні трубопроводу;
- наявність додаткових пристроїв для керування засувками.

Більш раціональним методом підтримання постійного тиску, регулювання витрати води (продуктивності насоса) є метод зміни частоти обертання колеса насоса. Регулюванням швидкості змінюються створювані напір і подача води.

Залежно від роду струму і різновидів приводних двигунів турбомеханізмів наявні системи для зміни тиску і продуктивності можна класифікувати так:

1. Приводні системи з двигунами постійного струму.
2. Регульовані приводні системи з синхронними двигунами.
3. Регульовані приводні системи з асинхронними короткозамкненими двигунами (АД) на базі механічних регуляторів швидкості та електромагнітних муфт.
4. Приводні системи з багатошвидкісними АД.
5. Регульовані приводні системи з асинхронними двигунами з фазним ротором.
6. Приводні системи з АД і регулятором напруги.
7. Приводні системи ПЧ АД.

Залежно від техніко-економічних показників при переведенні наявних нерегульованих електроприводів турбомеханізмів на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором на регульований електропривод найбільшою мірою доцільні приводні системи з регулятором напруги і приводні системи з перетворювачем частоти [7].

1.3 Технологічний процес автоматичного підтримання тиску води у водопровідній системі

Система подачі води складається з насоса 1, що приводиться в рух електродвигуном 2. Насос і електродвигун розміщені в будівлі насосної станції. Перетворювач частоти 3 керує електродвигуном. Тиск у водопровідній мережі

вимірюється датчиком тиску 4, сигнал зворотного зв'язку з якого надходить на ПЧ (рис. 1.4) [8].

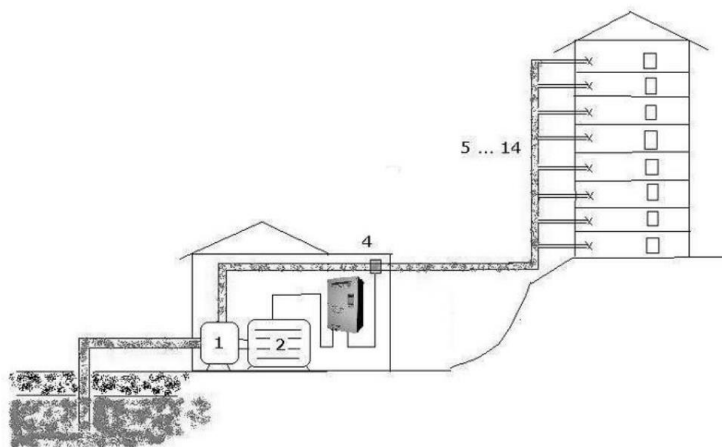


Рисунок 1.4 – Схема технологічного процесу

Задане значення тиску встановлюється на пультах керування ПЧ. Протягом доби витрата води Q значно змінюється (крани 5-14 відкриваються і закриваються). Максимальна (пікова) витрата води припадає на ранкові та вечірні години, тоді як вночі витрата практично нульова і вдень також невелика. Якщо діючий тиск води у водопровідній мережі за якоїсь витрати відрізняється від заданої, то перетворювач частоти плавно змінює швидкість обертання двигуна і насоса так, щоб за іншої витрати (споживання) забезпечити тиск у мережі. Таким чином, тиск у кранах підтримується постійним. Переваги використання ПЧ під час підтримання заданого тиску:

- зниження споживання електроенергії,
- унеможливлення гідроударів у мережі і, як наслідок, зниження кількості аварій на трубопроводах,
- усунення ударних навантажень на електричну мережу під час пуску електропривода.

Приблизний добовий графік водоспоживання представлений на рисунку 1.5.

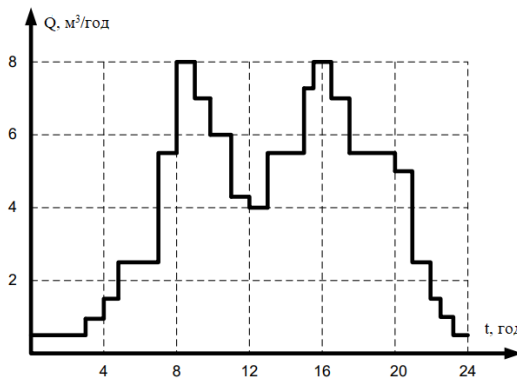


Рисунок 1.5 – Добовий графік водоспоживання [9]

Плавне регулювання продуктивності використовується, як правило, тільки для одного з наявних у складі установки насосних агрегатів. У разі нестачі діапазону регулювання (наприклад, потужність регульованого двигуна збільшується до максимальної, але це так і не призводить до потрібного збільшення тиску) відбувається зміна кількості ввімкнених у роботу насосних агрегатів (вмикається додатковий насосний агрегат, а потужність регульованого - починає знову плавно збільшуватися).

Застосування регульованого асинхронного електроприводу для керування насосними агрегатами може забезпечити:

- плавний пуск електродвигуна, відсутність механічних навантажень на двигун і стрибків струму в мережі;
- відсутність гідравлічних ударів;
- ефективне використання споживаної насосним агрегатом потужності в усьому діапазоні регулювання;

- забезпечення коефіцієнта потужності двигуна насоса на значенні, близькому до 1,0;
- зниження рівня шуму під час пуску та роботи;
- забезпечення автономної та безпечної роботи, інтеграція в АСК ТП.

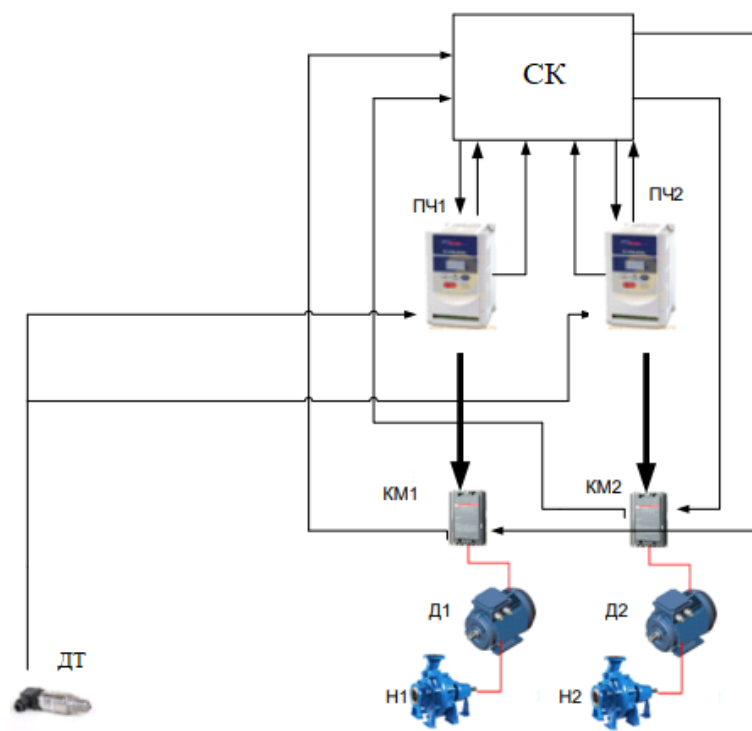


Рисунок 1.6 – Структурна схема АСК ТП насосної станції

СК – система керування, ПЧ – перетворювач частоти, Д – двигун, Н – насос, ДТ – датчик тиску.

За функціональним призначенням управління технологічним процесом поділяється на три рівні:

1. Верхній рівень - автоматизоване робоче місце оператора на базі пульта керування насосами (ПКН);

2. Середній рівень - реалізація оброблення інформації від вимірювальної системи нижнього рівня та формування керувального сигналу для виконавчих приводів (зокрема виконавчих елементів автоматики);

3. Нижній рівень - виконавчий електропривід, що входить до технологічного устаткування [10].

На верхньому рівні система керування виробляє технологічне завдання на рух робочих органів окремої технічної установки або цілої технологічної системи. Середній рівень забезпечує програмний рух виконавчих приводів, рух за заданою траєкторією в просторі керованих змінних. На нижньому рівні визначається технологічне обладнання, що безпосередньо бере участь у технологічному процесі, простір керованих і регульованих змінних технологічного обладнання.

1.4 Загальні правила вибору насоса

У загальному випадку під час вибору типу насосів і визначення кількості робочих агрегатів необхідно враховувати спільну роботу насосів, водоводів і мережі та керуватися такими міркуваннями:

1. Необхідно встановлювати якомога менше робочих насосів. Паралельна робота кількох насосів економічно не вигідна, тому вигідніше встановити великі насоси, що мають вищі ККД, ніж кілька середніх і малих. Крім того, сумарна подача декількох насосів при паралельній роботі на загальні водоводи завжди менша, ніж сума їхніх подач у разі роздільної роботи на цю систему.

2. Насоси повинні працювати в області найвищих значень ККД при тривалій подачі. Короткочасні витрати можуть подаватися з нижчим ККД.

3. Доцільно на насосних станціях встановлювати насоси одного типорозміру, що забезпечує взаємозамінність насосів, значно спрощує їхню експлуатацію і створює зручності для обслуговування. Однак вимоги економічності в багатьох випадках змушують відмовитися від застосування однотипних насосів. Низькі ККД насосів зумовлюються не тільки тим, що режимна точка насоса перебуває поза зоною оптимальних витрат, а й невідповідністю розвинутих насосами натисків потрібним напорам, оскільки під час зменшення витрати в мережі втрати напора на тертя зменшуються пропорційно квадрату витрати. Таким чином, для підвищення ККД насосної станції насоси потрібно підбирати на різні витрати за максимального ККД з урахуванням необхідних напорів, що призводить до необхідності встановлення різнотипних насосів.

4. Подача робочих насосів має бути достатньою для забезпечення максимальної витрати. Число резервних насосів приймається відповідно до класу насосної станції. Однак у будь-якому разі доцільно приймати не менше двох резервних агрегатів, оскільки за наявності одного резервного агрегату під час ремонту одного з робочих насосів станція залишається без резерву, а в разі аварії робочого насоса його нічим буде замінити.

Вимоги до надійності роботи насосної станції встановлюють залежно від призначення водопроводу. Відповідно до необхідного ступеня надійності безперебійного водопостачання водопровідні насосні станції підрозділяють на три класи:

I клас - не допускається перерва в роботі насосів, тому що це може призвести до значних збитків, ушкодження технологічного устаткування та порушення складного технологічного процесу;

II клас - допускається короткочасна перерва в роботі насосів на час, необхідний для ввімкнення резервних агрегатів, що спричиняє зменшення випуску продукції та простоювання технологічного устаткування;

III клас - допускається перерва в роботі насосів на час, необхідний для ввімкнення резервних агрегатів, що спричиняє зменшення випуску продукції і простої технологічного устаткування.

Резервні насоси приймаються з характеристикою, що відповідає найбільшому насосу, встановленому на насосній станції [11].

Визначення потужності приводного двигуна. Вихідними даними для визначення необхідної потужності електродвигуна (кВт) є секундна подача насоса Q ($\text{м}^3/\text{с}$) і напір H (м). Подачу і напір насоса приймають за режимною (робочою) точкою роботи системи "насос-мережа".

Потужність на валу насоса зазвичай вказують у паспорті насоса або в каталозі. Її величина, взята із запасом, відповідає подачі і напору для граничних точок робочої частини характеристики цього типу насоса.

Однак не завжди розрахункові параметри подачі і напору збігаються з параметрами характеристики $H=f(Q)$. У цих випадках виникає необхідність у визначенні потужності на валу насоса і необхідної потужності приводного двигуна. У таблиці 1.1 вказано кількість резервних агрегатів на станції.

Таблиця 1.1 – Кількість резервних агрегатів в залежності від класу насосної станції [12]

Число робочих агрегатів	Клас станції		
	I	II	III
1	2	1	1
2...3	2	1	1
4...6	2	2	1
7...9	3	3	2
10 <	4	4	3

Потужність насоса визначається за формулою:

$$N_H = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_H}; \quad (1.1)$$

де η_H – ККД насоса за роботи в даному режимі.

Потужність приводного двигуна насоса приймають більшою за потужність, споживану насосом, на випадок перевантажень від неврахованих умов роботи:

- при безпосередньому з'єднанні вала насоса з валом електродвигуна:

$$N_H = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_H} m; \quad (1.2)$$

- при з'єднанні приводного двигуна насоса через проміжну передачу:

$$N_H = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_H \cdot \eta_{пр}} m; \quad (1.3)$$

Де, m – коефіцієнт запасу потужності,

$\eta_{\text{пр}}$ – ККД передачі, що приймається за паспортом.

Відповідно до ДСТУ 4132-2002 коефіцієнт запасу потужності m приймають залежно від потужності на валу насоса N_H (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Коефіцієнт запасу потужності [13]

N_H	До 20	20..50	50..300	Більше 300
m	1,25	1,2	1,15	1,1

Коефіцієнт запасу потужності залежить також від співвідношення потужності на валу насоса за розрахункових значень подачі та напору, а також найближчого значення потужності двигуна, який виготовляє вітчизняна електропромисловість, паспортні дані якого відповідають умовам роботи насосного агрегату [14].

Під час визначення потужності на валу насоса подачу насоса зазвичай приймають найбільшу з розглянутих режимів роботи насосної станції. Під час вибору електродвигуна до насосів необхідно знати потужність, частоту обертання, напругу в мережі живлення, тип і виконання двигуна. Кожен двигун незалежно від його типу характеризується номінальними даними. Номінальний режим двигуна відповідає максимальному ККД і задовольняє встановленим нормам і вимогам щодо нагрівання, коефіцієнта потужності ($\cos\phi$), електричної міцності тощо. Тому під час підбору електродвигуна необхідно прагнути підібрати потужність двигуна якомога ближче до номінальної.

Поряд із тиристорними регуляторами напруги поширення в сучасній практиці водопостачання та водовідведення набули такі види регульованого електроприводу:

- частотний із перетворювачем на транзисторних IGBT-модулях;

- за схемою асинхронно-вентильного каскаду;
- за схемою вентильного двигуна;
- з індукторними муфтами ковзання;
- із гідромуфтами;
- із гідравлічними варіаторами.

Кожен із названих регульованих приводів має свої переваги та недоліки. Їхній вибір здійснюється на основі вивчення складу обладнання насосної установки, аналізу режиму її роботи у взаємозв'язку з режимом роботи водопровідних і каналізаційних мереж та інших насосних установок, що подають воду у водопровідну мережу. Регульований електропривод слід використовувати у складі системи автоматизованого керування режимами роботи насосної установки.

Висновки з розділу 1

У розділі 1 було виконано огляд насосів та принцип їх роботи, переваги та недоліки різних видів насосних агрегатів.

Наведені переваги використання регульованого електроприводу у насосних системах (зниження споживання електроенергії, унеможливлення гідроударів у мережі, усунення ударних навантажень) та різні їх види.

Описаний технологічний процес автоматичного підтримання тиску води у водопровідній системі та запропонована структурна схема АСК ТП.

Поставлено завдання вибору електроприводу на основі вивчення складу обладнання насосної установки, аналізу режиму її роботи.

РОЗДІЛ 2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір двигуна

За заданою кількістю у 3500 мешканців 12-поверхового будинку визначимо розрахункове добове споживання води:

$$Q_{\text{доб.м}} = \frac{\sum q_{\text{ж}} N_{\text{ж}}}{1000} \quad (2.1)$$

де, $q_{\text{ж}}$ – середньодобова норма споживання, л/добу, на одного жителя, приймаємо 250 л/добу відповідно до таблиці 1 ДБН В.2.5-74:2013 [15];

$N_{\text{ж}}$ – розрахункова кількість мешканців в районах житлової забудови з різним ступенем благоустрою;

$$Q_{\text{доб.м}} = \frac{250 \cdot 3500}{1000} = 875 \text{ м}^3/\text{добу}$$

Максимальне добове водоспоживання визначається за формулою:

$$Q_{\text{доб.мах}} = K_{\text{доб.мах}} \cdot Q_{\text{доб.м}} \quad (2.2)$$

де $K_{\text{доб}}$ – коефіцієнт добової нерівномірності водоспоживання, що враховує уклад життя населення, режим роботи підприємств, ступінь благоустрою будівель, зміни водоспоживання за сезонами року і днями тижня, приймаємо $K_{\text{доб.мах}} = 1,3$ [15]

$$Q_{\text{доб.мах}} = 1,3 \cdot 875 = 1137,5 \text{ м}^3/\text{добу}$$

Розрахункова максимальна годинна витрата води $q_{\text{год}}$, м³/год, визначається за формулою:

$$q_{\text{год.мах}} = \frac{K_{\text{год.мах}} \cdot Q_{\text{доб.мах}}}{24} \quad (2.3)$$

Коефіцієнт годинної нерівномірності водоспоживання $K_{\text{год.мах}}$ визначається з виразу:

$$K_{\text{год.мах}} = \alpha_{\text{мах}} \cdot \beta_{\text{мах}} \quad (2.4)$$

де: α — коефіцієнт, що враховує ступінь благоустрою будівель, режим роботи підприємств та інші місцеві умови, що приймається у межах $\alpha_{\text{мах}} = 1,2—1,4$

β — коефіцієнт, що враховує кількість жителів у населеному пункті, приймається за таблицею 2 ДБН В.2.5-74:2013.

$$K_{\text{год.мах}} = 1,3 \cdot 1 = 1,3$$

$$q_{\text{год.мах}} = \frac{1,2 \cdot 1137,5}{24} = 56,8 \text{ м}^3/\text{год}$$

За отриманим значенням $q_{\text{год.мах}}$ буде розраховуватись потужність обладнання.

За формулою визначимо необхідну розрахункову потужність, для подальшого вибору обладнання (насос, двигун, ПЧ):

$$P_P = K_3 \frac{p \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot 3600 \cdot \eta} = 1,1 \frac{1000 \cdot 9,8 \cdot 56,8 \cdot 36}{1000 \cdot 3600 \cdot 0,9} = 6,87 \text{ кВт} \quad (2.5)$$

$$P_H \geq P_P = 6,87 \text{ кВт}$$

З каталогу вибираємо двигун АИР 180S2 з наступними параметрами (табл. 2.2):

Таблиця 2.2 – Параметри двигуна

$P_{\text{ном}},$ кВт	$n_{\text{ном}},$ об/хв	ККД	$I_{\text{ном}},$ А	$M_{\text{ном}},$ Нм	$M_{\text{пуск}}/$ $M_{\text{ном}}$	$I_{\text{пуск}}/$ $I_{\text{ном}}$	$M_{\text{макс}}/$ $M_{\text{ном}}$	$J,$ кг*м ²
22	1500	0,905	41	71,463	2,0	7,5	2,3	0,062

Режим роботи - тривалий S1; Термічний клас ізоляції обмоток F - до 150°C;
 Тип корпусу - чавун/силумін/алюміній; Ступінь захисту від вологи та пилу - IP54;
 Діаметр жили обмотувального дроту - 1,32 мм; Вага мідної проводки - 12,7 кг;

2.2 Вибір насосного агрегату

Обираємо насос ЦНС 60-66 за номінальною потужністю двигуна 22 кВт з параметрами, наведеними у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри насоса

Q, м ³ /год	H, м	P, кВт	N, об/хв	ККД	Кавіт. запас	Число ступенів
60	66	22	1500	0,69	<4,5	2

Відцентрові насоси мають такі переваги: малі габарити; відносно невелика вартість; відсутність клапанів і деталей: зі зворотно-поступальним рухом; можливість прямого приєднання до швидкохідних двигунів; плавна зміна подачі насоса зі зміною гідравлічного опору труби; можливість пуску насоса за зачиненої засувки на нагнітальній лінії без загрози пориву засувки або трубопроводу; простота автоматизації насосних станцій.

2.3 Вибір перетворювача частоти

З погляду енергетики основним параметром електропривода є його потужність. Тому під час вибору перетворювача частоти насамперед необхідно визначити вимоги до його навантажувальної здатності. Другим важливим параметром перетворювача є вимоги до напруги мережі живлення. Як правило, перетворювачі живляться від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В, розкид +10% / -15%. Нині існує велика кількість різних перетворювачів частоти. Провідні позиції серед них займають перетворювачі таких фірм, таких як "Siemens", "ABB", "Danfoss", "Omron", "Mitsubishi", "Schneider Electric", "Delta Electronics".

Вибираємо ПЧ за умови [16]:

$$P_{\text{н.пч}} \geq 1,25 \cdot P_{\text{н.дв}}$$

$$I_{\text{н.пч}} \geq 1,25 \cdot I_{\text{н.дв}}$$

Перетворювач частоти VFD-CP2000 30кВт (VFD300CP43B-21), параметри якого наведені у таблиці 2.4

Таблиця 2.4 – Технічні параметри ПЧ

Номінальна потужність	30 кВт
Кількість фаз/напруга на вході	3/380 В
Кількість фаз/напруга на виході	3/380 В
Номінальний Струм	60А
Максимальна вихідна частота	400 Гц
Ступінь захисту по IP	20
ЕМС фільтр	+
Тормозний модуль	+
Вбудований ПЛК	+
Вбудований ПІД	+
Скалярний режим керування	+
Векторний режим керування без енкодера	+
Лінійний закон управління U/f	+
Квадратичний закон управління U/f^2	+
Число/тип аналогових входів	3(1: 0-10V; 2: 0-10V або 0(4)-20mA)
Число дискретних входів	2
Кількість релейних виходів	3
Максимальна кількість фіксованих швидкостей	16
Кількість дискретних виходів	0

Перетворювач може працювати як у ручному, так і в автоматичному режимі. В обох режимах передбачено місцеве або дистанційне керування.

У ручному режимі керування здійснюється оператором з місцевого або дистанційного пульта без зворотного зв'язку. Для зручності користувача в перетворювачі є можливість підключення зовнішнього задавального аналогового пристрою - потенціометра. Спостереження за параметрами робочого процесу (подача, натиск, тиск, розрядження) здійснюється оператором за вимірювальними приладами. Точність підтримання швидкості в ручному режимі становить $\pm 2\%$ - 3% . Діапазон керування швидкістю дорівнює 1:20 [17].

Краще з погляду якості управління параметрами робочого процесу використовувати автоматичний режим зі зворотним зв'язком за регульованим параметром. Для вимірювання параметрів процесу можна використовувати всі відомі датчики фізичних величин аналогового типу. Вихідний струмовий сигнал датчика може бути від 4 мА до 20 мА, сигнал за напругою - від 0 В до 10 В.

В автоматичному режимі зі зворотним зв'язком у перетворювачі реалізується ПД-закон регулювання. Для оперативного налаштування параметрів регулятора під необхідний технологічний процес є можливість керувати коефіцієнтами зворотного зв'язку. Використання ПД-регулятора дає змогу підтримувати задані параметри практично без похибки. У перетворювачі для виключення ударних навантажень на двигун і механічну частину приводу є функція плавного пуску. Наявна можливість виставити час розгону або гальмування електродвигуна незалежно один від одного в межах від 0,1 с до 3600 с.

2.4 Вибір і обґрунтування датчика тиску

Пристрої одержання інформації про стан технологічного процесу призначені для збирання і перетворення інформації без зміни її змісту про контрольовані та керовані параметри ТП. Входом пристроїв є природні або уніфіковані сигнали, виходом - відповідні значення уніфікованих сигналів.

До пристроїв для отримання інформації про стан процесу, що утворюють канал збирання та перетворення інформації, відносять чутливі елементи або власне датчики.

Датчики фізичних величин сприймають контрольований параметр і перетворюють його на величину, зручну для передавання каналами зв'язку або подальшого перетворення.

Основними характеристиками вимірювальних пристроїв для отримання інформації про стан ТП є: вхідна величина, що сприймається і перетворюється датчиком; вихідна величина, яка використовується для передавання інформації; статична і динамічна характеристики датчика; поріг чутливості; основна і додаткові похибки [18].

У цьому ТП як вимірювальний пристрій використовують датчик тиску подачі води.

Вхідна величина Q , що надходить на вхід датчика, належить до класу вхідних величин датчика, що характеризують перебіг процесу. Вихідна величина, яка використовується для передачі інформації, моделюється за амплітудою. Динамічна характеристика датчика визначає поведінку датчика під час зміни вхідної величини і визначається внутрішньою структурою датчика та його елементів.

Точність вимірювань тиску води характеризують такі чинники:

- поріг чутливості датчика - мінімальна зміна вхідної величини, що спричиняє зміну вихідного сигналу;

- основна похибка датчика - максимальна різниця між одержуваною за нормальних експлуатаційних умов величиною вихідного сигналу та його номінальним значенням, яку визначають за статичною характеристикою для цієї вхідної величини;

- додаткові похибки датчика - похибки, які спричиняють зміни зовнішніх умов порівняно з нормальними умовами (температурна похибка та ін.).

Обираємо датчик Schneider Electric 5 бар 4-20мА, G1/4 з наступними технічними параметрами (табл. 2.5):

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики датчика тиску

Номінальний тиск	5 бар
Контрольоване середовище	Прісна вода (0...125 °C) Повітря (-15...125 °C) Газ (-15...125 °C)
Електричне підключення	1 штекерний роз'єм EN 175301-803-A (ex DIN43650), 3 контакти
Номінальна напруга живлення	12...24 В постійного струму
Тип вихідного сигналу	Аналоговий
Функція аналогового виходу	4 ... 20 мА, 2-провідний

2.5 Вибір контакторів та автоматів захисту

За номінальним струмом та потужністю двигуна був вибраний контактор Siemens SIRIUS 3RT10 (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Технічні параметри контактора

Температура навколишнього середовища	-25...+60 °C
Ступінь захисту IP	20
Робочий струм при АС-1 при 400 В	60 А
Робочий струм при АС-3 при 400 В	50 А
Експлуатаційна потужність при 400В при АС-3	22 кВт
Керуюча напруга живлення при змінному струмі	110 В
Частота напруги живлення ланцюга управління	50 Гц

Також було обрано автоматичні вимикачі ВА-57-35 (рис. 2.1), які призначені для захисту проводів, кабелів, електрообладнання від короткого замикання і перевантажень [19].



Рисунок 2.1 – Автомат захисту ВА-57-35

Автоматичний вимикач ВА 57-35 (16...100А) - триполюсний, з тепловим розчеплювачем струмів перевантаження та електромагнітним розчеплювачем струмів короткого замикання, застосовується для вимикання струму в разі аварійних ситуацій (перевантажень, коротких замикань та неприпустимих знижень напруги), а також для нечастих (до 30 разів на добу) увімкнень та вимкнень електричних ланцюгів [20].

Тип автомата ВА 57-35

Номінальний струм 16 А ... 100 А

Кліматичне виконання за - УХЛЗ

Зносостійкість вимикача:

- загальна кількість циклів 16000;
- кількість циклів під навантаженням 10000

Номінальна змінна напруга мережі 50 Гц – до ~660 В

Номінальна постійна напруга 220 В

2.6 Розрахунок параметрів і характеристик АД

Для розрахунку електромеханічних і механічних характеристик асинхронного двигуна необхідно скористатися його математичною моделлю, яка в загальному випадку подається різними схемами заміщення. Найбільш простою і зручною для розрахунків асинхронного двигуна є Т-подібна схема заміщення.

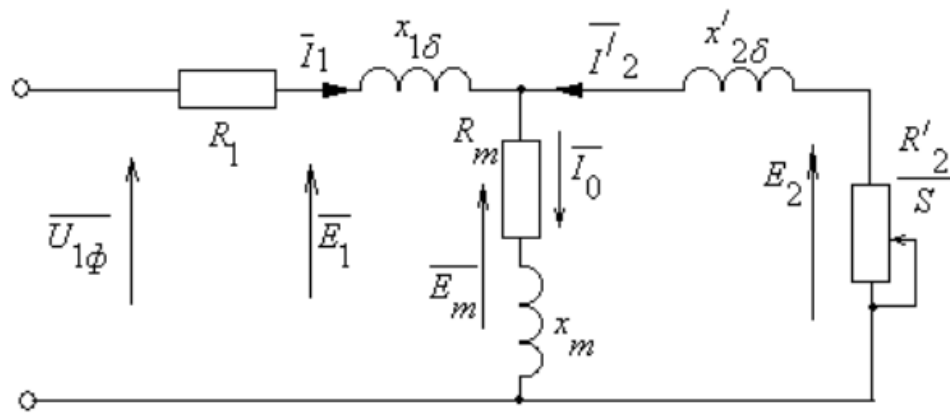


Рисунок 2.2 – Т-подібна схема заміщення АД [21]

$U_{1\phi}$ - фазна напруга, що підводиться до обмотки статора двигуна;

I_1 - струм обмотки статора;

R_1 - активний опір обмотки статора;

$X_{1\sigma}$ - індуктивний опір розсіювання обмотки статора;

I_2' - приведений струм обмотки ротора до обмотки статора;

R_2' - приведений активний опір ланцюга обмотки ротора до ланцюга обмотки статора;

X_2' - приведений індуктивний опір розсіювання ланцюга обмотки ротора до ланцюга обмотки статора;

I_0 - струм холостого ходу (намагнічування);

X_m - індуктивний опір контуру намагнічування;

Основні рівняння асинхронного двигуна, які відповідають даній схемі:

Векторна діаграма струмів, ЕРС і напруг зображена на рисунку 2.3.

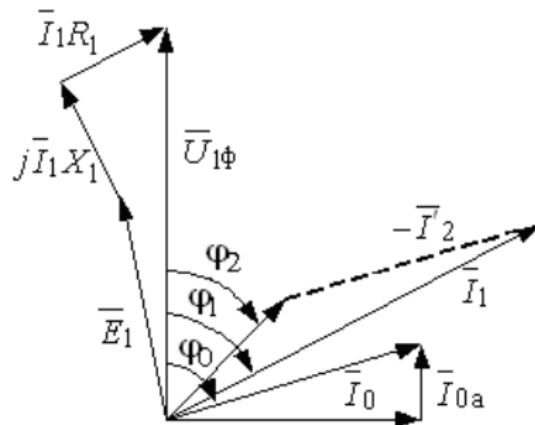


Рисунок 2.3 – Векторна діаграма асинхронної машини

Знайдемо синхронну частоту обертання та номінальне ковзання:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ рад/с}$$

$$s_H = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1465}{1500} = 0,023$$

Струм холостого ходу АД визначається за формулою:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_{ж} \cdot I_{1H} \cdot \frac{1 - S_H}{1 - p_{ж} \cdot S_H}\right)^2}{1 - \left(p_{ж} \cdot \frac{1 - S_H}{1 - p_{ж} \cdot S_H}\right)^2}}, \quad (2.6)$$

Де $p_{ж} = 0,75$ – коефіцієнт завантаження двигуна.

Струм статора при частковому навантаженні

$$I_{11} = \frac{p_{ж} \cdot P_{н}}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_{pж} \cdot \eta_{нрж}} = \frac{0,75 \cdot 22000}{3 \cdot 380 \cdot 0,86 \cdot 0,92} = 18,2 \text{ A} \quad (2.7)$$

Відносний коефіцієнт потужності при частковому навантаженні $\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi} = 0,98$ (рис. 2.4).

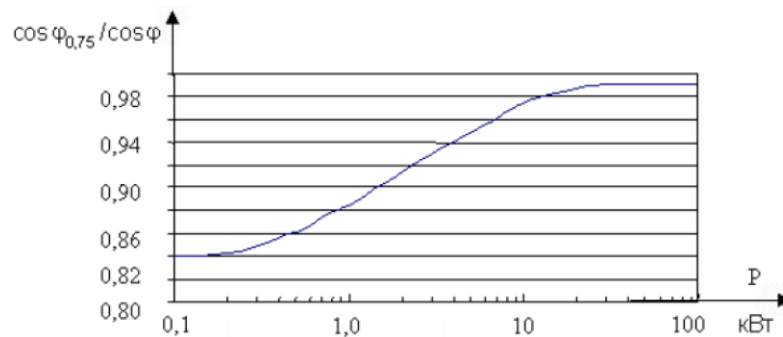


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнта потужності від навантаження двигуна

Номінальний струм двигуна:

$$I_{1н} = \frac{P_{н}}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{н}} = \frac{22000}{3 \cdot 380 \cdot 0,85 \cdot 0,91} = 24,9 \text{ A} \quad (2.8)$$

Звідси:

$$I_0 = 5,61 \text{ A}$$

З формули Клосса визначимо співвідношення для розрахунку критичного ковзання. У першому наближенні приймаємо $\beta = 1$

$$S_K = S_H \cdot \frac{k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 - [1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)}$$

$$= 0,023 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - [1 - 2 \cdot 0,023 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,023 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1)} = 0,107 \quad (2.9)$$

Знайдемо значення коефіцієнтів:

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2k_i \cdot I_{1H}} \right) = 1 + \left(\frac{5,61}{2 \cdot 7,5 \cdot 24,9} \right) = 1,015 \quad (2.10)$$

$$A_1 = m \cdot U_{1H}^2 \cdot \frac{1 - S_H}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_H} = 3 \cdot 380^2 \cdot \frac{1 - 0,023}{2 \cdot 1,015 \cdot 2,3 \cdot 22000} = 4,12 \quad (2.11)$$

Тепер можна визначити активний опір ротора, приведений до обмотки статора асинхронного двигуна:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{S_K} \right) \cdot C_1} = \frac{4,12}{\left(1 + \frac{1}{0,107} \right) \cdot 1,015} = 0,39 \text{ Ом} \quad (2.12)$$

Активний опір обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,015 \cdot 0,39 \cdot 1 = 0,396 \text{ Ом} \quad (2.13)$$

Визначимо параметр γ , який дає змогу знайти індуктивний опір короткого замикання x_{KH} [22]:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{S_K^2} \right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,107^2} \right) - 1^2} = 9,31 \quad (2.14)$$

Індуктивний опір короткого замикання x_{KH} :

$$x_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 3,68 \text{ Ом} \quad (2.15)$$

$$x_{2H}' = 0,58 \cdot \frac{x_{KH}}{C_1} = 2,1 \text{ Ом} \quad (2.16)$$

$$x_{1H} = 0,42 \cdot x_{KH} = 1,54 \text{ Ом} \quad (2.17)$$

$$S_{k1} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_{KH}^2}} = 0,107 \quad (2.18)$$

Знайдемо ЕРС намагнічування E_1 , наведену потоком повітряного зазору в обмотці статора в номінальному режимі [23]:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin\varphi - x_{1H} \cdot I_{1H})^2} \\ &= \sqrt{(380 \cdot 0,85 - 0,396 \cdot 24,9)^2 + (380 \cdot 0,493 - 1,54 \cdot 24,9)^2} = 364 \text{ В} \end{aligned}$$

Індуктивний опір намагнічування:

$$x_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{364}{5,61} = 65 \text{ Ом} \quad (2.19)$$

2.7 Розрахунок і побудова природної механічної та електромеханічної характеристик АД

Знайдемо синхронну кутову швидкість:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.20)$$

Розрахуємо і побудуємо природну електромеханічну характеристику:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin\phi_2} \quad (2.21)$$

$$\sin\phi_2 = \frac{x_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{\omega - \omega_0}\right)^2 + x_{KH}^2}} \quad (2.22)$$

$$I_2' = \frac{U_{1H}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{\omega - \omega_0})^2 + (\frac{x_{1H} + x_{2H}'}{\omega_0})^2}} \quad (2.23)$$

За вищенаведеними формулами розраховується природна електромеханічна характеристика, наведена на рисунку 2.5:

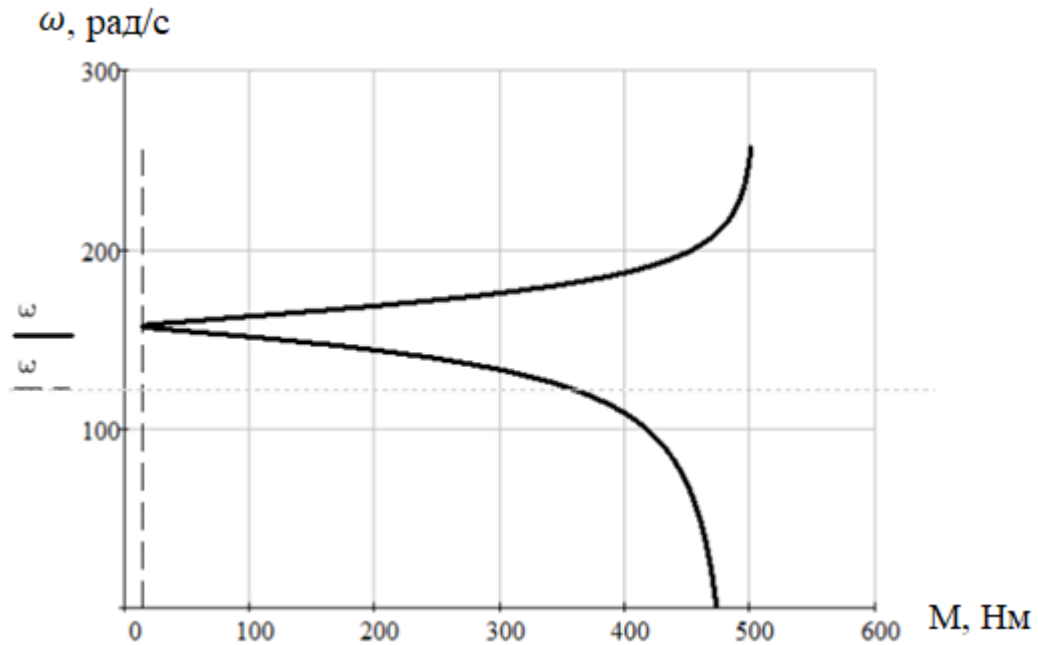


Рисунок 2.5 – Природна електромеханічна характеристика АД

Розрахуємо і побудуємо природну механічну характеристику за формулою:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \cdot \left[(R_1 + \frac{R_2'}{\omega - \omega_0})^2 + x_{кн}^2 \right]} \quad (2.24)$$

Розрахуємо контрольні точки механічної характеристики за паспортними даними:

Номінальна швидкість: $\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H) = 157,08 \cdot (1 - 0,023) = 153,46 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

Номінальний момент: $M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{22000}{153,46} = 241,77 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

Критичний момент: $M_K = M_H \cdot k_{max} = 143,36 \cdot 3,5 = 844,12 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

Пусковий момент: $M_{\Pi} = 2M_K \cdot S_{K1} = 2 \cdot 329,7 \cdot 0,107 = 302,19 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

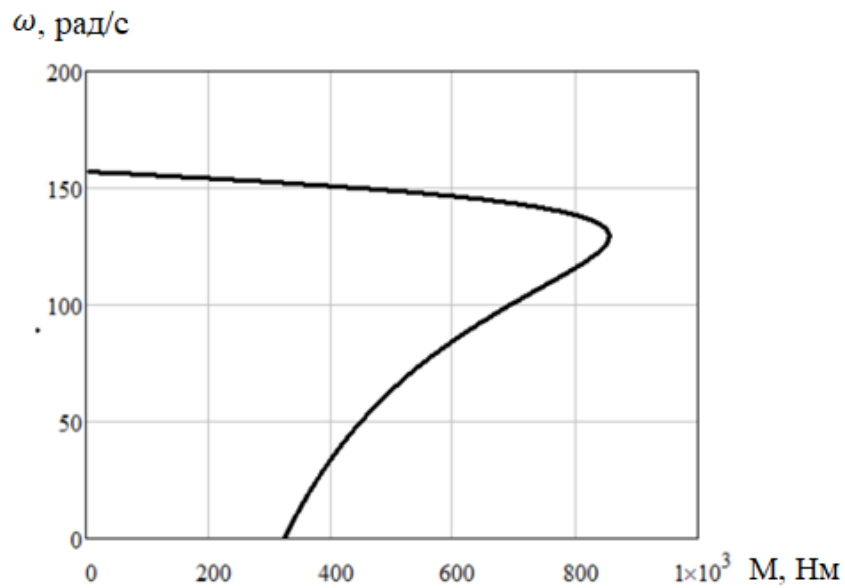


Рисунок 2.6 – Природна механічна характеристика асинхронного двигуна

Висновки з розділу 2

У розділі 2 виконаний та обґрунтований вибір наступного обладнання: електропривод АИР 180S2, насосний агрегат ЦНС 60-66, перетворювач частоти VFD-CP2000, датчик тиску Schneider Electric 4 бар 4-20мА, G1/4, контактор Siemens SIRIUS 3RT10, автоматичний вимикач ВА 57-35.

Розраховані параметри і характеристика АД за допомогою математичної моделі на основі Т-подібної схеми заміщення, побудовані природна механічна та електромеханічна характеристики АД.

РОЗДІЛ 3 СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Скалярне керування. Закон Костенко

Закон регулювання М. П. Костенка зазвичай розглядають у застосуванні до вентиляторного навантаження, тобто до таких видів моменту статичного опору, які залежать від швидкості або з точністю до ковзання - від частоти [24]:

$$\omega = \omega_{1н}(\alpha - \beta) \approx \omega_{1н\alpha} = \frac{\pi}{p} f_1 \quad (3.1)$$

Підставляючи у формулу відповідну залежність статичного моменту:

$$M_{ст} = M_{н} \left(\frac{\omega}{\omega_{н}} \right)^k \quad (3.2)$$

отримаємо в окремих випадках формули:

За постійного моменту:

$$\frac{f_1}{f_{1н}} = \frac{U_1}{U_{1н}} \quad (3.3)$$

За постійної потужності:

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \sqrt{\frac{f_1}{f_{1н}}} \quad (3.4)$$

За простого вентиляторного навантаження:

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \left(\frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 \quad (3.5)$$

Ці закони є фактичним стандартом, закладеним в усі сучасні перетворювачі частоти широкого застосування. Механічні характеристики виробничих механізмів і електроприводів за законів керування наведено на рисунку 3.1.

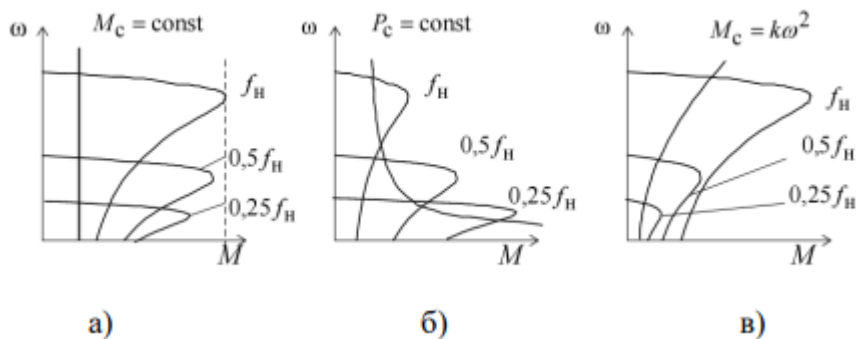


Рисунок 3.1 – Механічні характеристики виробничих механізмів і електроприводів за законів керування [25]

Закон регулювання М. П. Костенка можна розглядати по різному залежно від способу його реалізації. У первісному розумінні, в якому його часто розглядають і тепер, він відноситься до управління за розімкненим циклом і говорить про те, як треба змінити напругу, якщо двигун працюватиме не за номінальної частоти, а за нового, зниженого її значення [26]. При визначенні нового значення напруги потрібно враховувати властивості навантаження. Якщо воно зі зменшенням частоти також зменшується через супутнє майже пропорційно частоті зменшення швидкості обертання, то немає сенсу зберігати потік двигуна на тому ж рівні. Його можна зменшити настільки, щоб тільки зберегти старий номінальний коефіцієнт статичної перевантаженості, тобто запас статичної стійкості. Зменшення потоку за того ж запасу стійкості дасть змогу зменшити втрати в сталі двигуна.

Характерною і принциповою особливістю цього закону в узагальненому сенсі є регулювання напруги і, отже, потоку двигуна безперервно, відповідно до змін моменту навантаження на валу двигуна.

3.2 Розрахунок і побудова механічних і електромеханічних характеристик АД для закону

Розрахунок характеристик для частот $f_1 = 50; 30; 20; 15$ Гц за закону регулювання $Z_p = \frac{U_{1н}}{f^2} = 0,088$ виконаний у середовищі MathCad 15.

Побудова електромеханічних характеристик виконується за виразом [27]

$$I_2'(s, f) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2(f) + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu н} \cdot f_{1*}(f)}\right)^2}},$$

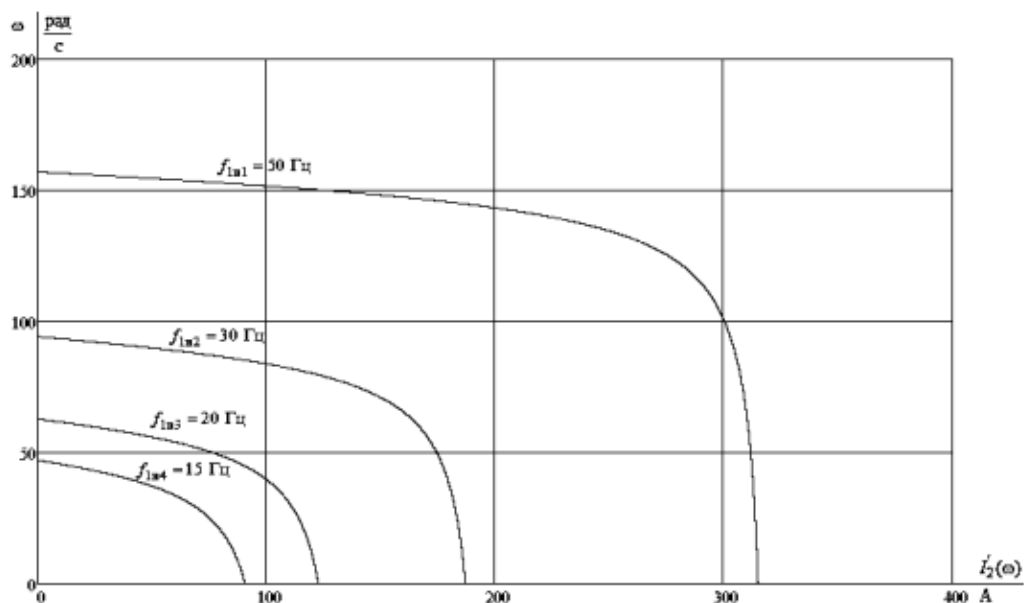


Рисунок 3.2 – Штучні електромеханічні характеристики $I_2'(\omega)$ для закону

$$\text{керування } \frac{U_1}{f^2} = \text{const}$$

Також будемо електромеханічні характеристики $I_1(\omega)$ для обраних частот за виразом

$$I_1(s, f) = \sqrt{(I_0(f))^2 + (I'_2(s, f))^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I'_2(s, f) \cdot \sin \varphi_2(s, f)},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s),$$

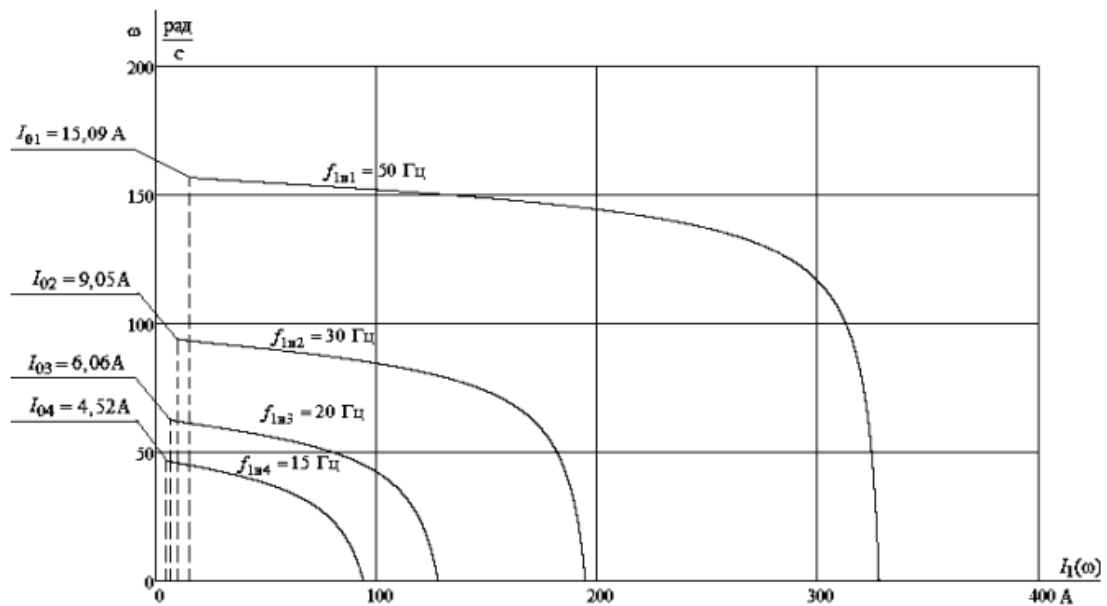


Рисунок 3.3 – Штучні електромеханічні характеристики $I_1(\omega)$ для закону

$$\text{керування } \frac{U_1}{f^2} = \text{const}$$

Механічні характеристики асинхронного двигуна $M(\omega)$ наведені на рис. 3.4

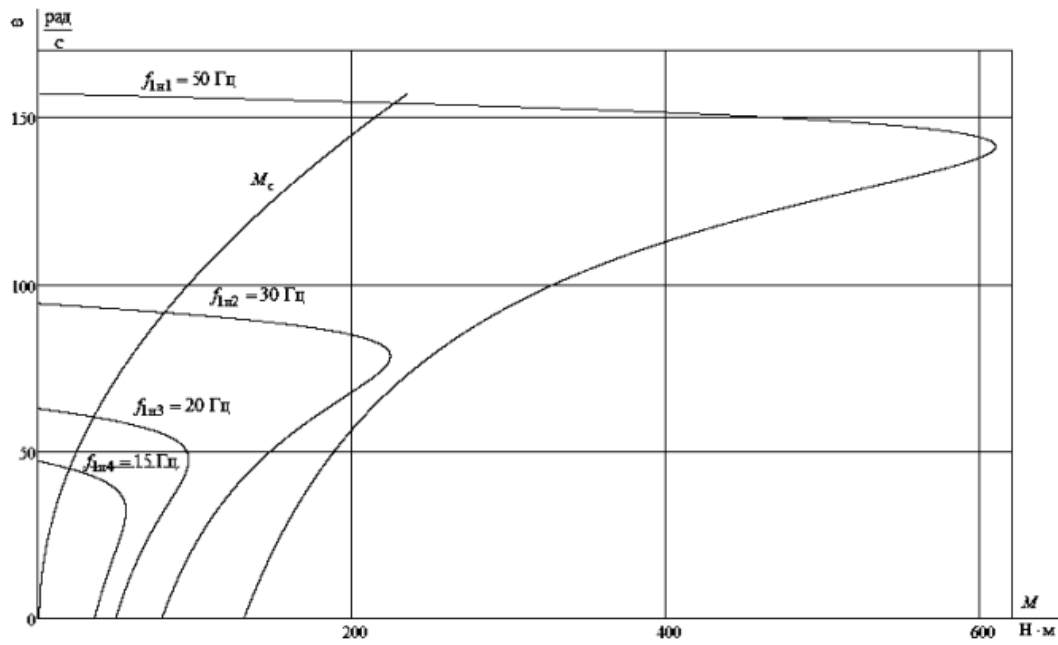


Рисунок 3.4 – Штучні електромеханічні характеристики $M(\omega)$ для закону

$$\text{керування } \frac{U_1}{f^2} = \text{const}$$

Знайдемо частоти обертання, за яких відбувається перетин механічних характеристик навантаження і двигуна:

1. $f_{1n1} = 50 \text{ Гц}$, $\omega_{p1} = 153,94 \text{ рад/с}$
2. $f_{1n1} = 30 \text{ Гц}$, $\omega_{p1} = 91,13 \text{ рад/с}$
3. $f_{1n1} = 20 \text{ Гц}$, $\omega_{p1} = 59,52 \text{ рад/с}$
4. $f_{1n1} = 15 \text{ Гц}$, $\omega_{p1} = 44,17 \text{ рад/с}$

Визначимо момент навантаження і ковзання для кожної частоти обертання:

$$1. M_{c1} = M_0 + k \cdot \omega_{p1}^2 = 1,2 + 0,01 \cdot 153,94^2 = 240,36 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p1} = \frac{\omega_{01} - \omega_{p1}}{\omega_{01}} = \frac{157,08 - 153,94}{157,08} = 0,02$$

$$2. M_{c2} = M_0 + k \cdot \omega_{p2}^2 = 1,2 + 0,01 \cdot 91,13^2 = 85,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p2} = \frac{\omega_{02} - \omega_{p2}}{\omega_{02}} = \frac{94,24 - 91,13}{94,24} = 0,033$$

$$3. M_{c3} = M_0 + k \cdot \omega_{p3}^2 = 1,2 + 0,01 \cdot 59,52^2 = 36,95 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p3} = \frac{\omega_{03} - \omega_{p3}}{\omega_{03}} = \frac{62,83 - 59,52}{62,83} = 0,053$$

$$4. M_{c4} = M_0 + k \cdot \omega_{p4}^2 = 1,2 + 0,01 \cdot 44,17^2 = 20,88 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p4} = \frac{\omega_{04} - \omega_{p4}}{\omega_{04}} = \frac{47,12 - 44,17}{47,12} = 0,0625$$

Втрати в роторі

$$\Delta P_2 = \omega_0 \cdot s_p \cdot M_c$$

$$\Delta P_{21} = \omega_{01} \cdot s_{p1} \cdot M_{c1} = 157,08 \cdot 0,02 \cdot 240,36 = 755,1 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{22} = \omega_{02} \cdot s_{p2} \cdot M_{c2} = 94,25 \cdot 0,033 \cdot 85,01 = 262,2 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{23} = \omega_{03} \cdot s_{p3} \cdot M_{c3} = 62,83 \cdot 0,053 \cdot 36,953 = 122,4 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{24} = \omega_{04} \cdot s_{p4} \cdot M_{c4} = 47,12 \cdot 0,0625 \cdot 20,88 = 61,5 \text{ Вт};$$

Аналізуючи втрати в роторі можна сказати, що зменшення частоти призводить до їх зменшення. Це можна пояснити тим, що момент навантаження прямо пропорційний частоті обертання [28].

За розрахунковими точками побудуємо криву, що відображає залежність втрат у роторі від частоти живильної напруги. Вона зображена на рисунку 3.5.

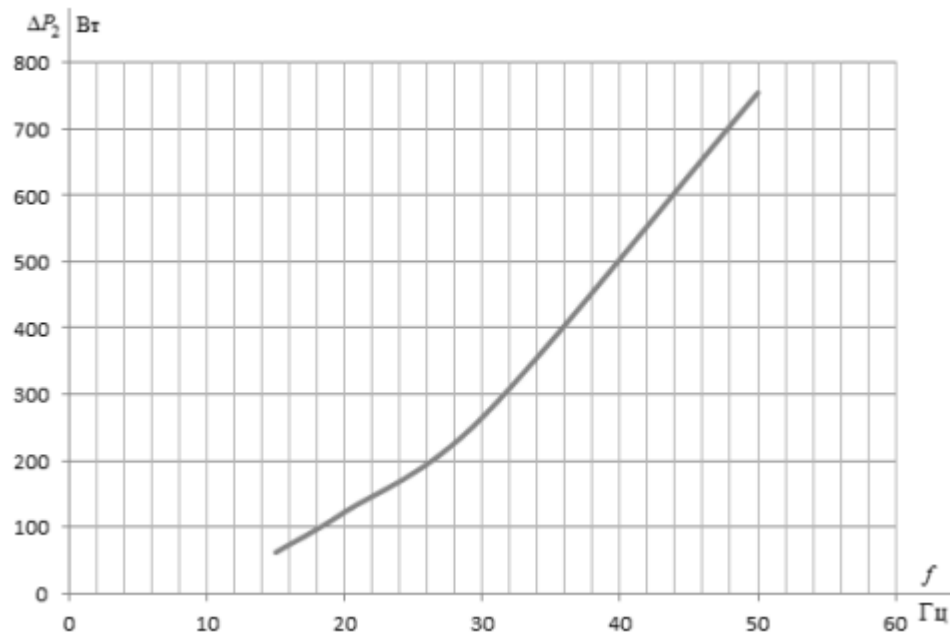


Рисунок 3.5 – Залежність втрат в роторі від частоти напруги живлення

3.3 Розрахунок і побудова природних механічних та електромеханічних характеристик замкненої системи "перетворювач частоти - асинхронний двигун" з IR-компенсацією

Відповідно до рівняння АД у статичному режимі для підтримки сталості напруги на статорі U_c можна виконати корекцію IR-компенсації на величину падіння напруги за активним опором обмотки статора IR-компенсація є позитивним зворотним зв'язком і вимагає введення додаткової ланки для забезпечення стабільної роботи. Компенсація при скалярному керуванні дозволяє розширити діапазон регулювання, знижує величину похибки, підвищує перевантажувальну здатність електродвигуна при завданні невеликих швидкостей.

Структурну схему системи скалярного частотного керування з IR-компенсацією наведено на рисунку 3.6.

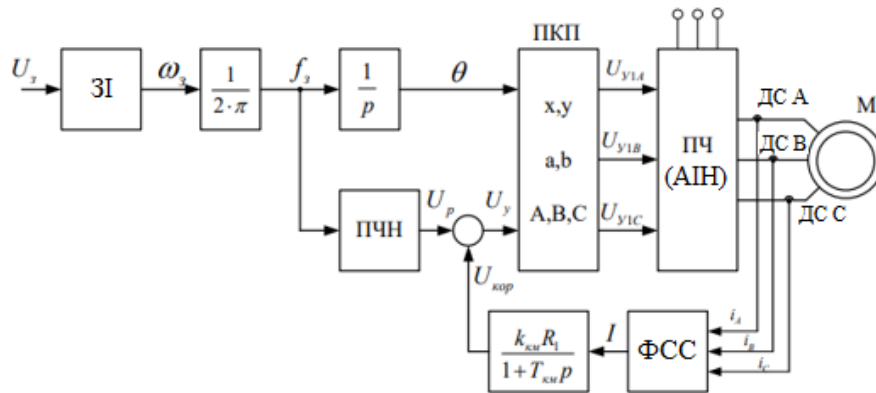


Рисунок 3.6 – Структурна схема системи скалярного частотного керування з ІР-компенсацією [29]

Задатчик інтенсивності формує криву і темп розгону двигуна. У разі дистанційного керування електроприводом сигналом завдання швидкості є задавальна напруга U_3 . Їй відповідає задавальна частота f_3 місцевого керування, у цьому разі керування пуском і зупинкою двигуна здійснюють із панелі перетворювача. Блок "перетворювач частота-напруга" ПЧН формує необхідну залежність скалярного керування між частотою і напругою перетворювача, чим і встановлюється прийнятий закон частотного регулювання. За скалярної ІР-компенсації сигнал управління U_y є сумою сигналів регулювання U_p і позитивного зворотного зв'язку за струмом $U_{кор}$ [30].

Сигнал керування є входним для прямого координатного перетворювача (ПКП), на виході якого формують три синусоїдальні напруги керування U_{1yA} , U_{1yB} , U_{1yC} , що зрушені відносно одна одної на кут $\pm 2\pi/3$, з амплітудами, пропорційними напрузі керування. Сигнали U_{1yA} , U_{1yB} , U_{1yC} формують фазні напруги на виході автономного інвертора напруги (АІН).

Зробимо розрахунок статичних характеристик. Прийнемо коефіцієнти компенсації: $K_{KM}=0,25; 0,5; 0,75$.

Знайдемо еквівалентні опір ротора з урахуванням IR - компенсації:

$$R_{1\text{екв}1} = R_1 \cdot (1 - K_{KM1}) = 0,0703 \cdot (1 - 0,25) = 0,0527 \text{ Ом}$$

$$R_{1\text{екв}2} = R_1 \cdot (1 - K_{KM3}) = 0,0703 \cdot (1 - 0,5) = 0,0352 \text{ Ом}$$

$$R_{1\text{екв}3} = R_1 \cdot (1 - K_{KM3}) = 0,0703 \cdot (1 - 0,75) = 0,0176 \text{ Ом}$$

Будуємо електромеханічні характеристики $\Gamma_2(\omega)$ для обраних частот і коефіцієнтів K_{KM} за виразом [31]:

$$I_2'(s, f, K_{KM}) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left(R_{1\text{екв}}(K_{KM}) + R_2' / s\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f) + \left(\frac{R_{1\text{екв}}(K_{KM}) \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}\right)^2}}$$

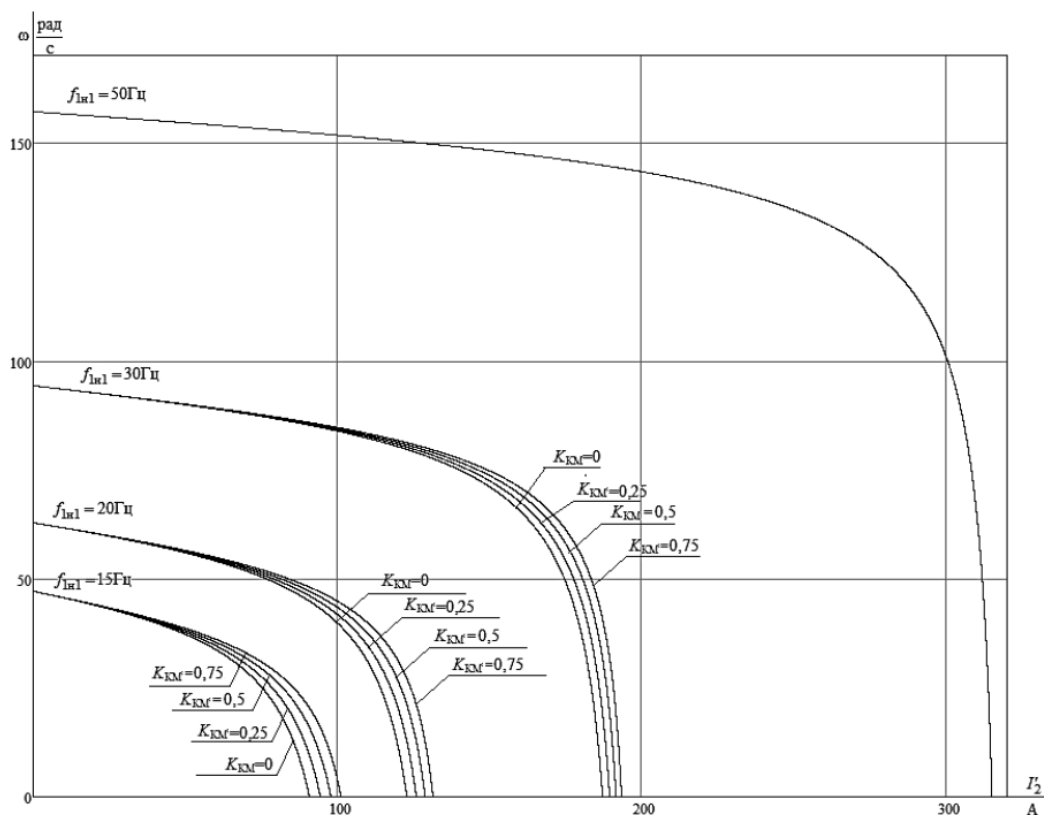


Рисунок 3.7 – Штучні електромеханічні характеристики $\Gamma_2(\omega)$ під час частотного регулювання швидкості з ІР-компенсацією

Також будемо електромеханічні характеристики $I_1(\omega)$ для обраних частот і коефіцієнтів $K_{\text{КМ}}$ (рис.3.8) за виразами

$$I_1(s, f, K_{\text{КМ}}) = \sqrt{(I_0(f))^2 + (I'_2(s, f, K_{\text{КМ}}))^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I'_2(s, f, K_{\text{КМ}}) \cdot \sin \phi_2(s, f, K_{\text{КМ}})}$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s),$$

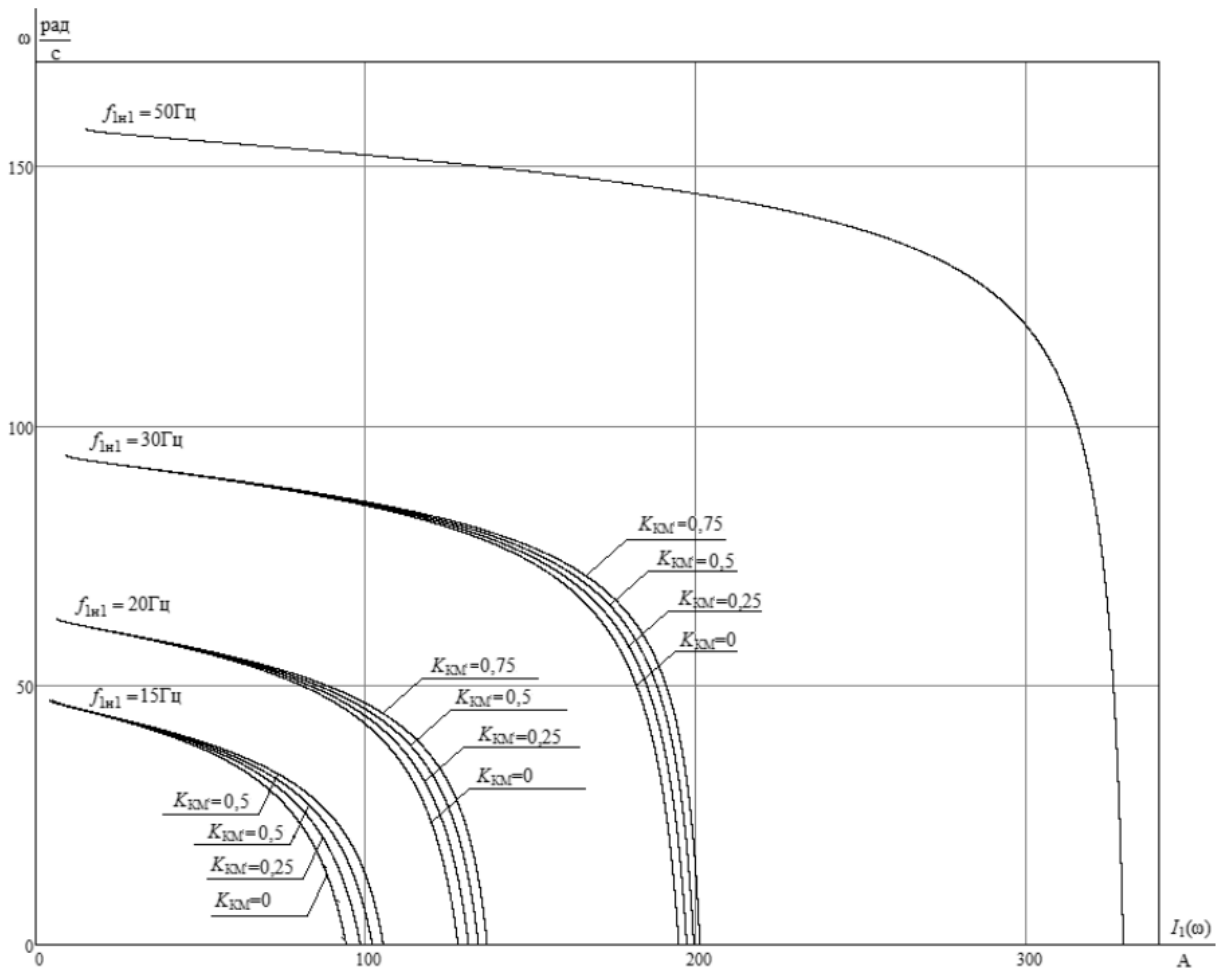


Рисунок 3.8 – Штучні електромеханічні характеристики $I_1(\omega)$ під час частотного регулювання швидкості з ІР-компенсацією

Механічні характеристики асинхронного двигуна $M(\omega)$ (рис.3.9) розраховуємо для обраних частот і коефіцієнтів K_{KM} за виразами:

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R'_2}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[X_{KH}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left(R_{1\text{экв}}(K_{KM}) + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_{1\text{экв}}(K_{KM}) \cdot R'_2}{s \cdot X_{MH} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2 \right]},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s).$$

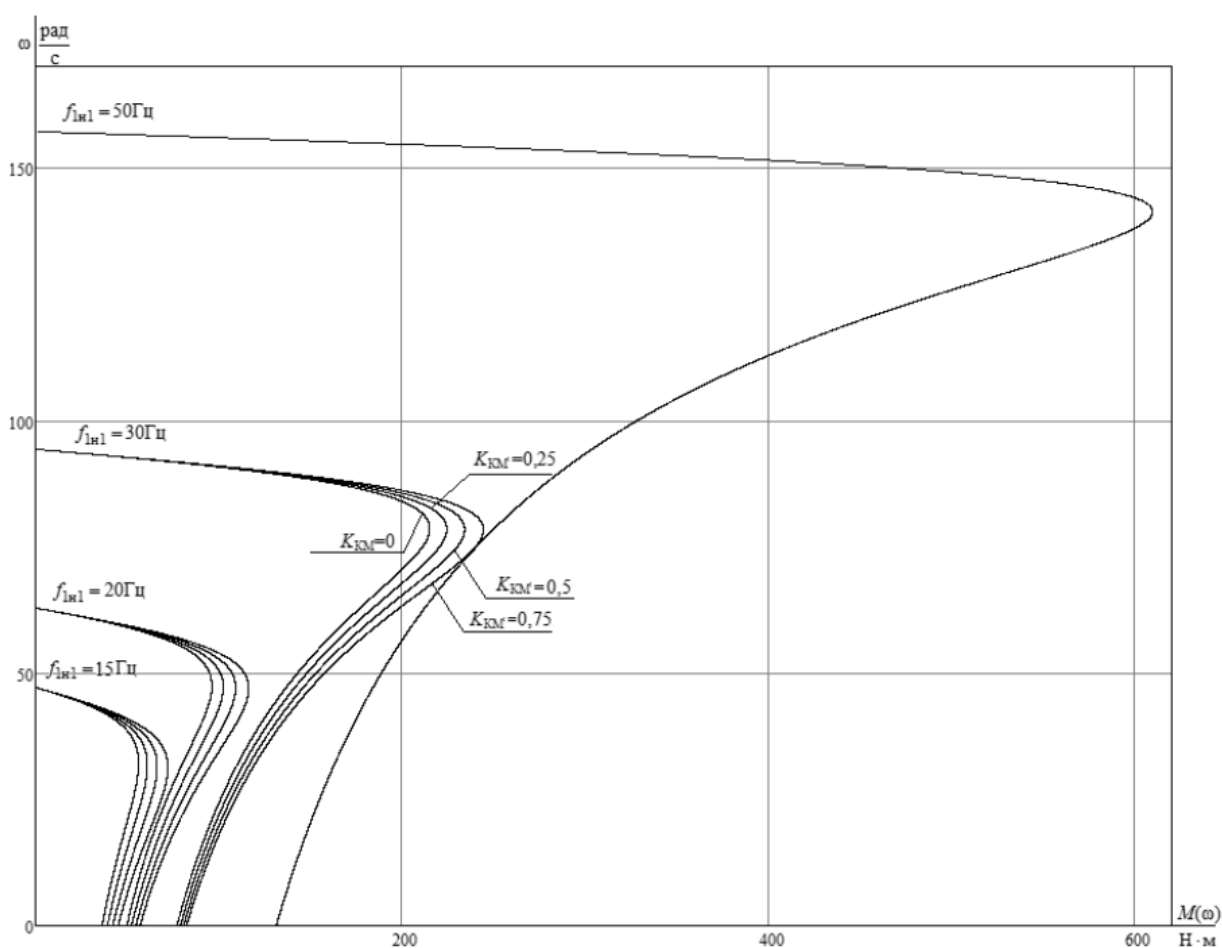


Рисунок 3.9 – Штучні електромеханічні характеристики $M(\omega)$ під час частотного регулювання швидкості з IR-компенсацією

Під час роботи на природній характеристиці ($f=50$ Гц) IR-компенсація не застосовується, оскільки фазна напруга підвищується вище за номінальну, що є неприпустимим [32].

З електромеханічних характеристик: на рисунку 3.7 видно, що під час збільшення коефіцієнта компенсації моменту K_{KM} струми короткого замикання $I_{\text{КЗ}}$ мають більші значення, причому ці відмінності тим більші, чим менша частота обмоток статора f_1 . Це пояснюється тим, що за малих частот частка падіння напруги на активному опорі R_1 більша, і, відповідно, частка компенсації [33].

Механічні характеристики: у разі збільшення коефіцієнта компенсації моменту K_{KM} критичний момент збільшується, а характеристики стають більш жорсткими. На рисунку 3.9 відмінності в критичному і пусковому моментах за різних K_{KM} не такі помітні. Це можна пояснити тим, що потужність двигуна велика і опір його статорної обмотки малий, а відповідно і падіння напруги на ній невелике [34].

3.4 Розроблення системи скалярного керування насоса в системі MatLab

Моделювання асинхронного двигуна здійснимо за допомогою програми MATLAB Simulink.

Для створення імітаційної моделі необхідні наступні параметри двигуна:

$$\text{Індуктивність фази обмотки статора: } L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,287}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0009 \text{ Гн};$$

$$\text{Індуктивність фази обмотки ротора: } L_{1\sigma}' = \frac{X_{2H}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,391}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0012 \text{ Гн};$$

$$\text{Індуктивність кола намагнічування: } L_{\mu} = \frac{X_{\mu H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{14,58}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,046 \text{ Гн}$$

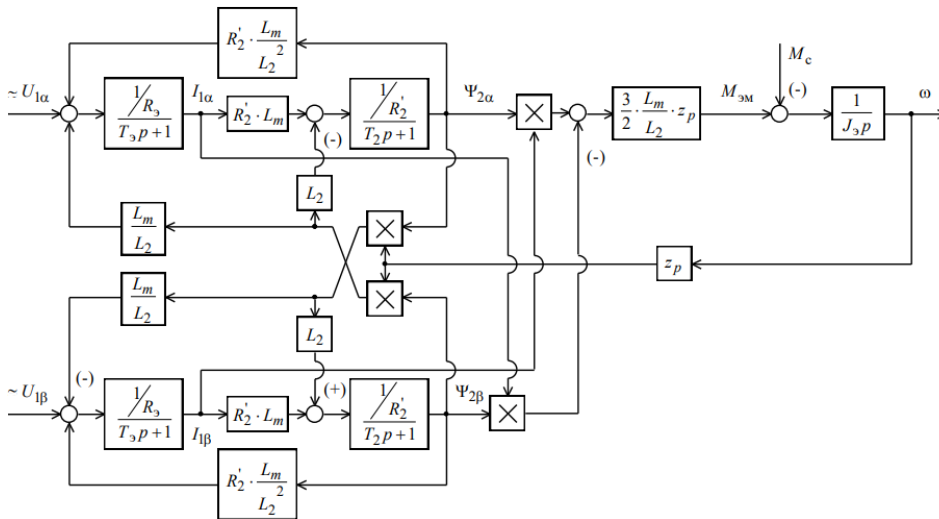


Рисунок 3.10 – Структурна схема електродвигуна у нерухомій системі координат α, β [35]

Розглянемо контур тиску

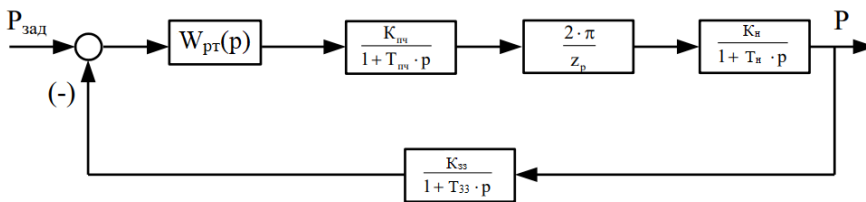


Рисунок 3.11 – Структурна схема контуру тиску

$W_{\text{рт}}(p)$ - передавальна функція регулятора тиску;

$K_{\text{ПЧ}}$ - коефіцієнт передавання інвертора;

$K_H = \frac{p}{\omega_H} = 0,0509$ - коефіцієнт передавання насоса

K_{33} - коефіцієнт передавання зворотного зв'язку;

$T_{пч}=0,0002$ с - постійна часу запізнювання автономного інвертора напруги;

$T_H=0,1$ с- постійна часу запізнювання насоса;

$T_{33}=0,1$ с- постійна часу запізнювання зворотного зв'язку.

Розімкнутий контур тиску, налаштований на модульний оптимум, повинен мати таку передавальну функцію:

$$W_{рт}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)} \cdot \frac{(T_{пч} p + 1)(T_H p + 1)(T_{33} p + 1)}{K_{пч} \cdot K_H \cdot K_{33}} \cdot \frac{z_p}{2\pi} \quad (3.6)$$

Під час оптимізації інерційність у каналі зворотного зв'язку належить до "малих", і за малу некомпенсовану постійну часу всього контуру приймають:

$$T_{\mu k} = T_{\mu} + T_{33}, \quad T_{33} \gg T_{пч}, \quad T_{пч} = T_{\mu}; \quad (3.7)$$

$$W_{рт}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu k} p (T_{\mu k} p + 1)} \cdot \frac{(T_{\mu k} p + 1)(T_{33} p + 1)}{K_{пч} \cdot K_H \cdot K_{33}} \cdot \frac{z_p}{2\pi} \quad (3.8)$$

Після скорочення домножимо отриманий вираз на T_{33} , після чого приведемо вираз до канонічного вигляду.

$$W_{рт}(p) = \frac{T_{33} \cdot z_p}{2 \cdot T_{\mu k} \cdot K_{пч} \cdot K_H \cdot K_{33} \cdot 2\pi} \cdot \frac{(T_{33} p + 1)}{T_{33} p} = 3,063 \cdot \frac{0,1p + 1}{0,1p} \quad (3.9)$$

На рисунку 3.12 зображена імітаційна модель контуру тиску.

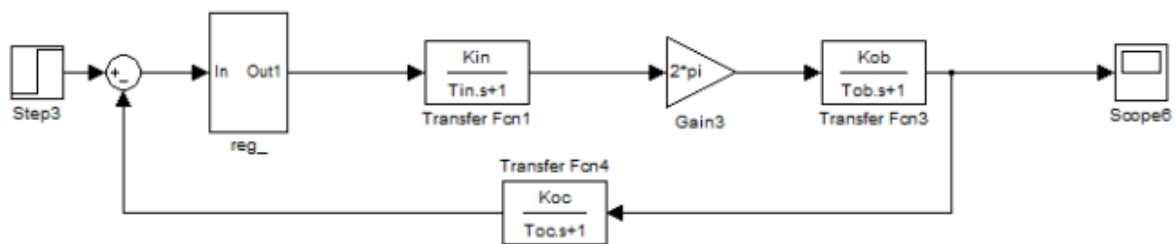


Рисунок 3.12 – Імітаційна модель контура тиску

На рисунку 3.13 представлена схема ПІ-регулятора тиску.

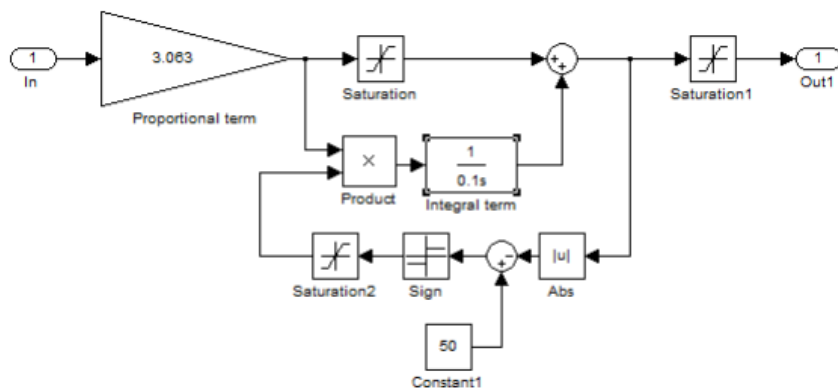


Рисунок 3.13 – Імітаційна модель ПІ-регулятора тиску

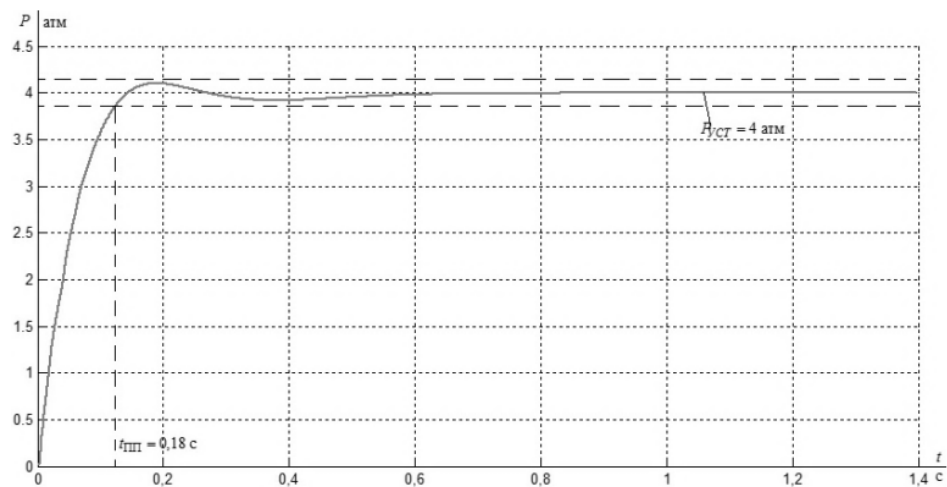


Рисунок 3.14 – Перехідні процеси контура тиску

Таблиця 3.1 – Показники якості роботи контура тиску

Перетворення струмів статора $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ двофазного двигуна в нерухомій системі координат α, β у фазні струми обмотки статора трифазного двигуна i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} , реалізується відповідно до формул перетворення:

$$\begin{aligned} i_{1a} &= i_{1\alpha} \\ i_{1b} &= -\frac{1}{2} \cdot i_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{1\beta} \\ i_{1c} &= -\frac{1}{2} \cdot i_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{1\beta} \end{aligned} \quad (3.10)$$

За схемою (рис. 3.16):

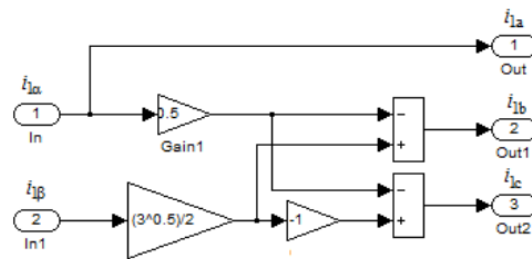


Рисунок 3.16 – Імітаційна модель перетворювача струмів статора

Діючі значення фазних струмів трифазного і двофазного двигуна рівні й визначаються за виразом [36]:

$$I_{1\phi} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2}, \quad \text{А} \quad (3.11)$$

Схема набору імітаційної моделі для обчислення діючого значення струму статора трифазного двигуна наведена на рис. 3.17.

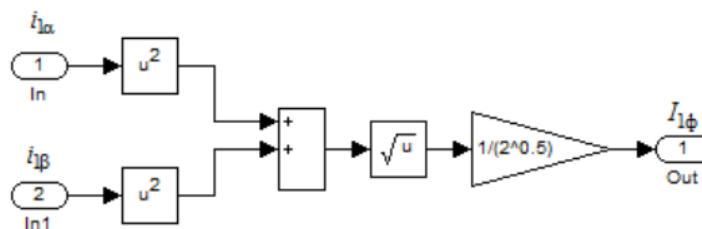


Рисунок 3.17 – Імітаційна модель обчислення діючого значення струму статора трифазного двигуна

Схему набору імітаційної моделі двофазного асинхронного двигуна в нерухомій системі координат α, β складено на основі структурної схеми рис. 3.10 і наведено на рис. 3.18.

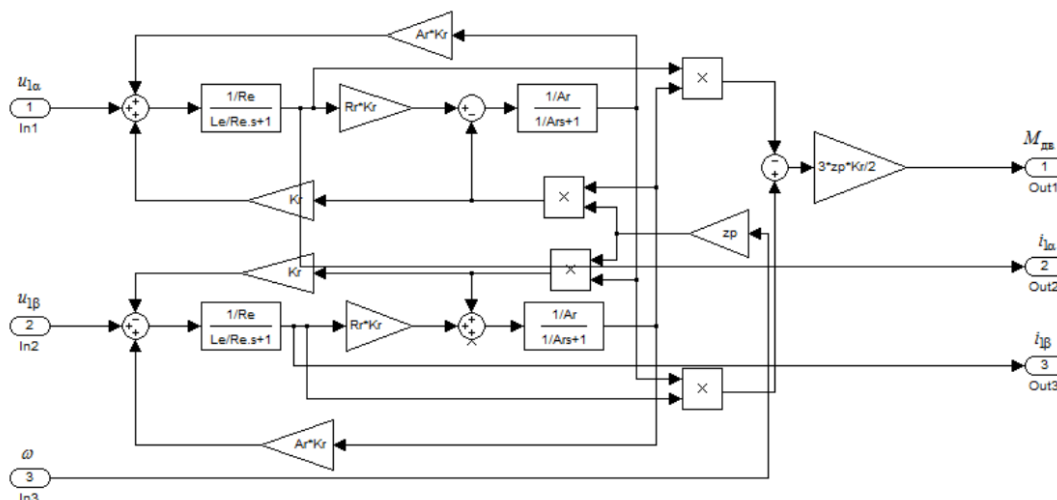


Рисунок 3.18 – Імітаційна модель двофазного асинхронного двигуна в нерухомій системі координат α, β

Схему набору імітаційної моделі одномасової механічної системи за моменту навантаження реактивного характеру наведено на рис. 3.19.

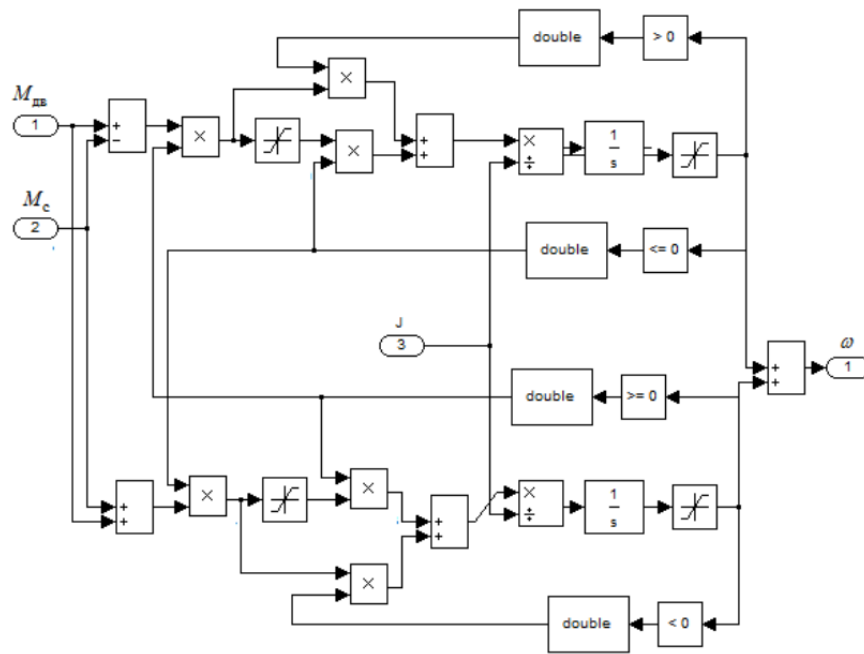


Рисунок 3.19 – Імітаційна модель одномасової механічної системи за моменту навантаження реактивного характеру

При навантаженні реактивного характеру $M_c(\omega) = M_c \cdot \text{sign} \omega$ і виконання умови $|M_{дв}| < M_c$ двигун, перебуваючи в нерухомому стані, не повинен рушати.

Якщо ж двигун обертається, то його подальший рух має визначатися умовою:

$$M_{дв} - M_c \cdot \text{sign} \omega = J_e \frac{d\omega}{dt} \quad (3.12)$$

Схему набору імітаційної моделі формувача фазних напруг статорних обмоток двофазного двигуна в нерухомій системі координат α, β наведено на рис. 3.20.

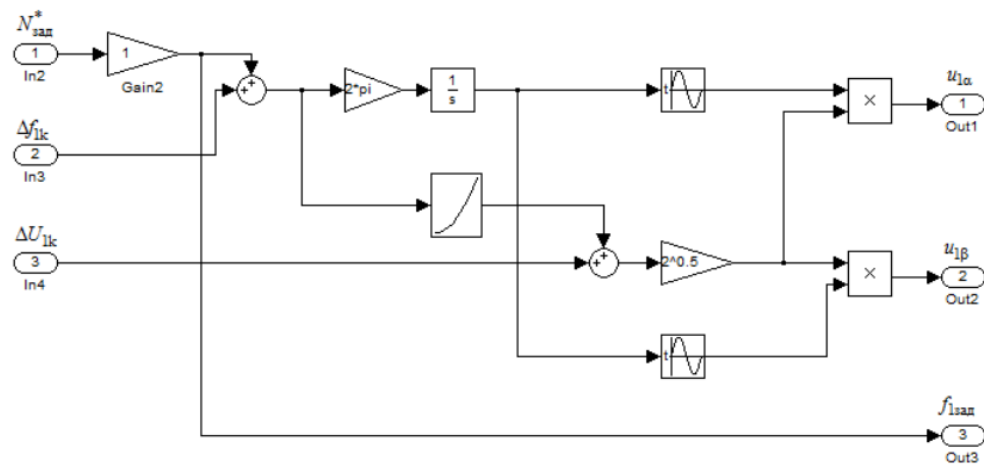


Рисунок 3.20 – Імітаційна моделі формувача фазних напруг статорних обмоток двофазного двигуна в нерухомій системі координат α, β

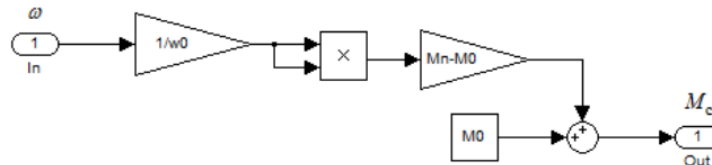


Рисунок 3.21 – Імітаційна модель навантаження турбомеханізму

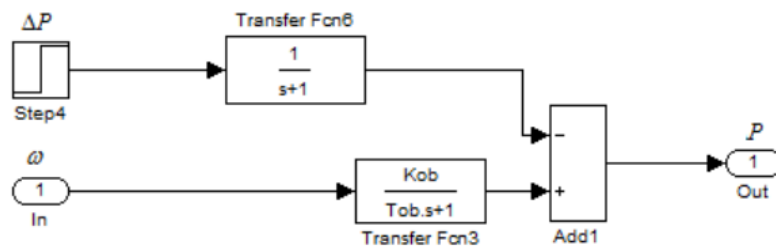


Рисунок 3.22 – Імітаційна модель об'єкта регулювання

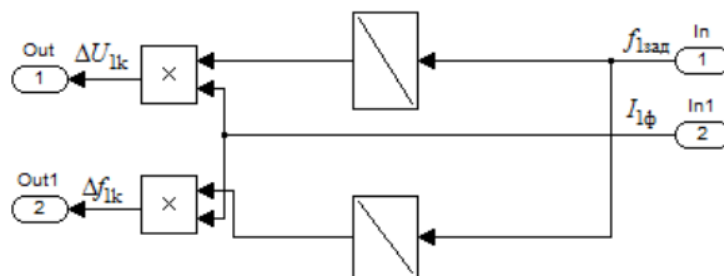


Рисунок 3.23 – Імітаційна модель ІR-компенсації

Нижче представлено перехідні процеси тиску, швидкості та моменту за номінального тиску $p = 4$ атм (рис. 3.24), падіння та наростання тиску $\Delta p = 1$ атм (рис. 3.25), падіння та наростання тиску $\Delta p = 0,5$ атм (рис. 3.26), моделювання системи підтримання тиску під час імітації невеликої частини графіка навантажень водоспоживання (рис. 3.27).

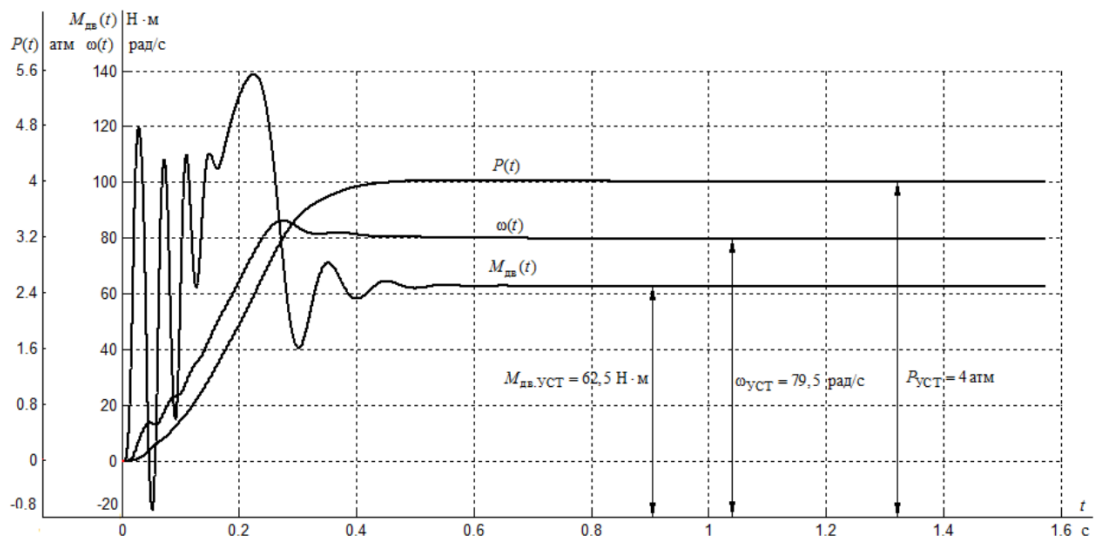


Рисунок 3.24 – Перехідні процеси тиску $P(t)$, швидкості $\omega(t)$ і моменту $M_{\text{дв}}(t)$ за номінального тиску $P_{\text{уст}} = 4$ атм

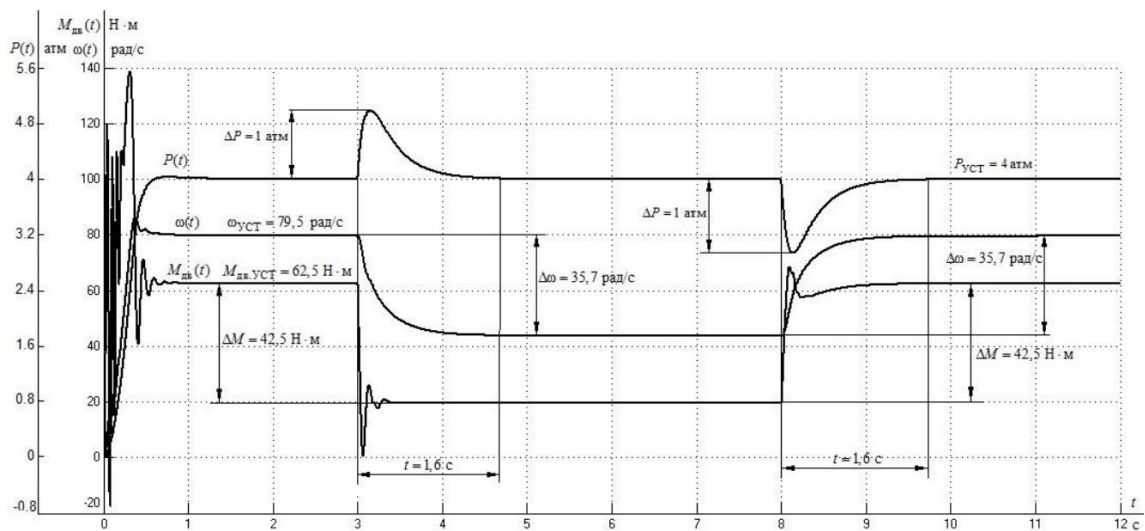


Рисунок 3.25 – Перехідні процеси тиску $P(t)$, швидкості $\omega(t)$ і моменту $M_{\text{дв}}(t)$ у випадку падіння та наростання тиску $\Delta p = 1$ атм

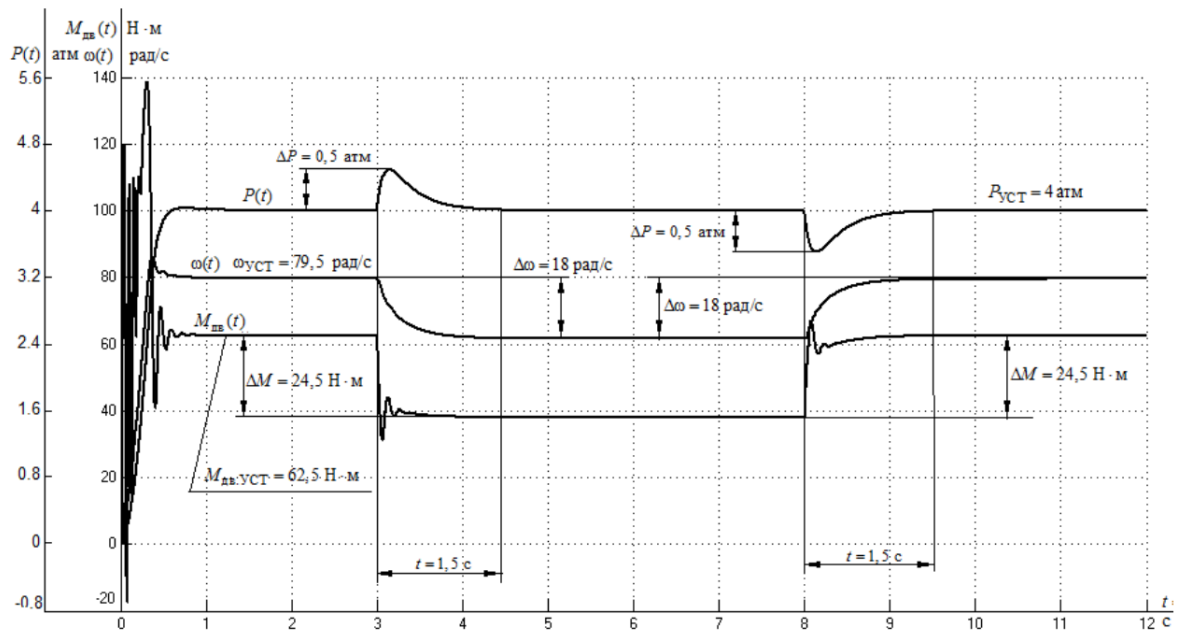


Рисунок 3.26 – Перехідні процеси тиску $P(t)$, швидкості $\omega(t)$ і моменту $M_{\text{дв}}(t)$ у випадку падіння та наростання тиску $\Delta p = 0,5$ атм

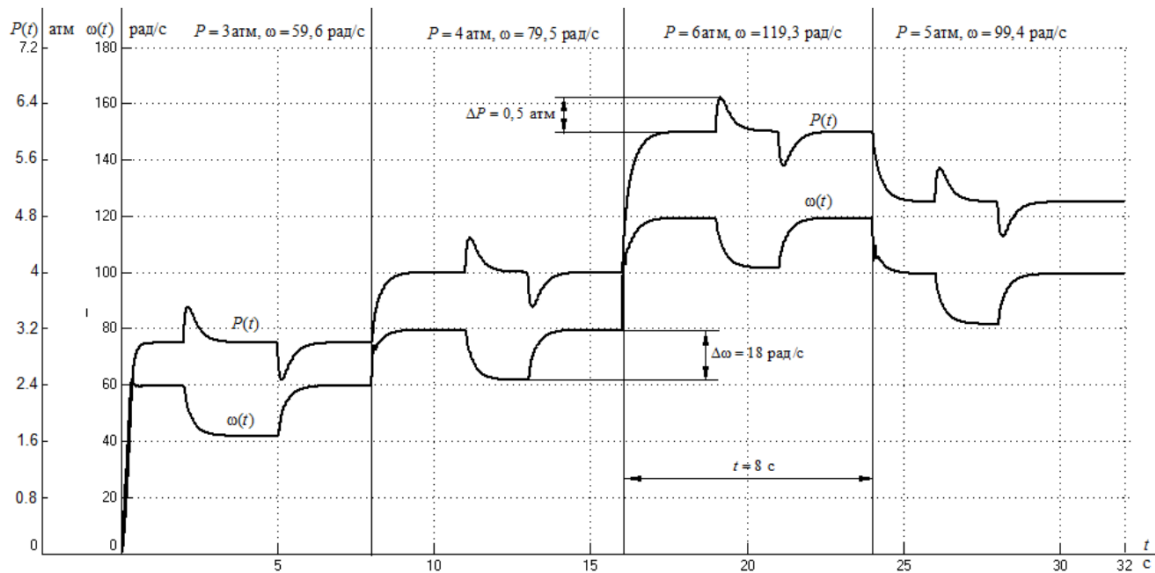


Рисунок 3.27 – Перехідні процеси тиску $P(t)$ і швидкості $\omega(t)$ невеликої частини графіка навантажень водоспоживання та при падінні й наростанні тиску $\Delta p = 0,5$ атм

Висновки з розділу 3

У розділі 3 було досліджено принципи скалярного керування асинхронними двигунами. На основі закону Костенка М.П., було розраховано та побудовано механічні та електромеханічні характеристики АД для режиму без компенсації та з ІR-компенсацією.

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

Також було досліджено систему автоматичної підтримки тиску води. Для отримання підтримання постійного тиску в системі було заведено зворотний зв'язок за тиском.

РОЗДІЛ 4 СТАРТАП-ПРОЕКТ

4.1 Цілі та етапи реалізації стартап-проекту

На початку розроблення стартап-проекту доцільно обґрунтувати цілі етапів його реалізації (табл. 4.1) [37].

Таблиця 4.1 - Цілі основних етапів реалізації стартап-проекту

Етапи реалізації стартап-проекту	Цілі етапів реалізації стартап-проекту
Початковий етап стартап-проекту	Дослідження потреб та запитів споживачів, суперечностей та технологічних недосконалостей діючих продуктів-аналогів конкурентного середовища
Етап обґрунтування актуальності та новизни інноваційної ідеї	Задоволення нових потреб споживачів, подолання певних суперечностей поточних технологічних процесів, вдосконалення діючих технологій та устаткування тощо
Етап аналізу конкурентного середовища	Виявлення можливих конкурентів-виробників, які виготовляють схоже обладнання або пропонують схожі технології та здійснення порівняльного аналізу техніко-економічних переваг та недоліків реалізації пропонованої ідеї
Етап обґрунтування ресурсного забезпечення проекту	Визначення необхідних матеріальних, трудових, капітальних ресурсів, ключових процесів, технології, обладнання та реалізації проекту в часі і просторі
Етап фінансового забезпечення реалізації проекту	Обґрунтування собівартості та ціни реалізації інноваційної ідеї
Інвестиційний етап реалізації стартап-проекту	Пошук потенційних інвесторів фінансування стартап-проекту
Маркетинговий етап реалізації проекту	Обґрунтування каналів збуту продукту стартап-проекту, залучення потенційних споживачів, формування необхідних сегментів ринку

4.2 Обґрунтування актуальності та новизна іноваційної ідеї стартап-проекту

Новизна ідеї проекту полягає у використанні керованого електроприводу зі скалярним керуванням та IR-компенсацією у системах водопостачання житлових багатоповерхових будівель.

Перевагами використання керованого електроприводу у системах водопостачання є:

- зниження споживання електроенергії,
- зниження кількості аварій на трубопроводах,
- усунення ударних навантажень на електричну мережу під час пуску електропривода [38].

Системи скалярного керування мають дуже багато переваг перед іншими системами: простота, надійність, потрібен мінімум інформації про двигун, і немає необхідності у використанні датчиків швидкості та положення ротора, тобто зменшення підсумкової вартості насосної установки.

Актуальність та новизна ідеї стартап-проекту зведені у таблицю 4.2

Таблиця 4.2 – Актуальність та новизна ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Переваги та вигоди споживача
Проектування системи водопостачання житлового багатоквартирного будинку	Використання регульованого електроприводу	Зниження споживання електроенергії, зниження кількості аварій на трубопроводах
	Використання скалярного керування	Зменшення підсумкової вартості встановлення насосної станції

4.3 Аналіз конкурентного середовища

Щоб визначити потенційних конкурентів цієї розробки, необхідно розглянути цільовий ринок і провести його сегментування.

Для складання мапи сегментування було взято три фірми, які займаються виробництвом електроприводів

У результаті сегментації:

- основні сегменти цього ринку включають у себе використання електроприводу з частотним регулюванням середніх і малих підприємств;

- найперспективнішим сегментом пропозиції є привід із частотним регулюванням середніх підприємств;

- сегмент ринку, що є привабливими для компаній у майбутньому, є забезпечення частотно-регульованого електроприводу з невеликими динамічними, компаніями.

Перевагами застосування електроприводів із перетворювачами частоти з використанням технології частотно-регулювання на ринку насосних станцій порівняно з іншими видами ЕП є:

- нижча вартість;
- мінімальні витрати на обслуговування;
- забезпечення необхідного ступеня захисту;

За даними на 2022 рік, застосування ЕП з перетворювачем частоти в різних галузях промисловості становить близько 45% на ринку електроенергетики та

електротехніки, що становить більшу частину серед різноманітності електроприводів [39].

4.4 SWOT – аналіз

SWOT-аналіз проводять для того, щоб дослідити зовнішнє та внутрішнє середовище проєкту.

Проведення аналізу здійснюється в кілька етапів:

- Опис сильних (Strengths) і слабких (Weaknesses) сторін проєкту, виявлення можливостей (Opportunities) і загроз (Threats), що можуть з'явитися в зовнішньому середовищі проєкту;
- Виявлення відповідності зовнішнім умовам середовища сильних і слабких сторін дослідницького проєкту;
- Складання підсумкової матриці SWOT-аналізу [40].

SWOT-аналіз проводимо для дослідження електроприводу насоса системи водопостачання. Результати SWOT-аналізу наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.3 – Матриця SWOT

	Сильні сторони (S)	Слабкі сторони (W)
	S1. Простота і зручність в експлуатації; S2. Безпека; S3. Низькі витрати; S4. Час дослідження	W1. Результати потребують експериментального підтвердження; W2. Недостатньо інформації про метод; W3. Не достатня точність результатів на даному етапі дослідження
Можливості (O) O1. Дослідження зразків з різних матеріалів без витрат; O2. Відсутність руйнування зразка; O3. Державна підтримка дослідження; O4. Проведення досліджень на будь-якому комп'ютері	Завдяки низьким матеріальним і часовим витратам, можна дослідити великий теоретичний пласт інформації для підбору найбільш підходящих характеристик і умов експерименту; Зручність в експлуатації, безпека, низькі матеріальні та часові витрати на дослідження сприяють отриманню державної підтримки; За рахунок простоти і зручності в експлуатації, дослідження можна проводити на будь-якому комп'ютері, без спеціального обладнання.	Завдяки можливості проводити дослідження для різних матеріалів, розширюється коло наявних експериментальних даних, з якими можна провести порівняння; За рахунок того, що дослідження можна проводити для великої кількості матеріалів і на будь-якому комп'ютері, а інформації про метод не достатньо, є можливість публікації актуальних статей у наукових журналах.
Загрози (T) T1. Виникнення конкурентів; T2. Технічні збої, які можуть спричинити втрату напрацьованої інформації	За рахунок скорочення матеріальних і часових витрат на дослідження, забезпечується перевага перед можливими конкурентними розробками; Проста технологія дасть змогу досить швидко відтворити загублені результати.	Недостатня точність результатів, досягнута на даному етапі дослідження, може призвести до випереджальних активних досліджень з боку можливих конкурентів, але простота і доступність цього методу допоможуть зменшити ризики.

Застосування технології частотного-регулювання в установках електроприводу при перекачуванні води є доцільним. Переваги перевершують недоліки, до того ж є можливості щодо поліпшення проекту.

4.5 Обґрунтування ресурсного забезпечення проекту

У таблиці 4.4 наведені капіталовкладення для втілення стартап-проекту.

Таблиця 4.4 – Капіталовкладення на втілення проекту [37]

Статті капіталовкладень	Витрати, тис.грн./міс	Витрати, тис.грн./рік
Прямі матеріальні затрати		
витрати на купівлю обладнання (ноутбуків, інструментів) (одноразово)	100	-
витрати на оренду офісу, складу, транспорту	20	240
витрати палива й енергії	10	120
Прямі затрати на оплату праці виробничих працівників		
заробітна плата (за ставками) персоналу, що займається монтажем і доставкою	80	960
премії, заохочення, компенсаційні виплати виробничих працівників	5	60
Соціальні відрахування до Пенсійного фонду – 22% по заробітній платі виробничих працівників	17,6	211,2
Інші прямі витрати:		
витрати на дослідження та розробку інноваційних продуктів (одноразово)	20	-
витрати на послуги сторонніх підприємств (охорона, реклама тощо)	30	360
витрати на оплату комунальних послуг	5	60
Всього одноразових капіталовкладень на реалізацію проекту	120	-
Всього капіталовкладень на реалізацію проекту	287,6	2011,2

4.5 Ключові види діяльності

Ключовими видами діяльності, необхідними для реалізації системи водопостачання багатоповерхового житлового будинку є: виробництво, закупівля, монтаж і сервіс.

Детальний опис видів діяльності наведений у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Ключові види діяльності

Назва діяльності	Опис діяльності	Результат діяльності
Проектування	Розрахунок та підбір насосного обладнання, складення схеми розташування обладнання, складення специфікації матеріалів та технічного обладнання	Пояснювальна записка, принципова схема, монтажні креслення, зведена специфікація
Закупівля	Придбання обладнання відповідно до проекту	Готове до встановлення насосне обладнання
Монтаж	Комплектація технологічного приміщення обладнанням, монтаж та налаштування систем автоматичного керування та диспетчеризації, пусканалагоджувальні роботи	Готова до експлуатації насосна станція
Сервіс	Перевірка стану обладнання, перевірка правильності підключення електроживлення, перевірка правильності підключення гідравлічних комунікацій, centruвання, налаштування, запуск та перевірка параметрів роботи	Безперебійна, надійна, якісна робота системи

4.6 Обґрунтування рівня рентабельності (прибутковості) інноваційної ідеї

Відносна величина прибутку підприємства характеризується рівнем рентабельності. Рівень рентабельності це співвідношення прибутку до витрат виробництва, розрахованих у відсотках:

$$N_{\text{пр.}} = \frac{\Pi}{ВВ} * 100\%, \quad (4.1)$$

де Π – прибуток підприємства, $ВВ$ – валові витрати.

В умовах ринкової економіки величина прибутку повинна відображати відносини власності або інші фінансові зобов'язання, наприклад, оплату дивідендів власникам акцій або залучення кредиту, тощо [37].

Дані для обґрунтування необхідного рівня прибутку інноваційної ідеї, для якої розраховується ціна, узагальнюємо в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Обґрунтування рівня рентабельності товару (послуги)

Статті витрат	Од. вимір.	Значення показників.
1. Собівартість послуги	грн./рік	2011200
Обсяг замовлень в рік	шт	20
2. Необхідний прибуток	грн./рік	234000
2.1. Засоби ФРВ	грн./рік	94918
2.2. Засоби ФСР	грн./рік	47539
2.3. Засоби ПФ	грн./рік	19015
2.4. Грошові виплати власникам підприємства	грн./рік	28523
2.5. Фінансовий резерв	грн./рік	9991
2.6. Податок на прибуток	грн./рік	34000
3. Необхідний рівень рентабельності продукції	%	11,6

4.7 Обґрунтування вартості виробництва інноваційної техніки (технології)

Податок на додану вартість (ПДВ), який сплачується всіма суб'єктами господарської діяльності відповідно до розділу 5 Податкового кодексу України

перетворює вартість товару (послуги) на його ціну. Величина ПДВ становить 20% доданої вартості товару (послуги). Результати обґрунтування та визначення суми ПДВ та ціни послуги наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 - Обґрунтування вартості та ціни

Статті витрат	Одиниці вимірювання	Значення показників
1. Собівартість послуги на рік	тис.грн.	2011,2
2. Норма рентабельності	%	116,3
3. «Нормальний» питомий прибуток	тис.грн./рік	2340
4. Вартість виробництва одиниці продукції	тис.грн./рік	4351,2
5. ПДВ	тис.грн./рік	870,24
6. Відпускна ціна товару (послуги)	тис.грн./рік	5221,44

Загальна ціна послуг на рік має складати 5221440 грн.

Точку критичного обсягу виробництва (точку беззбитковості) можна розрахувати за наступними формулами:

$$TR = FC + VC \quad (4.2)$$

$$TR = Q * P = FC + AVC * Q \quad (4.3)$$

$$Q(P - AVC) = FC \quad (4.4)$$

$$Q = FC / P - AVC = FC / MR \quad (4.5)$$

FC – постійні витрати в собівартості продукції (на весь її обсяг);

VC – змінні витрати в собівартості продукції (на весь її обсяг);

P – ціна продажу виробу;

TR – виручка від реалізації продукції;

Q – обсяг виробництва (реалізації);

AVC – питомі середні змінні витрати;

MR – питомий граничний прибуток.

Критична ціна продажу (ціна реалізації), при заданому обсягу реалізації, постійних та середніх змінних витрат на одиницю товару (AVC), на рівні якої здійснюється покриття загальних витрат та обчислюється таким чином:

$$P = FC / Q + AVC \quad (4.6)$$

Величину критичної виручки від реалізації товару (послуги) доцільно обчислити за формулою:

$$TR = \frac{FC}{1 - \frac{AVC}{P}} \quad \text{або} \quad TR = \frac{FC}{\frac{MR}{P}} \quad (4.7)$$

Якщо підприємство планує отримати певну величину прибутку, то необхідний обсяг виробництва визначається з урахуванням бажаної величини прибутку:

$$Q_{\text{прибутк}} = \frac{FC + \Pi}{P - AVC} \quad (4.8)$$

Для аналізу границь змін відпускної ціни в умовах вільного ринку необхідне проведення маркетингового дослідження на продукти-аналоги. Результати досліджень записуються в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 - Порівняльний аналіз сформованої ціни з цінами конкурентних товарів-аналогів

Види ціни	Одиниці вимірювання	Показники
1. Розрахункова ціна послуг з ПДВ	грн	130000
2. Ринкові ціни товарів-аналогів на ринку		-
– Мінімальна	грн	160000
– максимальна	грн	230000
– середня	грн	185000
3. Скоригована ціна реалізації	грн	180000

4.8 Цільові групи потенційних споживачів

В обґрунтуванні потенційних споживачів виявляються цільові групи, яким будуть пропонуватися створені обладнання або технології, а також визначити відповідну стратегію охоплення ринку: концентрованого маркетингу, диференційованого маркетингу, масового маркетингу.

Таблиця 4.9 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис цільової групи потенційних клієнтів	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Висотні житлові багатоквартирні будівлі	Високий попит через зростаючу кількість новобудов у великих містах	Середня	Середня

Обраний сегмент ринку передбачає розроблення базової стратегії розвитку (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 - Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентні позиції відповідно до обраної стратегії	Базова стратегія розвитку*
Модернізація систем водопостачання житлових багатопверхових будівель	Концентрований маркетинг	Використання сучасного енергозбережного обладнання, автоматизація систем	Стратегія концентрації

4.9 Канали збуту

Канали збуту — це сукупність фірм або окремих осіб, які виконують посередницькі функції щодо фізичного переміщення товарів і перебирають на себе або сприяють переданню права власності на товари на шляху їх просування від виробника до споживача.

Таблиця 4.11 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник послуг	Оптимальна система збуту
1	Проектна робота	Проектування, монтажні роботи та сервісне обслуговування	Прийняття замовлень на проекти через веб-сайт

4.10 Бізнес-модель проекту

Розробка стартап-проекту - це створення бізнес-моделі комерціалізації науково-технічних розробок. Побудова конкурентної бізнес-моделі є ефективним інструментом вирішення поставлених у роботі задач і представляє структуру найважливіших елементів бізнес-проекту та є джерелом інноваційних ідей і підходів, які можуть бути застосовані в унікальному поєднанні компонентів [41].

В табл. 4.12 представлено структуру бізнес-моделі інноваційного обладнання або технології.

Таблиця 4.12 - Структура бізнес моделі обладнання (технології)

Ключові партнери. Aquapolymer Engineering, FONtan, Vulver	Ключові види діяльності Проектування та модернізація насосних станцій	Цінність пропозиції Система підвищеної енергоефективності та зниженої вартості за рахунок використання скалярної IR-компенсації	Взаємовідносини з клієнтами Зворотний зв'язок через веб-сайт	Споживчі сегменти Висотні житлові багатоквартирні будівлі
	Ключові ресурси Програмне забезпечення для розрахунку параметрів системи		Канали збуту Прийняття замовлень на проекти через веб-сайт	
Структура собівартості 1.Витрати разові (капітальні): 120 тис.грн. 2.Витрати постійні 167,6 тис.грн.			Потоки надходження доходу Надання послуг з проектування, монтажу та сервісу.	

Висновки з розділу

Загалом, можна зробити висновок про високу прибутковість стартап-проекту, за рахунок низького рівню необхідних капіталовкладень та високого рівня прибутку. Загальні результати зведені у таблицю 4.13

Таблиця 4.13 - Узагальнюючі техніко-економічні показники

Показники	Значення
Річний випуск продукції, од	20
Капіталовкладення, тис. грн.	120
Собівартість послуг, тис. грн./рік	2011,2
Ціна послуг, тис грн	5211
Прибуток, тис. грн.	300,2
Рентабельність, %	14,9
Коефіцієнт економічної ефективності	1,1
Період повернення капіталовкладень, років	3

ВИСНОВКИ

У результаті роботи над дисертацією було досліджено технологічний процес підтримання тиску води, насосні станції та основні їхні характеристики. Також було створено імітаційну модель асинхронного ЕП насоса з урахуванням особливостей навантаження; розроблено систему керування асинхронним ЕП насоса.

Було досліджено принципи скалярного керування асинхронними двигунами. На основі закону, сформульованого Костенком М.П., було розраховано і побудовано механічні та електромеханічні характеристики АД для закону $\frac{U_1}{f_1^2} = const$ для режиму без компенсації та з IR-компенсацією. Система з IR-компенсацією показала підвищений пусковий момент при низьких частотах струму статора.

Системи скалярного керування мають дуже багато переваг перед іншими системами: простота, надійність, потрібен мінімум інформації про двигун, і немає необхідності у використанні датчиків швидкості та положення ротора. Також було досліджено систему автоматичної підтримки тиску води. Для отримання підтримання постійного тиску в системі було введено зворотний зв'язок за тиском.

Реалізація стартап-проекту показала високу прибутковість ідеї, за рахунок низького рівню необхідних капіталовкладень та високого рівня прибутку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ВОЗНЯК, Олександр Миколайович; ШТУЦЬ, Андрій Анатолійович; НААВГУСТ, Олександр Петрович. Аналіз комплексної моделі моніторингу параметрів якості електроенергетики. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2021, 4: 115.
2. GIRDHAR, Paresh; MONIZ, Octo. *Practical centrifugal pumps*. Elsevier, 2011.
3. КУЛІНЧЕНКО, Віталій Романович. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник. 2006.
4. НІКОЛОВА, Р. О. Гідравлічні та аеродинамічні машини. 2006.
5. LOBANOFF, Val S.; ROSS, Robert R. *Centrifugal pumps: design and application*. Elsevier, 2013.
6. КОЗЕЛКОВ, С. В.; КОРОБКО, О. А. Обґрунтування доцільності впровадження частотного регулювання в електроприводах насосів. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2013, 1: 133-138.
7. ПОПОВ, Володимир Андрійович; ТКАЧЕНКО, Вадим Владиславович; ЯРМОЛЮК, Олена Сергіївна. Ефективне керування режимами систем забезпечення споживачів електричною енергією. 2021.
8. OLSSON, Gustaf. Urban water supply automation—today and tomorrow. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 2021, 70.4: 420-437.
9. ГАРАСЬОВА, Н. Ю.; ВЕЛИЧКО, Т. В. Оцінка ефективності роботи регульованого електроприводу насосу при змінному графіку водоспоживання. 2014.
10. ЯСИНІЦЬКИЙ, Е. П., et al. Система автоматичного керування цехом Дніпровської водоподготовчої станції. *Промислова гідравліка і пневматика*, 2018, 4: 3-12.
11. ШЕВЧЕНКО, Т. О., et al. Насосні та повітродувні станції: навч. посібник. 2014.

- 12.ДОБРОВОЛЬСЬКА, О. Г. НАСОСНІ ТА ПОВІТРОДУВНІ СТАНЦІЇ. 2020.
- 13.ДБН 4132-2002 Насоси відцентрові загальнопромислового застосування. Вимоги до проектування, виготовлення, постачання, монтажування та експлуатування. Звід правил. Київ: Держстандарт України, 2002.-27 с.
- 14.МЕЛЬНІКОВА, Любов Василівна; ШЕСТАКА, Анатолій Іванови; КАЛІНІН, Олександр Георгійович. Енергозберігаюче керування електроприводом насоса гідравлічного крана. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 2018, 27: 82-90.
- 15.ДБН В.2.5-74:2013 Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ: Держстандарт України, 2013.-172 с.
- 16.KAN, Eduard; IKRAMOV, Nazir; MUKHAMMADIEV, Muradulla. The change in the efficiency factor of the pumping unit with a frequency converter. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2019. p. 05010.
- 17.XIUYUN, Xue, et al. Variable rate liquid fertilizer applicator for deep-fertilization in precision farming based on zigbee technology. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 52.30: 43-50.
- 18.ВОЛОДАРСЬКИЙ, Є. Т., et al. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. *Вінниця: Велес*, 2001.
- 19.ШЕВЧУК, Степан Прокопович; МЕЙТА, Олександр Вячеславович. Електричні мережі та системи: Конспект лекцій. 2022.
- 20.ГРИЩУК, Юрій Степанович; СУХОСТАВЦЕВА, Т. В. Мікроконтролерний розчеплювач для автоматичних вимикачів. 2008.
- 21.ОГНІВЕНКО, О. Д. ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОВОЗА ЗМІННОГО СТРУМУ ДСЗ. *МОЛОДИЙ НАУКОВЕЦЬ*, 2020, 92.
- 22.ДАНЬКО, В. Г.; ГОНЧАРОВ, Є. В. Електромагнітний надпровідний обмежувач струму короткого замикання. In: *Інформаційні технології: наука,*

техніка, технологія, освіта, здоров'я: XVIII міжн. наук.-практична конф.(microCAD-2010). р. 12-14.

- 23.ГЛЄБОВА, М. Л.; ДОРОХОВ, О. В.; ФОРКУН, Я. Б. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Електричні машини»(для студентів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050702–Електромеханіка).
- 24.SHURUB, Yu V. Статистична оптимізація частотно регульованих асинхронних електроприводів при скалярному керуванні. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, 1: 26-30.
- 25.СИНЯВСЬКИЙ, О. Ю., et al. ЕЛЕКТРОПРИВОД ВИРОБНИЧИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ. 2020.
- 26.ЗАКЛАДНИЙ, Олександр Миколайович; ПРОКОПЕНКО, Володимир Васильович; ЗАКЛАДНИЙ, Олег Олександрович. Електропривод. 2008.
- 27.КРАСНОШАПКА, Наталія Дмитрівна; ПИЖОВ, Володимир Михайлович; ПУШКАР, Микола Васильович. Теорія електропривода-1. 2017.
- 28.ГРАБКО, В. В., et al. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини. 2007.
- 29.Бур'ян С.О.; Ворощенко В.Ю.; Пушкар М.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ІР-КОМПЕНСАЦІЇ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ ПРОМИСЛОВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ
- 30.ЛІЩЕНКО, Віталій Петрович. Дослідження ефективності використання частотно-керованих електроприводів у вентиляційних установках. 2022.
- 31.ГУЗЕНКО, В. В.; ЛИСИЧЕНКО, Л. М. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНУТИМ РОТОРОМ ПРИ ЧАСТОТНОМУ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ НА НАСОСНИХ СТАНЦІЯХ. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 2011, 2: 50-54.

32. ГАРМАШ, Олександр Валерійович. Система автоматичного керування режимом реактивної потужності в електричних мережах при несиметрії напруги. 2022.
33. ДЕНИСЮК, Сергій Петрович; БЄЛОХА, Галина Сергіївна. Системи силової електроніки та засоби керування в електроенергетиці. Силова електроніка в системах електроживлення. 2022.
34. ЯРОШЕНКО, Л. В.; РУБАНЕНКО, О. О.; ВИШНЕВСЬКИЙ, В. М. Електричні машини.
35. КОНОНОВ, Б. Т.; НЕЧАУС, А. О.; РЯБУХА, Н. М. Система керування частотно-регульованим електроприводом на базі асинхронного електричного двигуна. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, 2014, 3: 136-140.
36. ПОДВИШЕЦЬКИЙ, Андрій Ігорович. Моніторинг несиметричних режимів роботи електричних мереж та розробка методів і заходів зниження несиметрії напруги. 2021.
37. КРУШ, Петро Васильович; ШЕВЧУК, Наталія Анатоліївна; АНДРУСЬ, Ольга Іванівна. Стартап-проект. Рекомендації до виконання розділу магістерської дисертації «Розроблення стартап-проекту». 2019.
38. ЮРКОВ, В. В.; ГАРАСЬОВА, Н. Ю. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ. *НАУКА–ВИРОБНИЦТВО*, 2014, 2014, 165.
39. ПЛУТАХІН, М. О. Цифрова система керування електроприводом. 2023.
40. СИНЧУК, І. В. Вплив SWOT-аналізу на прийняття управлінських рішень в умовах фінансової кризи. *Молодий вчений*, 2016, 3: 174-178.
41. Шевчук Н.А. Впровадження та реалізація стартапів в гірництві / Шевчук Н.А. / Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 120 – річчю КП «ПРОБЛЕМИ ГЕОІНЖЕНЕРІЇ ТА ПІДЗЕМНОЇ УРБАНІСТИКИ», м. Київ, 17-18 травня 2018 р.– К.: НТУУ «КПІ», 2018. – С. 89-90.