

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти

на тему:

**«Енергоощадне керування плавним пуском асинхронних
двигунів систем водопостачання з аналізом пускових
режимів»**

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи *ЕЕ-22М*

ОПП «Електротехнічні системи

електроспоживання»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»,

_____Максим ДЕМЧЕНКО

« ____ » _____ 2023 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____Наталія ГАРАСЬОВА

« ____ » _____ 2023 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

Петро ПЛЄШКОВ

« 04 » 09 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Демченко Максима Павловича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Енергоощадне керування плавним пуском асинхронних двигунів систем водопостачання з аналізом пускових режимів

Energy-saving soft start control of asynchronous motors in water supply systems with analysis of starting modes

2. Керівник роботи Гарасьова Наталія Юріївна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 28.12.2023 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: аналіз типової структури, функцій насосної станції системи водопостачання та сучасних тенденцій використання пристроїв плавного пуску; побудова математичної моделі автоматизованої системи керування плавним пуском асинхронних двигунів насосної станції; моделювання системи плавного пуску асинхронних двигунів насосної станції; економічне обґрунтування застосування пристроїв плавного пуску асинхронних двигунів; охорона праці; висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. І.В. Савеленко		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	10.10.2023 р.	
2	Аналіз типової структури, функцій насосної станції системи водопостачання та сучасних тенденцій використання пристроїв плавного пуску	13.10.2023 р.	
3	Побудова математичної моделі автоматизованої системи керування плавним пуском асинхронних двигунів насосної станції	25.10.2023 р.	
4	Моделювання системи плавного пуску асинхронних двигунів насосної станції;	30.10.2023 р.	
5	Економічне обґрунтування застосування пристроїв плавного пуску асинхронних двигунів;	15.11.2023 р.	
6	Охорона праці	30.11.2023 р.	
7	Висновки	07.12.2023 р.	
8	Список використаних джерел	11.12.2023 р.	
9	Оформлення презентації МР	15.12.2023 р.	
10	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки МР	20.12.2023 р.	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис керівника

Наталія ГАРАСЬОВА

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис здобувача

Максим ДЕМЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 102 с.; 28 рис.; 8 табл.; 34 джерела

Демченко М.П Енергоощадне керування плавним пуском асинхронних двигунів систем водопостачання з аналізом пускових режимів. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Об’єктом досліджень є процеси електромеханічного перетворення енергії при здійсненні плавного пуску асинхронних двигунів насосної станції в системі водопостачання.

Предмет досліджень – ефективність плавного пуску асинхронних двигунів насосної станції системи водопостачання.

Метою роботи є підвищення енергоощадності керування плавним пуском асинхронних двигунів насосної станції системи водопостачання.

У першій главі кваліфікаційної роботи виконано аналіз сучасних типових структур насосних станцій та тенденцій до застосування пристроїв плавного пуску. Обґрунтовано доцільність застосування пристроїв плавного пуску на насосних станціях, які потребують частого запуску насосних агрегатів, наприклад, у разі використання резервуарів обмеженої ємності.

У другій главі розглянуто побудову математичної моделі автоматизованої системи керування плавним пуском АД насосної станції, яка включає до свого складу окремі моделі: системи імпульсно-фазового керування тиристорним перетворювачем напруги, модель трансформаторної підстанції, спрощену теплову модель асинхронного двигуна, моделі насосного навантаження та гідравлічної системи.

У третій главі магістерської роботи виконано моделювання системи плавного пуску асинхронних двигунів насосної станції з використанням

постійної струмообмежуючої уставки та розрахункової уставки, яка враховує поточний стан системи. Запропоновано адаптивний алгоритм керування плавним пуском асинхронних двигунів насосної станції.

У четвертій главі досліджено економічну ефективність застосування пристроїв плавного пуску та в п'ятій главі розглянуто основні вимоги безпечної експлуатації насосних станцій.

За результатами роботи зроблено висновки та пропозиції щодо роботи насосних станцій з пристроями плавного пуску, розраховано економічний ефект від їх впровадження.

Ключові слова: асинхронний двигун, насосна станція, пристрій плавного пуску, автоматизована система керування, ефективність керування

ABSTRACT

Qualification work: 102 p.; 28 fig.; 8 tables; 34 sources

Demchenko M. P. Energy-saving soft start control of asynchronous motors in water supply systems with analysis of starting modes. - Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrotechnical systems of electricity consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The object of research is the process of electromechanical energy conversion during the smooth start of asynchronous motors of a pumping station in the water supply system.

The subject of research is the efficiency of soft start of asynchronous motors of the pumping station of the water supply system.

The purpose of the work is to increase the energy efficiency of the soft start control of asynchronous motors of the pumping station of the water supply system.

In the first chapter of the qualification work, an analysis of modern typical structures of pumping stations and trends in the use of soft start devices is performed. The expediency of using soft-start devices at pumping stations that require frequent start-up of pumping units, for example, in the case of using tanks of limited capacity, is substantiated.

In the second chapter, the construction of a mathematical model of the automated soft start control system of the AD pumping station is considered, which includes separate models: a pulse-phase control system with a thyristor voltage converter, a model of a transformer substation, a simplified thermal model of an asynchronous motor, pump load models, and a hydraulic system.

In the third chapter of the master's work, the simulation of the system of soft start of asynchronous motors of the pumping station is performed using a constant current limiting set point and a calculated set point that takes into account the current state of the system. An adaptive algorithm for controlling the soft start of asynchronous motors of a pumping station is proposed.

In the fourth chapter, the economic efficiency of the use of soft-start devices is investigated, and in the fifth chapter, the main requirements for the safe operation of pumping stations are considered.

Based on the results of the work, conclusions and proposals were made regarding the operation of pumping stations with soft start devices, and the economic effect of their implementation was calculated.

Key words: asynchronous motor, pumping station, soft start device, automated control system, control efficiency

З М І С Т

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ ТИПОВОЇ СТРУКТУРИ, ФУНКЦІЙ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСТРОЇВ ПЛАВНОГО ПУСКУ.....	14
1.1 Аналіз структури та функції насосної станції системи водопостачання.....	14
1.2 Сучасні тенденції застосування пристроїв плавного пуску АД з короткозамкнутим ротором.....	18
1.3 Вибір системи, що реалізує плавний пуск двигунів.....	21
2 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПЛАВНИМ ПУСКОМ АД НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ.....	25
2.1 Структура математичної моделі АСК плавним пуском АД насосної станції.....	25
2.2 Модель системи імпульсно-фазового керування тиристорним перетворювачем напруги асинхронного двигуна.....	27
2.3 Вибір типу синхронізації системи імпульсно-фазового керування ТПН-АД.....	33
2.3.1. СІФК-ТПН-АД з синхронізацією тиристорів по напрузі мережі.....	34
2.3.2. СІФК-ТПН-АД з синхронізацією тиристорів по струму навантаження.....	37
2.4 Математична модель трансформаторної підстанції.....	39
2.5 Спрощена теплова модель асинхронного двигуна.....	42
2.6 Математична модель насосного навантаження.....	46

	2.7 Математична модель гідравлічної системи.....	50
3	МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПЛАВНОГО ПУСКУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ.....	56
	3.1 Дослідження енергетичної підсистеми плавного пуску АД.....	56
	3.2 Моделювання гідравлічної підсистеми АСК ПП АД.....	63
	3.3 Моделювання нестационарного нагріву обмоток асинхронних двигунів.....	67
	3.4 Керування режимами плавного пуску та гальмування асинхронних двигунів.....	70
	3.5 Аналіз основних показників перехідних процесів при пуску АД	73
	3.6 Адаптивний алгоритм керування плавним пуском асинхронних двигунів насосної станції.....	75
4	ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЇВ ПЛАВНОГО ПУСКУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.	82
	4.1 Визначення величини капіталовкладень.....	82
	4.2 Визначення експлуатаційних витрат.....	83
	4.3 Розрахунок показників економічної ефективності.....	87
5	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	89
	5.1 Основні вимоги безпечної експлуатації насосних станцій.....	89
	5.2 Розрахунок заземлюючого пристрою ТП.....	95
	ВИСНОВКИ.....	97
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	99

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД - асинхронний двигун

АСК - автоматизована система керування

АСК ПП - автоматизована система керування плавним пуском

АСК ТП - автоматизована система керування технологічним процесом

АЕП - автоматизований електропривод

ЛЕП - лінія електропередач

ММ - математична модель

НА - насосний агрегат

НР - несиметричний режим

НС - насосна станція

ПУ - початкова умова

ЗДУ - звичайне диференціальне рівняння

СІФУК - система імпульсно-фазового керування

СН - синхронізація по напрузі мережі

СС - синхронізація по струму навантаження

СЗДР - система звичайних диференціальних рівнянь

ТП - трансформаторна підстанція

ТПН – тиристорний перетворювач напруги

ППП – пристрій плавного пуску

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищення ефективності промислового виробництва являється стратегічно важливою задачею, яка впливає на конкурентоспроможність підприємств, сталість економіки та забезпечує більш ефективне використання ресурсів.

За експертними оцінками основним споживачем електричної енергії являється промисловий електропривод, в якому до 25 % усієї спожитої електроенергії приходить на турбомеханізми, такі як насоси, вентилятори, компресори та інші. Що стосується електроенергії, яка споживається турбомеханізмами, основна частина приходить на відцентрові насоси, що застосовуються в магістральних трубопроводах, системах водопостачання та водовідведення.

Питання підвищення енергоефективності насосних установок визначається рядом факторів, які стосуються заощадження використання енергії, економії ресурсів та оптимізації роботи систем водопостачання. Вирішенню цієї проблеми сприяє розробка заходів з енергозбереження та автоматизації насосних станцій.

Системи, що забезпечують плавний пуск асинхронних двигунів дозволяють зменшити різкий споживаний струм при пуску, що сприяє зменшенню пікового навантаження та покращенню енергоефективності систем водопостачання. Використання пристроїв плавного пуску(ППП) допомагає зменшити механічний вплив на обладнання, уникнути гідравлічного удару в системі водопостачання, що веде до зниження зносу та продовження терміну служби обладнання.

Завдання системи плавного пуску насосного агрегату полягає у формуванні такої траєкторії пуску та гальмування двигуна насоса, яка забезпечить обмеження кидків струму, знакозмінних коливань електромагнітного моменту, температури статорних обмоток асинхронного двигуна та, одночасно, забезпечить контроль тиску у трубопроводі.

В цілому, енергоощадне керування плавним пуском асинхронних двигунів в системах водопостачання є актуальною темою, оскільки вона вирішує важливі

завдання енергоефективності, сталості електромережі та довговічності обладнання.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є дослідження підвищення ефективності роботи насосної станції за рахунок впровадження автоматизованої системи керування плавним пуском асинхронних двигунів насосних агрегатів.

Для отримання результатів потрібно вирішити наступні завдання:

- дослідити ефективність процесів, що супроводжують електромеханічне перетворення енергії у пристроях плавного пуску системи водопостачання;
- розробити методику моделювання та математичну модель, що описує процес електромеханічного перетворення енергії для застосування ППП АД насосної станції;
- скласти алгоритм керування ППП асинхронних двигунів, який дозволить заощадити втрати електроенергії при пуску та, одночасно, виконати обмеження, що стосуються показників перехідних процесів у системі «електрична мережа – пристрій плавного пуску – асинхронний двигун – насосний агрегат – трубопровід»;
- дослідити економічну ефективність застосування ППП.

Об'єктом дослідження являються процеси електромеханічного перетворення енергії при здійсненні плавного пуску асинхронних двигунів насосної станції в системі водопостачання.

Предметом дослідження являється керування електромеханічним перетворенням енергії системи плавного пуску, яка побудована на основі розімкнутої за швидкістю системи імпульсно-фазового керування ТПН асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором.

Методи дослідження ґрунтуються на загальних методах теоретичної електротехніки, електромеханіки, чисельних методах інтегрування диференціальних рівнянь, теорії імпульсних систем автоматичного керування, теоретичної та прикладної гідродинаміки, теорії стійкості та методах математичної статистики. В роботі використанні сучасні інструментальні

системи та методів математичного моделювання, зокрема, програма MATLAB додаток Simulink.

Основні теоретичні концепції підкріплюються та перевіряються за рахунок проведення математичного моделювання.

Науково-практична цінність роботи.

Проведений аналіз типової структури насосної станції, сформульовані мета та функції АСК в системі водопостачання та її підсистемі: АСК ПП АД насосної станції.

Досліджена робота енергетичної системи, до складу якої входять: електрична мережа, тиристорний перетворювач напруги, асинхронний двигун, насос, трубопровід.

Розроблено математичні моделі елементів системи та методика моделювання процесів плавного пуску АД насосної станції.

Запропоновано алгоритм керування ПП асинхронних двигунів, що дозволяє заощадити втрати електричної енергії в обмотках.

Результати кваліфікаційної роботи доцільно використовувати для насосних станцій, що потребують частого пуску асинхронних двигунів.

1 АНАЛІЗ ТИПОВОЇ СТРУКТУРИ, ФУНКЦІЙ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСТРОЇВ ПЛАВНОГО ПУСКУ

1.1 Аналіз структури та функцій насосної станції системи водопостачання

Призначенням насосної станції (НС) системи водопостачання являється забір та переміщення води від джерела (водозабірний резервуар) до місця споживання або напірного резервуару. Ця функція виконується за допомогою комплексу гідротехнічних споруд та насосних агрегатів (НА). Тобто, типову схему насосної станції можливо представити у вигляді, який наведено на рис.1.1.

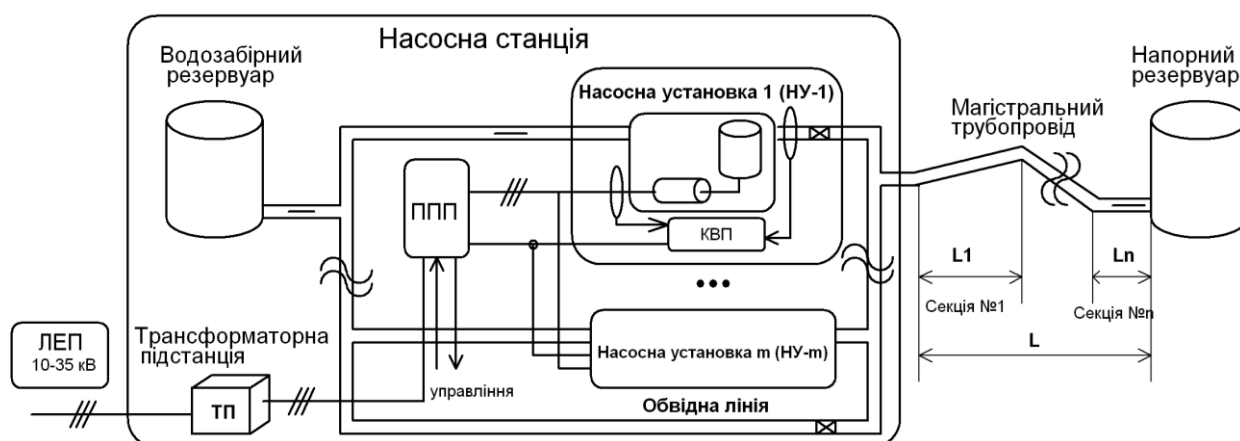


Рисунок 1.1- Структурна схема типової насосної станції системи водопостачання.

До такої схеми входять наступні компоненти:

- насосний агрегат, що представляє собою об'єднання асинхронного електроприводу, редуктору та насосу;
- насосна установка (НУ), яка крім насосного агрегату включає до свого складу напірний та всмоктуючий трубопроводи, арматуру, контрольно-вимірювальні прилади та пристрій керування НА;

- трансформаторна підстанція, яка здійснює електропостачання електричного обладнання насосної станції;
- водозабірний резервуар, до якого потрапляє вода через трубопровід попередньої ділянки водопостачання, після обробки у водоочисній підсистемі чи з артезіанської скважини;
- магістральний трубопровід, який забезпечує подачу води у напірний резервуар або безпосередньо в мережу;
- обвідна лінія, яка передбачається для резервування при аварійній зупинці насосної установки.

Для підвищення ефективності роботи такої типової структури НС може бути запропонована автоматизована система керування (АСК) технологічним процесом (ТП) водопостачання.

АСК ТП можливо представити сукупністю засобів технічного, математичного, програмного та інформаційного забезпечення для розробки та впровадження керуючих впливів на систему водопостачання. Мета такої системи забезпечити мінімум собівартості, необхідний об'єм та якість води, що подається споживачам.

АСК технологічним процесом водопостачання побудована за ієрархічною структурою (рис.1.1). Основними підсистемами АСК технологічним процесом являються: підйом води (включає керування групами артезіанських свердловин для насосних станцій I-го підйому); очищення води (керування водоочисними спорудами); подача та розподіл води (керування насосними, які поставляють воду у мережу) та дальній транспорт води (керування НС для магістральних трубопроводів).

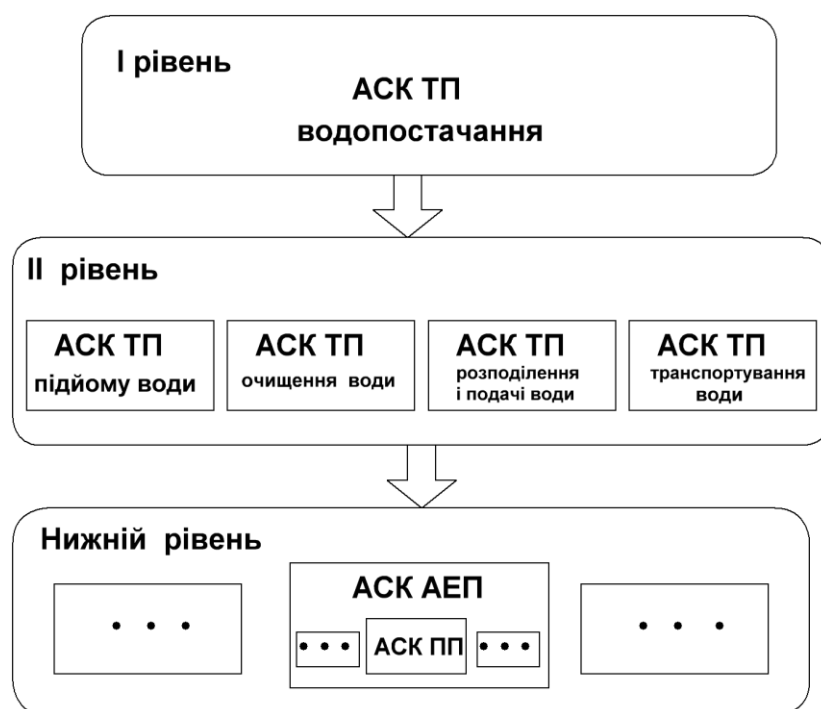


Рисунок 1.2 – Зображення ієрархічної структури АСК системи водопостачання.

АСК асинхронного електроприводу (АЕП) відноситься до нижнього рівня ієрархічної структури. Одна із функцій цієї підсистеми полягає у забезпеченні пуску та зупинки двигунів НА. Складність цієї проблеми та необхідність створення та використання різноманітного інформаційного, математичного і програмного забезпечення для ефективного її вирішення призвели до створення нового підкласу автоматизованих систем керування. Цей підклас отримав назву автоматизованих систем керування плавним пуском (АСК ПП) електродвигунів.

Автоматизована система керування для плавного пуску електроприводу насосного агрегату в системі водопостачання є комплексом технічних, інформаційних, математичних і програмних засобів. Її завданням є створення сигналів керування та їх передача без втрат та спотворень на пристрій для плавного запуску насосного агрегату з метою оптимального керування перехідними процесами в системі "мережа - насосний агрегат - трубопровід". Критерієм ефективності в цьому випадку є мінімізація втрат електроенергії при

врахуванні певних обмежень. Типову структурну схему системи АСК ПП електроприводу, що відповідає цьому визначенню, наведено на рис. 1.3.

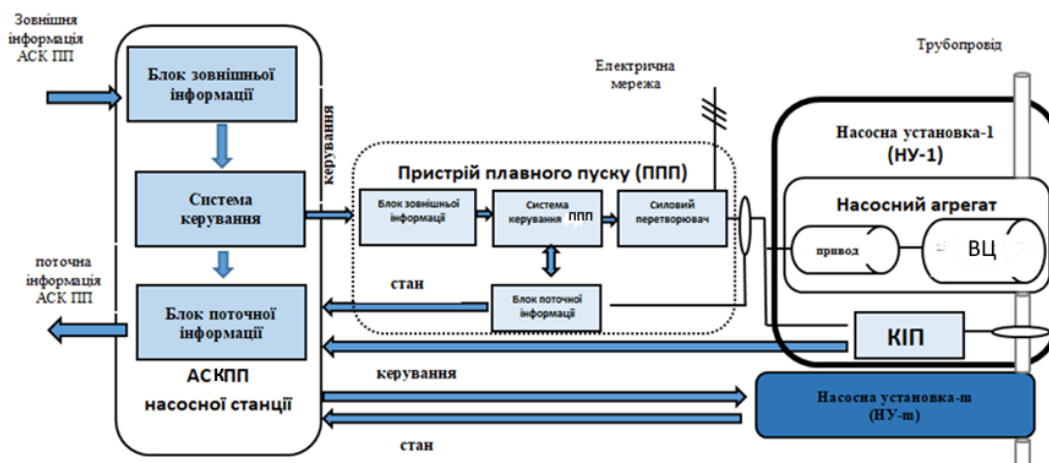


Рисунок 1.3 – Зображення типової структури АСК ПП електроприводу.

Така система виконує три основні функції: керуючу, інформаційну і допоміжну. Її керуюча функція стосується формування пускогальмівних режимів для насосних установок. Такі режими повинні забезпечити оптимальне проходження перехідних процесів у системі «НА - трубопровід». Бажано отримати такий перехідний процес, що забезпечить мінімальні енергетичні втрати в обмотках асинхронного двигуна. При цьому, обов'язковою умовою є виключення гідравлічного удару та виконання необхідних обмежень по амплітуді вільної складової струмів статора та електромагнітного моменту двигуна.

Інформаційна функція АСК ПП електродвигунів НС полягає у зібранні, перетворенні, зберіганні та передачі інформації про стан НУ для АСК вищого ієрархічного рівня.

До допоміжних функцій відноситься, насамперед, діагностична. Ця функція забезпечує контроль параметрів електричної мережі: напруги, струму, симетричності фаз; стану трубопроводу та параметрів довкілля. Моніторинг

цих параметрів дозволяє знизити ймовірність виникнення та розвитку аварійних режимів.

1.2 Сучасні тенденції застосування пристроїв плавного пуску АД з короткозамкнутим ротором

Проблема зменшення втрат електроенергії в обмотках двигунів відцентрових насосів під час пуску стає особливо актуальною у випадках, коли потрібно часто запускати насосні агрегати. Наприклад, розглянемо ситуацію у системах водопостачання, де з технологічних причин використовуються резервуари обмеженої ємності (як у системах очищення води, або в системах водопостачання невеликих об'єктів), а також у випадках використання погрузних насосів.

У якості електроприводів відцентрових насосів в системах водопостачання та каналізації, як правило, застосовуються електродвигуни змінного струму. Це пов'язано з компактністю конструкцій, зручністю з'єднань з насосом, легкістю впровадження автоматизації керування та достатньо низькими експлуатаційними витратами. Відцентрові насоси в нормальних умовах та після аварійного відключення мають полегшені умови пуску, запускаються, як правило, вхолосту. Для цих умов, момент торкання не більше (30-35)% від номінального моменту, момент опору плавно підвищується зі збільшенням швидкості. Ці обставини дозволяють застосовувати у якості електроприводів ВН асинхронні та синхронні двигуни змінного струму.

Розглянемо загальновідомі недоліки прямого пуску асинхронних двигунів [10]:

1. Амплітуда струмів обмоток статора двигуна в (6-8) та більше разів перевершує амплітуду струмів сталого режиму. Найбільш значні зусилля приходяться на лобові частини обмоток статора, що викликає ослаблення бандажування обмоток, термічний вплив на ізоляцію, що може привести до короткого замикання витків обмоток та передчасного виходу двигуна з ладу.

2. Крім того, протікання значних пускових струмів викликає падіння напруги в мережі, що обумовлено падінням напруги на внутрішньому опорі джерела живлення у разі застосування автономних генераторів та інших джерел слабкої потужності.

3. Спостерігається значне збільшення (в 4-5 разів) електромагнітного моменту електродвигуна при прямому пуску, порівняно до номінального моменту. При цьому, підшипники та виконавчий механізм знаходяться під дією підвищених навантажень, що приводять до появи зазорів у механічних з'єднаннях між двигуном та механізмом, і таким чином, до скорочення міжремонтного інтервалу.

4. Швидкий пуск чи зупинка асинхронних двигунів насосних агрегатів системи водопостачання, може привести до виникнення гідравлічного удару, який створює додаткові навантаження у трубах, сполучних муфтах, фланцях та інших монтажних конструкціях. Це приводить до їх передчасного зносу та виходу з ладу.

Такі негативні особливості прямого пуску та гальмування двигунів зумовили необхідність розробки та використання ряду технічних та організаційних заходів, які дозволяють усунути, або обмежити небажані явища. На основі аналізу літературних джерел [8,10] у роботі прийняті наступні обмеження:

1. Величина ударного пускового струму електродвигуна $I_{уп}$, не повинна викликати падіння напруги у точці приєднання до мережі нижче ніж $\Delta U_{\max, \text{доп.}}$, встановлюваного нормами [28]. Дотримання цієї умови дозволяє забезпечити нормальну роботу електричного обладнання насосної станції, включаючи обчислювальну техніку, контрольно-вимірювальні прилади та інші.

2. Значення $I_{уп}$ не повинно перевищувати амплітуду пускового струму, яка встановлена виробником даного двигуна. Дотримання цієї умови забезпечує захист обмоток електродвигуна від механічних перевантажень, які перевищують величину, що встановлюється виробником.

3. Зміна статорних струмів обмоток електродвигуна протягом перехідного процесу не повинна викликати підвищення сталої температури обмоток статорів вище гранично допустимого значення, яке встановлюється для системи ізоляції відповідного класу нагрівостійкості.

4. Час перехідних процесів T_n , має бути вибраний таким чином, щоб забезпечити умови 1-3, та обмежити найбільший приріст тиску в трубопроводі, $\Delta P_{\text{max. доп.}}$.

Аналіз шляхів вирішення задачі обмеження негативних наслідків прямого пуску асинхронних двигунів дозволив виділити чотири основні підходи [9,10]:

- застосування автотрансформаторів;
- перемикання статорних обмоток двигуна із зірки на трикутник в процесі пуску;
- підключення додаткових резисторів чи індуктивностей в статорні обмотки двигуна;
- використання напівпровідникових перетворювачів частоти та тиристорних перетворювачів напруги.

Основним недоліком перших 3-х підходів являється неможливість керування тривалістю перехідних процесів. Це порушує умови 4-го обмеження, що прийняте у роботі. Тому, розглянемо використання напівпровідникових перетворювачів частоти для виконання плавного пуску асинхронних двигунів.

Як відомо [20,33], найбільш універсальним типом АЕП, який забезпечує його широке використання у системах автоматизації електромеханічного перетворення енергії, являється частотнорегульований асинхронний електропривод. Широкий діапазон регулювання швидкості та можливості енергозбереження в АЕП з перетворювачами частоти, як правило, не залишає можливостей альтернативним типам АЕП. Але, підвищені вимоги до надійності ЕП живильних насосів ТЕЦ та АЕС, НС систем водопостачання та магістральних трубопроводів, роблять недоречним використання частотнорегульованих асинхронних електроприводів тільки для керування

пускогальмівними режимами, через насиченість елементної бази, складність схеми, алгоритмів керування, обслуговування та високої вартості. На цій підставі, для реалізації ППП найбільше використання отримала розімкнена за швидкістю система керування тиристорним перетворювачем напруги (ТПН).

1.3 Вибір системи, що реалізує плавний пуск двигунів

Класифікацію відомих варіантів реалізації ППП з ТПН наведено в [15-17]. Для обґрунтування побудови структурної схеми пристрою плавного пуску НУ, розглянемо складові цієї системи окремо.

За принципом виконання електричної частини силового каналу, тиристорні перетворювачі напруги підрозділяються на наступні типи:

- нереверсивний тиристорний перетворювач напруги із симетричним та несиметричним включенням тиристорів у фазні обмотки статора асинхронного двигуна. Несиметричні ТПН вносять істотну несиметрію у систему струмів та напруги для живлення АД, тому мають обмежене застосування;
- реверсивний тиристорний перетворювач напруги. До недоліків слід віднести збільшені масогабаритні показники та ускладнену систему керування. Практично не застосовується на насосних станціях, бо відсутня необхідність реверсування приводів насосів;
- комплектні пускорегулюючі пристрої. Застосування цих пристроїв являється доцільним з технічної та економічної точки зору, як правило, в спеціалізованих АЕП. Це пояснюється невикористанням частини їх функціональних можливостей для електроприводу масового застосування та значних масогабаритних показників.

Можливо зробити висновок, що з врахуванням переваг та недоліків наведених вище варіантів виконання ТПН для реалізації ППП асинхронних двигунів насосної станції, пропонується вибрати нереверсивну симетричну схему із шістьма тиристорами, які включені попарно (зустрічно-паралельно) у кожен фазу статорної обмотки асинхронного двигуна.

Алгоритми керування ТПН розділяють на чотири групи [10,15]:

- квазічастотне керування. Виконується модуляція мережевої трифазної напруги за рахунок низькочастотних релейних чи аналогових сигналів керування. До недоліків такого алгоритму слід віднести підвищення шуму та вібрацій в електродвигуні, з яким пов'язані суттєві обмеження його використання;

- імпульсне керування. При такому способі керування відсутнє фіксоване значення частоти в модулюючому сигналі. На практиці, цей спосіб отримав обмежене застосування через великі пульсації миттєвого моменту та частоти обертання асинхронного двигуна;

- векторно-імпульсне керування. Такий спосіб керування використовує імпульсне керування, але додатково враховує стан внутрішніх змінних асинхронного двигуна. В цьому випадку, для отримання електромагнітного моменту застосовуються дані про вектори магнітного потоку та струму. Такий алгоритм також має недоліки, основний з яких полягає у періодичній появі тимчасових інтервалів із частотою (25-50) Гц, у які, всі три фази статора електродвигуна відключаються від мережі. Такий алгоритм також являється додатковою причиною пульсацій електромагнітного моменту та струмів в обмотках статору АД;

- імпульсно-фазове керування. При такому способі, регулювання напруги, що подається на статор асинхронного двигуна, здійснюється симетричною зміною кута керування тиристорами. Цей спосіб найчастіше застосовується в розімкнених системах серійно випускаємих ТПН.

Тому, для побудови пристрою плавного пуску АД насосної станції, будемо використовувати саме алгоритм фазового керування.

Всі ці алгоритми можуть бути реалізовані, як засобами аналогової, так і цифрової системи керування.

На підставі вищенаведеного, сформулюємо вимоги до компонентів автоматизованої системи керування ПП електродвигунів насосної станції, а саме для електродвигунів та систем керування.

- для приводу насосних агрегатів вибираються асинхронні двигуни із короткозамкнутим ротором, закритого та захищеного виконання;
- використовується система імпульсно-фазового керування із симетричним ТПН без зворотнього зв'язку за швидкістю двигуна;
- вибирається мікроконтролер (МК) з енергонезалежним пристроєм, користуальницька підсистема введення-виводу, інтерфейс із керуючою зовнішньою системою та контрольно-вимірювальною апаратурою.

Таку деталізовану структурну схему АСК плавного пуску асинхронних двигунів НС наведено на рис.1.4.

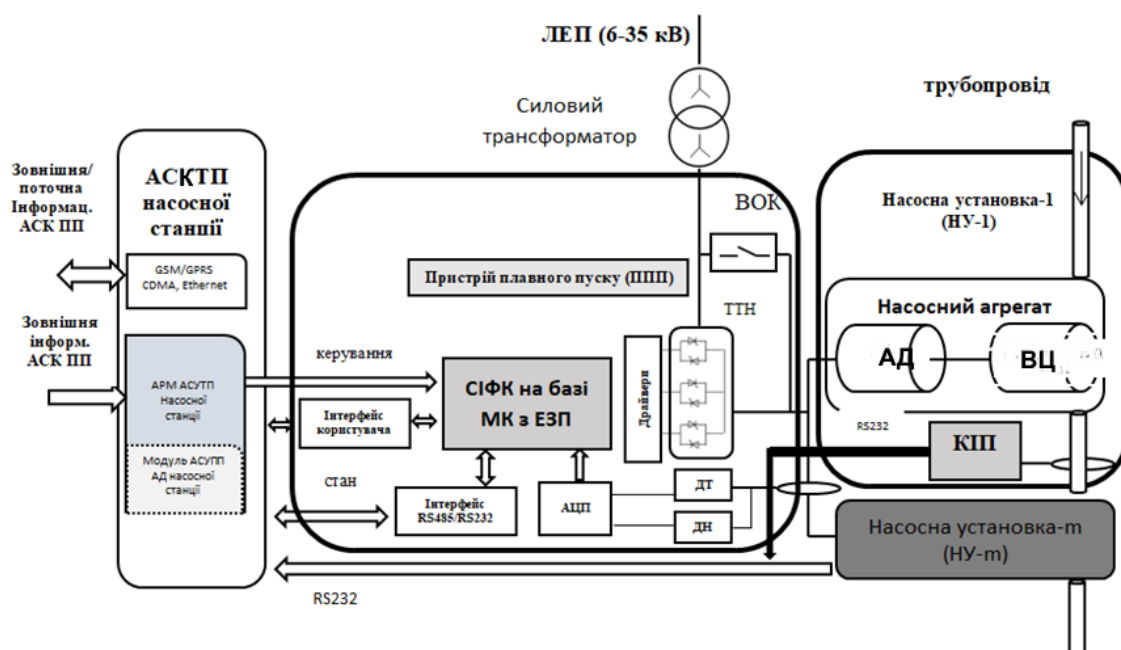


Рисунок 1.4 – Зображення деталізованої структурної схеми АСК ПП АД насосної станції системи водопостачання.

У якості інтерфейсу введення-виводу для ППП, в основному, вибираються гальванічно розв'язані промислові стандартні інтерфейси: RS-485/rs-232 та CAN. Також, можливе використання інтерфейсів для підключення сотових модемів зі стандартами GSM/GPRS, CDMA, та Ethernet для передачі інформації із використанням інформаційної інфраструктури.

Пристрій плавного пуску (рис. 1.4) побудований на основі системи імпульсно-фазового керування, яка реалізована на мікроконтролері з

незалежним запам'ятовуючим пристроєм, трифазного симетричного тиристорного перетворювача напруги з драйверами керування тиристорами та обвідним зовнішнім контактором; аналогово-цифрового перетворювача, датчиків та програмно-апаратних інтерфейсів введення-виводу. Крім того, до складу системи входить комутаційне високовольтне обладнання із пристроями релейного захисту та автоматики, яке не зображено на рис. 1.4.

Система керування АСК ПП асинхронних двигунів представляє собою частину програмного забезпечення (ПЗ) автоматизованого робочого місця диспетчера АСК насосної станції. Це дозволяє використовувати для керування єдиний електронно-обчислювальний комплекс.

Найбільш відповідальною та дорогою ланкою в АСК ПП є пристрій плавного пуску. Його вибір слід виконувати із врахуванням інтегрального критерію якості та вимог високої надійності при експлуатації.

2 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПЛАВНИМ ПУСКОМ АД НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

2.1 Структура математичної моделі АСК плавним пуском АД насосної станції

Особливістю математичної моделі (ММ) автоматизованої системи керування плавним пуском асинхронних двигунів насосної станції являється те, що вона повинна правильно відображати хід перехідних процесів системи, до складу якої входять: електрична мережа, пристрій плавного пуску, асинхронний двигун, насос та трубопровід.

Спираючись на типову структурну схему насосної станції, що наведена у першому розділі, представимо структурну схему загальної ММ як сукупність окремих моделей, а саме:

- ММ джерела електричної енергії;
- ММ системи імпульсно-фазового керування тиристорним перетворювачем напруги;
- ММ асинхронного двигуна;
- ММ насосної установки;
- ММ неусталеного руху рідини.

Загальний вигляд структурної схеми ММ представлено на рис. 2.1.

Звичайно, математична модель будується для певних цілей моделювання динамічних процесів. Математична модель може бути представлена у розподіленій постановці завдання чи зосередженій. У розподіленій постановці завдання досліджується не лише тимчасова динаміку протікання процесів, а і просторова. В цьому випадку, ММ записується у вигляді диференціальних рівнянь (ДР) у приватних похідних. У зосередженій постановці завдання просторову динаміку не враховують та розглядають тільки змінні стану ММ у часі. В цьому випадку, ММ записується у вигляді звичайних ДР.

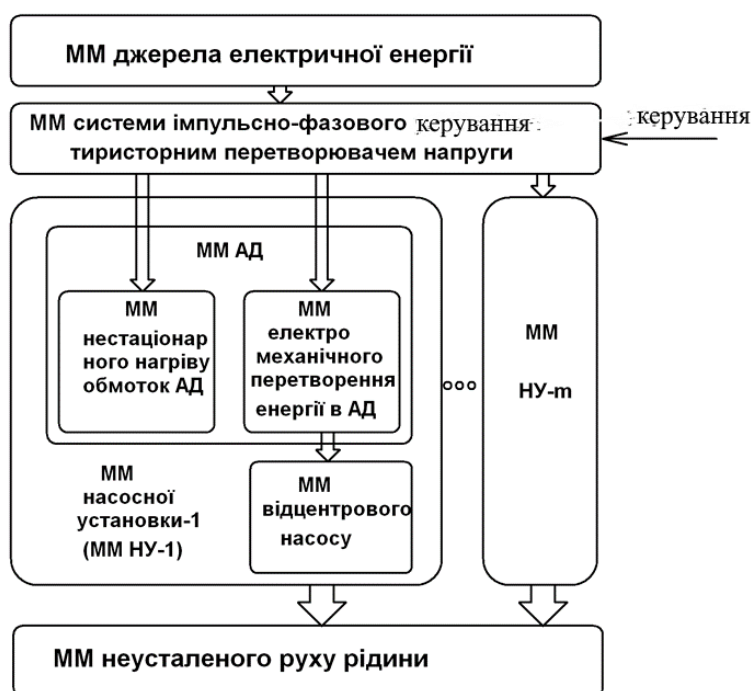


Рисунок 2.1 - Структурна схема ММ АСК плавного пуску АД насосної станції.

У кваліфікаційній роботі асинхронний двигун розглядається як складова частина електроприводу. Ця дозволяє використовувати зосереджену постановку задачі для синтезу ММ підсистеми СІФК-ТПН-АД із насосним навантаженням. Теплова модель АД, також розглядається в зосередженій постановці, для визначення максимального збільшення температури протягом перехідного процесу.

Модель джерела електричної енергії включає ідеальну ЛЕП-модель, яка представляє собою джерело синусоїдального струму нескінченної потужності, та трансформаторну підстанцію (ТП). Трансформаторна підстанція моделюється як ідеальний знижувальний трансформатор, до вторинної обмотки якого послідовно в часі підключаються асинхронні двигуни (АД) під час пуску насосних агрегатів. Важливо відзначити, що після завершення пуску кожного двигуна вмикається зовнішній обвідний контактор, який шунтує пристрій плавного пуску. Це призводить до того, що модель працюючого асинхронного

двигуна може бути описана як ідеальний електромеханічний перетворювач енергії, який функціонує в номінальному режимі.

Розробка алгоритмів керування АСК пристроїв плавного пуску асинхронних електроприводів, які забезпечують формування оптимальних траєкторій пускогальмівних режимів для асинхронних двигунів, спрямована на зменшення енергетичних втрат та уникнення виникнення гідравлічного удару в трубопроводі. Це вимагає використання математичних моделей для опису нестационарного руху рідини, які здатні точно відтворювати умови та особливості гідравлічного удару. Для досягнення цієї мети необхідно сформулювати задачу опису динаміки руху рідини в трубопроводі в розподіленій формі за допомогою диференціальних рівнянь у приватних похідних.

Експериментальне вивчення динаміки перетворення енергії в системі автоматизованого керування ПП АД насосної станції ускладнене двома факторами. По-перше, широкий діапазон амплітуди струмів у перехідних режимах змінюється у діапазоні (0,2-4,0) кА при зміні напруги у діапазоні (220-380) В. При цьому повні потужності, які споживаються з мережі, можуть сягати значень від (2,5- 3) МВ·А, що потребує використання складного та вартісного експериментального обладнання. По-друге, можливе виникнення гідравлічного удару, яке супроводжується кавітацією, може призвести до пошкодження трубопроводу в місці концентрації максимального тиску.

Це унеможлиблює проведення експериментальних досліджень на діючих об'єктах. В таких випадках, на практиці користуються комп'ютерними тренажерами.

2.2 Модель системи імпульсно-фазового керування тиристорним перетворювачем напруги асинхронного двигуна

Розглянемо основні припущення, що вводяться для зосередженої постановка задачі для опису електромеханічного перетворення енергії в системі «СІФК-ТПН-АД»:

- нехтують насиченням магнітопроводу статора та ротора асинхронного двигуна;
- вважається, що повітряний зазор між статором та ротором гладкий;
- обмотки двигуна зосереджені та зсунуті на фазний кут;
- схема заміщення асинхронного двигуна має параметри, які не змінюються у перехідних режимах;
- тиристор ПН представляє собою ідеальний ключ та не враховується паралельний демпфіруючий RC- ланцюг.

Режим функціонування симетричного трифазного тиристорного перетворювача напруги, який зображено на рис.2.2 а), має імпульсний характер. Це дозволяє визначити п'ять інтервалів постійності структури (ПС) протягом періоду живлячої напруги. Кожен із цих інтервалів визначається конкретним режимом підключення асинхронних двигунів до мережі змінного струму (рис.2.2 б). Розрізняють несиметричні режими (двофазні): "AB", "BC", "AC", а також два симетричних: "ABC" і "0". Режим "0" відповідає відключенню АД від мережі.

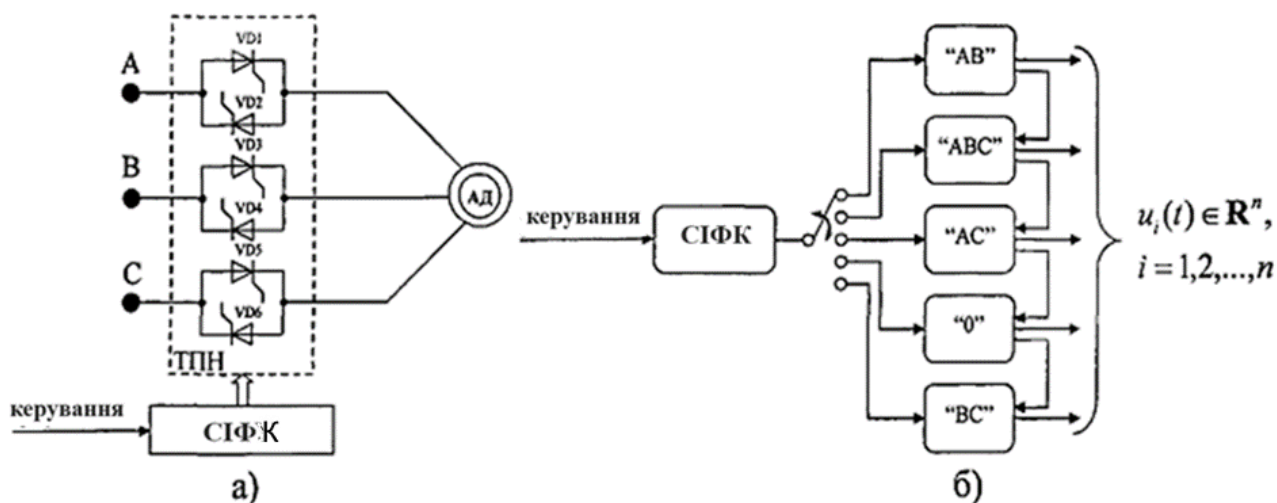


Рисунок 2.2 - Функціонування симетричного трифазного тиристорного перетворювача: а) структурна схема; б) режими підключення АД до мережі.

Розглянемо запис системи звичайних диференціальних рівнянь в нормальній формі Коші для j -ого інтервалу постійності структури:

$$\begin{aligned} \frac{du_i(t)}{dt} &= f_i[u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), g(t)], \quad u_i(t) \in \mathbf{R}^n, \quad t \in [t_j, t_{j+1}], \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ u_i(0) &= u_i^0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (2.1)$$

де n – порядок системи рівнянь ($n=4$ -режим «0»; $n=5$ - режими «AB», «BC», «AC»; $n=7$ - режим «ABC»);

u_i – змінні стани моделі, до яких відносять струми, потокозчеплення статорних та роторних обмоток, кутову швидкість обертання ротора двигуна;

$g(t)$ - напруга мережі змінного струму.

При моделюванні підключення АД до мережі у несиметричних нестационарних режимів (НР) прийнята наступна послідовність перетворень, що зображена на рис.2.3.

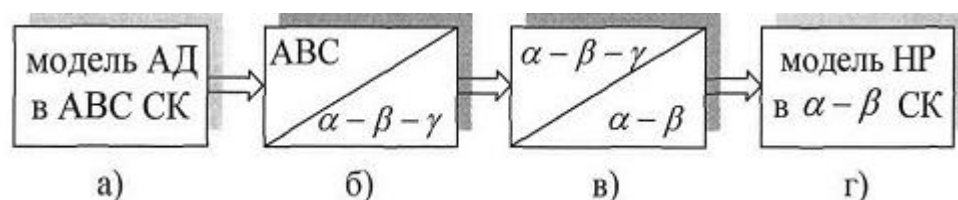


Рисунок 2.3 - Загальна послідовність перетворень, які застосовуються для моделювання несиметричних режимів.

Порядок виконання:

- побудова моделі асинхронного двигуна в системі координат ABC;
- введення в ланцюги ротора ЕДС обертання та приведення їх рівнянь до нерухомої відносно статора системи координат $\alpha\text{-}\beta\text{-}\gamma$;
- отримання узагальненої моделі двофазного ідеального двигуна у нерухомій (відносно статора) системі координат $\alpha\text{-}\beta$;

- введення в модель узагальненого двигуна різних видів несиметрії та отримання моделі несиметричного режиму.

Запропонована модель має декілька недоліків: для несиметричного режиму використовується модель, припущенням якої є симетрична система живлячих струмів; для визначення моменту закривання тиристорів на кожному кроці ітерації в такій моделі, потрібно розраховувати значення струмів статора, виконуючи перетворення з α - β системи координат до α - β - γ системи. Це значно ускладнює та подовшає розрахунки.

Пропонується використовувати моделі несиметричних режимів, які базуються на положеннях законів Ома та Кирхгофа, та одразу записуються у системі координат α - β - γ , виконавши перетворення із фізичної системи координат ABC, з метою усунення періодичних коефіцієнтів біля змінних. Усі основні та проміжні перетворення виконані у математичному пакеті «MATLAB» [1].

Пояснюємо таку методику опису несиметричних режимів на прикладі складання рівнянь режиму «BC».

Відповідно до першого закону Кірхгофа запишемо систему рівнянь, яка описує баланс напруги для статорних та роторних обмоток трифазного АД, еквівалентну схему заміщення якого наведено на рис. 2.4.

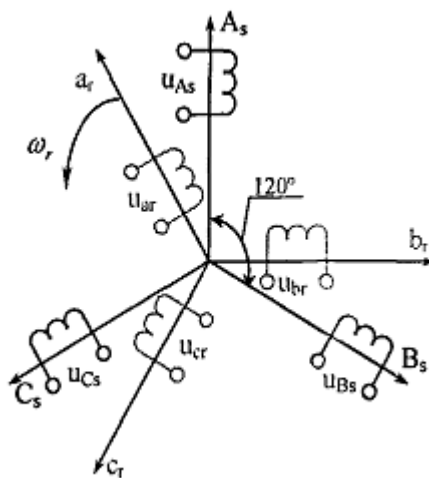


Рисунок 2.4 – Зображення еквівалентної електричної схеми трифазного асинхронного двигуна.

У матричній формі така система рівнянь матиме наступний вигляд [5]:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{ABC}^s &= R_s \mathbf{i}_{ABC}^s + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_{ABC}^s}{dt}; \\ 0 &= R_r \mathbf{i}_{abc}^r + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_{abc}^r}{dt}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де - $\mathbf{u}_{ABC}^s$; $\boldsymbol{\Psi}_{ABC}^s$ ($\boldsymbol{\Psi}_{abc}^r$) та $\mathbf{i}_{ABC}^s$ ($\mathbf{i}_{abc}^r$) - вектори розмірністю 3×1 напруги, яка прикладається до статорних обмоток, потокозчеплення та струму статорних та роторних обмоток відповідно;

R_s , R_r - активні опори статорних та роторних (відповідно) обмоток; (приймається симетричність двигуна) активний опір обмоток статора та ротора, який розміщений по різних осях - однаковий.

Вираз потокозчеплення для обмотки статора, розміщеній по вісі «А» записується наступним чином:

$$\begin{aligned} \Psi_{sA} &= i_{sA}(L_{sA,l} + M_{AA}) + i_{sB}M_{AB} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_{sC}M_{AC} \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) + i_{ra}M_{Aa} \cos(\theta) + \\ &+ i_{rb}M_{Ab} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{rc}M_{Ac} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (2.3)$$

де - i_{sA} ; i_{sB} ; i_{sC} (i_{ra} ; i_{rb} ; i_{rc}) - миттєві струми обмоток статора та ротору електродвигуна, що розміщені по вісях «АВС» та «abc»;

θ – кут у просторі між роторними та статорними обмотками АД;

L_{sA} - індуктивність розсіяння статорної обмотки фази «А»;

M_{AA} , M_{AB} , M_{AC} , M_{Aa} , M_{Ab} , M_{Ac} - взаємоіндуктивності між обмоткою статора фази «А» та іншими статорними та роторними обмотками. Дані взаємоіндуктивності приймаються рівними максимальній взаємоіндуктивності між будь-якими двома статорними чи роторними обмотками АД.

Рівняння несиметричного режиму «ВС» отримаються при розімкнутій фазі «А» статора АД (рис. 2.5).

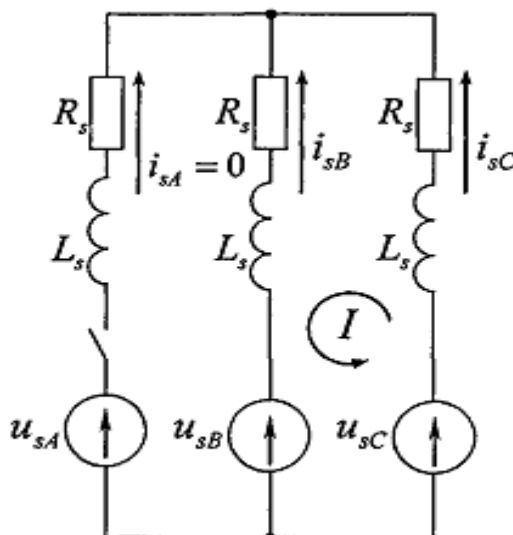


Рисунок 2.5 - Схема статорних ланцюгів трифазного АД в несиметричному режимі «BC».

На рис. 2.1 індуктивність L_s позначає повну індуктивність обмотки статора. Застосовуючи закон Кирхгофа, при обході контуру проти годинникової стрілки, отримаємо наступні рівняння:

$$i_{sA}(t) = 0; \quad (2.4)$$

$$i_{sB}(t) = -i_{sC}(t); \quad (2.5)$$

$$u_{sC} - u_{sB} = R_s i_{sC}(t) + \frac{d\psi_{sC}(t)}{dt} - R_s i_{sB}(t) - \frac{d\psi_{sB}(t)}{dt}. \quad (2.6)$$

Виконав підстановку виразу (2.5) у вираз (2.6), маємо:

$$u_{sC} - u_{sB} = 2R_s i_{sC}(t) + \frac{d\psi_{sC}(t)}{dt} - \frac{d\psi_{sB}(t)}{dt}. \quad (2.7)$$

Повна система рівнянь режиму «BC» включає також рівняння балансу моментів на валу двигуна та три рівняння балансу напруги роторних обмоток,

які не змінюються за формою та співпадають з рівняннями симетричного режиму.

Загальний вигляд рівняння електромеханічного перетворення енергії для двигуновому режимі наступний [2]:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_\Sigma} (M_s - M_c), \quad (2.8)$$

де ω_r – значення кутової частоти обертання ротора двигуна;

J_Σ - значення сумарного моменту інерції на валу двигуна;

M_c – значення електромагнітного моменту;

M_s – значення моменту опору.

Аналітичні перетворення були виконані за допомогою засобів математичного середовища MATLAB.

2.3 Вибір типу синхронізації системи імпульсно-фазового керування ТПН-АД

Існує два типи синхронізації в системах імпульсно-фазового керування ТПН:

- синхронізація по напрузі мережі (рис.2.6 а);
- синхронізація по струму навантаження (рис.2.6 б).

При синхронізації по напрузі мережі (СН), кут керування α фіксується у момент пересічення кривою фазної напруги вісі абсцис. При синхронізація по струму (СС) навантаження кут керування γ фіксується у момент припинення струму, який протікає через даний тиристор.

Для обґрунтованого обрання варіанту побудови ППП, розглянемо ці два варіанти, з точки зору найбільш відповідного завданням дослідження. Оцінімо роботу двох варіантів за наступними критеріями:

- форма імпульсів керування тиристорами;
- особливості формування імпульсів у багатофазних системах;
- діапазон, у якому змінюється кут керування;

- економічність та точність керування тиристорами.

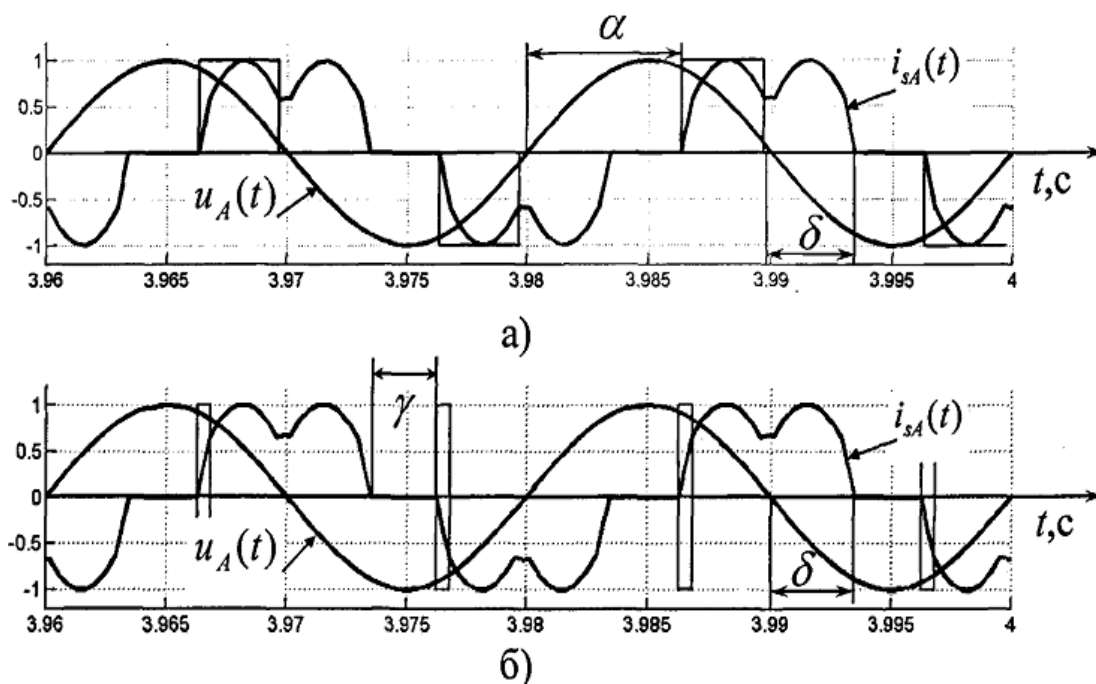


Рисунок 2.6 - Криві струму статорної обмотки фази «А» та фазної напруги фази «А»: а) СІФК-ТПН-АД з СН; б), СІФК- ТПН-АД з СС.

2.3.1. СІФК-ТПН-АД з синхронізацією тиристорів по напрузі мережі.

Амплітуда імпульсів керування задається заводом-виготівником у залежності від типу напівпровідникового приладу та умов його експлуатації параметрами: U_k та I_k - напруги та струму керування тиристором.

Для ланцюга, що має синусоїдальну форму струму навантаження, мінімальна ширина імпульсу керування t_k становить:

$$t_{k,\min} = \frac{T_c}{2\pi} \cdot \arcsin \frac{I_{ym}}{I_m}, \quad (2.9)$$

де T_c - період напруги мережі живлення, с;

I_{yt} - значення струму утримання, А;

I_m - значення амплітуди струму навантаження, А.

Амплітуда струму обмоток статора визначається режимом роботи асинхронного двигуна та може змінюватися у широкому діапазоні. Мінімальний струм двигуна відповідає режиму неробочого ходу. Якщо $I_{\text{ут}} = (0,2-0,3)$ А, то в залежності від потужності двигуна необхідна ширина імпульсу керування визначиться наступним чином:

- при $P_{\text{ном}} = 1$ кВт – $t_k \approx 350-500$ мкс;
- при $P_{\text{ном}} = 10$ кВт – $t_k \approx 45-70$ мкс;
- при $P_{\text{ном}} = 100$ кВт – $t_k \approx 5-8$ мкс.

Особливістю трифазного асинхронного двигуна являється змінний коефіцієнт потужності. Якщо пуск виконується вхолосту, цей кут змінюється від $\varphi_k \approx (30-40)$ ел.° (що відповідає короткому замиканню) до кута $\varphi_0 \approx 90$ ел.° (відповідає неробочому ходу). Якщо виконується перерегулювання в процесі пуску, фаза струму може мати значення більше 90 ел.°. Якщо двигун працює на робочій ділянці механічної характеристики, значення кута струму навантаження залежить від величини та характеру моменту на валу і змінюється від (20-30) ел.° до 150 ел.° та більше.

Керування тиристорами з використанням вузьких одиночних імпульсів призводить до зривів комутації, коли виконуються умови: $\alpha < \delta$. Тут α - кут включення тиристорів; δ - кут додаткової провідності тиристорів.

Для уникнення зривів комутації використовують широкі імпульси або інтервал $(\pi - \alpha)$ заповнюють імпульсами, які мають параметри, що достатні для відкриття тиристорів. Наприклад, у перетворювачах типу ТСУ-2, які серійно випускаються, прийнята до застосування частота заповнюючих імпульсів 5 кГц з шириною імпульсу 70 мкс. Скважність імпульсів, звичайно, приймають рівною 0,5. Формування імпульсів постійного струму з великою тривалістю не застосовується через великі габарити трансформаторів вихідних каскадів.

Вживання високочастотних проміжних сигналів приводить до зменшення габаритів трансформаторів, але підвищуються вимоги, що висуваються до якості їх магнітопроводів. Якщо вживаються оптронні тиристори, формування

широких сигналів керування не представляє проблеми, але збільшуються габарити джерел живлення, що потрібні для забезпечення широких імпульсів.

Мінімальне значення кута керування визначається мінімальною фазою струму навантаження та обмежується можливостями схеми синхронізації. Максимальна величина кута керування визначається необхідним діапазоном регулювання вихідної напруги перетворювача. Частіше, для АЕП з симетричним ТПН встановлюють $\alpha_{\max} = \alpha_{\text{гр}}$, що відповідає граничному режиму роботи перетворювача та найпростіше реалізується технічно. Для індуктивного навантаження у схемі із ізольованою нульовою точкою $\alpha_{\text{гр}} = 120$ ел.°.

У залежності від кількості комутованих тиристорів та меж регулювання кута включення створюються ситуації, коли при одному рівні напруги керування потрібно запускати кілька генераторів пилоподібної напруги та застосовувати кілька паралельних каналів СІФК. Наприклад, при використанні ТПН, що складається з шести тиристорів та обмеженням $\alpha_{\max} = 120$ ел.°, застосовуються двоканальні СІФК. Іноді, кожен із шести тиристорів керується по індивідуальному каналу, тобто використовують шести каналні СІФК.

Точність завдання кутів керування впливає на плавність регулювання та діапазон вихідної напруги перетворювача. Для багатоканальних СІФК необхідне індивідуальне налаштування каналів, що приводить до погіршення технологічності їх виробництва. У цифрових та цифро-аналогових СІФК, несиметрія кутів по фазах та напівперіодах обмежується та не перевищує певної заданої величини. При цьому, помилка підтримки кутів керування для тиристорів не перевищує 1 ел.°. В цьому випадку, джерелом несиметрії виступає невизначеність у моменті часу вмикання тиристорів при частотно-імпульсному заповненні сигналів керування. При заповненні імпульсами частотою 5 кГц, величина помилки включення тиристорів складає ± 3 ел.°. Ці обмеження не стосуються оптронних силових приладів, для яких формування імпульсу струму керування необхідної тривалості не представляє проблеми.

Враховуючи високу економічність сучасних інтегральних мікросхем та мікропроцесорних пристроїв, головним споживачем енергії у системах

керування ТПН являються вихідні каскади, які формують імпульси керування тиристорами. Потрібно зазначити, що в порівнянні з керованими багатофазними випрямлячами, у вихідних каскадах тиристорних перетворювачів напруги споживається більша потужність, яка доходить до (1,5-3) Вт на один тиристор. ККД вихідних каскадів невисоке.

Теоретично, ККД вихідних каскадів у загальному вигляді, у випадку використання частотно-імпульсного заповнення визначається за формулою:

$$\eta_{в.к.} = \frac{\pi}{\pi - \alpha} \cdot \frac{f_m}{f_y} \cdot 100\%, \quad (2.10)$$

де f_m , f_y – значення частоти напруги мережі та імпульсів, які заповнюють інтервал $(\pi - \alpha)$.

Якщо прийняти $f_m = 50$ Гц, $f_y = 5$ кГц та діапазон регулювання $0 \text{ ел.}^\circ \leq \alpha \leq 120 \text{ ел.}^\circ$, теоретичний ККД вихідного каскаду буде змінюватися у діапазоні $1\% \leq \eta_{в.к.} \leq 3\%$. При підвищенні частоти заповнення та переході до більш потужніших двигунів значення ККД зменшується.

2.3.2. СІФК-ТПН-АД з синхронізацією тиристорів по струму навантаження.

При застосуванні синхронізації зі струмом навантаження, генератор пилкоподібної напруги СІФК включається у момент закінчення струму у його попередній напівхвилі. Кутом керування являється кут безструмової паузи γ . У разі збігу по величині напруги керування та напруги "пили" вихідний каскад формує імпульс струму керування тиристором I_k . Зв'язок між кутами керування двох способів синхронізації виконується через кут запізнювання закінчення струму δ за допомогою виразу:

$$\alpha = \delta + \gamma \quad (2.11)$$

В системі із СС режим $\gamma = 0$ показує рівність $\alpha = \delta$ для будь-якого значення кута навантаження φ , тобто, на тиристори можливо подавати одиночний короткий імпульс керування, ширина якого визначається за формулою (2.11).

Діапазон регулювання кута γ не залежать від фази струму навантаження та при будь-якому її значенні: $\gamma_{\min}=0$; $\gamma_{\max} = \alpha_{\text{гр.}} - \delta$.

При вживанні синхронізації по струму навантаження, граничний режим приймається при $\gamma_{\text{гр}} = 60$ ел.°, та не залежить від фази струму. Діапазон зміни γ при СС менше, чим α при СН. Це призводить до простішого проектування одноканальної СІФК у системах із СС. Схема ТПН з шістьма тиристорами СІФК із діапазоном зміни γ до 60 ел.°, може бути вироблена одноканальною, тому що один генератор пилкоподібної напруги протягом періоду напруги мережі відпрацьовує шість циклів формування керуючих імпульсів.

Одноканальна СІФК при СС не викликає помилок кута керування по фазах та напівперіодах. Керування тиристорами одиночними вузькими імпульсами унеможлиблює додаткову помилку, яка спостерігається у вихідних каскадах з частотно-імпульсним заповненням для СН.

Теоретичний ККД вихідного каскаду у разі формування одиночних вузьких імпульсів наближається до 100%. Зрозуміло, що ККД при врахуванні втрат енергії у джерелі живлення, ключах, фільтрах та вихідних трансформаторах не досягає такої величини, але при СС економічність принципово підвищується, у порівнянні з СН.

У таблиці 2.1 представлено порівняння показників вихідних каскадів СІФК при СН та СС.

З точки зору технічної реалізації, використання СІФК із СС дозволяє зменшити габарити джерела та фільтрів живлення, вихідних трансформаторів, ключів формувачів імпульсів. Також, зменшуються вимоги до сталі трансформаторів. Це пояснюється тим, що частота вихідних імпульсів співпадає з частотою комутації тиристорів, легше забезпечується відведення тепла при закритому виконанні.

Таблиця 2.1 - Показники СІФК з двома типами синхронізації при використанні симетричного ТПН.

№	Показники порівняння	Тип синхронізації	
		СІФК з СН	СІФК з СС
1	Форма імпульсу керування тиристором	широкий безперервний або з частотним заповненням	одіночний вузький
2	Число каналів СІФК	2 (мінімально можливе); 3 (фактичне)	1 (достатнє)
3	Діапазон зміни кута керування	$0 \leq \alpha \leq 120$ ел. град.	$0 \leq \gamma \leq 60$ ел. град.
4	Теоретичний ККД вихідного каскаду	$1 \leq \eta_{\text{в.к.}} \leq 3\%$	Наближається до 100%
5	Несиметрія кутів керування по фазах, яка вноситься способом синхронізації	можлива в разі частотного заповнення імпульсів керування	відсутня

Часткове поліпшення економічності можливо отримати за рахунок використання простіших схемотехнічних рішень для одноканальної СІФК у порівнянні з багатоканальними.

З проведеного вище аналізу можна зробити висновок, що спосіб синхронізації тиристорів із струмом навантаження має кращі статичні та динамічні властивості, забезпечує знижене енергоспоживання, покращує технологічність виготовлення. Це робить застосування СІФК-ТПН із СС ефективнішим для реалізації ППП та обумовлює його вибір для проведення подальшого дослідження.

2.4 Математична модель трансформаторної підстанції

У магістерській роботі для перевірки адекватності алгоритму розрахунків максимальних струмових уставок, що визначаються для пуску асинхронних двигунів насосної станції з ППП, використовується спрощена електрична схема трансформаторної підстанції (ТП), яка включає знижувальний трифазний

трансформатор з двома обмотками, що підключається до ЛЕП. При цьому приймається припущення, що насиченням магнітопроводу трансформатора можна знехтувати.

Вибір потужності трансформатора виконується в залежності від кількості асинхронних двигунів основних насосів m (резервні не враховуються) за формулою:

$$S_{розр.} = k \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_{н.i}}{\eta_i \cdot \cos \varphi_i} + S_{доп.} \quad (2.12)$$

де k - коефіцієнт попиту по потужності, який залежить від кількості основних двигунів: для $m=3$ приймається $k_{i=3} = 0,9$;

$P_{нi}$, η_i , $\cos \varphi_i$ – значення номінальних потужності, ККД, коефіцієнта потужності асинхронних двигунів основних насосів (відповідно);

$S_{доп.} = 10-50$ кВ·А – загальна потужність допоміжного обладнання насосної станції.

Для запису рівнянь трансформаторної підстанції використовується матрична форма, так як таке представлення дозволяє скласти схему заміщення при довільній кількості двигунів.

Для уніфікації форми запису матмоделі стаціонарного стану електричної мережі, яка включає до свого складу електродвигуни та трансформатори приймаємо за основу модель двофазного ідеального перетворювача енергії.

Система рівнянь ідеального двофазного перетворювача енергії записується у наступній формі:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s\alpha} + \frac{d}{dt}L_{s\alpha} & \frac{d}{dt}L_m & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt}L_m & r_{r\alpha} + \frac{d}{dt}L_{r\alpha} & L_{s\beta}\omega_r & L_m\omega_r \\ -L_m\omega_r & -L_{r\alpha}\omega_r & r_{r\beta} + \frac{d}{dt}L_{r\beta} & \frac{d}{dt}L_m \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt}L_m & r_{s\beta} + \frac{d}{dt}L_{s\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Для стаціонарного стану кутова швидкість ротора асинхронного двигуна має вигляд:

$$\omega_r(t) = \omega_c = \frac{\omega_s(1-s)}{p_p}, \quad (2.14)$$

де ω_c - значення синхронна частота обертання магнітного кругового поля в повітряному зазорі двигуна;

s – значення ковзання;

p_p - кількість пар полюсів асинхронного двигуна.

Виконав підстановку (2.14) та $j \cdot \omega$ замість d/dt в (2.13), отримаємо рівняння двигуна в усталеному режимі:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s\alpha} + \frac{d}{dt}L_{s\alpha} & \frac{d}{dt}L_m & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt}L_m & r_{r\alpha} + \frac{d}{dt}L_{r\alpha} & L_{s\beta}\omega_r & L_m\omega_r \\ -L_m\omega_r & -L_{r\alpha}\omega_r & r_{r\beta} + \frac{d}{dt}L_{r\beta} & \frac{d}{dt}L_m \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt}L_m & r_{s\beta} + \frac{d}{dt}L_{s\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Для отримання рівняння трансформатора підставимо $\omega_r = 0$ у рівняння (2.15). Враховуючи, що кут між нерухомими обмотками становить 90° , будемо розглядати електромагнітні процеси незалежно для вісей α та β кожної фази трифазного трансформатора. Позначимо індексом «1» первинну обмотку трансформатора та її параметри, індексом «2» - вторинну, отримаємо рівняння:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & j\omega L_m \\ j\omega L_m & R_2 + j\omega L_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Для отримання повної моделі електричного ланцюга потрібно записати рівняння, які аналогічні (2.16) для інших фаз трансформатора та рівняння (2.15) для кожного з асинхронних двигунів, що підключені до мережі.

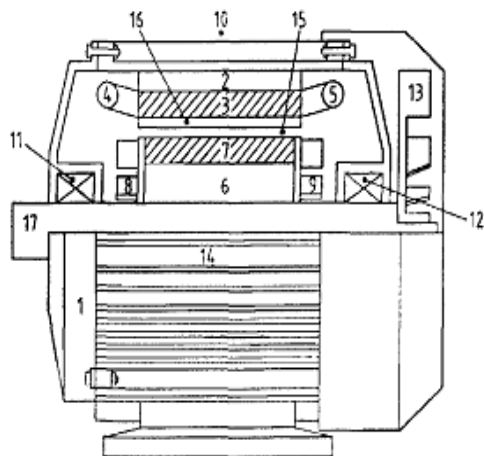
2.5 Спрощена теплова модель асинхронного двигуна

Існує дві постановки задачі нестационарного нагріву та охолодження електричних машин - розподілена та зосереджена. Розподілена постановка, як правило, використовується для оптимізації конструкції двигуна та його системи охолодження, зменшення постійних часу нагрівання та охолодження конструктивних елементів.

У магістерській роботі ставиться завдання визначення максимальної температури перегріву статорних обмоток двигуна при керованому пуску. В цьому випадку, доцільно застосувати зосереджену постановку задачі. Серед методів зосередженої постановки найбільшого поширення отримав метод еквівалентних теплових схем заміщення. Суть такого методу заключається у тому, що виділяються однорідні елементи в конструкції двигуна в яких температура в будь-якій точці поверхні дорівнює середній температурі елементу. Дане припущення дозволяє представити динаміку температури двигуна за допомогою неоднорідної системи диференціальних рівнянь, вирішення якої отримується за допомогою різницевого однокрокового методу інтегрування.

На рис. 2.7 вказані однорідні конструктивні елементи асинхронного двигуна закритого виконання для загальнопромислової серії 4А.

Еквівалентна теплова схема заміщення двигуна налічує три основні елементи: накопичувачі (теплоємності), джерела тепла та теплопровідності (опори), що розміщуються між поверхнями різнорідних елементів конструкції.



1 - корпус АД; 2 - магнітопровід статора; 3 - пазова частина обмотки статора; 4;5 - лобові частини обмотки статора; 6 - магнітопровід ротора; 7 - стрижні обмотки ротора; 8;9 - короткозамикаючі кільця ротора; 10 - зовнішній повітряний простір; 11;12 - підшипники; 13-вентилятор; 14 - ребра, що охолоджують; 15 - повітряний зазор; 16 - зубці статора; 17- вал ротора.

Рисунок 2.7 - Конструктивні елементи асинхронного двигуна.

Джерелами тепла у асинхронному двигуні являються:

- P_s, P_r - електричні втрати в обмотках двигуна: статора та ротора;
- $P_{ст}$ - втрати у сталі осердя статора;
- $P_{мех}$ - механічні втрати у підшипниках;
- $P_{дод}$ - додаткові втрати в асинхронному двигуні:

$$P_{дод} = 0,05 \cdot P_{2ном} / \eta,$$

де η - ККД двигуна у номінальному режимі.

Перегрів, насамперед, контролюється у пазових та лобових частинах статорних обмоток. Джерело тепла пазової частини статорної обмотки:

$$P_{п} = \frac{P_s \cdot L_{п}}{(L_{л} + L_{п})},$$

де $L_{л}$ - довжина лобової частини статорної обмотки;

$L_{п}$ - довжина пазової частини статорної обмотки.

Лобові частини приймаються, як один елемент з джерелом:

$$L_{\text{л}} = \frac{P_{\text{с}} \cdot L_{\text{л}}}{(L_{\text{л}} + L_{\text{п}})},$$

Втрати у сталі пакету статора визначаються як суму втрат:

$$P_{\text{см}} = P_{\text{сз}} + P_{\text{сж}} + P_{\text{доод}},$$

де $P_{\text{сз}}$, $P_{\text{сж}}$ – втрати, відповідно, у зубцях та ярмі статора.

Аналогічно розглядається визначення втрат у роторі асинхронного двигуна.

Корпус та підшипникові щити із механічними втратами, розглядаються у вигляді окремих елементів теплової схеми заміщення. Якщо враховувати симетричність конструкції двигуна відносно валу ротора, можливо об'єднати кілька елементів в один, що має приведену сумарну потужність втрат. Таким чином, об'єднуються праві та ліві лобові частини статорної обмотки як один елемент із сумарними втратами $P_{\text{л}}$. Також об'єднуються щити та крайні ділянки станини. Один вузол представляють стрижні ротора, магнітопровід та короткозамкнуті кільця. При цьому вважається, що температура об'єданого вузла дорівнює середньому арифметичному від температури вхідних вузлів.

Введемо наступні позначення при складанні еквівалентної теплової схеми заміщення двигуна. Для джерел тепла (P): P_1 - лобові частини статорної обмотки, P_2 - пазові частини статорної обмотки, P_3 - магнітопровід статора, P_4 - повітря всередині двигуна, P_5 – ротор, P_6 - корпус асинхронного двигуна. G_{ij} - теплопровідність між окремими елементами, C_i - теплоємність елементів схеми, θ_0 - повітря, яке охолоджує.

З використанням прийнятих позначень, еквівалентну теплову схему заміщення двигуна зображено на рис. 2.8.

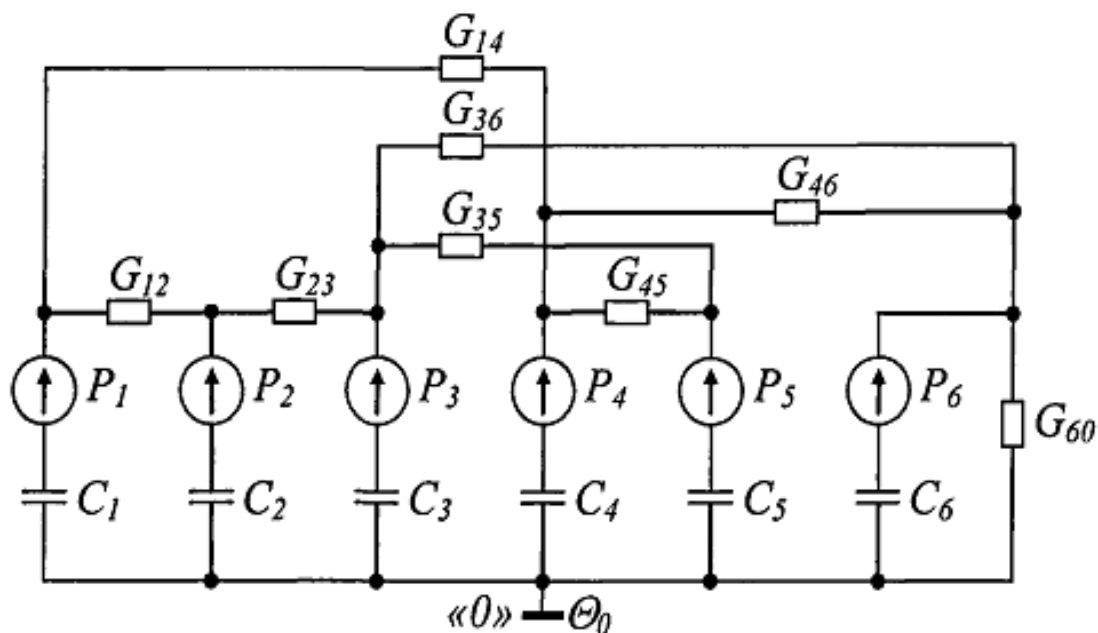


Рисунок 2.8 – Зображення еквівалентної теплової схеми заміщення двигуна.

Використовуючи закони Кирхгофа запишемо систему рівнянь для схеми, що зображена на рис.2.8:

$$\frac{d\Theta}{dt} = C \cdot P - C^{-1} \cdot G \cdot \Theta, \quad (2.17)$$

де Θ - вектор-стовпець, що враховує перевищення температури елементів теплової схеми заміщення двигуна над температурою довкілля;

G - матриця теплопровідностей;

C - матриця теплоємностей елементів схеми;

P - вектор-стовпець джерел тепла.

Вихідною інформацією для проведення розрахунків елементів матриць C та G являються обмотувальні дані статора, його розміри та властивості матеріалів: корпусу двигуна, пакету сталі статора, підшипникового щита, пакету сталі ротора, вентилятора.

2.6 Математична модель насосного навантаження

Робота відцентрового насосу (ВЦ) характеризується трьома величинами: подачею (Q , м³/год), натиском (H , м) та швидкістю обертання (n , об/хв). За допомогою цих величини визначається момент опору та потужність на валу механізму. Для вибору насосу потрібно визначитися з подачею та тиском, які потрібно забезпечити в сталому режимі. Вибір насосу виконується по паспортним графікам характеристичних кривих таким чином, щоб точка (Q_{ref} , H_{ref}) опинилася в околиці оптимальної точки ($Q_{\text{р.опт.}}$, $H_{\text{р.опт.}}$), яка відповідає максимальному значенню ККД насоса.

На рис. 2.9 представлено графіки характеристичних кривих для одного рівня багатоступеневого вертикального відцентрового насоса (ВЦ) типу CV 400, швидкість обертання $n=1450$ об/хв, для трьох величин діаметру робочого колеса $d = 315$ мм; 330 мм; 350 мм [34]. На рис. 2.9 позначена точка максимального ККД, для $d = 330$ мм, яка визначає значення ($Q_{\text{р.опт.}}$, $H_{\text{р.опт.}}$) та відповідне споживання електроенергії P_2 , для випадку роботи насосу в оптимальній режимній точці.

Визначити усталений режим роботи насосної установки для $n=\text{const}$ можливо графічним способом. Для цього потрібно визначити точку пересічення відповідної характеристики насоса та характеристики магістралі, яка підключена до насоса. Рівняння для характеристики магістралі можливо записати наступним чином:

$$H_{\text{маг}} = H_{\text{ст}} + k_{\text{маг}} \cdot Q^2, \quad (2.18)$$

де $H_{\text{ст}}$ - статичний напір магістралі, м;

$k_{\text{маг}}$ - значення коефіцієнту опору магістралі.

Застосуємо принцип подібності для отримання двох множин значень (Q_{pi}), (H_{pi}), $i = 1...m$, які знаходяться на характеристичній кривій, що побудована для швидкості $n_j < n_0$. Скористаємося наступними співвідношеннями:

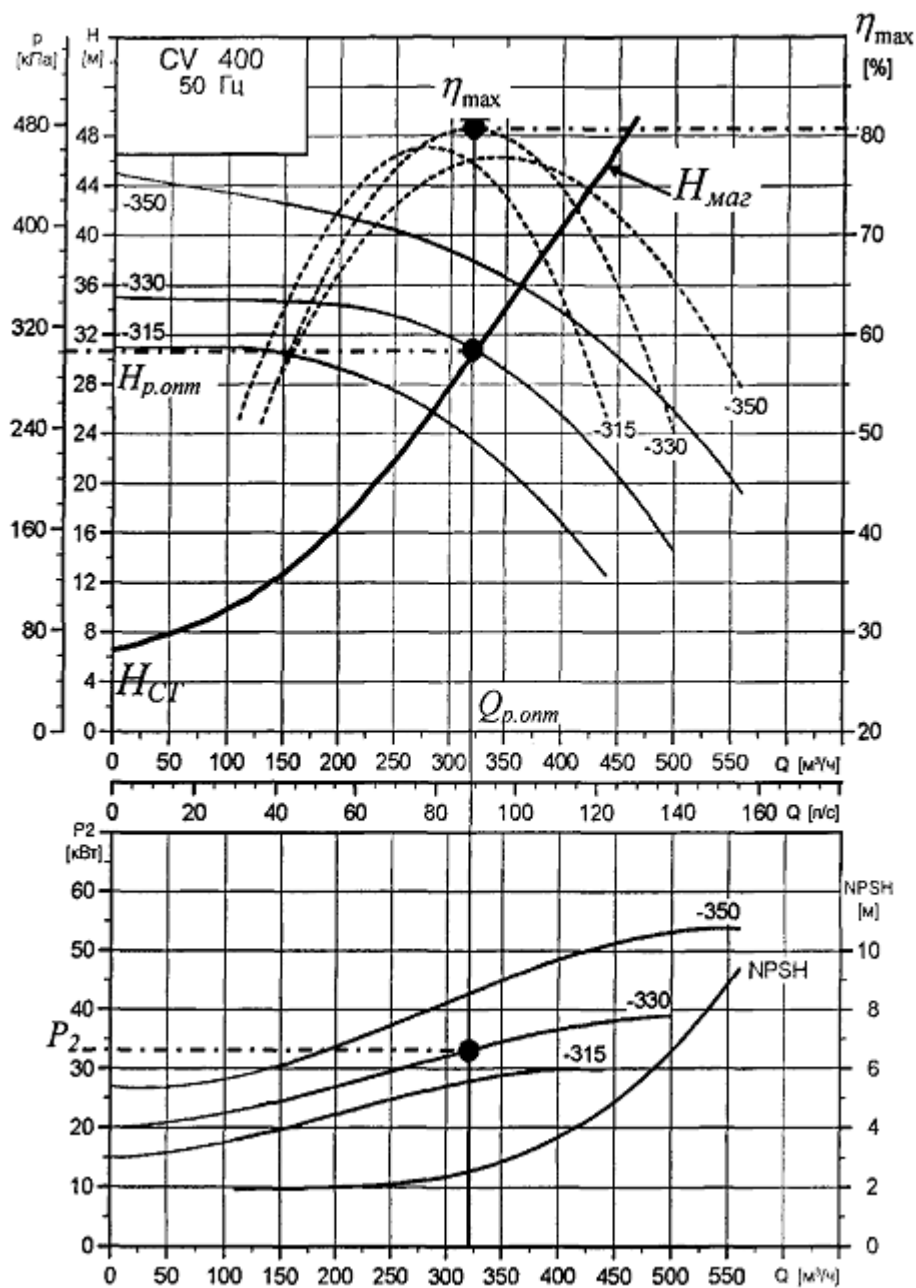


Рисунок 2.9 – Зображення графіків характеристичних кривих для однієї сходинок відцентрового насосу CV 400 (Grundfos).

$$q_{pi} = q_{0i} \frac{n_i}{n_0}; \quad h_{pi} = h_{0i} \left(\frac{n_i}{n_0} \right)^2, i = 1 \dots m.$$

Для отримання аналітичного виразу моменту опору, який створюється насосом на валу асинхронного двигуна виконаємо апроксимацію характеристичної кривої, яка відповідає змінній швидкості обертання валу двигуна, що менша за номінальну: $n_j < n_0$.

Для цього використаємо квадратичну залежність тиску від витрати. Складаємо матричну систему рівнянь вигляду:

$$Q \cdot A = H, \quad (2.19)$$

де $Q_{3 \times 3}$ - матриця відліків витрати приймає вигляд:

$$\begin{bmatrix} q_{p1}^2 & q_{p1} & 1 \\ q_{p2}^2 & q_{p2} & 1 \\ q_{p3}^2 & q_{p3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$A_{3 \times 1}$ – вектор-стовпець невідомих коефіцієнтів - $[a_2 \ a_1 \ a_0]^T$, де T- символ транспонування;

$H_{3 \times 1}$ – вектор-стовпець відліків тиску - $[h_{p1} \ h_{p2} \ h_{p3}]^T$.

Розв'язання системи (2.20) має наступний вигляд:

$$A = Q^{-1} \cdot H. \quad (2.21)$$

Після обчислення вектору A можливо представити аналітичний вираз тиску насосу як функцію подачі для деякого $n_j = \text{const}$ у вигляді:

$$h_p = a_2 \cdot q_p^2 + a_1 \cdot q_p + a_0, \quad (2.22)$$

Визначимо корисну потужність насосу:

$$P_{кор} = h_p \cdot q_p \cdot \rho \cdot g, \quad (2.23)$$

де ρ - щільність рідини, кг/м³;

g - прискорення вільного падіння, м/с².

Тоді, потужність на валу насосу, з врахуванням ККД визначається наступною формулою:

$$P_c = \frac{h_p q_p \rho g}{\eta_p}. \quad (2.24)$$

Момент опору на валу насосу:

$$M_c = \frac{P_c}{\omega_r}. \quad (2.25)$$

Виконавши необхідні підстановки отримаємо:

$$M_c = M_{c,e} \left(\frac{\omega_r}{\omega_{ном}} \right)^2, \quad (2.26)$$

де $M_{c,e}$ – значення моменту опору, який відповідає номінальній швидкості насосу ($\omega_{ном}$).

Якщо магістраль створює статичний тиск $H_{ст} = \text{const} \neq 0$, то для розрахунків, як правило, потрібно використовувати графічні методи. Але, якщо розглядати зміну моменту опору у робочому діапазоні від $M_{c,\min}$ (що відповідає кутовій частоті $\omega_{r,\min}$) до $M_{c,\max}$ (що відповідає кутовій частоті $\omega_{r,\max}$), можливо розрахувати аналітичний вираз, який використовує параболічну апроксимацію [24]:

$$M_c = M_{c,\max} \left(\frac{\omega}{\omega_{r,\max}} \right)^k, \quad (2.27)$$

де k - показник параболи визначається з наступного виразу:

$$k = \frac{\lg \frac{M_{c,\min}}{M_{c,\max}}}{\lg \frac{\omega_{r,\min}}{\omega_{r,\max}}}.$$

Аналіз характеристик насосу показує, що в сталому режимі залежність напора насоса від його подачі визначається квадратичним поліномом вигляду (2.22) з коефіцієнтами, які розраховуються по паспортній характеристичній кривій. Для перехідного режиму момент опору насоса M_c для робочого діапазону визначається із використанням параболічної апроксимації, що отримана за рівняннями 2.26 та 2.27. На підставі отриманих залежностей у третій главі будуть виконані розрахунки при проведенні чисельних експериментів.

2.7 Математична модель гідравлічної системи

Для з'ясування можливості виникнення гідравлічного удару у трубопроводі проведемо дослідження динаміки руху рідини. Приймаємо, що рідина являється гомогенною з основними параметрами, які однакові по трьох просторових координатах.

Розглянемо елементарний об'єм рідини циліндрової форми dV , який знаходиться у внутрішній частині трубки довжиною ds , з поверхнею S та площиною поперечного перетину A . Запишемо закон збереження маси для dV у наступному вигляді [31]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0, \quad (2.28)$$

де V - швидкість руху рідини;

n - зовнішній одиничний нормальний вектор по поверхні S ;

t - час;

ρ - щільність рідини.

Рівняння (2.28) описує накопичення маси рідини у часі в елементарному об'ємі та визначає складову швидкості руху рідини, що проходить у напрямі пересічення із поверхнею S .

Після виконання певних перетворень отримаємо наступне рівняння [31]:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial s} = 0; \\ a^2 \frac{\partial v}{\partial s} + g \frac{\partial H}{\partial t} = 0. \end{cases} \quad (2.29)$$

Запишемо перше рівняння системи (2.29) через похідну по s , а друге рівняння виразимо через похідну по t . Об'єднавши дані рівняння, отримаємо:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 H}{\partial s^2}. \quad (2.30)$$

Рівняння (2.30) отримало назву хвильового рівняння, де a є швидкістю поширення хвилі тиску. Якщо розглядати нелінійні члени рівняння (2.30) на невеликому просторовому інтервалі $s \sim at$, то їх можливо представити наступними виразами:

$$\begin{aligned} v \frac{\partial v}{\partial s} &\sim \frac{v}{a} \frac{\partial v}{\partial t}; \\ v \frac{\partial H}{\partial s} &\sim \frac{v}{a} \frac{\partial H}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Заміна, яка виконана у (2.31) справедлива для тих випадків, коли $v/a \ll 1$.

Моделюванню та аналізу механізмів виникнення та протікання гідравлічного удару в напірних водопроводах присвячено багато робіт, наприклад [31,32]. Доведено хвильовий характер розповсюдження ударного тиску та встановлено, що для нестискуваної ідеальної рідини при раптовому закритті засувки у трубопроводі, швидкість поширення ударної хвилі сягає швидкості звуку в цьому середовищі.

Проведемо дослідження фізичних процесів у разі швидкого закриття засувки в трубопроводі, що заповнений рідиною, на прикладі елементарної ділянки трубопроводу δL (рис.2.10).

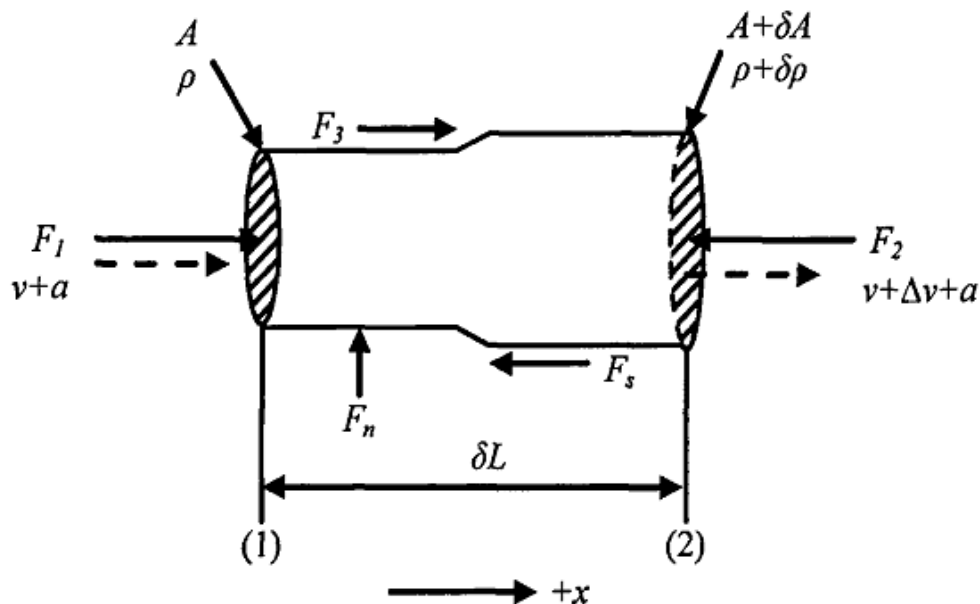


Рисунок 2.10 - Рух рідини на елементарній ділянці трубопроводу δL .

Представимо для початкового моменту часу, що постійний потік рідини із щільністю ρ протікає зі швидкістю v . Вважаємо, що натиск H однаковий для всіх перетинів трубопроводу діаметром D та площею поперечного перетину A .

У випадку, коли вентиль різко закривається, швидкість руху рідини також різко змінюється, що призводить до перетворення кінетичної енергії на потенційну. Це викликає підвищення тиску у трубопроводі на величину ΔH в місці розташування вентиля. Збільшення тиску викликає стискування рідини та розширення стінок труби. Утворюється хвиля підвищеного тиску, яка, розширюючи стінки труби, поширюється в бік, протилежний початковому напрямку руху рідини.

Якщо введемо локальну систему координат, яка рухається із швидкістю поширення хвилі a , то для визначення стану рідини на невеликому відрізку довжиною dl можливо використовувати лінійне рівняння моментів. В такому випадку, можна сформулювати рівняння балансу для суми векторів зовнішніх сил ΣF_{ext} , у наступному вигляді:

$$\Sigma F_{ext} = (\Sigma Q \cdot \rho \cdot v)_{out} - (\Sigma Q \cdot \rho \cdot v)_{in}, \quad (2.32)$$

де Q – значення витрата рідини, м³/год;

ρ - щільність рідини, кг/м³.

Для компонентів векторів F і v , що паралельні трубі, рівняння (2.32) матиме вигляд:

$$(\Sigma F_{ext}) = Q \cdot \rho (v_{out} - v_{in}). \quad (2.33)$$

Прийняте припущення про одновимірність потоку рідини, дозволяє знехтувати силою поперечного зрушення F_s , так як її значення пропорційне величині малого приросту довжини δL . Також нехтують силою F_z у зв'язку з відносно жорсткими матеріалами труб, що виконуються із сталі або чавуну. Зроблені припущення дозволяють записати рівняння (2.33) у вигляді:

$$F_1 - F_2 = Q \cdot \rho [(v + \Delta v + a) - (v + a)] = Q \cdot \rho [\Delta v], \quad (2.34)$$

де $Q \cdot \rho = A \cdot \rho (v + a)$.

Позначимо тиск в перетині «1» - p_0 , тиск в перетині «2» - $(p_0 + \Delta p)$ тоді рівняння балансу енергії можливо записати у вигляді:

$$p_0 A - (p_0 + \Delta p)(A + \delta A) = A \rho (v + a)(\Delta v). \quad (2.35)$$

Якщо врахувати, що приріст натиску ΔH більше тиску Δp на величину питомої маси рідини γ ($\Delta p = \gamma \Delta H$) та ΔH , A і γ значно більше δA , то, нехтуючи добутками малих приростів, вираз для ΔH з (2.35) запишеться наступному вигляді:

$$\Delta H = -\frac{a \Delta v}{g} \left(1 + \frac{v}{a} \right). \quad (2.36)$$

З врахуванням припущення про значну жорсткість матеріалів труб: ($v/a \ll 1$), рівняння (2.36) прийме вигляд:

$$\Delta H = -\frac{a\Delta v}{g}.$$

Рівняння (4.6) показує, що збільшення натиску та тиску в трубопроводі прямо-пропорційно значенню зміни швидкості руху рідини Δv .

Для оцінки коефіцієнта пропорційності a/g необхідно провести аналіз змін, що відбуваються із стінками труби, при появі приросту тиску рідини Δp .

Відомо рівняння повної зміни об'єму у вигляді [32]:

$$\delta V = \frac{\pi}{4} D^2 \delta L (\Delta \varepsilon_1 + 2\Delta \varepsilon_2). \quad (2.37)$$

Розглянемо варіант монтажу трубопроводу, коли повністю обмежено осьове розтягування труб. Тоді, коефіцієнт подовжнього розтягування $\Delta \varepsilon_1 = 0$. Підставивши це значення в (2.37), з врахуванням коефіцієнти розтягування та стискування в повздовжньому $(\varepsilon_1, \sigma_1)$ та поперечному $(\varepsilon_2, \sigma_2)$ напрямках, отримаємо:

$$\delta V = \frac{\pi}{4} D^2 \delta L \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right) \left(\frac{\Delta p D}{e} \right). \quad (2.38)$$

З врахуванням закону збереження маси, залежність зміни маси рідині δM в трубопроводі представляється у вигляді:

$$\delta M = -\rho A \Delta V \frac{\delta L}{a}. \quad (2.39)$$

Запишемо рівняння різниці маси рідини в трубопроводі до проходження хвилі тиску та після, отримаємо:

$$\delta M = (\rho + \delta \rho)(A \delta L + \delta V) - \rho A \delta L. \quad (2.40)$$

Об'єднання рівнянь (2.39) та (2.40) дозволяє отримати наступне рівняння:

$$\delta \rho A \delta L + \rho \delta V = A \rho \Delta V \frac{\delta L}{a}. \quad (2.41)$$

Приймаючи до уваги, що $\Delta p = \gamma \cdot \Delta H$, об'єднавши рівняння (2.38) і (2.41), отримаємо:

$$\gamma \Delta H \left[\frac{1}{K} + \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right) \frac{D}{e} \right] = \frac{\Delta V}{a}, \quad (2.42)$$

де K – значення модуля об'ємного стискування рідини.

Об'єднання рівняння (2.36) з рівнянням (2.42) дозволить записати:

$$a^2 \rho \left[\frac{1}{K} + \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right) \frac{D}{e} \right] = 1, \quad (2.43)$$

Таким чином, отримаємо рівняння для визначення швидкості поширення хвилі тиску у трубопроводі:

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{K \cdot D}{E \cdot e} (1 - \mu^2)}}. \quad (2.44)$$

На підставі цього рівняння, у наступній главі роботи, буде досліджена можливість виникнення гідравлічного удару в трубопроводі.

3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПЛАВНОГО ПУСКУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

3.1 Дослідження енергетичної підсистеми плавного пуску АД.

Для виконання аналізу перехідних процесів при плавному пуску асинхронних двигунів НС, проведемо моделювання енергетичної системи, яка включає до свого складу джерело живлення, трансформаторну підстанцію та асинхронні двигуни основних насосів. Фрагмент схеми електропостачання АД насосів наведено на рис. 3.1.

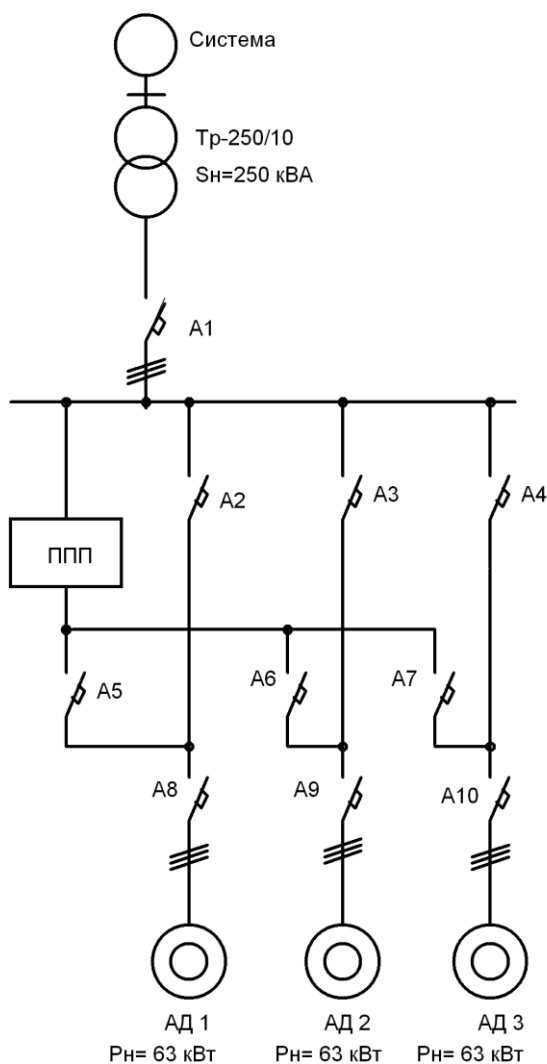


Рисунок 3.1- Схема електропостачання АД насосів.

Визначимо параметри електричної і гідравлічної підсистем, які прийняті в розрахунках. На насосній станції встановлено три АД типу 4АС250М4У3 номінальною потужністю $P_{\text{ном}} = 63$ кВт; на трансформаторній підстанції встановлено двообмоточний трансформатор ТМ-250/10 номінальною потужністю $S_{\text{ном}} = 250$ кВА, сумарна потужність допоміжного обладнання складає 16 кВА.

Перевіряємо потужність трансформатора:

$$S_{\text{розр.}} = k \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_{\text{н.і}}}{\eta_i \cdot \cos \varphi_i} + S_{\text{доп.}} = 0,9 \cdot \frac{3 \cdot 63}{0,87 \cdot 0,93} + 16 = 226,23 \text{ кВА.}$$

Коефіцієнт завантаження складає:

$$k_z = \frac{S_{\text{розр.}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{226,23}{250} = 0,89.$$

Паспортні дані трансформатора приведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Паспортні данні і параметри схеми заміщення трансформатора.

Тип трансформатора	Потужність $S_{\text{ном}}$, кВ·А	Каталожні данні			
		$U_{\text{ном}}$, кВ обмоток		ΔP_x ,	ΔP_k , кВт
		В	Н		
ТМ-250/10	250	10	0,4;0,23	1,05	3,7;4,2

Продовження таблиці 3.1.

Тип трансформатора	Каталожні данні		Розрахункові данні		
	u_k , %кВт	I_x , %	$X_{\text{тр}}$, Ом	$R_{\text{тр}}$, Ом	ΔQ_x , квар
ТМ-250/10	4,5-4,7	2.3-3,7	15,6	6,70	9,2

В таблиці 3.2. наведені паспортні данні та параметри схеми заміщення АД, що використовуються у роботі для проведенні чисельних розрахунків.

В попередніх главах роботи були сформовані обмеження, які накладаються на процедуру формування пускогальмівних траєкторій

асинхронних двигунів насосних агрегатів. Проаналізуємо перші два обмеження, що стосуються енергетичного аспекту електромеханічного перетворення енергії у двигунах.

У ДСТУ EN 50160:2014 [28] встановлюються величини нормально та гранично допустимих значень сталого відхилення напруги виводів приймачів електричної енергії, на рівні відповідно $\pm 5\%$ та $\pm 10\%$ від номінальної напруги мережі. Негативне відхилення напруги $\Delta U_{\text{max, доп}}$ на значення, що перебільшує 10% , визначається як провал напруги, який характеризується гранично допустимим значенням тривалості, що дорівнює 30 с для електричних мережах напругою включно до 20 кВ.

Таблиця 3.2 - Паспортні данні та параметри схеми заміщення асинхронних двигунів

№	Параметри двигуна	Одиниця виміру	Марка двигуна		
			4A132M6Y3	4A112M4Y3	4AC250M4Y3
1	P_n	кВт	7,5	5,5	63
2	p	-	3	2	2
3	m	-	3	3	3
4	f	Гц	50	50	50
5	$\cos \varphi$	-	0,85	0,85	0,93
6	η	-	0,825	0,855	0,87
7	$U_{\text{н.ф.}}$	В	220	220	220
8	$I_{\text{н.ф.}}$	А	18,4	11,5	117,9
9	r_s	Ом	0,574	1,164	0,034
10	r_r	Ом	0,850	0,645	0,123
11	L_m	Гн	0,107	0,171	0,0231
12	L_s	Гн	0,110	0,176	0,0236
13	L_r	Гн	0,111	0,179	0,0235
14	$M_{\text{ем.н}}$	Н·м	58,2	36,4	429,4
15	J_n	кг·м ²	0,028	0,017	1,2

На рис. 3.2 приведені результати моделювання прямого пуску першого асинхронного двигуна насосної станції системи водопостачання.

Криві, що наведено на рис. 3.2, відповідають прямому пуску АД 4АС250М4У3 із нульовими початковими умовами. Пуск починається із загальмованого стану, момент опору на валу змінюється відповідно до рівняння (2.26), та відповідному в усталеному режимі номінальному моменту АД. Верхній графік на рис. 3.2 показує зміну кутової частоти обертання ротора асинхронного двигуна протягом пуску ($\omega_r(t)$); на середньому графіку відображено зміну діючої лінійної напруги у точці приєднання АД до мережі ($U_{\text{л}}$); нижній графік показує зміну миттєвого струму статора фази «А» двигуна ($I_{\text{сА}}$).

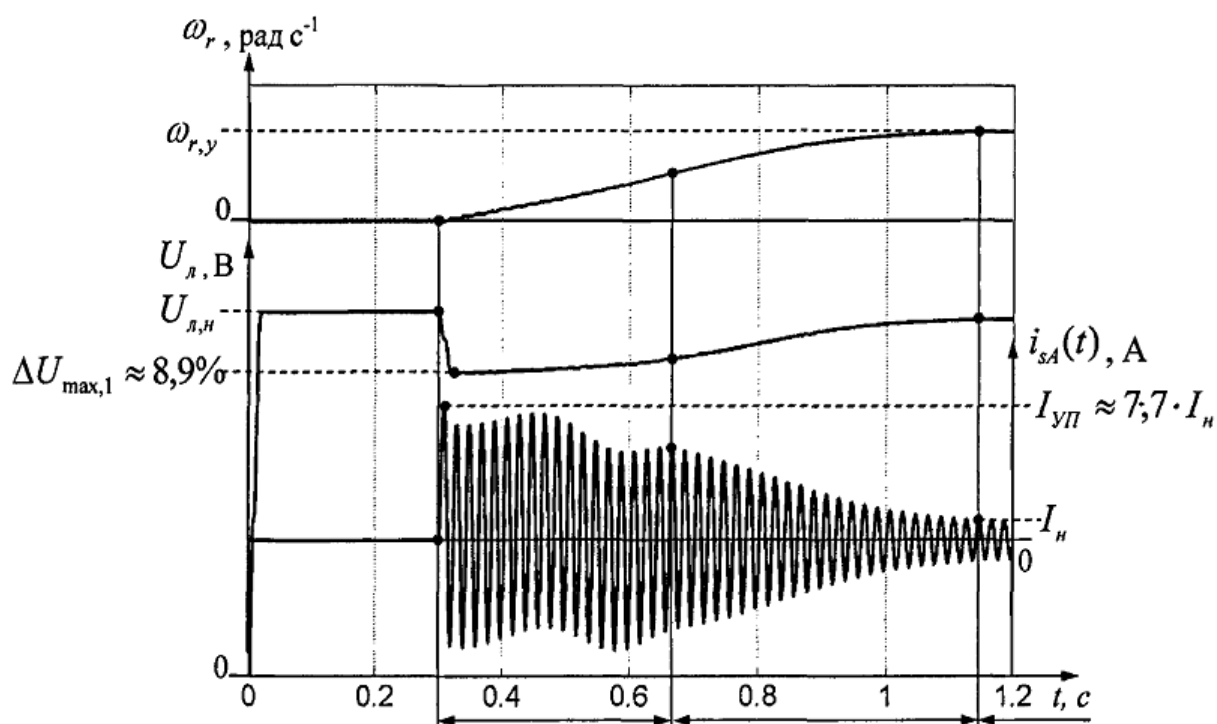


Рисунок 3.2 - Електромеханічні процеси при прямому пуску асинхронного двигуна 4АС250М4У3 насосної станції.

Пуск двигуна розпочинається в момент часу $t_{\text{start}} = 0,3$ с. Приблизно через 0,35 с після початку пуску, струм статорних обмоток знижується, цей діапазон відповідає наближенню кутової швидкості двигуна до області підсинхронних значень. Приблизно через 0,85 с після початку пуску, перехідний процес закінчується, а переходить в усталений режим.

Після першого періоду початку пуску двигуна, амплітуда миттєвого струму обмотки статора фази «А», досягає ударного пускового значення $I_{уп}$, яке перевищує амплітуду номінального струму двигуна приблизно в 7,7 разів. Виникнення значного струму призводить до збільшення падіння напруги у внутрішньому опорі первинної та вторинної обмоток трансформатора.

На рис. 3.3 представлений графік зміни діючої лінійної напруги, в даній мережі при пуску всіх трьох двигунів насосної станції в моменти часу t_{start1} , t_{start2} , t_{start3} відповідно.

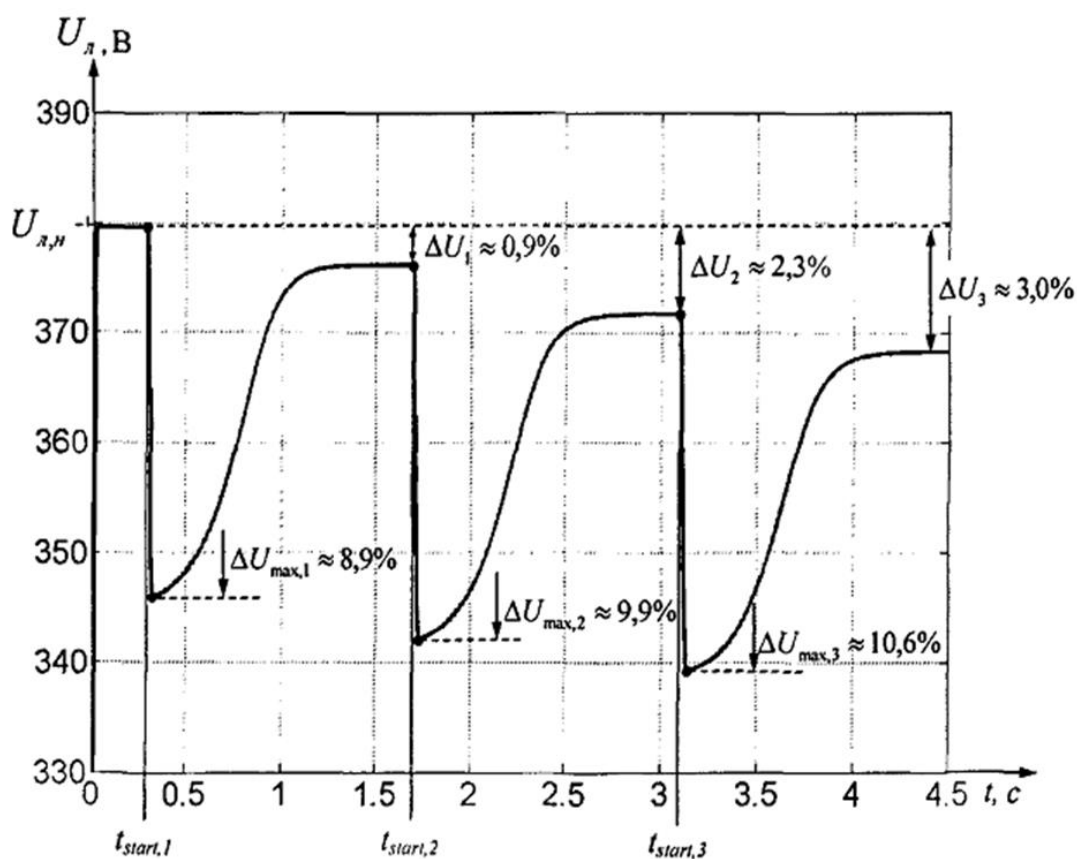


Рисунок 3.3 – Залежність діючої лінійної напруги від часу пуску.

З аналізу графіка діючої лінійної напруги (рис. 3.3), видно, що максимальне відхилення діючої лінійної напруги у мережі при пуску 1-го АД складає $\Delta U_{max,1} \approx 8,9\%$. Ця величина не перевищує гранично допустимого нормованого значення.

Аналіз графіка, приведеного на рис. 3.3, показує, що в сталому режимі відхилення діючої напруги від номінального значення в досліджуваній мережі, не більше нормально допустимої величини по закінченню пуску 3-го АД і приблизно дорівнює 3%. Але, максимальне відхилення діючої напруги протягом пуску 3-го двигуна складає 10,6%. Це перевищує гранично допустиме відхилення на 0,6%.

Таким чином, представлені вище результати вказують на необхідність обмеження перехідного струму статора при пуску асинхронного двигуна із використанням ППП. В цьому випадку, отримана у попередньому розділі роботи математична модель енергетичної підсистеми НС дозволяє розрахувати значення максимально допустимого струму, яке при пуску чергового двигуна не буде приводити до падіння напруги в мережі, що нижче гранично допустимого значення.

Друге обмеження, що пов'язане з величиною ударного струму, визначається конструктивними характеристиками двигуна. Відомо, що значні пускові струми небезпечні через свою теплову та механічну дії.

Механічна дія пояснюється тим, що перехідні струми можуть створювати значні механічні зусилля у лобових частинах обмотки. Наприклад, у крупних асинхронних двигунах зусилля, які діють на лобові частини обмотки досягають 75 кг/см. Тому, при частих діях перехідних процесів в АД, в лобових частинах виникають деформуючі вібрації, що призводить до передчасного виходу обмотки з ладу. Ця проблема враховується при конструюванні двигунів. При виконанні механічних розрахунків кріплень лобових частин обмоток враховують значення пускових струмів, які виникають в обмотках за номінальних умов пуску. Виробник двигуна встановлює значення максимального пускового струму, яке являється нормально допустимим та гарантує не менше 23000 год. середнього напрацювання на відмову. При цьому, нормується величина гранично допустимого відхилення максимального пускового струму, що дорівнює 20% від нормально допустимої величини.

Таким чином, поява пускового струму з максимальною амплітудою, яка вказана виробником двигуна у технічному каталозі, являється штатним режимом та не повинна викликати негативних змін у конструкції двигуна протягом гарантійного терміну експлуатації із номінальними навантаженнями та параметрами мережі електроживлення.

Позначимо відношення амплітуди пускового струму ($I_{\text{п}}$) до номінального ($I_{\text{н}}$) як коефіцієнт пускового струму:

$$K_{\text{і.п}} = I_{\text{п}} / I_{\text{н}} . \quad (3.1)$$

На рис. 3.4 приведені залежності зміни коефіцієнту $k_{\text{і.п}}$ у функції номінальної потужності двигуна із номінальними швидкостями ротора $n_{\text{н}}=3000$ об/хв та $n_{\text{н}}=1500$ об/хв загальнопромислових серій 4А і 5А з виконанням по ступеню захисту IP44 та IP54 (відповідно).

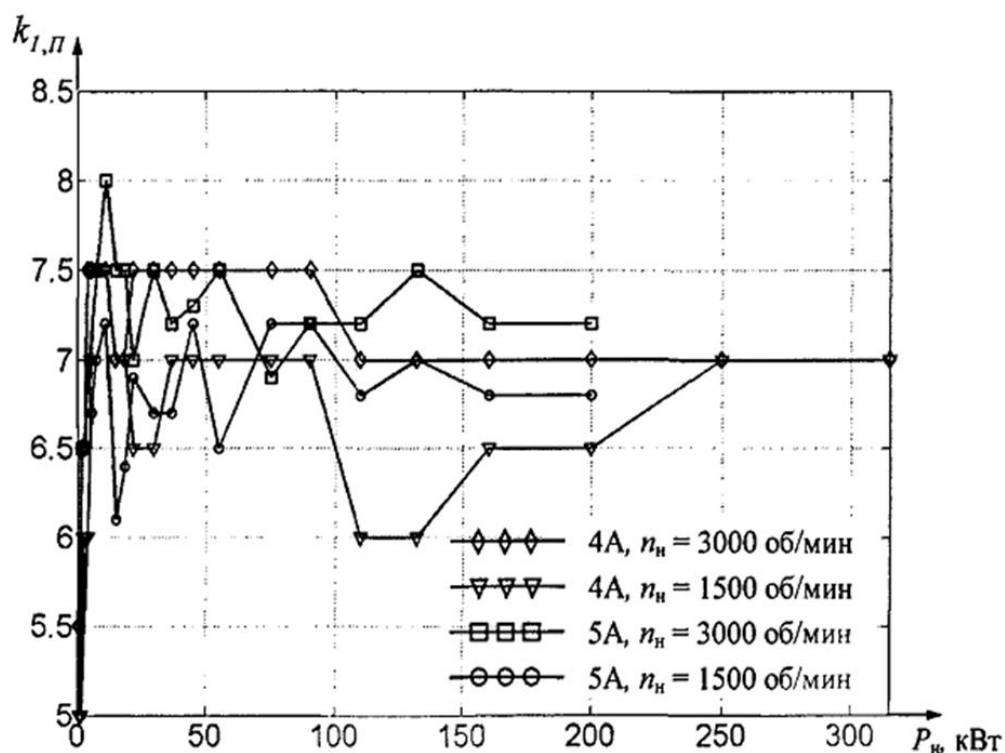


Рисунок 3.4 - Залежності зміни коефіцієнту $k_{\text{і.п}}$ у функції номінальної потужності двигуна для АД серій 4А і 5А.

Аналіз графіків, що наведено на рис. 3.4, показує, що в середньому значення $k_{лп}$ знаходяться у межах (6,5-7,5), характерно, що це значення більше для АД із більшою швидкістю. Крім того, в АД загальнопромислової серії 5А виконані конструктивно-технологічні поліпшення у порівнянні з АД попередньої серії, тому значення $k_{лп}$ для АД серії 5А більше, ніж в АД 4А при однаковій потужності двигуна.

Таким чином, для захисту конструкції асинхронного двигуна від механічних дій у пускових режимах при використанні ППП, потрібно обмежувати ударний пусковий струм до значень, які вказаними підприємством-виробником у технічній документації на двигун.

3.2 Моделювання гідравлічної підсистеми АСК ПП АД

Рівняння зміни маси рідини в трубопроводі, було в кінцевому вигляді отримано в главі 2 кваліфікаційної роботи. Аналіз цього рівняння показує, що швидкість поширення хвилі тиску у трубопроводі визначається:

- фізичними властивостями матеріалу труби (E, μ);
- геометричними параметрами труби (діаметром D , товщиною стінок e , щільністю ρ та модулем об'ємного стискування рідини K).

При цьому, напрям руху рідини не впливає на швидкість розповсюдження хвилі. Ця остання обставина пояснює підхід, коли аналіз динаміки несталого руху рідини у трубопроводі виконується для випадку закриття вентилі. При цьому, швидкість руху рідини змінюється від сталого значення v_0 до нульового.

З врахуванням наведених вище припущень та з обчисленням швидкості хвилі тиску по (2.44) проаналізуємо перехідний процес, який виникає при закритті вентилі у гідравлічній системі, яку зображено на рис. 3.5.

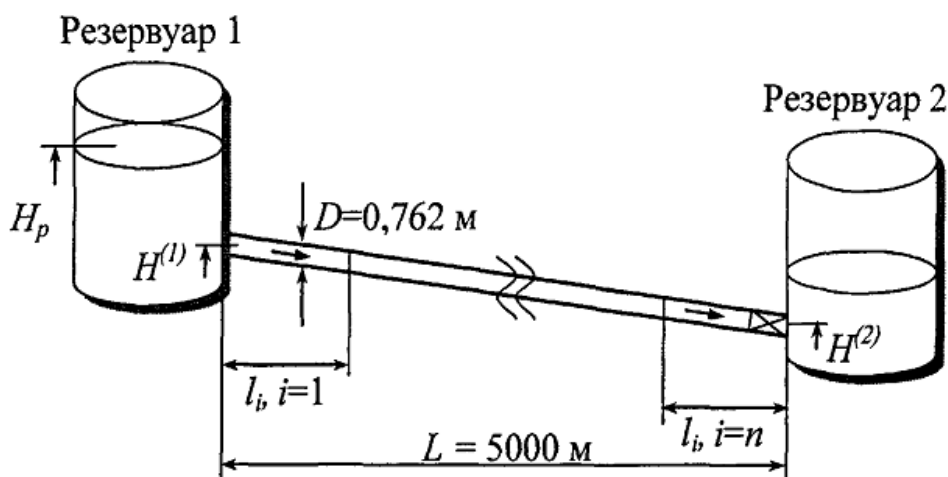


Рисунок 3.5 – Зображення схеми гідравлічної системи.

В такій гідравлічній системі задіяний сталевий трубопровід по якому з резервуару «1» в резервуар «2» проходить рідина (вода) з температурою 4 °С ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$). Запишемо грпничні умови для такої схеми для крайньої секції:

- проти течії:

$$H^{(1)} = H_p;$$

- за течією:

$$H_n = H_p - (n-1) \cdot \frac{12 \cdot f \cdot \Delta L \cdot v_0^2}{64,4 \cdot D}.$$

Вихідні дані та результати розрахунку змінних сталого режиму для гідравлічної системи, що зображено на рис. 3.5, зведено в таблицю 3.3.

На рис. 3.6 показано хвильові процеси у секції трубопроводу, яка примикає до вентиля. На рис. 3.6 а) зображено графіки натиску для двох значень тривалості закриття вентиля: $T_1=1 \text{ с.}$ та $T_2=10 \text{ с.}$

На рис. 3.6 б) наведено поверхню тиску води у трубопроводі при закритті вентиля тривалістю $T_1=1 \text{ с.}$

Таблиця 3.3 - Вихідні дані та параметри сталого режиму для гідравлічної системи.

№	Найменування параметра	Позначення	Розмірність	Величина
1	Натиск води в резервуарі «1»	H_p	м	218,1
2	Довжина трубопроводу	L	м	1524
3	Глибина центру стислого перетину струменя по кінцях трубопроводу проти течії та за течією	$H^{(1)}$ $H^{(2)}$	м	30,5 15,25
4	Коефіцієнт втрат на тертя	F	-	0.02
5	Діаметр труби	D	м	0,762
6	Модуль пружності	$E_{\text{сталь}}$	Па	$207 \cdot 10^9$
7	Товщина стінок труби	e	м	$2.54 \cdot 10^{-3}$
8	Щільність води (4 °С)	ρ	кг/м ³	1000
9	Коефіцієнт Пуассона	μ	-	0.3
10	Початкова швидкість руху води	v_0	м/с	1,5
11	Модуль об'ємного стискування води	K	Па	$2,2 \cdot 10^9$
12	Швидкість поширення хвилі тиску	a	м/с	751

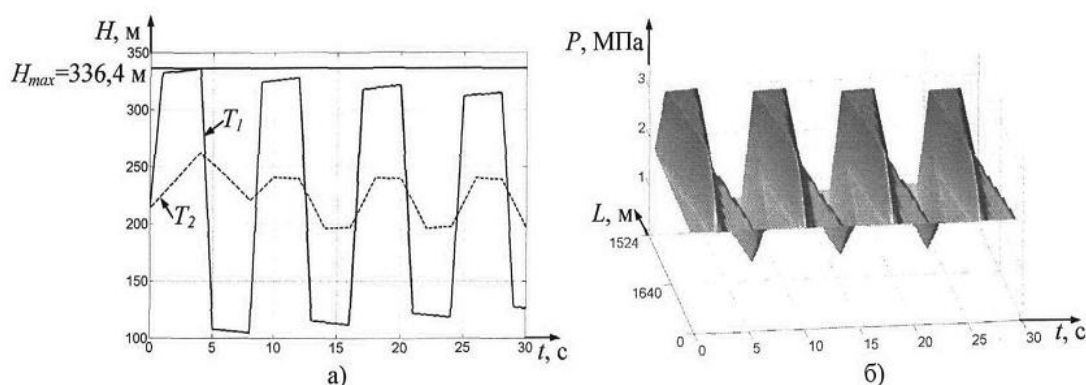


Рисунок 3.6 - Хвильові процеси в трубопроводі: а) – зміна повного натиску; б) - поверхня тиску води.

Аналіз графіків показує, що максимальний натиск складає $H_{\text{max}} = 336,4$ м. Форма хвилі натиску створює різкий фронт, що відповідає теоретичним відомостям про процеси, які протікають при гідравлічному ударі. При

збільшенні часу закриття вентиля від T_1 до T_2 , форма профілю хвилі стає більш пологою, а максимальна амплітуда натиску зменшується до $H_{\max} = 262,1$ м.

Для типової насосної станції змодельємо пуск та зупинку асинхронного двигуна на відкриту засувку. Основні параметри насосної станції наступні :

- число послідовно сполучених секцій трубопроводу $n=3$;
- натиск води в двох резервуарах $H^{(1)}=120,4$ м.; $H^{(2)}=256$ м;
- кількість паралельних насосних агрегатів $m=4$;
- моменти, що відповідають часу пуску насосів: $t_{\text{start } j} = (100, 400, 500, 600)$, $j=1...4$;
- моменти, що відповідають часу зупинки насосів: $t_{\text{stop } j} = (800, 900, 1000, 1100)$, $j=1...4$;
- тривалість перехідного процесу для всіх насосів однакова та дорівнює $T_{\text{пн}}=20$ с;
- фізичні властивості рідини та матеріалу труб вказані в таблиці 3.3.

На рис. 3.7 а) наведено графік зміни повного натиску (H , м) для першого перетину першої секції трубопроводу. На рис. 3.7 б) наведено графіки максимального ($P_{\max}$) та мінімального ($P_{\min}$) тиску води для всіх перетинів трубопроводу відносно часу.

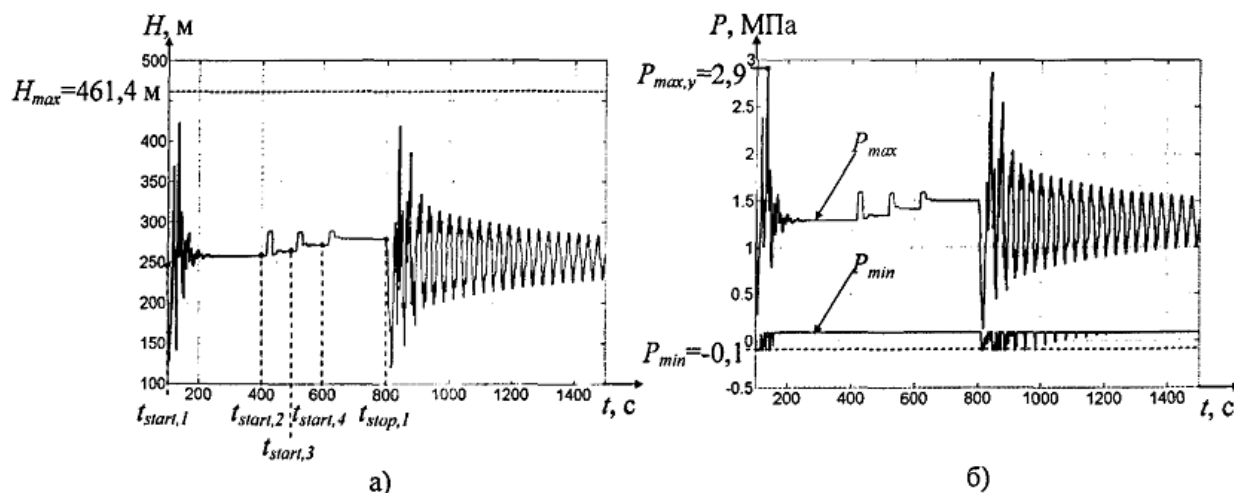


Рисунок 3.7 - Зображення моделювання перехідних процесів пуску і зупинки насосних агрегатів на відкриту засувку.

Аналіз графіків показує, що максимальний натиск в трубопроводі не перевищує максимально розрахованої величини $H_{\max} = 461,4$ м (рис 3.7 а), та ударний тиск в модельованій системі $P_{\max, y} = 2,9$ МПа (рис. 3.7 б). Це значення значно менше ударного тиску для трубопроводів, які виконаного із сталевих труб і становить $P_{y, \text{сталь}} = 10$ Мпа. Також на графіку рис. 3.7 б) видно, що мінімальний тиск у трубопроводі становить $P_{\min} = 0,1$ МПа. Це може спровокувати явище кавітації, тобто виникнення в товщі рідини порожнин, заповнених газом або каверн, що можуть за певних умов схлопуватися та викликати локальне значне підвищення тиску. Під дією кавітації з поверхні стінок каналів, лопастей насосів відриваються частки речовини, що викликає ерозію матеріалів. Явище кавітації являється найбільш суттєвим руйнівним наслідком гідравлічного удару.

3.3 Моделювання нестационарного нагріву обмоток асинхронних двигунів

При роботі асинхронного двигуна виділяється теплова енергія в елементах конструкції двигуна. Найбільше на підвищення температури реагує ізоляція обмоток. Збільшення температури ізоляції обмоток вище встановленого допустимого значення $\Theta_{\max, \text{доп}}$ приводить до появи необоротних фізико-хімічних процесів та прискорює її старіння. Для оцінки стійкості електричної ізоляції електротехнічних виробів до впливу температури прийняті класи нагрівостійкості: Y; A; E; B; F. Клас нагрівостійкості електротехнічного виробу показує максимально допустиму робочу температуру, при якій допускається працювати з номінальним навантаженням.

В роботі проведено моделювання температури нагріву статорних обмоток асинхронного двигуна допоміжного обладнання 4A112M4УЗ номінальною потужністю $P_{\text{ном}} = 5,5$ кВт. Цей двигун має ступень захисту IP44 та клас нагрівостійкості ізоляції B. Для цього класу ізоляції максимально допустима температура нагріву становить $\Theta_{\max} = 130$ °C.

Розрахунки виконувалися за рівняннями, що наведені у другому розділі. Прямий пуск із номінальним навантаженням виконувався із загальмованого стану з початковою температурою елементів конструкції електродвигуна $\Theta_0 = 40^\circ\text{C}$.

Використаємо модель нестационарного нагріву та охолодження двигуна (2.14) та запишемо квадратні матриці теплоємностей та теплопровідностей для еквівалентної теплової схеми заміщення (рис. 2.8):

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_6 \end{bmatrix}; \quad (3.2)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{11} & -G_{12} & 0 & -G_{14} & 0 & 0 \\ -G_{21} & G_{22} & -G_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -G_{32} & G_{33} & 0 & -G_{35} & -G_{36} \\ -G_{41} & 0 & 0 & G_{44} & -G_{45} & -G_{46} \\ 0 & 0 & -G_{53} & -G_{54} & G_{55} & 0 \\ 0 & 0 & -G_{63} & -G_{64} & 0 & G_{66} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Теплопровідності головної діагоналі в матриці (4.25) обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} G_{11} &= G_{12} + G_{14}; & G_{33} &= G_{32} + G_{35} + G_{36}; & G_{55} &= G_{53} + G_{54}; \\ G_{22} &= G_{21} + G_{23}; & G_{44} &= G_{41} + G_{45} + G_{46}; & G_{66} &= G_{63} + G_{64} + G_{60}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

За наведеною методикою розраховуємо параметри елементів еквівалентної теплової схеми заміщення, результати розрахунків розміщено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунків теплоємкостей та теплопровідностей для АД 4A112M4УЗ.

Тепло- провідності	Розмір- ність	Величина	Теплоємкості	Розмірність	Величина
G_{12}	Вт/(м·К)	5,71	C_1	Дж/(кг·К)	539,9
G_{14}	Вт/(м·К)	0,53	C_2	Дж/(кг·К)	423,4
G_{23}	Вт/(м·К)	28,12	C_3	Дж/(кг·К)	4450,6
G_{35}	Вт/(м·К)	7,41	C_4	Дж/(кг·К)	0,99
G_{36}	Вт/(м·К)	64,77	C_5	Дж/(кг·К)	1006
G_{45}	Вт/(м·К)	1,07	C_6	Дж/(кг·К)	18446,6
G_{46}	Вт/(м·К)	24,04			
G_{60}	Вт/(м·К)	66,67			

На рис. 3.8 наведено криві нагріву лобової частини статорної обмотки двигуна 4A112M4УЗ, які отримані з використанням моделі (2.17).

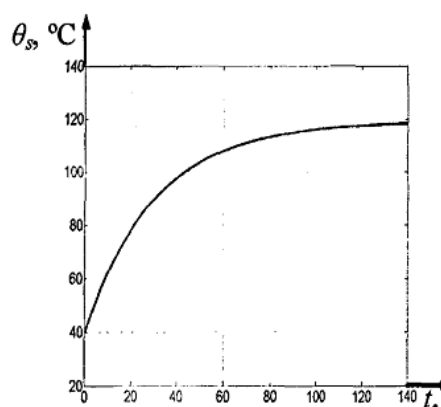


Рисунок 3.8 - Крива нагріву лобової частини статорної обмотки двигуна 4A112M4УЗ.

При проведенні плавного пуску двигуна спостерігається збільшення часу його знаходження в області підвищених ковзань та додаткового виділення тепла в статорних обмотках через несинусоїдальність живлячої напруги. Температура обмоток при тривалому пуску навантаженого двигуна може бути більшою за температуру обмоток при прямому пуску. Це вимагає контролю температури, наприклад, із використанням датчиків або програмними засобами через включення теплової моделі двигуна до програмного забезпечення мікроконтроллера ППП.

3.4 Керування режимами плавного пуску та гальмування асинхронних двигунів

Виробники пристроїв плавного пуску надають можливість користувачеві самостійно виконувати налаштування параметрів. Для цього, декілька типових пускогальмівних програм, для найбільш поширених навантажень, записують в електронний запам'ятовуючий пристрій мікроконтролера. Розглянемо одну з типових програм, яка здійснює зміну кута керування ТПН. Її форму приведено на рис. 3.9.



Рисунок 3.9 – Типова форма зміни кривої кута керування ТПН.

На рис. 3.9 $\alpha_{\min}$ відповідає куту відкриття тиристорів, що забезпечує нижній рівень діючої напруги на виході ТПН. Кут $\alpha_{\max}$ відповідає куту відкриття тиристорів, який забезпечує верхній рівень діючої напруги на виході ТПН. Значення $\alpha_{\text{кик}}$ та $t_{\text{кик}}$ відповідають величині кута та тривалості пускового (кік-) імпульсу, призначеного для створення потрібного пускового моменту.

Так, в симетричному ТПН, що виконаний з шістьма тиристорами, СІФК з СН, кут керування α може змінюватися у діапазоні від 0 ел. $^{\circ}$ до 120 ел. $^{\circ}$. отже, якщо від 180 ел. $^{\circ}$ відняти межі вказаного діапазону, то куту $\alpha_{\min}$ буде відповідати 60 ел. $^{\circ}$, куту $\alpha_{\max}$ - 180 ел. $^{\circ}$.

Використання наведеного алгоритму керування пристроєм плавного пуску не встановлює залежність максимального пускового струму від тривалості пуску двигуна. Але, інформація про значення струмів статорних обмоток

двигуна у перехідних режимах потрібна для обмеження механічних перевантажень та температурного перегріву обмоток двигуна.

Тому, доцільно використання алгоритму керування СІФК-ТПН з обмеженням по струму. Коефіцієнт кратності струму при керованому пуску АД визначається відношенням:

$$k_{i.kп} = I_{кп}/I_n, \quad (3.5)$$

де I_n – значення номінального струму обмоток статора двигуна, А.

Існує кілька способів реалізації алгоритму керування ТПН із струмовим обмеженням. Наприклад, можливе використання пропорційно-інтегрального регулятора. Але такий регулятор обмежує коливання амплітуди струму в зоні уставки, що створює додаткові труднощі його налаштування та вживання.

У магістерській роботі використовується наступний алгоритм керування із струмовим обмеженням:

- приймаються дискретні відліки часу t_i ; $i = 1, 2, 3 \dots n$, для яких виконується умова $I_{кп} = \kappa \cdot I_n$, де κ - коефіцієнт запасу;
- в момент часу $t_j = 0$ кут керування $\alpha = \alpha_0$ (початкове значення);
- в поточний момент часу t_i кут α визначається за правилом:

$$\alpha_i = \begin{cases} \alpha_{i-1} \cdot \sin(t_i \cdot \kappa_f + \pi / 2), I_{yп} < \kappa \cdot I_y \\ \alpha_{i-1}, I_{yп} \geq \kappa \cdot I_y \end{cases},$$

де κ_f – значення частоти синусоїдальної кривої керування.

На рис. 3.10 наведено графіки зміни у часі кривої миттєвого струму статорної обмотки «А» та кутової швидкості та електромагнітного моменту для двигуна 4АС250М4УЗ. Дані графіки отримано при використанні наведеного алгоритму з двома різними уставками:

- $I_n = 2,5 \cdot I_n$; рис. 3.10 а), 3.10 б);
- $I_n = 2,1 \cdot I_n$; рис. 3.10 в), 3.10 г).

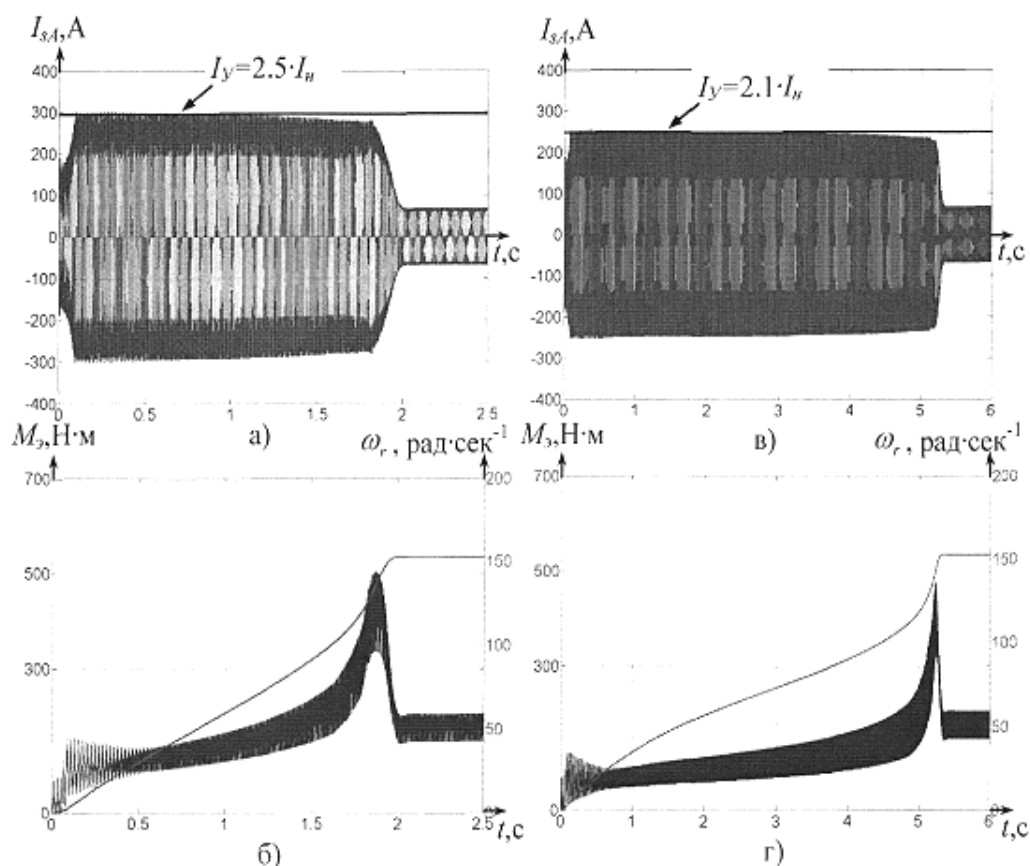


Рисунок 3.10 – Залежності струмів статора, кутової швидкості та електромагнітного моменту у часі із СС при струмових обмеженнях: $I_k=2,5 \cdot I_n$ (а, б) та $I_k=2,1 \cdot I_n$ (в, г).

Проаналізуємо наведені вище графіки. Тривалість пуску при першій уставці ($I_k=2,5 \cdot I_n$) склала $t_n=1,85$ с, для другої уставки ($I_k=2,1 \cdot I_n$) - $t_n=5,23$ с. Уставки обмеження струму відпрацьовуються коректно, відсутні негативні значення електромагнітного моменту, огинаюча струмів статорів гладка.

Моделювання проводилося з застосуванням СІФК-ТПН-АД, що синхронізова по струму статора. Параметри схеми заміщення двигунів, які використані в роботі при проведенні розрахунків, представлено в таблиці 3.2.

Проведений аналіз дозволяє визначити при керованому пуску асинхронних двигунів максимальну амплітуду струмів статора та тривалість пуску. Далі розглянемо зв'язок між вказаними показниками та втратами енергії у перехідних процесах.

3.5 Аналіз основних показників перехідних процесів при пуску АД

Найбільш значна частина енергетичних втрат в асинхронному двигуні приходить на втрати в обмотках ротора та статора електродвигуна [10]. Загальні втрати потужності для обмоток асинхронного двигуна можливо записати наступним чином:

$$\begin{aligned} \Delta P(t) = \Delta P_s(t) + \Delta P_r(t) = R_s \cdot [i_{s\alpha}^2(t)] + [i_{s\beta}^2(t)] + \\ + [i_{s\gamma}^2(t)] + R_r \cdot [i_{r\alpha}^2(t)] + [i_{r\beta}^2(t)] + [i_{r\gamma}^2(t)] \end{aligned} \quad (3.5)$$

де R_s та R_r – значення активних опорів обмоток статора та ротора двигуна;

$i_{s\alpha}(t); i_{s\beta}(t); i_{s\gamma}(t); i_{r\alpha}(t); i_{r\beta}(t); i_{r\gamma}(t)$ – значення миттєвих статорних та роторних струмів електродвигуна для α - β - γ системи координат.

При цьому, втрати енергії протягом перехідного процесу T_{Π} складають:

$$\Delta W = \int_0^{T_{\Pi}} \Delta P(t) dt. \quad (3.6)$$

На рис. 3.11 представлено відносне значення зміни втрат електроенергії в асинхронному двигуні при некерованому (прямому) пуску $\Delta W_{\Pi\Pi}$ та керованому (плавному) пуску $\Delta W_{\text{кп}}$, при зміні тривалості кута керування у межах ($\alpha_{\min}$ - $\alpha_{\max}$), яка відбувалася за алгоритмом, представленим на рис. 3.9. Значення часу T_{Π} визначалося діапазоном, у якому кутова миттєва швидкість ротора двигуна $\omega_r(t)$ знаходилася у межах:

$$\omega_r(t) \in [0,95 \cdot \omega_{r,y}; 1,05 \cdot \omega_{r,y}],$$

де ω_{ry} - значення усталеної кутової швидкості ротора двигуна.

Розрахунок кривих проводився для двох потужностей електродвигунів: основного (4AC250M4У3, $P_{\text{ном2}} = 63$ кВт, $M_{\text{ном2}} = 429,4$ Н·м) та допоміжного

обладнання (4A132M6УЗ, $P_{\text{ном1}} = 7,5$ кВт, $M_{\text{ном1}} = 58,2$ Н·м). Значення моментів опору на валу двигуна приймалося $M_{\text{с1}} = (0,1 \cdot M_{\text{н1}}; 0,5 \cdot M_{\text{н1}}; M_{\text{н1}})$.

Аналіз кривих на рис. 3.11 показує, що виділяється область мінімальних втрат енергії, які викликані зниженням коливальності змінних стану при перехідному процесі.

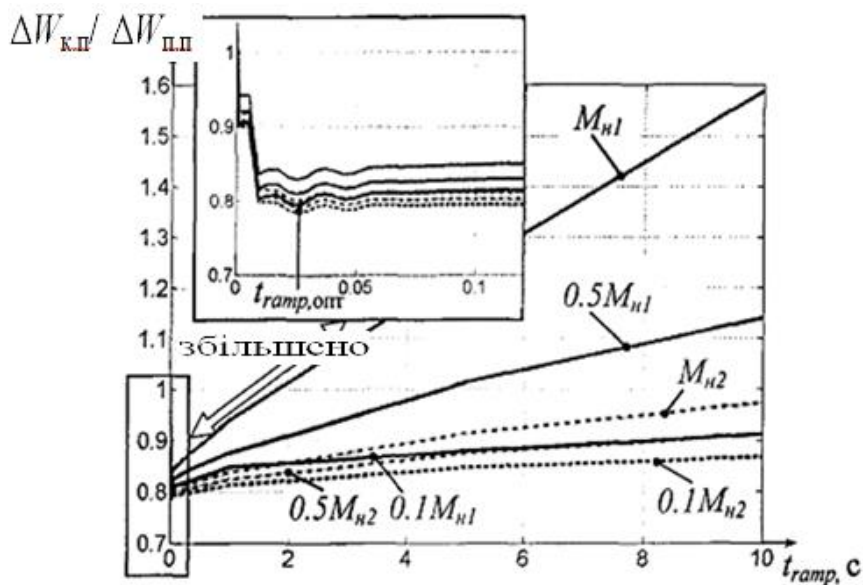


Рисунок 3.11 - Зміни відносних втрат при керованому пуску електродвигуна.

При значенні $t_{\text{ramp,опт}} = (0,02-0,03)$ с. втрати $\Delta W_{\text{кп}}$ зменшується на (14-20)% у порівнянні із втратами електроенергії для некерованого прямого пуску $\Delta W_{\text{пп}}$. Якщо і надалі збільшувати t_{ramp} , це приведе до зростання втрат через збільшення часу знаходження електродвигуна в області зниженої швидкості. Збільшення втрат відбувається швидше при зменшенні номінальної потужності електродвигуна та збільшенні механічного навантаження на валу двигуна. Аналіз залежностей графіків рис. 3.11 дозволяє зробити висновок, що необґрунтоване затягування тривалості керованого пуску двигуна приводить до перевищення втрат енергії порівняно з прямим пуском.

Застосування алгоритму пуску асинхронного двигуна з обмеженням по струму вимагає завдання максимально-допустимого відношення $k_{\text{i,кп}}$, що

визначає результуючу тривалість пуску $T_{\text{п}}$. При цьому використовується однакове значення $k_{i.\text{кп}}$ для всіх двигунів насосних агрегатів та не враховуються зміни в модельованій системі, які вносяться пуском наступного двигуна. Так, вибір заниженого значення коефіцієнту $k_{i.\text{кп}}$, буде приводити до необґрунтованого затягуванню пуску, що збільшує втрати електроенергії, вибір завищеного значення коефіцієнту $k_{i.\text{уп}}$ порушує безпечний режим функціонування обмоток двигуна та трубопроводу.

Таким чином, для скорочення втрат електроенергії у обмотках АД насосної станції системи водопостачання та забезпечення надійності роботи, потрібно забезпечити таке значення оптимальної тривалості пуску $T_{\text{п.опт}}$, при якому будуть враховані всі обмеження, що накладаються на роботу системи «ЕМ- ППП - АД - НА - трубопровід».

3.6 Адаптивний алгоритм керування плавним пуском асинхронних двигунів насосної станції

Розглянемо плавний пуск асинхронних двигунів насосної станції від пристрою плавного пуску, в якому використовується струмообмежуюча уставка, що задається однаковою для всіх АД основних насосів: $I_y = I_{y1} = I_{y2} = \dots = I_{y\text{н}}$ (рис.3.12).

Перед початком пуску 1-го асинхронного двигуна (АД₁) діюча лінійна напруга у вторинному ланцюзі трансформаторної підстанції дорівнює $U_{\text{ст.1}}$. Сталий натиск в трубопроводі - $H_{\text{ст.1}}$, який разом з початковою витратою ($Q_{\text{н}}$) зумовлює значення моменту опору $M_{\text{с.1}}$ для першого відцентрового насоса (ЦН₁).

У момент часу $t_{\text{start,1}}$ розпочинається плавний пуск першого АД при подачі відповідної команди на пристрій плавного пуску. Перехідний процес характеризується наступним:

- пускові струми, призводять до падіння напруги в електричній мережі, що становить ΔU_1 ;

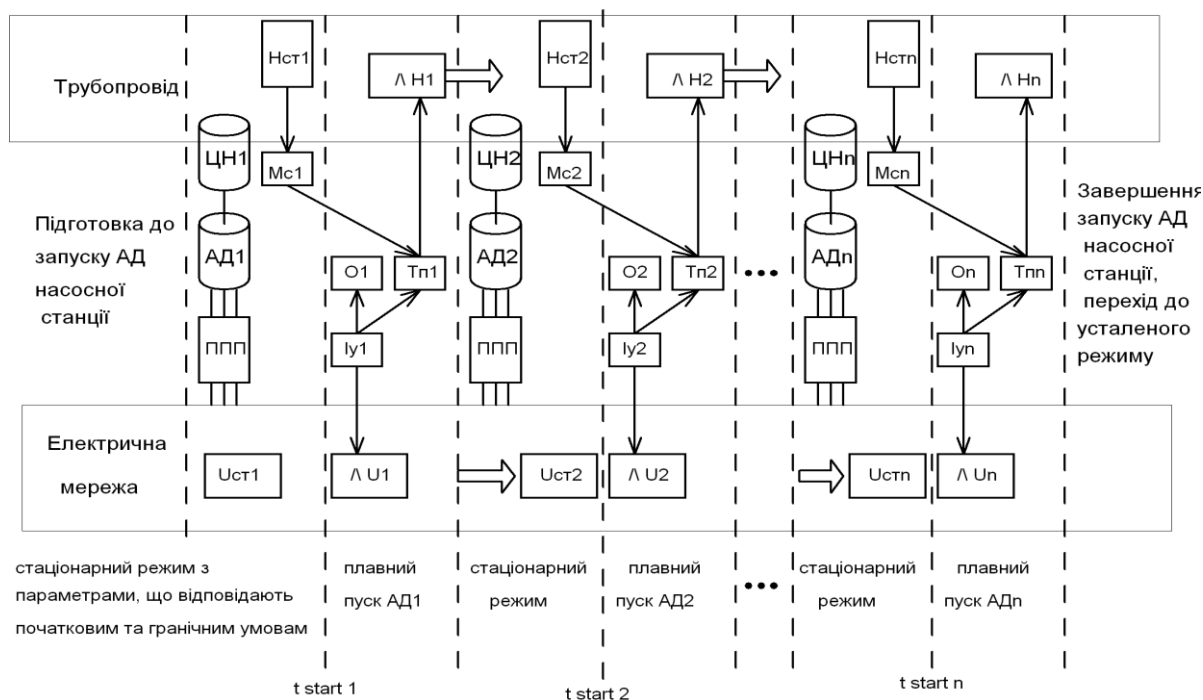


Рисунок 3.12 – Схема проведення плавного пуску двигунів насосної станції при фіксованій уставці.

- підвищується температура обмоток статора асинхронного двигуна і становить θ_1 ;
- максимальне значення натиску води в трубопроводі збільшується і становить ΔH_1 .

Після закінчення перехідного процесу в сталому режимі в трубопроводі розвивається натиск ($H_{ст,2}$), що разом з витратою (Q_n) зумовлюють величину моменту опору ($M_{с,2}$) відцентрового насоса (ЦН₂). Такий порядок відстежується при запуску всіх асинхронних двигунів насосної станції. При запуску кожного наступного двигуна початковими умовами являються значення змінних стану моделі, які отримані при пуску попередніх двигунів.

Результати аналізу енергетичних втрат в двигуні при плавному пуску, дозволяють зробити висновок, що використання фіксованої струмової уставки для плавного пуску всіх двигунів насосних установок не виявляється ефективним. Вибір заниженого значення струмової уставки I_y приводить до затягування пуску та втратам енергії (рис. 3.10), а вибір завищеного значення уставки I_y (рис. 3.3), приводить до провалів напруги в електричній мережі, що

нижче гранично допустимого значення та можуть послужити причиною появи гідравлічного удару у трубопроводі.

Усунути ці недоліки можливо за рахунок використання адаптивного алгоритму, який виконує аналіз поточного стану системи «ЕМ – ППП – АД – НУ - трубопровід» та дозволяє сформувати максимально можливу струмову уставку I_y для пристрою плавного пуску. При використанні такої уставки на протязі керованого пуску двигуна будуть виконані певні обмеження.

Структурна схема адаптивного алгоритму керування плавним пуском АД насосної станції приведена на рис. 3.13.

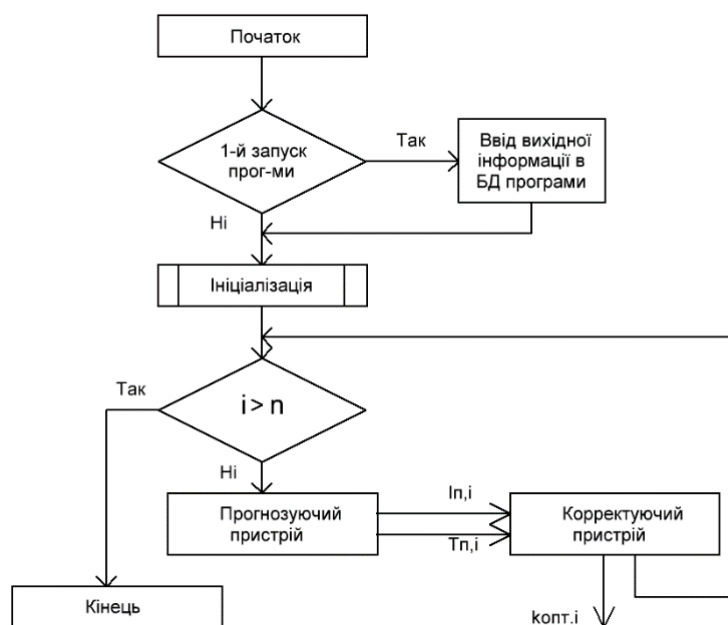


Рисунок 3.13 - Логічна схема адаптивного алгоритму керування плавним пуском АД насосної станції

Перед початком виконання розрахунків, в базу даних програми вноситься інформація за наступними параметрами:

- електрична підсистема (параметри ТП та АД);
- механічна підсистема (параметри ВН);
- гідравлічна підсистема (параметри магістрального трубопроводу, резервуарів, обвідної лінії).

Обов'язково вводяться обмеження, що накладаються на протікання пускогальмівних процесів в асинхронних двигунах насосної станції. До них відносяться:

- фіксовані, що зумовлені типом асинхронних двигунів, які використовуються ($I_p, \theta_{\max, \text{доп}}$);
- змінні, які залежать від умов експлуатації насосної станції ($\Delta U_{\max, \text{доп.}}, \Delta P_{\max, \text{доп.}}$).

Набір вихідних даних при використанні адаптивного алгоритму керування плавним пуском двигунів насосної станції представлено на рис. 3.14.



Рисунок 3.14 - Структура вихідних даних адаптивного алгоритму керування плавним пуском АД насосної станції

Після внесення та перевірки даних проходить процедура ініціалізації змінних і параметрів програми. Потім керування передається прогнозуючому пристрою, який виконує дві основні функції:

- визначення j відліків максимального збільшення тиску $\Delta P_{\max, ij}$ в трубопроводі у функції тривалості плавного пуску i -того двигуна. Розрахунок відліків виконується автоматично методом чисельного інтегрування змодельованої гідравлічної підсистеми. В результаті проведеної апроксимації

отримується тривалість пуску двигуна, що відповідає встановленому обмеженню $\Delta P_{\text{max, доп.}}$;

- будується електрична схема заміщення, яка складається з джерела нескінченної потужності із номінальною напругою ЛЕП, знижуючого трансформатора та вже запущених асинхронних двигунів, що представляються спрощеною схемою заміщення, що відповідає номінальному режиму роботи. Для такої схеми виконується розрахунок амплітуди максимально допустимого струму, який відповідає встановленому обмеженню $\Delta U_{\text{max, доп.}}$.

Результатом роботи прогнозуючого пристрою являється значення тривалості пуску і пускового струму, з якими потрібно запустити i -тий асинхронний двигун НУ при дотриманні обмежень на $\Delta U_{\text{max, доп.}}$, $\Delta P_{\text{max, доп.}}$.

Потім керування переходить до коректуючого пристрою, який також виконує дві функції:

- отримання j відліків для пускового струму у функції тривалості пуску для i -того двигуна. Відліки розраховуються автоматично методом чисельного інтегрування моделі СІФК-ТПН-АД. Тобто, визначається оптимальна уставка кратності струму пуску;
- для отриманих значень $I_{Y,i}$, $T_{П,i}$ виконується розрахунок максимальної температури $\Theta_{\text{max},i}$ лобових частин обмоток статора i -того двигуна.

Після проведення розрахунків, отримані оптимальні значення $k_{\text{іопт.}}$. Для кожного з асинхронних двигунів ці значення послідовно надсилаються на ППП для здійснення пуску за алгоритмом із обмеженням за струмом.

У разі плавної зупинки асинхронного двигуна немає необхідності контролювати напругу мережі та температуру обмоток двигунів. Обчислення $k_{\text{іопт.}}$ можливо виконувати за спрощеним варіантом наведеного вище алгоритму.

Перевагою адаптивного алгоритму являється те, що він не виконує ітерацій. Це дозволяє забезпечити достатню для інтерактивного керування продуктивність. Розрахунки за даним алгоритмом були виконані у математичному середовищі Matlab.

Порівняння результатів розрахунків із фіксованою уставкою та із використанням адаптивного алгоритму приведено у таблиці 3.5. На насосній станції системи водопостачання було встановлено 3 асинхронні двигуна потужністю $P_{\text{ном}} = 63$ кВт, характеристики ВН відповідають насосу Ingersoll-Dresser 15H277, на трансформаторній підстанції встановлено двохобмоточний трансформатор ТМ-250/10 з номінальною потужністю $S_{\text{ном}}=250$ кВА, загальна сумарна потужність допоміжного обладнання $S_{\text{доп}}=16$ кВА. Прийнята максимально допустима температура статорних обмоток із ізоляцією класу нагрівостійкості В: $\theta_{\text{мах.доп.}}=130^{\circ}\text{C}$; максимально допустиме зниження напруги у вторинній обмотці трансформатора $\Delta U_{\text{мах.доп.}}=10$ %; максимально допустиме збільшення тиску в трубопроводі по відношенню до сталого режиму $\Delta P_{\text{мах.доп.}} = 50$ %.

Таблиця 3.5 - Результати моделювання ПП асинхронних двигунів насосної станції при зміні струмообмежуючої уставки.

Плавний пуск з фіксованою уставкою					Плавний пуск з розрахунковою уставкою		
$k_{i,\text{уп}}$	ΣW , кДж	$\Delta P_{\text{мах}}$, %	$\Delta U_{\text{мах}}$, %	$\theta_{\text{мах.}}$, $^{\circ}\text{C}$	ΣW , кДж	δW ,%	ΔW^* , кВт·ч
2,5	252,10	43,01	4,71	122,3	139,15 $K_{\text{опт.і}}=(4,1;$ 6,2;4,8), $i=1\dots3$	44,29	22,33
3,0	171,30	49,10	6,20	118,1		17,86	6,13
4,0	141,54	49,71	8,11	116,0		0,86	0,26
5,0	139,60	50,41	9,92	115,8		-	-
6,0	139,61	50,50	10,10	115,7		-	-

* - величина скорочення втрат енергії за добу при 30 пусках за годину.

Виробники пристроїв плавного пуску рекомендують при пуску АД НА встановлювати значення величини кратності пускового струму $k_{i,\text{кп}}$ на рівні 2,5; 3.

Аналіз результатів, що наведено в таблиці 3.1, дозволяє зробити висновки, що плавний пуск двигунів з використанням розрахункової уставки, яка враховує поточний стан системи, приводить до скорочення сумарних втрат електроенергії в обмотках двигунів, по відношенню до втрат електроенергії при використанні класичного алгоритму з фіксованою уставкой $k_{i.kп}=3$, на 17,9%. Як слідує з результатів моделювання, зниження $k_{i.kп}$ до 2,5 викликає зростання втрат на 47%. Збільшення $k_{i.kп}$ до значення $k_{i.kп} = 5$ приводить до перевищення максимального приросту тиску у трубопроводі вище прийнятого обмеження. При значенні $k_{i.kп}=6$, відбувається падіння напруги в ланцюгах трансформатора на відносне значення $\Delta U_{\max}=10,1\%$, що також порушує прийняте обмеження $\Delta U_{\max.\text{доп.}} = 10\%$.

За результатами таблиці 3.1 видно, що перевищення температури лобових частин обмоток статорів двигунів вище допустимого значення $\Theta_{\max.\text{доп.}}=130^{\circ}\text{C}$ зафіксовано не було.

4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЇВ ПЛАВНОГО ПУСКУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НС

Ефективність сучасного виробництва залежить, насамперед, від роботи обладнання, яке приводиться до руху АД. Одним з головних недоліків асинхронних електродвигунів з КЗ ротором являється наявність великих пускових струмів. У попередніх главах кваліфікаційної роботи було розглянуто вибір тиристорних перетворювачів напруги для здійснення плавного пуску асинхронних двигунів насосної станції.

Пристрій плавного пуску дозволяє забезпечити суттєві технічні переваги та економію електроенергії в обмотках двигунів у динамічних режимах. Але зробити остаточний висновок про ефективність цього пристрою можливо на підставі розрахунку показників економічної ефективності, які будуть розглянуті у цьому розділі.

Для порівняння розрахунки виконуються за двома варіантами: базовим – без встановлення ППП, та новим – з використанням пристрою ПП на насосній станції.

4.1 Визначення величини капіталовкладень

Визначення вартості капітальних вкладень проводиться тільки для нового варіанту і включає вартість самого пристрою плавного пуску, витрати на доставку ППП, монтаж та пусконаладжувальні (п/н) роботи. Визначається за формулою:

$$K = B_{\text{обл}} + B_{\text{м}} + B_{\text{пн}} + B_{\text{д}} = 52387 + 52387 \cdot (10 + 18 + 5) / 100 = 69674,71 \text{ грн,}$$

де K – значення капіталовкладень, грн.

$B_{\text{обл}}$ – вартість обладнання, грн.;

B_m – вартість монтажних робіт, що враховує також вартість монтажних матеріалів, грн. Ця величина, зазвичай, приймається у розмірі 18% вартості обладнання.

B_{nn} – вартість п/н робіт, грн. Може бути прийнята у розмірі 5% вартості обладнання.

B_d – вартість доставки, грн. Приймається у розмірі 10% вартості обладнання;

До встановлення приймається пристрій ATS 22, вартість якого за даними виробника складає 56387 грн.

4.2 Визначення експлуатаційних витрат

Визначення експлуатаційних витрат виконується з врахуванням роботи системи протягом року для 2-х варіантів: базового (робота НС без пристрою плавного пуску), та нового (використання ППП). В розрахунок долучаються тільки ті статті витрат, що відрізняються за варіантами. Відомість річних експлуатаційних витрат визначається за такими статтями:

- основна і додаткова заробітна плата (ЗП) експлуатаційних робітників;
- амортизаційні відрахування;
- поточні ремонти;
- аварійні ремонти;
- вартість експлуатаційних матеріалів;
- інші витрати.

Визначаємо основну і додаткову ЗП експлуатаційних робітників із відрахуваннями на соціальні потреби:

$$Z_{екс} = Q_{то} \cdot l_c \cdot K_d \left(1 + \frac{H_{соц}}{100}\right) \quad (5.1)$$

де $Q_{то}$ – значення річної трудомісткості експлуатаційних робіт. Для базового варіанту приймаємо 620 люд-год. Для нового варіанту, завдяки автоматизації процесів пуску і гальмування асинхронних двигунів трудомісткість експлуатаційних робіт знижується на 20% та складає 496 люд-

год. Крім того, потрібно додати трудомісткість обслуговування додаткового обладнання, тобто ППП, яка складає 48 люд-год. Тоді, загальна трудомісткість експлуатаційних робіт у випадку нового варіанту складає 544 люд-год. за рік;

K_o – значення коефіцієнту додаткової ЗП, що враховує премії та всі види грошових доплат. Приймається на рівні 1,25-1,35;

H – норматив єдиного соціального внеску;

l_c – середня тарифна часова ставка експлуатаційних робітників, грн./год.

$$З_{екс.баз.} = 620 \cdot 38,4 \cdot 1,35 \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) = 39211,78 \text{ грн.};$$

$$З_{екс.нов.} = 544 \cdot 38,4 \cdot 1,35 \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) = 34405,17 \text{ грн.}$$

Приймаємо вартість експлуатаційних матеріалів, орієнтовно, у розмірі 15% від величини $З_{екс.}$

$$З_{екс.мат..баз.} = 0,15 \cdot З_{екс.баз.} = 0,15 \cdot 39211,78 = 5881,77 \text{ грн.};$$

$$З_{екс.мат.нов.} = 0,15 \cdot З_{екс.нов.} = 0,15 \cdot 34405,17 = 5160,78 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт обладнання визначаємо з врахуванням основної і додаткової заробітної плати ремонтних робітників із відрахуваннями у соціальні фонди:

$$З_p = 0,8 \cdot Q_p \cdot l_{cp} \cdot K_o \left(1 + \frac{H_{соц}}{100}\right) \quad (5.2)$$

де 0,8 – значення коефіцієнту, що враховує долю поточних ремонтів у загальній сумі ремонтних робіт;

Q_p – значення річної трудомісткості ремонтних робіт, яка розраховується відповідно до нормативів системи ПЗР (табл.4.1);

Таблиця 4.1 - Визначення трудомісткості ремонтних робіт

№	Елементи схеми	Кіль- кість, шт.	Тривалість, міс			Структура ремонтного циклу			Трудомісткість, нормо-год.							
									Нормативна			За рем. цикл				Річна
			$T_{p.n.}$	$T_{p.ц.}$	$T_{o.n.}$	n_m	n_k	n_o	Q_k^H	Q_m^H	Q_o^H	Q_m	Q_k	Q_o	Q^Σ	Q_p
			Базовий варіант													
	АД $P_{ном} = 63$ кВт	3	6	36	0	5	1	0	125,0	68,0	0	1020,0	375,0	0	1395,0	465,0
	Відцентровий насос	3	4	24	0	5	1	0	105,0	34,0	0	510,0	315,0	0	825,0	412,4
	Електричні засувки	3	4	24	0	5	1	0	15,0	6,0	0	90,0	45,0	0	135,0	67,5
	Трубопровід	4	0	96	0	0	1	0	86,0	0	0	0,0	344,0	0	344,0	43,0
	Всього															987,4
			Новий варіант*													
	АД $P_{ном} = 63$ кВт	3	9	108	0	1	11	0	125,0	68,0	0	2244,0	375,0	0	2619,0	291,0
	Відцентровий насос	3	6	48	0	1	7	0	105,0	34,0	0	714,0	315,0	0	1029,0	257,25
	Електричні засувки	3	6	48	0	1	7	0	15,0	6,0	0	126,0	45,0	0	171,0	42,75
	Трубопровід	4	0	180	0	1	0	0	86,0	0	0	0	344,0	0	344,0	22,94
	Пристрій плавного пуску	1	24	120	12	1	4	5	35,0	10,0	1,0	40,0	35,0	5,0	80,0	8,00
	Всього															621,94

* В новому варіанті, за рахунок встановлення пристрою плавного пуску тривалість ремонтного циклу та міжремонтного періоду може бути збільшена без зміни рівня надійності системи.

l_{cp} – значення середньої тарифної часової ставка ремонтних робітників.

$$З_{p.баз.} = 0,8 \cdot 987,9 \cdot 30,85 \cdot 1,35 \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) = 40156,12 \text{ грн.};$$

$$З_{p.нов.} = 0,8 \cdot 621,94 \cdot 30,85 \cdot 1,35 \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) = 25280,59 \text{ грн.}$$

Приймаємо вартість ремонтних матеріалів і запасних частин у розмірі 75% від витрат на поточний ремонт обладнання:

$$З_{рем.мат..баз.} = 0,75 \cdot З_{рем.баз.} = 0,75 \cdot 40156,12 = 30117,09 \text{ грн.};$$

$$З_{рем.мат.нов.} = 0,75 \cdot З_{рем.нов.} = 0,75 \cdot 25280,59 = 18960,44 \text{ грн.}$$

Витрати на аварійний ремонт для базового варіанту розраховуємо виходячи з середньої кількості аварій обладнання НС - 6 аварій на рік. Переважна більшість цих аварій пов'язана з гідроударами у водопровідній системі, які виникають під час запуску та зупинки електроприводів.

Приймається, що витрати на ліквідацію аварії складають приблизно 5635 грн. Тоді, в базовому варіанті, витрати на ліквідацію аварійного ремонту складають 33810 грн. В новому варіанті, в результаті встановлення ППП, кількість аварійних ситуацій знизилася на 50% та склала 16905 грн.

Амортизаційні відрахування визначають за значенням капіталовкладень у елементи системи та враховується річна норма амортизації ($H_a\%$), яка дорівнює 20 %. Ці відрахування визначаються тільки для нового варіанту з встановленням ППП.

$$З_{p.нов.} = \frac{K \cdot H_a}{100} = \frac{69674,71 \cdot 20}{100} = 13934,94 \text{ грн.}$$

Інші витрати на утримання системи приймаються у розмірі 20% від витрат на поточний ремонт обладнання:

$$I_{н.баз.} = 0,2 \cdot 3_{р.баз.} = 0,2 \cdot 40156,12 = 8031,22 \text{ грн.};$$

$$I_{н.нов.} = 0,2 \cdot 3_{р.нов.} = 0,2 \cdot 25280,59 = 5056,12 \text{ грн.}$$

Відомість річних експлуатаційних витрат за двома варіантами наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Відомість річних експлуатаційних витрат

№	Найменування витрат	Витрати, грн	
		Базовий	Новий
1	Основна та додаткова ЗП експлуатаційних робітників із відрахуванням на соцстрах та інші фонди, грн	39211,78	34405,17
2	Вартість експлуатаційних матеріалів, грн	5881,77	5160,78
3	Амортизаційні відрахування, грн	0	14998,34
4	Поточні ремонти, грн	70273,21	44241,04
5	Аварійні ремонти, грн	33810	10905
6	Інші витрати, грн	8031,22	5056,12
	Всього	157207,98	114766,44

4.3 Розрахунок показників економічної ефективності

Значення річного економічного ефекту від застосування пристрою плавного пуску розраховується за формулою:

$$E_p = (B_{ебаз} - B_{енов}) - E_n \cdot K \quad (5.7)$$

де $B_{ебаз}$, $B_{енов}$ – величина експлуатаційних витрат за базовим та новим варіантами (відповідно);

E_n – значення нормативного коефіцієнту економічної ефективності капіталовкладень, $E_n=0,25$.

$$E_p = (157207,98 - 114766,44) - 0,25 \cdot 69674,71 = 25022,86 \text{ грн.}$$

Період окупності додаткових капітальних вкладень за рахунок зниження експлуатаційних витрат визначається за формулою:

$$T_{ок} = \frac{K}{B_{e.баз.} - B_{e.нов.}} = \frac{69674,71}{157207,98 - 114766,44} = 1,64 \text{ року.}$$

Аналіз розрахунків показує, що впровадження на підприємстві ППП асинхронних двигунів НС являється економічно обґрунтованим. Величина річного економічного ефекту від проведення запропонованих заходів складає 25023 грн., а період окупності капіталовкладень 1 рік 7 місяців.

Хоча даний пристрій дає не дуже суттєву пряму економію електроенергії, він дозволяє знизити рівень пускових струмів, зменшити механічні перенавантаження двигуна та насосу, запобігти гідроударам у водогоні та зменшити перенавантаження на регулюючу та запірну арматуру. В результаті отримується збільшення терміну роботи обладнання, зменшення кількості поривів на водогоні та, відповідно, зменшуються і витрати на ремонт.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Основні вимоги безпечної експлуатації насосних станцій

Технічна експлуатація насосних станцій систем водопостачання та каналізації технологічно повинна забезпечувати безперервну подачу води споживачам і перекачку стічних вод та здійснюватися з дотриманням вимог щодо охорони праці з високими техніко - економічними показниками.

У процесі експлуатації насосних станцій оперативний та ремонтний персонал зобов'язаний:

- здійснювати технологічно грамотне та безпечне обслуговування обладнання;
- забезпечувати постійний нагляд і контроль за станом та режимом роботи насосних агрегатів, комунікацій та допоміжного обладнання;
- підтримувати порядок та належний рівень санітарного стану у приміщеннях;
- проводити систематичне зняття показників та вносити відповідні записи в експлуатаційні журнали;
- забезпечувати своєчасне та якісне проведення регламентних робіт та ревізій устаткування.

На кожній насосній станції виробниче обладнання повинно бути закріплено за відповідними підрозділами, службами, визначені їх функції і відповідальність працівників за безпечну експлуатацію устаткування. Закріплення оформляється наказом керівника по підприємству.

На кожній насосній станції повинна зберігатися наступна технічна документація:

- генеральний план виробничого майданчика з нанесеними підземними комунікаціями;
- оперативна технологічна схема перемикань, агрегатів і комунікацій;

- однолінійна схема електропостачання, принципові і монтажні схеми електрообладнання, автоматики і телемеханіки;
- журнал контролю та обліку показників роботи устаткування.

Інструкції з експлуатації обладнання насосних станцій складають на основі «Правил технічної експлуатації систем водопостачання та водовідведення населених пунктів», інструкцій заводів-виробників обладнання, що експлуатується, з урахуванням особливостей кожної конкретної станції.

В експлуатаційних інструкціях повинні бути визначені:

- умови роботи НС в нормальному режимі;
- умови роботи НС в аварійному режимі;
- терміни та обсяг профілактичного, періодичного ремонту обладнання;
- порядок експлуатації контрольно-вимірювальних приладів;
- порядок експлуатації систем опалення та вентиляції;
- порядок користування електроталіями, тельферами та іншим підйомним устаткуванням;
- аварійний випуск.

В інструкції повинні бути узгоджені та обумовлені обов'язки суміжних структурних підрозділів по догляду, обслуговуванню та ремонту закріпленого обладнання, а також зобов'язання експлуатаційного персоналу.

Для обслуговуючого персоналу насосної станції по кожній професії, крім експлуатаційних, повинні бути розроблені та затверджені інструкції з охорони праці.

В інструкціях з експлуатації необхідно відображати послідовність операцій при пуску, перемиканні і зупинці насосних агрегатів, допоміжного обладнання, допустимі температури підшипників, мінімально допустимий тиск масла (у системах з наявністю циркуляційного змащування), перелік основних відмов та несправностей насосному обладнанні і способів їх усунення.

Робота насосних агрегатів повинна бути негайно зупинена при виникненні наступних явищ:

- в агрегаті з'явився явно чутний стукіт;
- іскріння і світіння, задимлення в зазорі між статором та ротором електродвигуна;
- виникнення підвищеної вібрації вала електродвигуна в порівнянні з нормальним режимом роботи;
- підвищення температури складових частин електродвигуна - підшипників, обмоток статора або ротора вище, ніж допустима;
- підпалення підшипників ковзання (або вихід з ладу підшипників кочення);
- падіння рівня тиску масла, нижче допустимого.

При аварійній ситуації черговий персонал зупиняє насосний агрегат згідно із спеціальною протиаварійною інструкцією без отримання дозволу чергового вищого рівня та негайно сповістити безпосереднього керівника.

У машинних залах насосних станцій обладнують монтажний майданчик по ремонту обладнання і майданчик для виконання ремонту і обслуговування вантажопідіймальних механізмів. Розміри монтажного майданчика проєктуються такими, щоб давати змогу улаштувати проходи шириною 0,7 м навколо розміщеного на ньому устаткування.

Пол станції влаштовують з обов'язковим ухилом до напрямку відводу води.

При висоті агрегатів і електроприводів засувки більше, ніж 1,4 м від рівня підлоги, слід передбачати дерев'яні містки, майданчики, або уширення фундаменту для обслуговування, які комплектуються огорожами.

В приміщеннях насосних станцій передбачено улаштування робочого та аварійного освітлення.

Категорично забороняється знімати запобіжні кожухи, інші захисні пристрої частин, що обертаються під час роботи насосних і компресорних

установок, гальмувати агрегати вручну або ремонтувати їх під час роботи. Також заборонено підігрівати маслопровідну систему або користуватися для освітлення відкритим вогнем, смолоскипами.

При змінній роботі, машиніст не має права закінчити роботу раніше, чим працівник, що його змінює, прийме зміну від нього. Якщо машиністу необхідно тимчасово відлучитися під час чергування, його повинен замінити інший працівник, який добре ознайомлений з роботою агрегатів.

Насосні станції водопостачання.

Насосні станції всіх призначень проектуються, як правило, для роботи без постійного обслуговуючого персоналу: з автоматичним управлінням - режим роботи залежить від технологічних параметрів (рівня води в ємностях, тиску води в мережі або обсягу її витрат); дистанційним управлінням (телемеханічним) - керується з пункту управління; місцевим управлінням – персонал приходить періодично, в залежності від надходження сигналів на пункт управління або на пункт з постійною дислокацією обслуговуючого персоналу.

При наявності автоматичного або дистанційного (телемеханічного) управління також необхідно передбачати місцеве управління.

Включення резервного агрегату у автоматизованих насосних станціях при аварійному відключенні робочих насосних агрегатів повинно виконуватися автоматично.

Слід улаштовувати розподільні пункти, трансформаторні підстанції та щити управління у вбудованих або прибудованих приміщеннях з можливістю їх розширення у разі збільшення потужності. Допускається окреме розташування закритих розподільчих пристроїв і трансформаторних підстанцій.

При установці розподільчих щитів та щитів управління у виробничих приміщеннях слід вживати заходів, що запобігають попаданню на них води.

Запірна арматура на всмоктувальних і напірних трубопроводах розміщується так, щоб забезпечити можливість заміни або ремонту кожного із зворотних клапанів або основної запірної арматури.

Напірна лінія кожного насоса обладнується запірною арматурою і, зазвичай, встановлюється зворотній клапан між насосом і запірною арматурою.

Як правило, на заглиблених та напівзаглиблених насосних станціях на насосі з найбільшою продуктивністю передбачаються заходи проти можливого підтоплення агрегатів під час аварії в машинному залі, а також при несправностях у запірній арматурі чи трубопроводі шляхом розміщення електродвигунів насосів на фундаментах або конструкціях висотою не менше 0,5 метра від підлоги машинного залу; самопливного випуску води, яка витікла в результаті аварійної ситуації, в каналізацію; відкачування води прямка резервними дренажними насосами або основними насосами виробничого призначення.

При необхідності встановлення аварійних насосів, продуктивність їх належить визначати, виходячи з необхідності відкачування води з машинного залу при рівні 0,5 м не більше, ніж 2 години, також передбачати один резервний агрегат. У насосній станції слід передбачати (незалежно від рівня її автоматизації) санітарний вузол (унітаз і раковину), та місце для зберігання одягу ремонтного чи експлуатаційного персоналу.

При розташуванні на відстані не більше 50 метрів від насосної станції виробничих будівель, обладнаних санітарно-побутовими приміщеннями, санітарний вузол можна не передбачати.

В віддалено розташованій насосній станції для здійснення дрібного ремонту потрібно передбачати установку верстата.

У насосних станціях необхідно передбачати установку контрольно-вимірювальної апаратури.

Приміщення, в якому розміщується черговий персонал насосних станцій, повинно обладнуватися засобами зв'язку .

Люки-лази повинні улаштовуватися поблизу від країв підвідного-відвідного та переливного трубопроводів. Кришки люків резервуарів питної води обладнують пристроями для замикання і пломбування. Люки резервуарів повинні розміщуватися над утепленням перекриття на висоті меншій, ніж 0,2 м.

Всі люки резервуарів для питної води повинні бути забезпечені повною герметизацією.

Приміщення, у якому проводиться приготування розчину хлорного заліза, крім загально-обмінної вентиляції, необхідно також обладнати місцевим відсмоктувачем повітря з ємності для вимивання з бочкової тари хлорного заліза.

У приміщенні, де здійснюються приготування розчину фтористого натрію, необхідно крім загально-обмінної вентиляції, передбачати також місцевий відсмоктувач повітря з шафи, де зберігаються бочки з фтористим натрієм. У перерізах робочих отворів швидкість потоку повітря повинна складати не менше 0,5 м / с.

Протипожежний захист

Основні причини пожеж, що виникають у насосних станціях:

- недотримання протипожежних вимог по улаштуванню та експлуатації основного і допоміжного обладнання;
- несправність електрообладнання, електропроводки (пошкодження ізоляції, перегрів контактів та ін.), освітлювальних приладів і порушення в процесі їх експлуатації;
- самозагорання промаслених спецодягу та дрантя, загорання мастил та інших легкозаймистих та легкогорючих матеріалів при недотриманні правил їх зберігання;
- недотримання правил проведення зварювальних і вогневих робіт при проведенні робіт в місцях зберігання горючих речовин та матеріалів;
- вихід з ладу приладів автоматики;
- куріння у невстановлених місцях і викидання недопалків і сірників;

- відсутність або хибне розміщення технічних засобів захисту від статичної електрики і атмосферних розрядів.

Нормативні документи, яких необхідно дотримуватись в процесі експлуатації та ремонту обладнання насосної станції :

- Типові правила пожежної безпеки для промислових підприємств;
- Пожежна безпека. Загальні вимоги;
- Правила улаштування електроустановок;
- Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів;
- Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів;
- Правила безпечної експлуатації насосних станцій водогосподарських систем;
- Типова інструкція по організації безпечного проведення вогневих робіт на вибухонебезпечних і вибухопожежонебезпечних об'єктах.

5.2 Розрахунок заземлюючого пристрою ТП

Розрахунок опору заземлювача виконується наступним чином:

1. Визначається розрахунковий питомий опір ґрунту $\rho_{розр}$ з урахуванням питомих коефіцієнтів, що враховують висихання ґрунту літом і промерзання взимку.

$$\rho_{розр.в.} = k_{\epsilon} \rho_{уд} = 1,4 \cdot 100 = 140 \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

де k_{ϵ} – коефіцієнт сезону для вертикальних електродів. Для даного регіону $k_{\epsilon}=(1,4-1,6)$;

$\rho_{уд}$ – питомий опір для суглинка 100 Ом·м.

2. Визначається опір розтікання одного вертикального електроду R_{BO} за формулою:

$$R_{BO} = \frac{\rho_{розр.в.}}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \frac{140}{2\pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,016} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,2 + 3}{4 \cdot 2,2 - 3} \right) = 45 \text{ Ом},$$

де l – висота вертикальних електродів, м;
 t – відстань від поверхні землі до середини стержня, м;
 d – діаметр стержня, м.

$$t = \frac{l}{2} + 0,7 = \frac{3}{2} + 0,7 = 2,2 \text{ м}$$

3. Визначається приблизна кількість вертикальних заземлювачів n згідно попередньо прийнятого коефіцієнту використання $\eta_s=0,8$ за формулою:

$$n_B = \frac{R_{BO}}{\eta_B R_{к.з.}} = \frac{45}{0,8 \cdot 4} = 14$$

де $R_{к.з.}$ – необхідний опір контуру заземлення, Ом.

Визначається опір розтікання горизонтальних електродів за формулою:

$$R_r = \frac{1}{\eta_z} \cdot \frac{\rho_{розр.з.}}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bt} = \frac{1}{0,77} \cdot \frac{200}{2\pi \cdot 30} \ln \frac{2 \cdot 30^2}{0,02 \cdot 0,5} = 10 \text{ Ом},$$

де $\eta_z=0,77$ – коефіцієнт використання для горизонтального електроду;

$$\rho_{розр.з.} = k_z \rho_{уд} = 2,0 \cdot 100 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

t – глибина закладання горизонтального заземлювача, м;

l – загальна довжина горизонтального заземлювача, м;

4. Уточняється необхідний опір вертикальних електродів з врахуванням провідності горизонтальних електродів за виразом:

$$R_B = \frac{R_r R_{II}}{R_r - R_{II}} = \frac{10 \cdot 4}{10 - 4} = 7 \text{ Ом}.$$

5. Уточняється кількість вертикальних електродів з урахуванням коефіцієнтів використання:

$$n_B = \frac{R_{BO}}{\eta_B R_B} = \frac{45}{0,8 \cdot 7} = 8$$

Остаточно приймаємо 8 вертикальних електродів, які розміщуємо 3 м один від одного та з'єднуємо їх за допомогою сталі круглої $\varnothing 10$ мм.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі виконано аналіз сучасних насосних станцій систем водопостачання та тенденцій використання пристроїв плавного пуску. Обґрунтовано доцільність застосування ППП на насосних станціях, що потребують частого запуску насосних агрегатів, наприклад, у разі встановлення резервуарів обмеженої ємності.

Для підвищення ефективності роботи такої насосної станції може бути запропонована автоматизована система керування плавним пуском асинхронних двигунів, яка є частиною загальної системи керування технологічним процесом водопостачання.

Підвищенні вимоги до надійності електроприводів насосної станції системи водопостачання диктують необхідність використання ППП, які виконані на базі ТПН з СІФК з синхронізацією по струму навантаження для керування пускогальмівними режимами АД з короткозамкнутим ротором.

Для дослідження процесу плавного пуску асинхронних двигунів була побудована математична модель насосної станції, що включає до свого складу: ЛЕП з трансформаторною підстанцією, СІФК-ТПН-АД з насосним навантаженням, теплову модель АД, модель руху рідини в трубопроводі. Визначені обмеження і критерії ефективності процесу перетворення електромеханічної енергії у пристрої плавного пуску асинхронних двигунів.

Проведене чисельне моделювання перехідних процесів пуску та зупинки насосних агрегатів НС системи водопостачання для кожної із змодельованих підсистем.

При прямому пуску трьох двигунів насосної станції максимальне відхилення діючої напруги склало 10,6 %, що перевищує допустиме значення на 0,6%.

Моделювання гідравлічної підсистеми дозволило проаналізувати процес закриття вентилу у трубопроводі. При тривалості закриття $T_1 = 1$ с, ударний тиск у трубопроводі становить 2,9 МПа, мінімальний тиск – 0,1 МПа, що може спровокувати кавітацію.

Моделювання нестационарного нагріву обмоток двигунів показало, що перевищення температури лобових частин статорних обмоток двигунів вище допустимого значення (130°C) зафіксовано не було.

При переході до керованого пуску двигунів встановлено, що при тривалості наростання напруги на виході ТПН (0,02-0,03) с., втрати енергії знижуються порівняно з втратами при прямому пуску на 14-20 %. Значення уставки потрібно підтримувати на рівні $(2,5-3)I_{\text{ном.}}$.

Але, кращі результати отримуються, якщо уставка розраховується індивідуально для кожного запуску двигуна в залежності від поточних параметрів системи ($K_{\text{опт.і}} = 4,1; 6,2; 4,8$). В цьому випадку, спостерігається скорочення сумарних втрат електроенергії в обмотках двигунів, по відношенню до втрат електроенергії при використанні класичного алгоритму з фіксованою уставкой $k_{i,\text{кп}}=3$, на 17,9%. Як слідує з результатів моделювання, зниження $k_{i,\text{кп}}$ до 2,5 викликає зростання втрат на 47%. Збільшення $k_{i,\text{кп}}$ до 5 приводить до перевищення максимального приросту тиску в трубопроводі вище допустимого. При значенні $k_{i,\text{кп}}=6$, відбувається падіння напруги в ланцюгах трансформатора на відносне значення $\Delta U_{\text{max.}}=10,1\%$, що також порушує прийняте обмеження $\Delta U_{\text{max.доп.}} = 10\%$. Тобто, найбільш ефективним виявився керований плавний пуск з розрахунковою уставкою,

Розглянуті основні техніко-економічні показники впровадження ПП насосних агрегатів. Крім економії електроенергії, він дозволяє зменшити рівень пускових струмів, зменшити механічні перенавантаження двигуна та насоса, уникнути гідроударів в водогоні та зменшити перенавантаження на запірну і регулюючу арматуру. В результаті збільшується термін роботи обладнання, зменшується кількість поривів у водогоні, а відповідно – зменшуються витрати на ремонт.

Як показали розрахунки, впровадження на підприємстві пристрою плавного пуску АД насосної станції є економічно обґрунтованим. Величина річного економічного ефекту від запропонованих заходів складає 25,02 тис. грн., а період окупності капіталовкладень 1,64 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл.
2. Лавріненко Ю.М., Савченко П.І., Синявський О.Ю., Войтюк Д.Г., Савченко В.В., Голодний І.М. Основи електропривода: підручник / Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.В. Савченко, І.М. Голодний. – К.: Видавництво Ліра. – 2017. – 524 с.
3. Закладний О. М. Захист як складник системи функціонального діагностування асинхронних електродвигунів / О. М. Закладний, В. В. Прокопенко, О. О. Закладний // Промелектро. – 2010. – № 4. – С.36- 40.
4. Півняк Г.Г. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. – Д.: Національний гірничий університет, 2009. – 376 с.
5. Немцев Е. М. Математична модель для аналізу режимів роботи асинхронного двигуна при симетричній і несиметричній напрузі живлення.- [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-21-26>
6. Немцев Е. М. Математична модель аналізу режимів групової роботи асинхронних двигунів при живленні від загального джерела. - Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №1(22)'2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2020-1-30-33>
7. Ciprian H. Wavelet Analysis and Park's Vector Based Condition Monitoring of Induction Machines. / H. Ciprian, L. Szabó // Jurnal of Computer Science and Control Systems, Vol.4, No 2, 2011, pp 35 -38.
8. Губаревич О.В., Гулак С.О., Голубєва С.М. Комплексний підхід до діагностування асинхронних електродвигунів водного транспорту: Новітні технології. Збірник наукових праць Приватного вищого навчального

- закладу «Університет новітніх технологій». К.: ПВНЗ «Університет новітніх технологій», 2019. Випуск 2(9). С.48-61.
9. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О.І. Соловей, В.П. Розен, П.Г. Плешков, С.В. Серебренніков, В.Ф. Ткаченко, К.Г. Петрова]; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
 10. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник.-К:Кондор, . - 408 с.2005
 - 11.Chioncel, C. P., Tirian, G. O., Gillich N., Raducha E.. Vector Control Structure of an Asynchronous Motor at Maximum Torque [Text] /C. P. Chioncel, G. O. Tirian, N. Gillich, E. Raducha//International Conference on Applied Sciences – 2015. P. 012005 – 012010.
 - 12.Pakkiraian, B., Sukumar, G.D. A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive [Text]/B. Pakkiraian, G.D. Sukumar//Indian Journal of Science and Technology. 2016 – Vol. 9, Issue 45. – P. 1 10.
 - 13.Казачковський М.М. Керовані випрямлячі. / М.М. Казачковський – Д.: НГА, 1999. – 228 с. 4.
 - 14.Казачковський М.М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навч. посіб. /М.М.Казачковський. – Д.: НГА, 2000. — 197 с.
 15. Пристрої плавного пуску. Переваги використання. [Електронний ресурс].— Режим доступу: <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/4344.php>
 16. Офіційний сайт Schneider Electric [Електронний ресурс].—Режим доступу: <http://www.schneider-electric.com>.
 17. Офіційний сайт Siemens [Електронний ресурс].—Режим доступу: <https://www.siemens.com>.

18. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Г75 Мікропроцесорні системи керування електроприводами. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.
19. Шавьолкін О.О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник / О.О. Шавьолкін; Харків, над. ун-т. міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. — Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 403 с. (djvu)
20. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с
21. Запорізький завод «Перетворювач» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zprua.com/about-us/>
22. Кириленко О.В., Жуйкою В.Я., Денисюк С.П., Рибіна О.Б. Системи силової електроніки та методи їх аналізу. – К.: Текст, 2006. – 488 с.
23. Жуйков В.Я., Рогаль В.В., Будьонний О.В., Пілінський В.В. Енергетична електроніка. Електронний підручник. – К.: 2008. – <http://fel.kpi.ua/lib/pidruchniki>
24. Коренькова Т.В. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом: навч. посібник / Т.В. Коренькова, О.О. Сердюк, В.Г. Ковальчук. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2014. – 200 с.
25. С. П. Денисюк. Системи силової електроніки та засоби керування в електроенергетиці. Силова електроніка в системах електроживлення. навч. посібник – НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського., Київ 2022. – 130 с.
26. Промышленные консольные и моноблочные насосы по ISO 2858 50 Гц, Каталог GRUNDFOS, databooklet-nbg-nbge-nkg-nkge-70140576-0819.pdf [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.grundfos.com/by/support/documentation/catalogs>
27. Струтинський, В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки [Текст] / В. Б. Струтинський. – Житомир: ЖІТІ, 2001, – 612 с.

28. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.
29. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник / О.В. Губаревич. Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. 248 с.
30. Губаревич О.В., Голубєва С.М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів: Всеукраїнський науковий збірник «Наукові праці Донецького національного технічного університету». Серія «Електротехніка і енергетика» – Покровськ: Вид.: Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», №1(21), 2019. С.55-63.
31. Герасімов Є. Г., Герасимов Г. Г., Іванов С. Ю. Динамічні процеси в трубопровідних системах : монографія. – Рівне : НУВГП, 2020. – 597 с.
32. Герасимов Г. Г., Герасімов Є. Г. Трубопроводні системи з водоповітряними резервуарами. - Рівне : НУВГП, 2005. – 328 с.
33. Сучасні перетворювачі частот в системі електропривода (навчальний посібник) М.В. Загірняк, Т.В. Коренькова, А.П. Калінов, А.І. Гладир. Харків, видавництво «Точка» 2017, 210с.
34. А.О. Бобух. Автоматизовані системи керування технологічними процесами: Навч. посібник. – Харків: ХНАМГ, 2006. - 185 с.