

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра електричної інженерії та електроніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

на тему:

Підвищення ефективності роботи потужного суднового асинхронного
електропривода в динамічних режимах

Виконав: студент 6 курсу, групи 360153
спеціальності:

271 – Морський та внутрішній водний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Спеціалізація: «Експлуатація суднового електрообладна-
ння і засобів автоматики»

Камінський Ігор Євгенійович
(підпис, П.І.Б.)

допущений до захисту 15.12.2023
(дата)

Завідувач кафедри Муха Микола Муха
(підпис, ім'я та прізвище)

Керівник Муха Микола Муха
(підпис, ім'я та прізвище)

Нормо контролер Малаявін Ігор Малаявін
(підпис, ім'я та прізвище)

Рецензент Григорів Грина Гвоздева
(підпис, ім'я та прізвище)

м. Одеса 2023 р.

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата час: 15:04:03 18.12.2023

Файлу з підписом: DPM_Камінський І.Є._2023_full.pdf

Розмір файлу з підписом: 2.3 МБ

Відправлені файли:

Файлу без підпису: DPM_Камінський І.Є._2023_full.pdf

Розмір файлу без підпису: 2.3 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: Камінський Ігор Євгенійович

І.Є. Камінський Ігор Євгенійович

Країна: Україна

Ідентифікатор: 3546412617

Час створення підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 15:03:55

Метод виданий: "Дія". Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг

Ідентифікатор: 382367105294AF970400000014CF5200380EC101

Тип особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301

Метод підпису: ДСТУ-4145

Метод підпису: Кваліфікований

Контейнер: Підписаний PDF-файл (PAdES)

Метод підпису: 3 повними даними для перевірки (PAdES-B-LT)

Метод підпису: Кваліфікований

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра електричної інженерії та електроніки

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедрою ЕІ та Е

Микола Муха

« 01 » 11 2023 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи магістра

Камінського Ігоря Євгенійовича

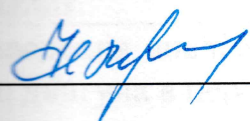
Тема магістерської роботи

1. **«Підвищення ефективності роботи потужного суднового асинхронного електропривода в динамічних режимах»** затверджена наказом ректора університету від 12 грудня 2023 р. за № 2004

2. Термін здачі курсантом закінченої роботи до 20.12.2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація судна контейнеровозу
4. Змістовна частина розділів дипломної роботи освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» зі спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» освітньо-професійної програми «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»:
 - 4.1. Аналітичний огляд науково-технічної літератури за предметом дослідження, аналіз методів ІКРП. Обґрунтування теми дослідження, її актуальності та новизни..
 - 4.2. Постановка задачі моделювання, обґрунтування допущень, оцінка адекватності моделей, розробка алгоритму проведення моделювання.
 - 4.3. Проведення аналізу традиційного асинхронного двигуна в перехідних режимах його роботи. Модель асинхронного електродвигуна, підтримуюча реалізацію різних алгоритмів управління.

- 4.4. Огляд основних способів індивідуальної компенсації реактивної потужності. Огляд алгоритмічного та програмного забезпечення, використаного для аналізу роботи АД.
- 4.5. Розробка оптимальної схеми ІКРП. Розрахунок необхідної ємності конденсаторних ступенів.

Дата видачі завдання: 01.11.2023 р.

Керівник  Муха Микола

Завдання прийняв до виконання

Камінський Ігор

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1.	Аналітичний огляд науково-технічної літератури за предметом дослідження, аналіз методів ІКРП. Обґрунтування теми дослідження, її актуальності та новизни.	01.11.23- 15.11.23	
2.	Постановка задачі моделювання, обґрунтування допущень, оцінка адекватності моделей, розробка алгоритму проведення моделювання.	16.11.23-26.11.23	
3.	Проведення аналізу традиційного асинхронного двигуна в перехідних режимах його роботи.	27.11.23-30.11.23	
4.	Огляд основних способів індивідуальної компенсації реактивної потужності.	01.12.23-01.12.23	
5.	Огляд алгоритмічного та програмного забезпечення, використаного для аналізу роботи АД.	07.12.23-15.12.23	
6.	Оформлення дипломної роботи. Підготовка презентації доповіді.	16.12.23-20.12.23	

Курсант-дипломник

(підпис)

Камінський Ігор

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Муха Микола

(прізвище та ініціали)

Перелік умовних позначень

АД – асинхронний двигун

ТАД – традиційний асинхронний двигун

АДГ – аварійний дизель-генератор

АКП – автоматичний керуючий пристрій

АПС – аварійно-попереджувальна сигналізація

АРЩ – аварійно-розподільний щит

АСЕП – автоматизована система електроприводу

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВМ – виконавчий механізм

ГД – головний двигун

ГРЩ – головний розподільний щит

ДГ – дизель-генератор

ЕП – електропривід

КЗ – коротке замикання

ККД – коефіцієнт корисної дії

МВ – машинне відділення

ІКРП - індивідуальна компенсація реактивної потужності

ТП – тиристорний перетворювач

РЩ – розподільний щит

СД – синхронний двигун

СЕС – суднова електростанція

СОД – середньо обертовий дизель

СУ – система управління

ЦПК – центральний пункт керування.

Анотація

У першому розділі дипломної роботи проведено аналіз та огляд особливостей роботи електричних мереж за наявності потужних асинхронних двигунів. Особлива увага приділена визначенню втрат напруги в пускових режимах і взаємовпливу напруги у вузлі мережі та реактивної потужності навантаження. Розглянуто критерії ефективності та методи аналізу пускових режимів АД. Проведено аналіз наявних пристроїв для індивідуальної компенсації реактивної потужності. Обґрунтовано необхідність пошуку нових рішень в галузі інформативних параметрів систем керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності.

У другому розділі розроблена методика розрахунку схем заміщення асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності. Розрахунок виконано на основі Т – образної схеми заміщення.

У третьому розділі розроблено математичні моделі аналізу пускових режимів асинхронних електроприводів, які базуються на використанні нелінійних диференціальних рівнянь в ортогональних координатах, що дозволяє проаналізувати швидкодіюче компенсування реактивної потужності в перехідних режимах асинхронних двигунів.

У четвертому розділі приведені результати експериментального дослідження системи динамічної компенсації реактивної потужності. Зроблено порівняльний аналіз та оцінка ефективності інновації.

Ключові слова: ІНДИВІДУАЛЬНА КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ, ЕЛЕКТРОПРИВІД, НАСОС ЗАБОРТНОЇ ВОДИ.

Abstract

In the first section of the Diploma work an overview of the features of work of electric networks with powerful asynchronous motors is done. Special attention is paid to the definition of voltage loss in starting conditions and influence of voltage in the network node and reactive power of the load. Considered the criteria of effectiveness and methods of analysis starting modes. Analysis of the existing devices for dynamic reactive power compensation. The necessity of search of new solutions in the field of informative parameters of individual reactive power compensation was given.

In the second Chapter the methodology for calculation of electromagnetic induction motor with individual compensated reactive power is developed. The calculation is made based on a T - shaped equivalent circuit.

In the third section mathematical models' analysis of the starting modes of asynchronous electric drives, based on the use of nonlinear differential equations in orthogonal coordinates, that allows to analyse a fast-acting reactive power compensation in transient modes of asynchronous motor were investigated.

In the fourth section by the experiment of the dynamic reactive power compensation is produced. The comparison of analysis and evaluation of the effectiveness of innovation was done.

Key words: INDIVIDUAL REACTIVE POWER COMPENSATION, ASYNCHRONOUS MOTOR, EQUIVALENT CIRCUIT, ELECTRICAL DRIVE, SEA WATER PUMP.

Зміст

ВСТУП.....	11
1 ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ. НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ПРОБЛЕМА. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	15
1.1 Обґрунтування актуальності проблеми. Постановка задачі дослідження. Аналіз стану об'єкту дослідження	15
1.2 Обґрунтування концепції, задач дипломної роботи та методик дослідження.....	26
2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РОЗРАХУНКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ІНДИВІДУАЛЬНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	30
2.1 Розробка електричної схеми заміщення асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності.....	30
2.2 Обґрунтування методики розрахунку лінійного струмового та теплового навантажень статора асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності.....	36
2.3 Розрахунок ємності компенсуючого - конденсатора для асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності та розробка експериментальної схеми дослідження.....	42
2.4 Розробка математичного опису сталих режимів навантажень і електроспоживання нерегульованих і регульованих електроприводів насосних агрегатів на основі АД з ІКРП і ТАД.....	48
3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ.....	58
3.1. Характеристика процесу компенсації реактивної потужності в пускових режимах роботи АД.....	58
3.2. Аналіз знижень напруги під час пуску асинхронних двигунів за динамічної компенсації реактивної потужності.....	62

3.3 Висновки до розділу 3.....	65
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ІНДИВІДУАЛЬНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ. ВИСНОВКИ.....	66 69
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ.....	71
Додаток А.....	76
Додаток Б.....	77

ВСТУП

Починаючи з січня 2013 року стали обов'язковими вимоги доповненого Додатку VI до Протоколу 1997 р. Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню із суден (МАРПОЛ) та енергетичної ефективності морських суден, які були прийняті Комітетом по захисту морського середовища (КЗМС) Міжнародної морської організації (ІМО МЕРС), Резолюція МЕРС.214 (63). В цілому Додаток VI до Протоколу 1997 р. до Конвенції присвячений питанням запобігання забруднення повітряного середовища з суден, що встановлює ряд вимог до енергоефективності морських суден і спрямований на поступове зниження обсягу викидів вуглекислого газу в атмосферу об'єктами морського транспорту.

Через встановлені механізми реалізації зазначених вимог, а саме завдяки розрахунку коефіцієнта енергоефективності конструкції судна (англ. Energy Efficiency Design Index, EEDI), що представляє собою визначену розрахунковим шляхом величину і вказує обсяг викиду судном двоокису вуглецю у відношенні до обсягу перевезеного вантажу (в грамах на тономілю), передбачаються шляхи і способи підвищення енергоефективності експлуатації суден, а також встановлюються нові правила управління енергоефективністю судна і шляхи до зниження енергоспоживання на водному транспорті.

Обґрунтовано [6,7], що одним із шляхів до підвищення енергоефективності експлуатації судна та зниження енергоспоживання наряду з вдосконаленням експлуатації рушіїв суден та оптимізацією роботи суднового устаткування являється розробка раціональних методів керування електричною енергією.

При виробництві, розподіленні, перетворенні та використанні електричної енергії у судновій автономній електроенергетичній системі виникають небажані втрати. Окрім цього суднові споживачі електроенергії в основному мають активно-індуктивний характер, де повний струм генератора, трансформаторів та кабельних ліній повинен бути збільшений по відношенню до необхідного активного струму навантаження на величину обернено пропорційну значенню коефіцієнта потужності, що пропорційно збільшує встановлену потужність електрообладнання і перетин кабельних з'єднань. Тому генеруючі установки повинні

забезпечити додаткові реактивні потужності, що в свою чергу знижує їх ефективність роботи через перевитрату палива приводних двигунів.

Замість одиночної роботи генератора з повним завантаженням збільшується час паралельної роботи генеруючих агрегатів з недовантаженням для забезпечення надлишкової повної потужності електроспоживачів, що включає їх реактивну потужність. При цьому виробляється моторесурс електроагрегатів, електростанція працює з низьким ККД і відповідною перевитратою палива.

В автономній судновій електроенергетичній системі прямий пуск потужного електродвигуна ускладнений або неможливий із-за необхідності генерувати реактивний струм саме впродовж перехідного процесу, співвимірному з номінальним струмом генератора. При цьому істотно збільшується динамічний провал і час відновлення напруги генератора при включенні навантажень з низьким коефіцієнтом потужності.

Наразі існує щонайменше дві можливості вирішити указані проблеми [33,11]. Перша – це удосконалення технологічного процесу шляхом зменшення часу роботи недовантажених електроагрегатів: випрямлячів, трансформаторів, електродвигунів та ін. Інший радикальний шлях – ємнісна компенсація індуктивного струму споживачів електроенергії.

Компенсація реактивної потужності має підвищити ефективність генерування, транспортування, розподілу і споживання електроенергії. Ефективна компенсація індуктивних струмів забезпечує економію ресурсів і підвищення якості електроенергії.

З огляду на відмінні особливості суднової електроенергетичної системи в порівнянні зі стаціонарними (береговими) системами електропостачання автономні (транспортні) електроенергетичні системи мають особливості, що впливають на їх статичні характеристики та динамічні перехідні процеси, які необхідно враховувати при їх проектуванні та експлуатації. В першу чергу це пов'язано з більш швидкодіючими змінами напруги та частоти при перемиканні споживачів, при включенні на паралельну роботу та при коротких замиканнях. Зменшення сталих часу електричних кіл збільшують швидкості протікання електромагнітних

перехідних процесів, менші маси дизельних, газових або парових приводних двигунів автономних генераторів призводять до більш прискорених механічних процесів в енергетичних установках. Короткі лінії електропередачі автономної мережі не обмежують максимальні значення струмів та електромагнітних моментів в перехідних процесах, що відбуваються в електроенергетичних установках.

Приблизно однакова потужність приводних двигунів і генераторних електро-агрегатів, різний нахил навантажувальних характеристик приводних двигунів та швидкодія їх регуляторів, режими паралельної роботи генераторів з різнотипними приводними механізмами впливають на протікання процесів в судновій автономній багатогенераторній електростанції. Крім того співвимірність потужності генераторів і навантаження, необхідність автономної роботи генераторів на електроприводи великої потужності призводять до більш тяжких перехідних режимів з небезпекою знеструмлення електроенергетичної установки.

Режими роботи сучасних багатогенераторних судових електроенергетичних установок характеризуються різко змінним навантаженням з частими запусками електроприводів співвимірної потужності. Проте під час перехідних процесів ко-мутації статичного навантаження і пуску електродвигунів наявні судові компенсатори реактивної потужності управляються та змінюють свою реактивну потужність у відповідності зі сталим коефіцієнтом потужності навантаження, тобто динамічної компенсації не здійснюється. Це пояснюється недоліком науково-технічних досліджень та розробок в області керування реактивним струмом саме в динамічних режимах роботи, тобто в продовж часу сумірного з періодом напруги живлення.

Застосування в судовій електростанції джерел реактивної потужності буде ефективним, якщо при розробці системи керування будуть враховані особливості процесів в судовій електростанції, а також сучасні технологічні можливості вимірювання, синтезу законів керування і реалізації виконавчих елементів систем автоматизації [7].

Магістерська робота присвячена вирішенню науково-технічної проблеми індивідуальної динамічної компенсації реактивної потужності в судовій

автономній електроенергетичній системі, до складу якої входить конденсаторна установка компенсації реактивної потужності шляхом синтезу законів керування генераторними установками та завдяки розробленим алгоритмам функціонування регуляторів, що підвищує ефективність експлуатації суднових електроенергетичних систем та має важливе значення для морського транспорту і суднобудівної галузі.

Основним завданням магістерської роботи є визначення закону керування реактивною потужністю в режимі пуску потужного асинхронного електродвигуна при виборі раціонального співвідношення компенсуючої ємності під час розгону двигуна, поки його реактивна провідність максимальна і практично не змінюється, та під час встановлення сталої частоти обертання на завершальному етапі розгону, коли реактивна провідність двигуна швидко зменшується.

Об'єктом дослідження в роботі являються електромагнітні та електромеханічні процеси в судновій системі автоматичного керування генераторними установками в пускових режимах потужних асинхронних двигунів та при регулюванні конденсаторними компенсаторами реактивної потужності навантаження.

Предмет дослідження – суднова автономна електроенергетична система з конденсаторною установкою динамічної компенсації реактивної потужності.

Методи дослідження: теоретичні дослідження виконані із залученням теорії електроприводу, теорії автоматичного управління, методу передавальних функцій, методу імітаційного моделювання з використанням засобів моделювання системи Matlab і інструментальних засобів цієї системи: програмного пакету Simulink. Також використані фізичні методи дослідження із застосуванням лабораторних установок.

У складі електроенергетичного комплексу чотири основних дизель-генератори і один аварійний дизель-генератор. Основні дизелі потужністю 600 кВт, аварійний 160 кВт. Даний варіант установки таких дизель-генераторів дозволяє отримати оптимальну завантаженість електроенергетичного комплексу, виконується завдяки комбінуванню генераторів різної потужності на паралельну роботу.

1. ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ. НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ПРОБЛЕМА. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Обґрунтування актуальності проблеми. Постановка задачі дослідження. Аналіз стану об'єкту дослідження

Пускові струми потужних асинхронних (АД) двигунів зумовлюють різке зниження напруги суднової мережі живлення. Це спричиняє ряд негативних наслідків, до яких можна віднести збільшення тривалості пуску двигунів, зменшення запасу статичної та динамічної стійкості електричних мереж, зокрема, в суднових системах обмеженої потужності. Одним із ефективних заходів підвищення рівня напруги під час пуску двигунів є динамічна компенсація реактивної потужності. Водночас для регулювання силових елементів пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності в перехідних режимах необхідним є визначення їх оптимальних параметрів та оцінка ефективності процесу пуску. Завдання вибору оптимальних параметрів в перехідних режимах ускладнюється, оскільки реактивна потужність АД є складною функцією моменту навантаження, напруги мережі, опорів мережі та двигуна, струму збудження синхронних машин, а також залежить від нелінійності кривої намагнічування АД. У зв'язку з цим відсутні еквівалентні пасивні параметри, які можна було б однозначно використовувати як розрахункові в пускових режимах електроприводів, забезпечивши при цьому мінімальний вплив статичних характеристик вузлів навантажень. В сучасних умовах експлуатації електричних мереж номінальною напругою 0,4-1 кВ для забезпечення компенсування реактивної потужності і для мінімізації відхилень напруги при змінах навантаження застосовують нерегульовані конденсаторні установки (КУ). Пристрої для динамічної компенсації реактивної потужності в пускових режимах електроприводів практично не використовують. Тому науково-прикладна задача, яка полягає у підвищенні точності процесу динамічної компенсації реактивної потужності під час пуску потужних асинхронних електроприводів в силових мережах обмеженої потужності, є актуальною.

Особливе значення має використання раціональних методів, що забезпечують мінімальне споживання електроенергії, способів керування технологічними процесами. Більшість сучасних технологічних установок на морському транспорті оснащені АД в якості електроприводу, номінальною напругою 380/440 В. Ці електродвигуни є масовими споживачами електричної енергії на судах. Вони характеризуються простотою конструкцією і обслуговування, високою економічністю та надійністю ніж синхронні двигуни. Переваги асинхронних короткозамкнутих двигунів очевидні, але великий пусковий струм ($6-7 I_n$) перекреслює всі переваги. В початковий момент відбувається просів напруги, який приводить до збоїв електроустаткування, підключених до тієї ж мережі. Подібна "шокова терапія" не кращим чином впливає і на сам двигун.

Однією з причин невисокого енергетичного ККД АД є їх конструктивна особливість - наявність електротехнічної сталі і котушок індуктивності обмоток електричної машини, а також проектування і виготовлення їх за критерієм мінімуму витрат, вигідною лише для виробника. Питань підвищення енергоефективності електроприводів промислових підприємств присвячені роботи багатьох вітчизняних наукових шкіл, а також відомих вчених у галузі електромашинобудування, електроенергетики та енергоспоживання. Однак такі двигуни не досягли масового впровадження на судах через ряд причин які описані в дипломній роботі.

Найбільш ефективним технічним заходом, що забезпечує підвищення енергетичного ККД споживачів електричної енергії перемінного струму є компенсація реактивної потужності. Напрямок дослідження даної дипломної роботи - індивідуальна компенсація реактивної потужності електроспоживачів на рівні його електромагнітної системи. На практиці це реалізується шляхом застосування різних компенсаторів реактивної потужності (КРП). Розглянуто КРП під час пуску та в перехідних режимах потужного АД.

Ефективне використання електричної енергії є одним з найважливіших завдань, які розглядаються на сьогоднішній день на морському транспорті. У судновій промисловості для обертання робочих машин і механізмів

використовуються електроприводи, створені на основі асинхронних двигунів (АД), номінальною напругою 380/440 В. Однією з причин невисокого енергетичного ККД АД є їх конструктивна особливість - наявність електротехнічної сталі і котушок індуктивності обмоток електричної машини, а також проектування і виготовлення їх за критерієм мінімуму витрат. Найбільш ефективним технічним заходом, що забезпечує підвищення енергетичного ККД споживачів електричної енергії змінного струму є компенсація реактивної потужності. На практиці це реалізується шляхом застосування різних компенсаторів реактивної потужності (КРП) . Головними показниками енергоефективності електроприводів на основі АД є: споживаний з електромережі струм (I_1) , електричний ККД (η_e) , коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) , енергетичний ККД ($\eta_{ен}$), витрата електроенергії на одиницю випущеної продукції (w_y - питома витрата) . Головним недоліком АД є невисокий $\cos \varphi$, що не перевищує 0,6-0,92. Для АД величина споживаного струму на 25-40 % визначається індуктивною реактивною потужністю та на 60-75 % активною потужністю . Реактивна складова струму збуджує обертове магнітне поле двигуна. Енергія магнітного поля в механічну енергію не перетворюється. У найкращих режимах роботи АД , при електричному ККД 80-92 % і $\cos \varphi = 0,8-0,9$, енергетичний ККД становить 64-83 %. При неоптимальних навантаженнях енергетичний ККД знижується до 52-70 %. Реактивний струм створює в системі електропостачання і електроприводі падіння напруги, викликає непродуктивні втрати активної потужності. Навіть при найкращих режимах роботи АД втрачається 9-16 % (0,09-0,16 в.о.) електричної енергії через порівняно низького $\cos \varphi$, що знижує енергоефективність електроприводу. Враховуючи масштаби застосування АД, їх середній коефіцієнт навантаження ($K_z = 0,75$) , коефіцієнт використання технологічного обладнання ($K_{и} = 0,6$) , коефіцієнт втрат через реактивних струмів ($K = 0,09-0,16$), встановлена потужність двигунів яких близько 2-4 МВт , втрати електричної енергії в рік складають 5,6-11,2 млн. кВт · год.

Зарубіжні фірми (АЕГ, АВВ) виробляють енергозберігаючі ТАД, збільшуючи масу активних матеріалів - міді та електротехнічної сталі. Однак це веде до істотного подорожчання двигуна. З їх досвіду відомо, що збільшення ККД на

кілька відсотків веде до збільшення міді на 20-25%, алюмінію на 10-15%, електро-технічної сталі на 30-35%. Збільшення електричного ККД ТАД супроводжується деяким зниженням його номінального $\cos\phi$. Зрештою енергетичний ККД збільшується незначно або зберігається на первинному рівні. Питань підвищення енергоефективності електроприводів промислових підприємств присвячені роботи багатьох вітчизняних наукових шкіл, а також відомих вчених у галузі електромашинобудування, електроенергетики та енергоспоживання. Найбільш значущі результати у вирішенні означеної проблеми досягнуто такими вітчизняними вченими, як М.Й. Бурбело, М.В. Петухов, А.В. Гадай, Ю.В. Грицюк [1-5].

Компенсатор зсуву фаз Леблана для асинхронного двигуна

Розглянуте технічне рішення належить до підвищення $\cos\phi$ потужних асинхронних двигунів з фазним ротором. Сутність технічного рішення полягає в наступному: Роторна трифазна обмотка асинхронного двигуна електрично з'єднана з особливою компенсуючою машиною, званою «компенсатором зсуву фаз». Компенсатор зсуву фаз приводиться в обертання додатковим асинхронним двигуном малої потужності. На рисунку 1.1 наведена електрична схема компенсатора зсуву фаз Леблана. Компенсатор складається з ротора, забезпеченого обмоткою постійного струму і колектором. Статор компенсатора виконаний без обмотки. Вал ротора компенсатора механічно з'єднаний з валом приводного асинхронного двигуна В.

Обмотка постійного струму ротора компенсатора через колектор і три щітки електрично з'єднуються з контактними кільцями традиційного асинхронного двигуна S1-R1. Принцип компенсації зсуву фаз полягає в наступному. Якщо до колектора компенсатора підвести трифазний струм до обмотки ротора асинхронного двигуна, то обмотка ротора компенсатора створить магнітний потік, що обертається в просторі зі швидкістю n_3 . Ця швидкість обертання залежить тільки від частоти f_2 струму ротора і від числа пар полюсів обмотки ротора p_2 і не залежить від швидкості обертання ротора, тобто:

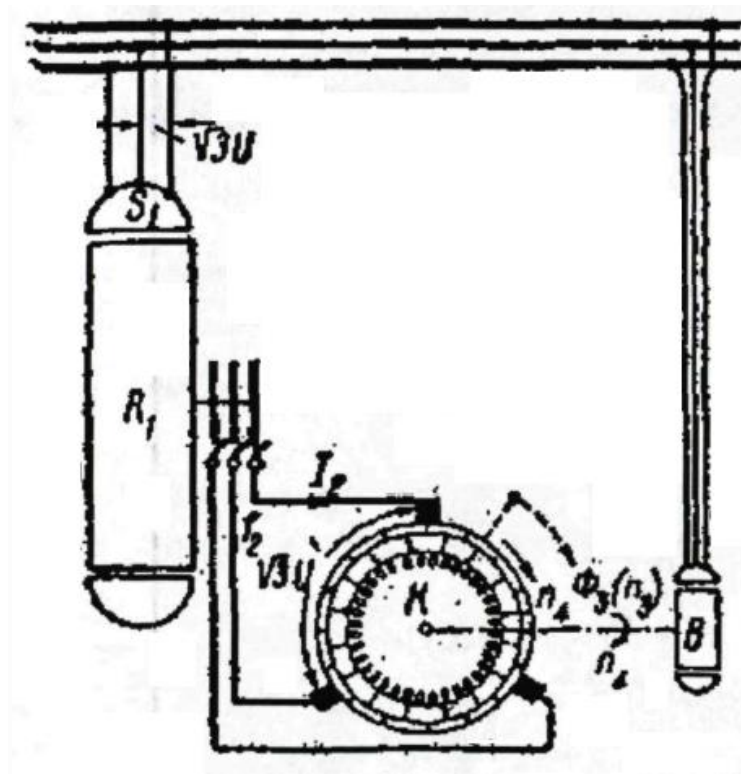


Рисунок 1.1 – Електрична схема компенсатора зсуву фаз Леблана

$$n_3 = \frac{60f_2}{p_2} \quad (1.1)$$

Якщо привести ротор компенсатора в обертання зі швидкістю в ту ж сторону, в яку обертаються магнітний потік, то останній відносно обмотки ротора буде переміщатися зі швидкістю ковзання і викличе в обмотці ЕДС компенсатора:

$$E_k = 4,44 \cdot k_3 \cdot W_3 \cdot s_2 \cdot f_2 \cdot \Phi_3 \cdot 10^{-8} \quad (1.2)$$

де k_3, W_3 - обмотувальний коефіцієнт і кількість витків однієї фази обмотки ротора компенсатора; Φ_3 - амплітуда обертового потоку компенсатора.

Електрорушійна сила E_k зміщена по фазі щодо Φ_3 , а отже, і відносно струму, викликає цей магнітний потік на 90° . При швидкості компенсатора нижче синхронної, тобто позитивна і відстає по фазі від Φ_3 на 90° . При синхронній швидкості, $E_k = 0$. При швидкості компенсатора вище синхронної, негативна і випереджає по фазі від Φ_3 на 90° . Останньою обставиною і користуються для компенсації зсуву фаз асинхронного двигуна. У запропонованій схемі, змінюючи відповідним чином швидкість допоміжного двигуна, а отже, і величину E_k , можна компенсувати зсув фаз при різних режимах роботи асинхронного двигуна S1-R1. Недоліком запропонованого технічного рішення є використання додаткових електричних машин -

компенсатора, що має колектор і щітковий апарат, а також приводного двигуна компенсатора. Крім того, для отримання регульованого $\cos\varphi$, швидкість приводного двигуна компенсатора повинна бути регульованою.

Компенсатор зсуву фаз Шербиуса для асинхронного двигуна

Розглянутий компенсатор призначений для зсуву фаз струму і напруги асинхронного двигуна з фазним ротором. Шербіус спростив компенсатор Леблана, усунувши в ньому сталь статора. Він складається з одного ротора, що обертається від додаткового двигуна. Ротор являє собою замкнутий сталеве кільце, в пазах якого розміщена обмотка, приєднана до колектора. Обмотка через колектор і щітки з'єднується з обмоткою ротора асинхронного двигуна.

Завдяки того, що пази розміщені значно глибше зовнішньої поверхні ротора, силові лінії обертового потоку практично не виходять із сталі ротора. Це усуває повітряний зазор, що веде до зменшення магнітного опору системи. Ротор має властивість самозбудження. Магнітний потік Φ_z компенсатора при малому насиченні змінюється прямо пропорційно струму ротора асинхронного двигуна. При зростанні навантаження асинхронного двигуна пропорційно зростає потік Φ_z компенсатора і збільшується E_k . Отже, в запропонованому варіанті компенсатора досягається деяка автоматичність регулювання $\cos\varphi$ асинхронного двигуна при досить широких межах зміни навантаження асинхронного двигуна. Недоліки компенсатора Шербиуса аналогічні недолікам компенсатора Леблана.

Компенсований асинхронний двигун Гейланда

У 1901-1902 Г.Г.Гейланд, інженер німецької фірми Бергман, поєднав компенсатор зсуву фаз і ротор асинхронного двигуна в одне конструктивне ціле. Вийшла одна нова машина, що має статор, абсолютно схожий зі статором традиційного асинхронного двигуна, і ротор, має колектор. На рисунку 1.2 наведена схема компенсованого асинхронного двигуна Гейланда. На статорі і роторі цього двигуна розміщені по дві обмотки. Головна трифазна обмотка статора нічим не відрізняється від традиційної обмотки асинхронного двигуна. Допоміжна трифазна обмотка S_2 , що складається з порівняно невеликого числа витків, підключена до щіток на колекторі ротора. В роторі цього двигуна окрім звичайної обмотки R_1 у

вигляді білячого колеса розміщена ще одна обмотка R2, виконана у вигляді обмотки постійного струму з колектором. Обмотка R2 призначена для компенсації зсуву фаз.

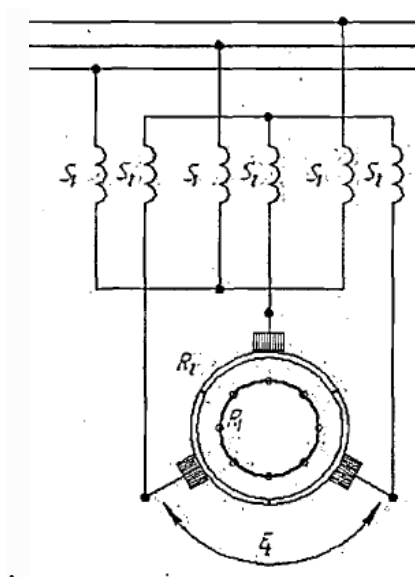


Рисунок 1.2 – Схема компенсованого асинхронного двигуна Гейланда

При роботі двигуна; зрушуючи щітки на колекторі на належний кут, можна зміщувати, по; фазі на будь-який кут - напруги на колекторі E_k . Отже, можна домогтися того, що в кожній фазі обмотки S2 статора буде протікати струм I_3 випереджаючої фази по відношенню до напруги мережі U_1 .

Так як між обмотками S_1 і S_2 існує трансформаторний зв'язок іампервитки складаються геометрично, то в результаті впливу випереджаючого струму I_3 , вектор струму I_1 в обмотці статора S_1 наблизиться до збігу по фазі з вектором напруги U_1 і асинхронний двигун буде працювати з $\cos\varphi \sim 1,0$.

Недоліками таких двигунів є: ускладнення конструкції ротора за наявності колектора і обмотки постійного струму; збільшення маси активної міді.

Асинхронно-синхронні двигуни

У 1918-1920 р.р. з'явилася ідея застосування асинхронного двигуна як синхронного з харчуванням обмотки ротора постійним струмом від збудника (машина постійного струму). Це, так званий в даний час синхронний асинхронний двигун. С. розвитком силової електроніки в 1960-1970 р.р. збудник асинхронного двигуна був замінений на тиристорний випрямний пристрій (ТВП).

Він підключався або через узгоджувальний трансформатор, або безпосередньо до тієї ж електричної мережі, що і асинхронний двигун. На рисунку 1.3 представлена схема синхронізації асинхронного двигуна від мережі змінного струму. Керований випрямляч необхідний для регулювання струму в обмотках ротора при зміні навантаження на валу двигуна. Істотно більшою ефективністю володіє схема синхронізації АТ при послідовному збудженні роторної обмотки, рисунку. 1.4. Синхронізований асинхронний двигун має статорну обмотку, випрямний пристрій, роторну обмотку, контакти комутаційного апарату К1-К3-і тиристор VS. На схемі відсутні пускові опори, так як вони принципової ролі не грають. Пуск двигуна здійснюється при замкнутих контактах К1-К3 комутаційного апарата, при цьому двигун працює в асинхронному режимі. При розімкнутих контактах К1-К3 роторна обмотка живиться випрямленою робочим струмом, споживаного двигуном з мережі, і двигун працює в синхронному режимі. При збільшенні навантаження на валу двигуна збільшується струм в обмотці статора, а отже, і струм збудження.

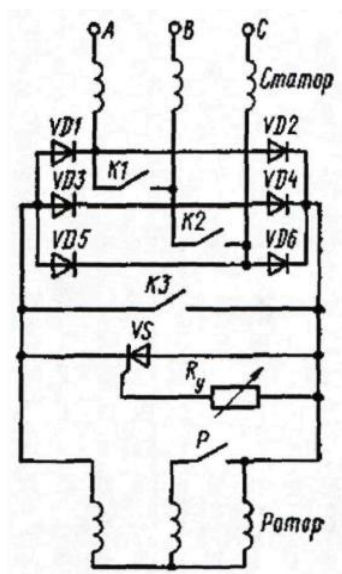


Рисунок 1.3. – Схема синхронізації асинхронного двигуна від мережі змінного струму

Електричний зв'язок статорної обмотки з некерованим випрямлячевим пристроєм дозволяє здійснити автоматичне регулювання перевантажувального моменту в синхронному режимі при різних коефіцієнтах завантаження. Синхронізація асинхронного двигуна з електричною мережею в останні роки застосовується все рідше через збільшення апаратних витрат на її реалізацію.

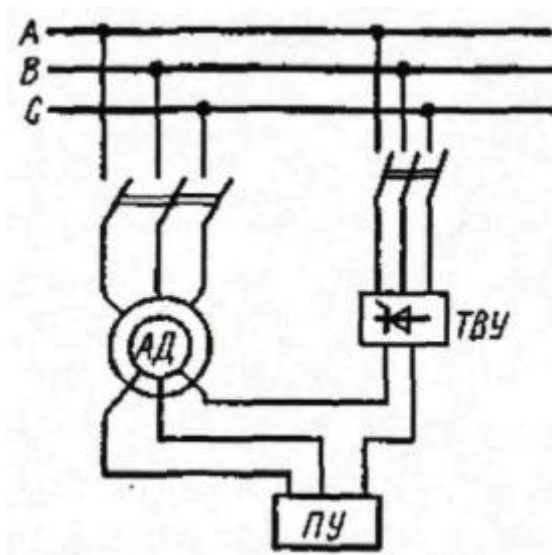


Рисунок 1.4 – Принципова електрична схема синхронізованого асинхронного двигуна з послідовним збудженням

Асинхронний двигун з постійними магнітами на роторі

У 2001 році видано свідоцтво на корисну модель і опублікована стаття. Автор запропоновано АД, який при збереженні основних його переваг, простоти, надійності і невисокій вартості, забезпечує у всьому діапазоні навантажень зниження споживаної з мережі реактивної потужності і поліпшення коефіцієнта потужності, зниження повної потужності, що споживається з мережі, при тієї ж навантаженні на валу, що і у звичайної серійної машини. В силу цих особливостей автор цього двигуна назвав асинхронним енергозберігаючим (АЕД). АЕД відрізняється в конструктивному відношенні від звичайного АД тим, що в зубцях магнітопровода ротора виконані поглиблення, в які вмонтовані ПМ. Число магнітів відповідає числу полюсів двигуна, число магнітів під полюсом може бути дорівнює одиниці або числом пазів на полюс і фазу. Полюси пар магнітів, звернені до повітряного зазору, повинні бути різнойменними. Характеристики АЕД істотно залежать від енергії постійних магнітів. При досить малих її значеннях АЕД перетворюється в звичайний АД, тоді як при іншому граничному випадку АЕД перетворюється в звичайний синхронний двигун (СД) із постійними магнітами. Таким чином, АЕД займає проміжне положення між звичайним АД і СД з постійними магнітами. АЕД можна представити як суміщену електричну машину, що

складається з АД і синхронного генератора, який виконує функцію внутрішнього джерела реактивної потужності. Постійні магніти створюють у магнітопроводі та повітряному зазорі машини симетричне стаціонарне магнітне поле, яке обертається при обертанні ротора. Розподіл магнітного поля, розраховане методом кінцевих елементів для дво полюсного АЕД, представлено на рисунку 1.5.

В режимі ХХ АЕД у порівнянні з серійним двигуном знижує споживану повну (66%) і реактивну (65%) потужності. У всьому діапазоні навантажень струм статора АЕД менше струму статора серійного АТ в середньому на 24-25%. В режимі ХХ ця різниця становить більше 30%, що виключно важливо для електроприводів з асинхронними двигунами, яких режим роботи двигуна вхолосту займає значну частину діаграми навантаження електропривода.

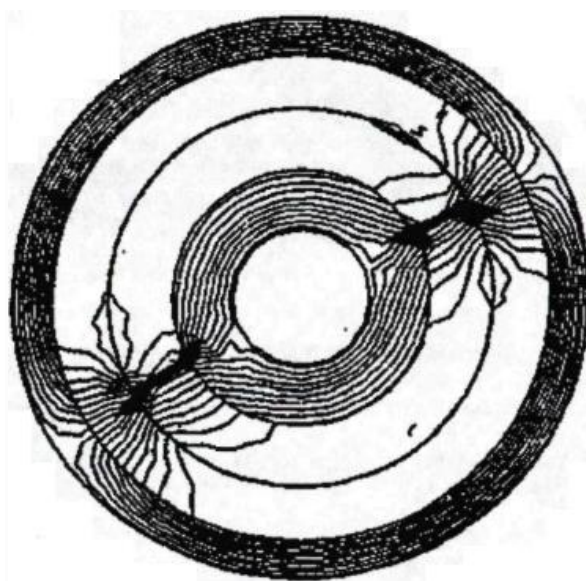


Рисунок 1.5 – Розподіл стаціонарного магнітного поля АЕД

Недоліком АЕД є зниження критичного моменту (близько 23%) двигуна. Крім того, на ділянці пуску механічної характеристики АЕД є провали, характерні для пускових характеристик синхронних двигунів з постійними магнітами і білячою кліткою. Ці обставини дещо звужують область застосування АЕД, які можуть бути особливо успішно використані для електроприводів механізмів з так званої, вентиляторної характеристики: вентилятори, відцентрові насоси, компресори і т.д. Розглянутий АЕД, незважаючи на наявні переваги в практиці поки не знайшов

належного застосування з-за технологічних проблем розміщення постійних магнітів на роторі. В кінці XX століття з'явилися публікації щодо підвищення $\cos\varphi$ асинхронних двигунів на основі застосування сучасних технологій, огляд яких виконаний в роботі

Асинхронний двигун з внутрішньої компенсацією

У зв'язку з тим, що сердечник статора асинхронних машин має шарувату структуру, запропоновано використовувати елементи конструкції двигуна в якості вбудованих компенсуючих конденсаторів. Вивчалася можливість застосування різних ізоляційних матеріалів як між листової ізоляції сердечника, здатних зберегти свої ізоляційні властивості після всіх технологічних операцій по збірці сердечника. Аналіз застосування оксидної плівки, лакових та полімерних покриттів, електрокартону показав, що лише електрокартон зберігає свої електроізоляційні властивості. Інші матеріали в процесі виготовлення сердечника статора механічно пошкоджуються і не забезпечують електричної міцності ізоляційного проміжку між сусідніми пластинами електротехнічної сталі, тобто не можуть служити в якості діелектрика для вбудованого конденсатора. Слід зазначити, що розглянуту схему конденсатора досить важко здійснити практично, оскільки пакет сталі статора машин малої і середньої потужності жорстко сполучається з корпусом, від якого вбудований конденсатор повинен бути надійно ізольований. Дослідження показали, що введенням в магнітну систему асинхронного двигуна вбудованої компенсуючої ємності можна компенсувати лише до 2% споживаної машиною в номінальному режимі реактивної потужності. Це не дозволяє рекомендувати розглянутий спосіб компенсації реактивної потужності для промислового впровадження.

Огляд технічних рішень по підвищенню коефіцієнта потужності асинхронних двигунів та їх аналіз показує:

- 1) Використання для підвищення коефіцієнта потужності асинхронних двигунів спеціальних електромеханічних компенсуючих пристроїв, механічно з'єднаних з валом двигуна, у даний час не раціональні через ускладнення і зниження надійності системи.

- 2) Застосування постійних магнітів, вбудованих в ротор асинхронного двигуна, дозволяють лише частково компенсувати реактивну потужність. Крім того, асинхронний двигун зменшує свій максимальний обертовий момент, що є небажаним; реконструювати вже виготовлені ротори асинхронних двигунів шляхом «впровадження» в них постійних магнітів можливо тільки в спеціалізованих електромашинобудівних підприємствах і дуже трудомістко - в електроремонтних підприємствах.
- 3) Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів шляхом внесення розподілених у магнітній системі і обмотувальних проводів ємнісних елементів не дозволяє повністю компенсувати реактивну потужність індуктивного характеру. Крім того, такий двигун неможливо створити в умовах електроmontажного підприємства.

1.3. Обґрунтування концепції, задач дипломної роботи та методик дослідження

Виконаний огляд і аналіз стану проблеми дозволяє відзначити такі головні науково обґрунтовані і підтверджені практикою напрямки підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів і систем:

1. Компенсація реактивних струмів і потужності індуктивного характеру реактивними струмами і потужностями - ємнісного характеру, що досягається шляхом застосування спеціальних нерегульованих і регульованих компенсаторів реактивної потужності (конденсаторних, електромеханічних, напівпровідникових та ін. При цьому, техніко-економічний ефект досягається за рахунок зменшення втрат активної потужності в електричних мережах від перетікання реактивної потужності. Цей напрямок базується на загальновідомій, концепції використання явища резонансу струмів в електричних ланцюгах. Реалізація цієї концепції найбільш ефективна в енергосистемах середньої і високої напруги (6/10 кВ і вище). Однак, в системах електропостачання напругою до 1000 В, в яких використовується до 70% всього парку асинхронних двигунів, її застосування не завжди

економічно виправдано. Тому в системах електропостачання напругою 220/380 В, 380/660 В. компенсація реактивної потужності, як правило, здійснюється рідко або не здійснюється, незважаючи на те, що в них втрачається від 8 до 14% всієї споживаної активної електричної енергії.

2. Перехід від нерегульованих асинхронних електроприводів до регульованих на основі застосування систем ПЧ-АД, НПЧ-АД, ТРН-АД та ін. Це напрямок підвищення енергоефективності досягається приведенням у відповідності споживаної електроприводами електричної потужності до потужності, необхідної для реалізації технологічного процесу. У такій технології як транспортування рідин, газів та ін., де застосовуються насоси і вентилятори, надається можливість економити до 25-40% електричної енергії. У системах ПЧ-АД з ШІМ досягається поєднання початкових фаз струмів і напруги першої гармоніки і, як наслідок, зменшення споживаної реактивної потужності і підвищення $\cos\varphi$ до 0,95-0,98. Проте в цих системах, внаслідок особливостей регулювання відносини U/f порушуються вищі гармоніки струмів, що знижують ККД електропривода на 3-6% і викликають додаткові проблеми - зниження показників якості електроенергії та електромагнітної сумісності. В системах електроприводів ТПН-АД, НПЧ-АД з фазовим або програмним управлінням $\cos\varphi$ системи виявляється нижче $\cos\varphi$ ТАД.

3. Удосконалення створених і розробка нових конструкцій електричних машин і апаратів, застосування для їх виготовлення сучасних технологій, конструкційних і ізоляційних матеріалів. Техніко-економічний ефект цього напрямку досягається за рахунок підвищення електричного та енергетичного ККД, збільшення показників надійності електричних машин, зниження експлуатаційних витрат. Незважаючи на затратність даного напрямку, принципово нових технічних рішень, що істотно підвищують показники ефективності асинхронних машин поки не виявлено.

4. Розробка, створення і застосування сучасних силових напівпровідникових перетворювачів електричної енергії (ПЧ на основі IGBT транзисторів з ШІМ, тиристорів НПЧ з програмним формуванням бажаних ступенів частот напруги) для пуску і регулювання частоти обертання асинхронних двигунів. Техніко-

економічна ефективність цього напрямку підтверджується збільшенням частки регульованого асинхронного електропривода.

5. Створення проблемно-орієнтованих електротехнічних комплексів і систем, керованих засобами сучасної електроніки, мікроелектроніки, мікропроцесорними пристроями. У даній дипломній роботі головним напрямком дослідження є удосконалення створених і розробка нових конструкцій асинхронних двигунів електроприводів промислових установок на їх основі. Цей напрям відрізняється від відомого тим, що додатково враховує нові можливості і позитивний досвід з енергозбереження та компенсації реактивної потужності в електричних мережах. Концепція, покладена в основу цього дослідження, полягає в тому; що для підвищення енергоефективності асинхронних електроприводів, кожен застосовуваний у них асинхронний двигун повинен володіти здатністю генерувати реактивну потужність ємнісного характеру, достатню для компенсації реактивної потужності індуктивного характеру. Ця концепція відрізняється від відомої, заснованої на використанні явища резонансу струмів в електричних ланцюгах, тим, що базується на використанні явища ферорезонансу струмів, характерного для електромагнітних ланцюгів. Тобто, ідеєю дипломної роботи є створення асинхронних двигунів та електроприводів на основі їх застосування, що не споживають в перехідних режимах від джерела електричної енергії реактивну потужність, індуктивного характеру.

Для вирішення означеної проблеми в дипломній роботі використовується системний підхід, що дозволяє поетапно ставити і знаходити рішення окремих-приватних завдань, порівнювати отримані рішення з бажаними, коригувати постановку завдань і тим самим просуватися у вирішенні проблеми і досягнення цілі.

На основі розглянутого робимо висновок, що проблема потребує подальшого дослідження в зв'язку з рядом недоліків в інновації такі як: тривалий час окупності системи, висока ціна самої модифікації. Тому сформульована мета роботи - підвищення енергетичної ефективності електроприводів суднових установок шляхом створення та застосування асинхронних двигунів з індивідуальною компенсацією реактивної потужності. Для досягнення мети, на основі системного

аналізу енергетичних показників асинхронних двигунів і електроприводів на їх основі, з урахуванням головних причин, що впливають на показники енергоефективності, в роботі поставлені і вирішені наступні завдання:

1. Розробка нових асинхронних двигунів з індивідуальною компенсацією реактивної потужності.
2. Розробка математичних моделей для оцінки статичних і динамічних характеристик електроприводів на основі асинхронних двигунів з індивідуальною компенсацією реактивної потужності.
3. Розробка методики та алгоритму розрахунку показників енергоефективності регульованих і нерегульованих електроприводів на основі застосування ТАД і АТ з ІКРП.
4. Створення та дослідження регульованих електроприводів промислових установок на основі асинхронних двигунів з індивідуальною компенсацією реактивної потужності.

2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ІНДИВІДУАЛЬНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

2.1. Електрична схема заміщення асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності

Для отримання схеми заміщення скористаємося відомою методикою створення електричних схем заміщення АД. Спрощена електромагнітна схема однієї фази двигуна представлена на рис. 2.1, де: $R_1 X_{a1}$ - параметри робочої обмотки статора; $R_2 X_{a2}$ - параметри обмотки ротора; $R_3 X_{a3}$ - параметри компенсаційної обмотки статора; X_K - ємнісний опір компенсуючого конденсатора; $M_{12}=M_{21}$; $M_{13}=M_{31}$, $M_{23}=M_{32}$ - взаємні індуктивності обмоток двигуна.

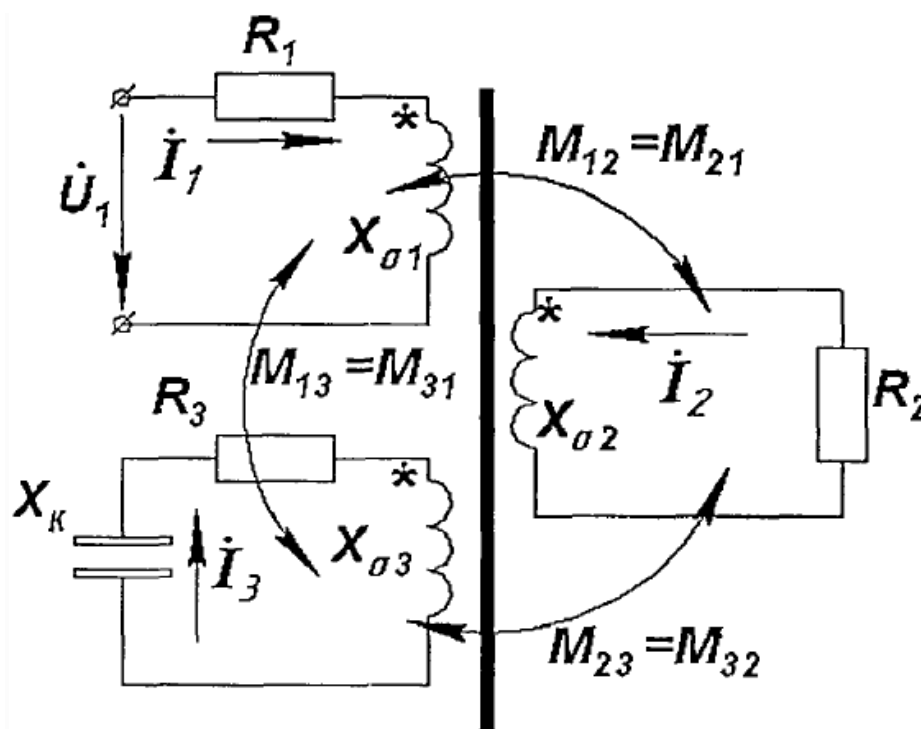


Рисунок 2.1 - Електромагнітна схема однієї фази АД з ІКРП

Складемо рівняння за другим законом Кірхгофа для однієї фази робочої обмотки однієї фази компенсаційної обмотки і однієї фази обмотки ротора асинхронної компенсованої машини з обертовим ротором. Ці рівняння записуються для моменту часу, або положення ротора, коли осі розглянутих фаз обмоток статора і ротора збігаються. Припустимо також, що магнітні втрати в осердях статора і

ротора дорівнюють нулю. Рівняння для робочої обмотки статора, та компенсаційної обмотки ротора обмотки статора мають вигляд:

$$U_1 = R_1 I_1 + jX_{a1} I_1 + jx_{r1} I_1 + jx_{r21} I_2 + jx_{r31} I_3 \quad (2.1)$$

$$0 = R_2 I_2 + jsX_{a2} I_2 + jsx_{r2} I_2 + jsx_{r12} I_1 + jsx_{r32} I_3 \quad (2.2)$$

$$0 = (R_3 + r_k) I_3 + jX_{a3} I_3 - jX_{a3} I_3 + jx_{r3} I_3 + jx_{r13} I_1 + jx_{r23} I_2 \quad (2.3)$$

де U_1 - фазна напруга; I_1, I_2, I_3 , - струми робочої, роторною та компенсаційній обмоток; r_r - активний опір конденсатора; X_{a1}, X_{a2}, X_{a3} - індуктивні опори розсіювання, що включають пазове, лобове, диференціальне розсіювання та розсіювання по коронкам зубців робочої, роторною та компенсаційної обмоток; X_{r1}, X_{r2}, X_{r3} - головні власні індуктивні опору, що враховують основні гармоніки магнітного поля в повітряному зазорі, робочої, роторною та компенсаційної обмоток; $x_{r21,12,32,31,13,23}$ - взаємні індуктивні опори робочої, роторною та компенсаційної обмоток від основних гармонік поля в повітряному зазорі, X_k - ємнісне опір фази конденсатора, підключеної до компенсаційної обмотки.

ЕРС взаємної індукції в обмотці ротора, індукована струмами робочої і компенсаційної обмоток також пропорційна s , оскільки швидкість обертання робочого, а, отже, і компенсаційного поля, щодо роторної обмотки також пропорційні ковзанню:

$$E_{12s} = -(jsx_{r12} I_1 + jsx_{r32} I_3) \quad (2.4)$$

Суми останніх трьох членів (2.1), (2.2) і (2.3), взяті з протилежним знаком, являють собою ЕРС в робочій обмотці, обмотці ротора і компенсаційною обмотці, індуковані результуючим магнітним потоком, основних гармонік статора і ротора, тобто:

$$E_1 = jX_{r1} I_1 + jx_{r21} I_2 + jx_{r31} I_3 \quad (2.5)$$

$$E_2 s = -(jsX_{r2} I_2 + jsx_{r12} I_1 + jsx_{r32} I_3) \quad (2.6)$$

$$E_3 = jX_{r3} I_3 + jx_{r13} I_1 + jx_{r23} I_2 \quad (2.7)$$

Щоб отримати схему заміщення АД з ІКРП із загальмованим ротором, наведемо параметри роторною та компенсаційної обмоток до параметрів робочої обмотки через, так звані, коефіцієнти приведення:

$$K_{U2} = \frac{w_1 k_{o61}}{w_2 k_{o62}} \quad K_{U3} = \frac{w_1 k_{o61}}{w_3 k_{o63}} \quad (2.8)$$

$$K_{i2} = \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} \quad K_{i3} = \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_3 w_3 k_{o63}}$$

де K_{U2} K_{U3} - коефіцієнти приведення роторною та компенсаційної обмоток; K_{i2} K_{i3} коефіцієнти приведення струмів роторною та компенсаційної обмоток; w_1, w_2, w_3 - число витків робочої, роторною та компенсаційної обмоток; $k_{o61}, k_{o62}, k_{o63}$ —обмотувальні коефіцієнти робочої, роторною та компенсаційної обмоток; $гп1, т2, т3$ - число фаз робочої, роторною та компенсаційної обмоток. Наведемо реальні струми роторною та компенсаційної обмоток до струму робочої обмотки Γ_2, Γ_3

$$I_2 = k_{i2} I_2; \quad I_2 = k_{i3} I_3; \quad (2.9)$$

Реальні напруги. роторною та компенсаційної обмоток приведемо до напруги робочої обмотки, помноживши рівняння (2.6) і (2.7) на K_{U2} і K_{U3} - відповідно. Рівняння (2.6) розділимо на s , що буде відповідати переходу до машини із загальмованим ротором.

В рівності (2.6) введемо наведені значення активних опорів і індуктивних опорів розсіювання для роторної та компенсаційної обмоток, а також наведені значення активного та ємнісного опорів і конденсаторів рівняння (2.7):

$$R'_2 = K_{U2} K_{i2} R_2; \quad R'_3 = K_{U3} K_{i3} R_3; \quad r'_k = K_{U2} K_{i2} r_k; \quad (2.10)$$

$$X'_{a2} = K_{U2} K_{i2} X_{a2}; \quad X'_{a3} = K_{U3} K_{i3} X_{a3}; \quad X'_k = K_{U2} K_{i2} X_k; \quad (2.11)$$

Головні власні індуктивні опору робочої, роторною та компенсаційної обмоток визначаються:

$$X_{r1} = m_1 w_1^2 X_{o61}^2 X_1 \quad (2.12)$$

$$X_{r2} = m_2 w_2^2 X_{o62}^2 X_2 \quad (2.13)$$

$$X_{r3} = m_3 w_3^2 X_{o63}^2 X_3 \quad (2.14)$$

Взаємні індуктивні опору обмоток двигуна визначаються множеннями:

$$\begin{aligned} x_{12} &= m_1 w_1 k_{o61} w_2 k_{o62} X_1; & x_{21} &= m_2 w_1 k_{o61} w_2 k_{o62} X_1; \\ x_{13} &= m_1 w_1 k_{o61} w_3 k_{o63} X_1; & x_{31} &= m_3 w_1 k_{o61} w_3 k_{o63} X_1; \\ x_{23} &= m_2 w_2 k_{o63} w_3 k_{o62} X_1; & x_{32} &= m_3 w_2 k_{o63} w_2 k_{o62} X_1; \end{aligned} \quad (2.15)$$

Наведені величини індуктивних опорів взаємної індукції, згідно з виразами (2.5) і (2.15), можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned}
 x_{r21} &= K_{12}x_{r21} = \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o61}} m_2 w_1 k_{o61} x_1 = m_1 w_1^2 k_{o61}^2 x_1 \\
 x_{r31} &= k_{13}x_{r31} = \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_3 w_3 k_{o61}} m_2 w_1 k_{o61} w_3 k_{o63} x_1 = m_1 w_1^2 k_{o61}^2 x_1 \\
 x_{r2} &= K_{u2}K_{12}x_{r2} = \frac{w_1 k_{o61} m_1 w_1 k_{o61}}{w_2 k_{o62} m_2 w_2 k_{o62}} m_2 w_2^2 k_{o62}^2 x_1 = m_1 w_1^2 k_{o61}^2 x_1 \\
 x_{r12} &= K_{u2}x_{r12} = \frac{w_1 k_{o61}}{w_2 k_{o62}} m_1 w_1 k_{o61} w_2 k_{o62} x_1 = m_1 w_1^2 k_{o61}^2 x_1 \\
 x_{r32} &= K_{u2}K_{13}x_{r32} = \frac{w_1 k_{o61} m_1 w_1 k_{o61}}{w_2 k_{o62} m_3 w_3 k_{o63}} m_3 w_2 k_{o62} w_3 k_{o63} x_1 = m_1 w_1^2 k_{o61}^2 x_1 \\
 x_{r3} &= K_{u3}K_{13}x_{r3} = \frac{w_1 k_{o61} m_1 w_1 k_{o61}}{w_3 k_{o63} m_3 w_3 k_{o63}} m_3 w_3^2 k_{o63}^2 x_1 = m_1 w_1^2 k_{o61}^2 x_1 \\
 x_{r13} &= K_{u3}x_{r13} = \frac{w_1 k_{o61}}{w_3 k_{o63}} m_1 w_1 k_{o61} w_3 k_{o63} x_1 = m_1 w_1^2 k_{o61}^2 x_1 \\
 x_{r23} &= K_{u3}K_{12}x_{r23} = \frac{w_1 k_{o61} m_1 w_1 k_{o61}}{w_3 k_{o63} m_2 w_2 k_{o62}} m_2 w_2 k_{o62} w_3 k_{o63} x_1 = m_1 w_1^2 k_{o61}^2 x_1
 \end{aligned}$$

На підставі (2.12) індуктивні опору взаємної індукції обмоток можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned}
 x_{r1} &= K_{12}x_{r21}=x_{r21}; & x_{r1}&=K_{13}x_{r31}=x_{r31}; & x_{r1}&=K_{u2}K_{12}x_{r2} = x_{r2}; \\
 x_{r1}&=K_{u2}x_{r12} = x_{r12}; & x_{r1}&=K_{u2}K_{13}x_{r32}=x_{r32}; & & \\
 x_{r1}&=K_{u3}K_{13}x_{r3}=x_{r3}; & x_{r1} &= K_{u2}X_{13} = X_{r13}; & x_{r1}&=K_{u3}K_{12}x_{r23}=x_{r23};
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Таким чином, наведені взаємні індуктивні опору виявляються рівними головному індуктивного опору первинної обмотки, зумовленого основною гармонікою поля цієї обмотки.

$$U_1 = R_1 I_1 + jX_a I_1 + jx_{r1}(I_1 + I_2 + I_3) \tag{2.17}$$

$$0 = (R_2 / s) I_2 + jx_{a2} I_2 + jx_{r1}(I_1 + I_2 + I_3) \tag{2.18}$$

$$0 = (R_3 + r_k) I_3 + j(x_{a3} + x_k) I_3 + jx_{r1}(I_1 + I_2 + I_3) \tag{2.19}$$

Рівняння (2.17), (2.18) (2.19) визначають баланс напруг у трьох електричних контурах з однією загальною гілкою, що містить елемент x_{r1} , за якою протікає струм намагнічування:

$$I_{\mu} = I_1 + I'_2 + I'_3 \quad (2.20)$$

Електрична схема заміщення, складена на основі рівнянь (2.17)- (2.20) представлена на рис. 2.2.

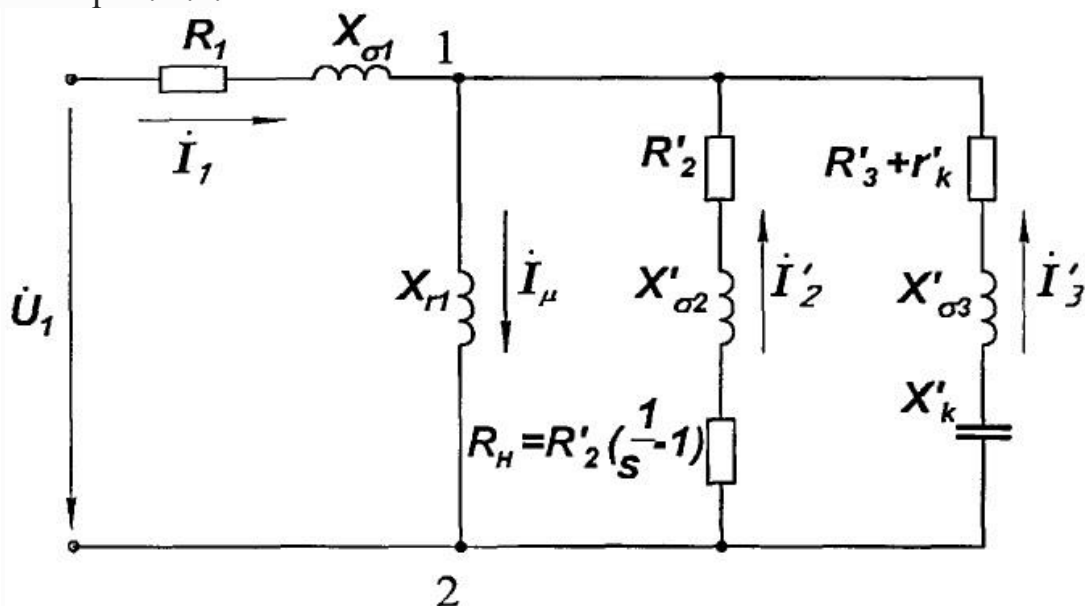


Рисунок 2.2 – Електрична схема заміщення АД з КРП без урахування магнітних втрат

Коло намагнічування представлена головним індуктивним опором x_{r1} робочої обмотки. Напруга на затискачах намагнічує ланцюга $U_{12} = E_{PC}$ робочої обмотки і приведеним до робочій обмотці ЕРС роторною та компенсаційній обмоток

$$U_{12} = E_1 = E_2 = E_3 \quad (2.21)$$

Схема заміщення, рис. 2.2, не враховує магнітні втрати в електротехнічній сталі машини. Для обліку цих втрат на схемі рисунка 2.2 паралельно опору x_{r1} можна включити активний опір $r_{m\Gamma}$ такого значення, електричні втрати в якому рівні магнітних втрат $r_{m\Gamma}$ осердя статора на одну фазу. Величина цього опору може бути визначена відношенням

$$r_{m\Gamma} = m_1 E_1^2 / p_{m\sigma 1} \quad (2.22)$$

Паралельно включені опори можливо об'єднати в один еквівалентний опір Z_m намагнічуючого ланцюга:

$$Z_m = \frac{r_{m\sigma} j x_{r1}}{r_{m\sigma} + j x_{r1}} = R_{\mu} + j x_{\mu} \quad (2.23)$$

Причому $R_{\mu} \ll x_{\mu}$. З урахуванням висказаного, схему рисунку 2.2 можливо замінити рисунком 2.3

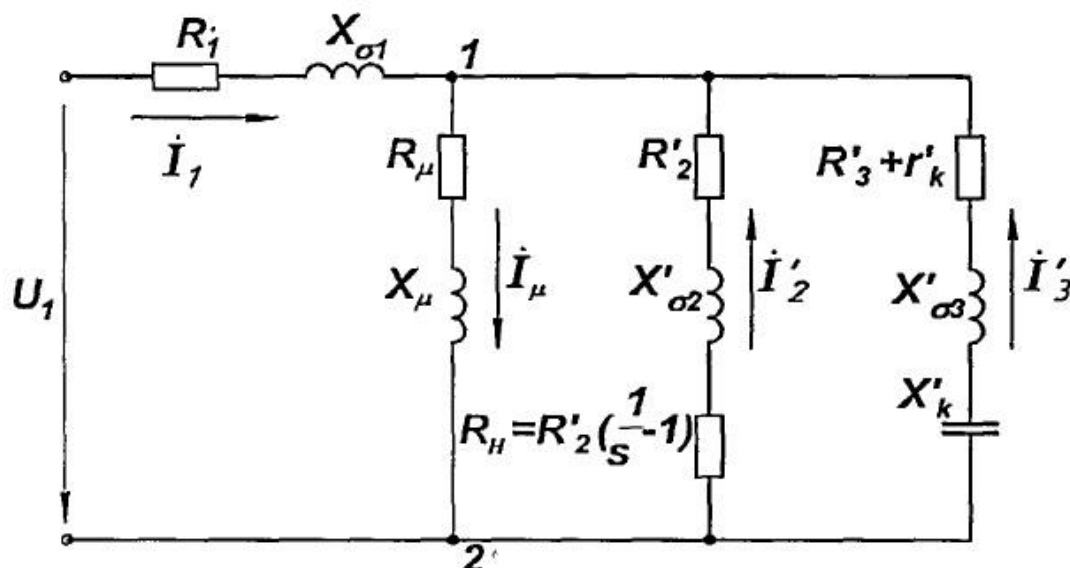


Рисунок 2.3 – Схема заміщення АД з ІКРП з урахуванням магнітних втрат

Отримана Т-подібна електрична схема заміщення асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності справедлива як для схем з електрично непов'язаними робочого і компенсаційного обмотками, тобто коли зв'язок між цими обмотками тільки магнітна, так і для автотрансформаторним схеми включення обмоток, коли названі обмотки пов'язані між собою електрично і через магнітне поле. Для електричної схеми заміщення, рисунка 2.3, з урахуванням рівнянь (2.17)- (2.20) можна уявити векторну діаграму струмів і напруг для однієї фази АД з ІКРП. На рисунку 2.4 представлені векторні діаграми струмів, напруг і ЕРС ТАД і АД з ІКРП. З порівняння векторних діаграм струмів двигунів видно, що в АД з ІКРП споживаний струм визначається векторною сумою струмів I_μ, I_2, I_3 . При струмі $I_3=0$ АД з ІКРП буде дорівнює струму I_1 ТАД. Із збільшенням струму I_3 початкова фаза ϕ_1 і модуль струму будуть зменшуватися. При певній величині ємності компенсуючого конденсатора $C_k=C_3$ можна забезпечити повну компенсацію реактивної складової струму I_1 , тобто двигун буде працювати з $\cos \phi = 1,0$ і мінімальним струмом рівним активному струму. При незмінній величині живлячої напруги U електрорушійні сили, що наводяться в обмотках двигуна $E_1 = E_2 = E_3$ зростуть, отже, збільшиться електромагнітна потужність, що передається на обмотку ротора.

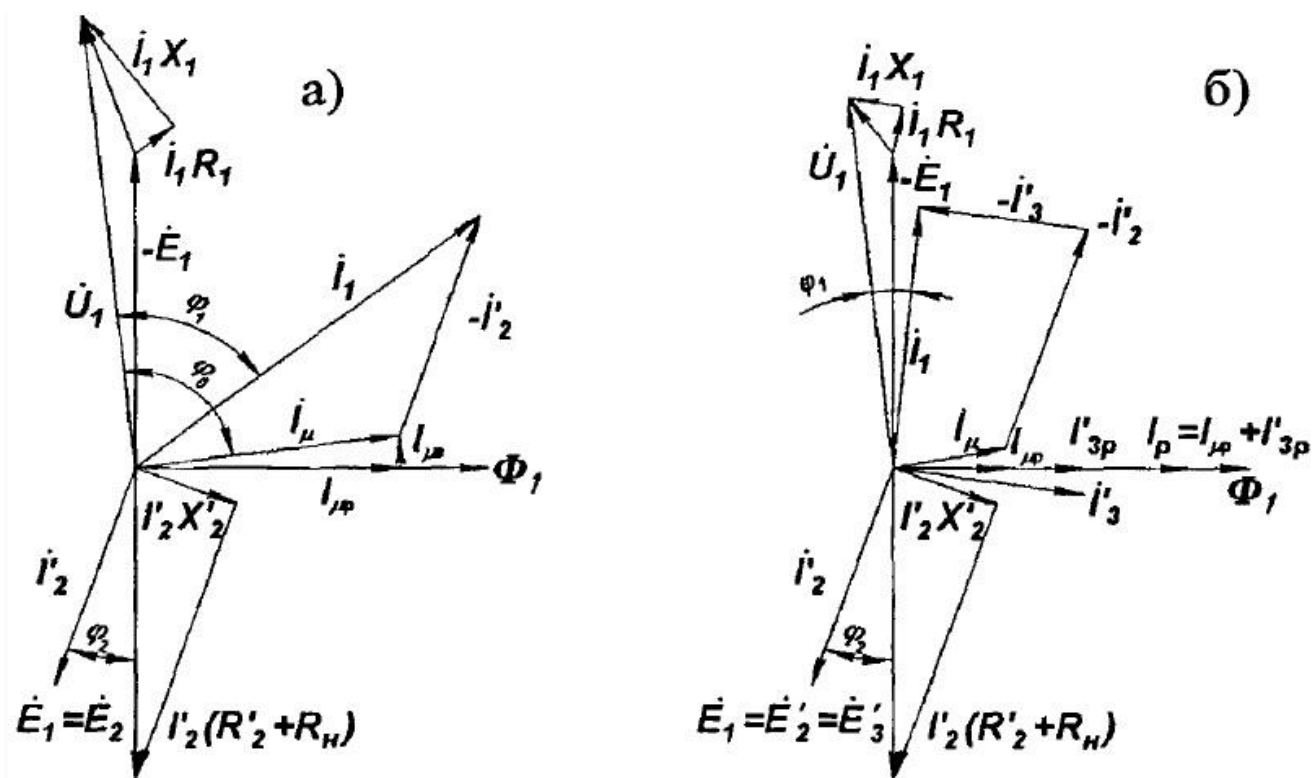


Рисунок 2.4 – Векторні діаграми струмів, напруг і ЕРС асинхронних двигунів:

а)ТАД;б)АД с ІКРП

При дослідженні статичних характеристик асинхронних двигунів часто користуються спрощеною, так званої, Г-подібною схемою заміщення. Г-подібна схема заміщення АД з ІКРП за відомою методикою може бути перетворена в Г-подібну електричну схему заміщення.

2.2. Обґрунтування методики розрахунку лінійного струмового та теплового навантажень статора асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності

За величинами лінійного струмового та теплового навантажень електромагнітних систем визначають клас стійкості нагрівання ізоляції електричних машин і апаратів. Правильний вибір класу стійкості нагрівання ізоляції є надзвичайно важливим як з точки зору надійності, так і собівартості створюються електромеханічних систем. В даний час відомі методика та інженерні формули, що дозволяють обчислити названі навантаження при проектуванні ТАД, що містять на статорі і

роторі по одній трифазній обмотці. Однак відомі методики та інженерні формули, що дозволяють визначати величини лінійної струмового та теплового навантажень при проектуванні ТАД, не дозволяють обчислювати вищезазначені навантаження при проектуванні АД з ІКРП, так як не враховують наявності додаткової обмотки і її струму. Тому для цих двигунів клас стійкості нагрівання ізоляції доводиться вибирати методом проб і помилок, що є витратним, не ефективним, а іноді - і невдалим помилковим. У цій частині дипломної роботи - пропонуються обґрунтування і інженерні формули, які дозволяють розраховувати лінійну струмовий і теплову навантаження при проектуванні асинхронних двигунів з індивідуальною компенсацією реактивної потужності. Отже, звернемося до сутності відомої методики розрахунку обговорюваних навантаження ТАД; містить на статорі і роторі по одній трифазній обмотці. Лінійна струмова і теплова навантаження ТАД визначаються за формулами :

- для статора

$$A_1 = \frac{10Z_1 N_{1n} I_{1n}}{\pi D_1 a_1} \quad (2.24)$$

$$W_1 = A_1 J_1 \quad (2.26)$$

для ротора

$$A_2 = \frac{10Z_2 N_{2n} I_{2n}}{\pi D_2 a_2} \quad (2.27)$$

$$W_2 = A_2 J_2 \quad (2.28)$$

де A_1, A_2 - лінійні струмові навантаження статора і ротора, А/см; W_1, W_2 - теплові навантаження статора і ротора, Z_1, Z_2 - число пазів статора і ротора; N_{1n}, N_{2n} - число провідників у пазах статора і ротора; D_1, D_2 - відповідно внутрішній і зовнішній діаметри, статора та ротора, мм; a_1, a_2 - число паралельних гілок обмоток статора і ротора; I_{1n}, I_{2n} - номінальні струми обмоток статора і ротора, А; J_1, J_2 - густини струмів в обмотках статора і ротора.

При проектуванні нової традиційної асинхронної електричної машини обчислені значення лінійної струмового та теплового навантажень порівнюють з середніми значеннями відповідних навантажень, накопиченими за весь попередній

період проєктування, виготовлення і експлуатації аналогічних електричних машин. Якщо обчислені за (2.24-2.8) значення навантажень не перевищують середніх значень навантажень електричних машин-аналогів, то клас стійкості нагрівання ізоляції проєктованої машини» приймають рівним відповідного клас стійкості нагрівання ізоляції машини-аналога. Якщо обчислені значення навантажень перевищують середні значення навантажень машин-аналогів, то клас стійкості нагрівання ізоляції проєктованої машини підвищують згідно з рекомендаціями.

На відміну від ТАД в АД з ІКРП на статорі крім робочої обмотки з числом витків w_1 , яка підключається до трифазного джерела електричної енергії, розміщується трифазна компенсаційна обмотка з числом витків w_3 , яка підключається до трифазної, конденсаторної батареї певної ємності. Тому лінійну струмовий і теплову навантаження статора цього двигуна створюють два струми: струм I_1 , що протікає по - обмотці і має в загальному випадку активно-індуктивний характер; струм I_3 , що протікає по компенсаційної обмотки і має переважно ємнісний характер. Рівняння намагнічуючих сил асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності при $k_{061} = k_{062} = k_{063} = 1$ має вигляд

$$I_1 w_1 = I_{1x} w_1 - I_2 w_2 - I_3 w_3 \quad (2.29)$$

або

$$I_1 = I_{1x} - I'_2 - I'_3 \quad (2.30)$$

де I_1 - комплекс струму обмотки статора; I_{1x} - комплекс струму робочої обмотки статора при холостому ході АД; $I'_2 = I_2 w_2 / w_1$ - комплекс струму ротора, приведенного до робочої обмотки статора; ; $I'_3 = I_3 w_3 / w_1$ - комплекс струму компенсаційної обмотки, приведенного до робочої обмотки статора.

При роботі АД з ІКРП без механічного навантаження, тобто при $I'_2 = 0$, модуль струму холостого ходу робочої обмотки дорівнює модулю приведенного струму компенсаційної обмотки статора. Цю умову можна записати рівнянням

$$I_{1x} = I'_3 \quad (2.31)$$

Відомо також, що основний магнітний потік Φ_0 асинхронних машин практично не залежить від величини струмів, що протікають в обмотках статора і ротора. Він

визначається магнітними властивостями сталі, геометричними розмірами магнітної системи, частотою і напругою живлення машини

$$\Phi_0 = bU_1/f_1 \quad (2.32)$$

де b – конструктивна постійна машини; U_1, f_1 - напруга живлення і її частота.

Отже, можна стверджувати, що намагнічуючі сили обмоток компенсованого асинхронного двигуна при всіх навантаженнях, менших номінальної, підсумовуються так, що результуюча сила буде намагнічує такий же за величиною як у аналогічного по потужності і частоті обертання традиційного асинхронного двигуна при холостому ході. Тобто, для асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності, містить на статорі дві трифазні обмотки, при $I'_2 = 0$, можна записати рівняння:

$$I_{1mx} = I_{1x} + I'_3 \quad (2.33)$$

де I_{1mx} - струм холостого ходу традиційного асинхронного двигуна-аналога.

Магнітний потік, створюваний електротехнічної сталлю асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності при холостому ході, порушується реактивними складовими струмів робочої і компенсаційній обмоток статора.

Отже, з рівняння (2.33) для реактивних складових струмів можна записати рівність:

$$I_{1mx} \sin \varphi_x = I_{1x} \sin \varphi_x + I'_3 \sin \varphi_3 \quad (2.34)$$

З урахуванням (2.31)

$$I_{1mx} \sin \varphi_x = \sin \varphi_x + \sin \varphi_3 \quad (2.35)$$

З рівняння (2.2.11) модуль струму робочої обмотки статора при холостому ході АД запишеться рівнянням:

$$I_{1x} = \frac{I_{1mx} \sin \varphi_x}{\sin \varphi_x + \sin \varphi_3}, \quad (2.36)$$

де φ_x - зсув фаз струму і напруги при холостому ході двигуна; $\varphi_x = 90 - \delta$; δ - кут, пропорційний втрат - у стали магнітної системи двигуна; $\varphi_3 = \arctg(x - y)/z$; x, z - наведені на робочій обмотці активний і індуктивний опір розсіювання

фази компенсаційної обмотки; y - наведене до робочої обмотки ємнісний опір фази компенсуючого конденсатора; при ідеальному конденсаторі.

Комплекс струму робочої обмотки статора при холостому ході двигуна з урахуванням (2.36) визначається виразом:

$$I_{1x} = I_{1x} \cos \varphi_x + j I_{1x} \sin \varphi_x = I_{1xa} + j I_{1xp} \quad (2.37)$$

де I_{1xa}, I_{1xp} - активна і реактивна складові струму холостого ходу асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності;

$$I_{1xa} = \frac{I_{1mx} \sin \varphi_x \cos \varphi_x}{(\sin \varphi_x + \cos \varphi_x)} \quad (2.38a)$$

$$I_{1xp} = \frac{I_{1mx} \sin^2 \varphi_x}{(\sin \varphi_x + \cos \varphi_x)} \quad (2.38p)$$

Комплекс струму, споживаного з електромережі при ідеальному холостому ході двигуна, з урахуванням (2.33, 2.37) визначається:

$$I_1 = I_{1x} - I_3 = \frac{I_{1mx} \sin \varphi_x}{(\sin \varphi_x + \cos \varphi_x)} ((\cos \varphi_x + \cos \varphi_3) + j(\sin \varphi_x - \sin \varphi_3)) \quad (2.39)$$

Комплекс струму компенсаційної обмотки асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності в загальному випадку визначається сумою: $I_1 = I_{3a} + j I_{3p}$ де I_{3a}, I_{3p} - активна і реактивна складові струму компенсаційної обмотки, приведенного до робочої обмотки статора. Активна і реактивна складові струму I_{3a} можуть бути виражені:

$$I_{3a} = \frac{P_{2n}}{m k_{31} U_{1n} \theta_n} (tg \varphi_n + / - tg \varphi_{nж}) \cos \varphi_3 \quad (2.40a)$$

$$I_{3p} = \frac{P_{2n}}{m k_{31} U_{1n} \theta_n} (tg \varphi_n + / - tg \varphi_{nж}) \sin \varphi_3 \quad (2.40p)$$

де: P_{2n}, U_{1n}, θ_n - номінальна потужність, напруга та ККД проектованого двигуна; θ_n - більше номінального ККД двигуна-аналога; m - число фаз двигуна; k_{31} - коефіцієнт приведення струму компенсаційної обмотки до робочої обмотки статора; знак «+» використовується для випадку генерування реактивної потужності ємнісного характеру; $tg \varphi_n$ - тангенс номінального зсуву фаз струму і напруги традиційного двигуна-аналога; $tg \varphi_{nж}$ - тангенс номінального бажаного зсуву фаз струму і напруги проектованого двигуна. Комплекс струму ротора асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності (2.32) з урахуванням (2.38, 2.40) запишеться рівнянням:

$$I_{2n} = I_{1x} - I_{1n} - I_3 = I_{2na} + jI_{2np} \quad (2.41)$$

де I_{2na}, I_{2np} - активна і реактивна складові номінального струму ротора, приведенного до робочої обмотки статора.

Активна і реактивна складові струму ротора можуть бути виражені:

$$I_{2na} = \frac{I_{1xm} \sin \varphi_x \cos \varphi_x}{(\sin \varphi_x + \cos \varphi_3)} + \frac{P_{2n}}{mU_{1n}\theta_n} ((tg\varphi_n + /-tg\varphi_{nж}) \frac{\cos \varphi_3}{k_{21}} - \quad (2.42a)$$

$$I_{2np} = \frac{I_{1xm} \sin^2 \varphi_x}{(\sin \varphi_x + \cos \varphi_3)} - \frac{P_{2n}}{mU_{1n}\theta_n} (tg\varphi_{nж} + (tg\varphi_n + /-tg\varphi_{nж}) \frac{\sin \varphi_3}{k_{21}} \quad (2.42p)$$

де k_{21} - коефіцієнт приведення струму ротора до струму РО.

Комплекс струму робочої обмотки статора двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності (2.33) з урахуванням (2.29, 2.31, 2.32) для номінального навантаження визначається виразом:

$$I_{1n} = I_{1na} + jI_{1np} = I_{1n} (\cos \varphi_{nж} + /-j \sin \varphi_{nж}) \quad (2.43)$$

де:

$$I_{1na} = I_{1xa} + I_{2na} + I_{3a} \quad (2.44a)$$

$$I_{1np} = I_{1xp} + I_{2np} - I_{3p} \quad (2.44p)$$

$$I_{1n} = \sqrt{I_{1na}^2 + I_{1np}^2}$$

I_{1na}, I_{1np} - активна і реактивна складові струму робочої обмотки при номінальному навантаженні двигуна.

З урахуванням викладеного, еквівалентна комплексна струмова навантаження статора асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності визначається сумою:

$$A_{1c} = A_1 + A_3 = \frac{10N_{n1}Z_1I_{1n}}{\pi D_1a_1} + \frac{10N_{n3}Z_1I_3}{\pi D_1a_3} \quad (2.45)$$

де A_1, A_3 - комплекси струмових навантажень від робочої і компенсаційної обмоток. При числі паралельних гілок $a_1=a_3$, з урахуванням приведення струму компенсаційної обмотки до струму робочої обмотки, еквівалентна струмова навантаження статора запишеться виразом:

$$A_{1c} = \frac{10N_{n1}Z_1}{\pi D_1a_1} ((I_{1na} + I_{3a}) + j(I_{1np} + I_{3p})) \quad (2.46)$$

Модулі еквівалентної лінійної струмового та теплового навантажень статора обчислюються за формулами:

$$A_{1c} = \frac{10N_{n1}Z_1}{\pi D_1 a_1} \sqrt{(I_{1na} + I_{3a})^2 + (I_{1np} + I_{3p})^2} \quad (2.47)$$

$$W_{1c} = A_{1c} J_1 \quad (2.48)$$

Модулі лінійної струмового та теплового навантажень ротора АД з ІКРП можуть бути обчислені за формулами:

$$A_2 = \frac{10N_{n2}Z_2}{\pi D_2 a_2} \sqrt{I_{2na}^2 + I_{2np}^2} \quad (2.49)$$

$$W_2 = A_2 J_2 \quad (2.50)$$

Отримані рівняння (2.45-2.50) використовуються в методиці електромагнітного розрахунку АД з ІКРП для вибору класу нагрівостійкості ізоляції.

2.3. Розрахунок ємності компенсуючого - конденсатора для асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності та розробка експериментальної схеми дослідження

При створенні енергозберігаючого асинхронного двигуна з індивідуальною компенсацією реактивної потужності виникає задача визначення ємності компенсуючого конденсатора. З одного боку ємність компенсуючого конденсатора повинна бути достатньою для повної або бажаного ступеня компенсації реактивної індуктивної потужності (отримання бажаного $\cos\varphi$), споживаючої АД з електромережі при заданому діапазоні навантажень прикладених до його валу. З іншого боку - ємність компенсуючого конденсатора повинна бути мінімально можливою з точки зору зменшення струму і електричних втрат в компенсаційній обмотці АД. При експлуатації АД з ІКРП в системі ПЧ-АД з ІКРП, тобто в умовах регулювання швидкості обертання зміною частоти, змінюються реактивні потужності індуктивних і ємнісних елементів двигуна. Тому ємність компенсуючого конденсатора, яка є оптимальною для номінальної частоти живлячої напруги стає не оптимальною при частотах, що відрізняються від номінальної. Це пояснюється тим, що

реактивна потужність компенсуючого конденсатора пропорційна частоті струму, а реактивна потужність індуктивних елементів АД - обернено пропорційна частоті.

Крім того, оскільки реактивна потужність компенсуючого конденсатора пропорційна квадрату напруги на компенсаційній обмотки АД з ІКРП, її величина залежить від коефіцієнта трансформації між робочою і компенсаційною обмотками, схеми з'єднання обмоток один з одним та компенсуючим конденсатором. У цій частині дипломної роботи вирішується завдання отримання аналітичної залежності величини ємності компенсуючого конденсатора в функції частоти живлячої напруги, параметрів схеми заміщення АД з ІКРП, величини навантаження, прикладеної до його валу. Для вирішення задачі розроблена схема підключення конденсаторів до АД, представлена на рисунку 2.5.

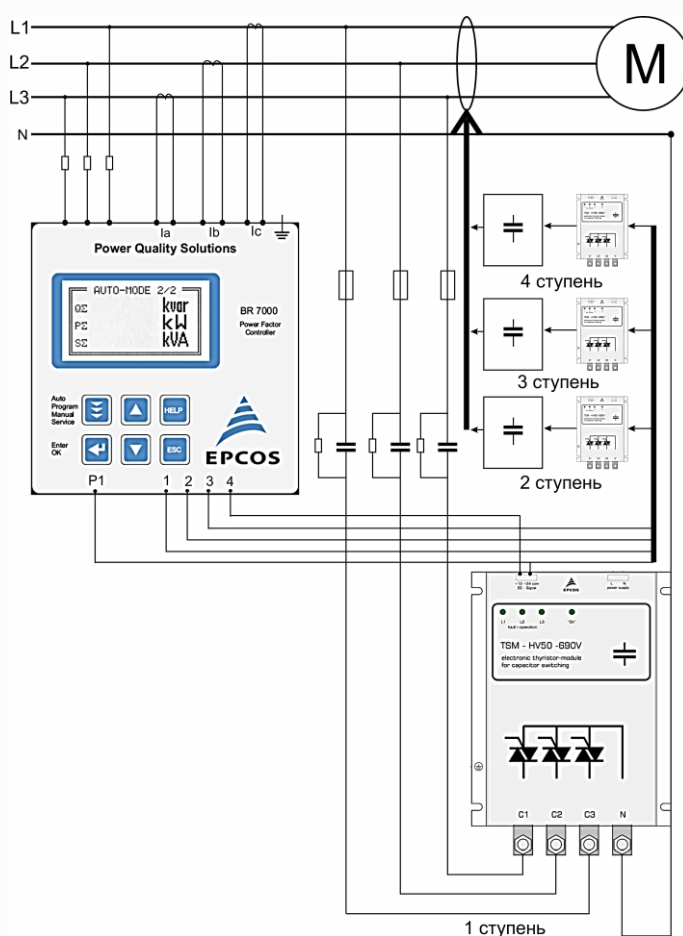


Рисунок. 2.5 – Схема підключення конденсаторів до АД

Компенсація реактивної потужності здійснюється за рахунок включення тиристорних ключів, які підключають в ланцюг статора конденсатори підключені за схемою «зірка» в 4 ступені, ваговим співвідношенням - 1, 2, 4, 8. Контроль активної і реактивної потужностей здійснює контролер BR7000, який управляє включенням ступенів у залежності від діючого ККД двигуна.

Для розрахунку ємності компенсуючи конденсаторів прийmemo ряд припущень:

- електромагнітна схема АД з ІКРМ симетрична і ненасичена;

АД з ІКРП живиться від синусоїдального симетричного джерела електричної енергії з регульованою частотою;

- навантаження, після прикладання білої тканини до валу АД з ІКРП, робочої частини механічної характеристики пропорційний ковзання;

- ємнісний опір, компенсуючого конденсатора набагато більше активного та індуктивного опорів від потоків розсіювання КО.

Для вирішення поставленої задачі звернемося до базової електромагнітної схеми АД з ІКРП, використовуваним в реальних системах електроприводів. На електромагнітній схемі, рисунка 2.6: робоча обмотка (РО) з'єднана в схему («зірка»); компенсаційна обмотка (КО) з'єднана в схему «зірка»; компенсуючий конденсатор (С) з'єднаний в схему «зірка»; нульові точки. КО і С з'єднані між собою; електричний (потенційний) зв'язок між обмотками РО, КО і обмоткою ротора (ОР) відсутній, тобто зв'язок між усіма обмотками трансформаторна (Т).

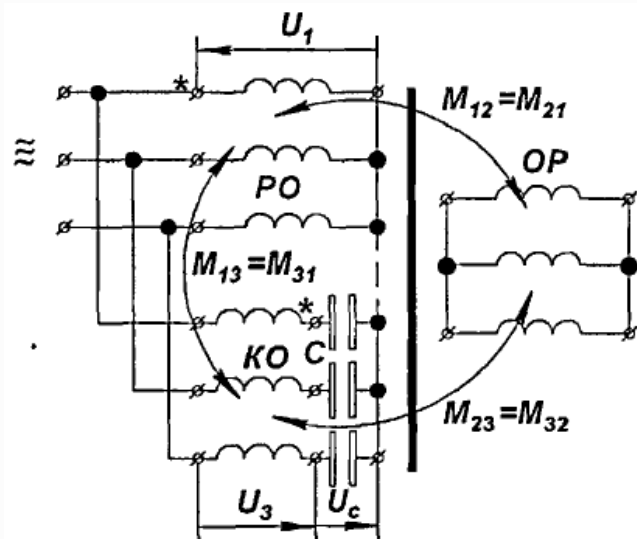


Рис. 2.6 - Електромагнітна схема АД з ІКРП

Для схеми на рисунку 2.6 фазні напруги на компенсуючому конденсаторі обчислюються рівністю:

$$U_c = U_3 = (1 + k_T)U_1 \quad (2.51)$$

Для розрахунку пропонується використати звичайний АД з коротко замкнутим ротором, в якому замість компенсаційної обмотки будуть використовуватися реактори в кожній фазі. Для визначення ємності компенсуючого конденсатора, що забезпечує отримання бажаного ступеня компенсації реактивної потужності АД з ІКРП, тобто отримання бажаного зсуву фаз між напругою живлення і струмом, споживаним асинхронним двигуном з електромережі, скористаємося відомим відношенням, що визначає кількісний зв'язок між зсувом фаз, активної і реактивної потужності електроспоживачів:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{ж}} = \frac{(Q_{1\text{э}} - Q_{\text{с}})}{P_{\text{э}}} \quad (2.52)$$

де $Q_{1\text{э}}$ - еквівалентна реактивна потужність індуктивних елементів електроспоживачів; $Q_{\text{с}}$ - реактивна потужність ємнісних елементів електроспоживачів; $P_{\text{э}}$ - еквівалентна активна потужність електроспоживачів; $\varphi_{\text{ж}}$ - бажаний кут зсуву початкових фаз напруги і струму електроспоживачів.

З рівняння (2.52) реактивна потужність ємнісного характеру, необхідна для компенсації реактивної індуктивної потужності, запишеться виразом:

$$Q_{\text{с}} = Q_{1\text{э}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{ж}} P_{\text{э}} \quad (2.53)$$

Стосовно АД з ІКРП реактивні і активні потужності можуть бути записані відношеннями

$$Q_{L\text{э}} = \frac{U_{L\text{э}}^2}{x_{L\text{э}}} = \frac{U_1^2 \sin^2 \varphi_{\text{э}}}{x_{L\text{с}}}; \quad Q_{\text{с}} = \frac{U_{\text{с}}^2}{x_{\text{с}}} \quad (2.54)$$

$$P_{\text{э}} = \frac{U_{R\text{э}}^2}{R_{\text{э}}} = \frac{U_1^2 \cos^2 \varphi_{\text{э}}}{R_{\text{э}}} \quad (2.55)$$

де U_1 - фазна напруга двигуна; $x_{L\text{э}}$ - еквівалентний індуктивний опір двигуна; $x_{\text{с}}$ - ємнісне опір компенсуючого конденсатора; $R_{\text{э}}$ - еквівалентний активний опір,

пропорційний теплових втрат і навантаження, прикладеної до валу двигуна; φ_3 - еквівалентний кут зсуву початкових фаз напруги і струму електроспоживачів.

З рівняння (2.53) з урахуванням (2.54-2.55) ємнісний опір компенсуючого конденсатора виразиться співвідношенням:

$$X_c = \frac{U_c^2 R_3 X_{L3}}{R_3 U_{1H}^2 \sin^2 \varphi_3 - X_{L3} U_{1H}^2 \cos^2 \varphi_3 \operatorname{tg} \varphi_{ж}} \quad (2.56)$$

або, з урахуванням $X_c = 1/2\pi f_1 C$; $X_{L3} = 2\pi f_1$, $\sin \varphi_3 = X_{L3} / \sqrt{R_3^2 + X_{L3}^2}$,

$\cos \varphi_3 = R_3 / \sqrt{R_3^2 + X_{L3}^2}$ і рівнянь, що визначають співвідношення між живлючою двигун напругою U_1 і напругою U_c на компенсуючому конденсаторі, ємність останнього для електромагнітних схем, запишеться виразом:

$$C = \frac{1}{2\pi f_1 (1+k_T)^2} \left(\frac{2\pi f_1 L_3 - R_3 \operatorname{tg} \varphi_{ж}}{R_3^2 + 4\pi^2 f_1^2 L_3^2} \right) \quad (2.57)$$

Для отримання повної компенсації реактивної потужності індуктивного характеру, тобто одержання $\varphi_{ж}=0$, у виразі (2.57) складова $R_3 \operatorname{tg} \varphi_{ж}$ стає рівною нулю і вирази для визначення ємності компенсуючого конденсатора спрощуються. В отриманому рівнянні величини R_3 і L_3 можуть обчислюватись через параметри схеми заміщення АД з ІКРП, рисунок. 2.7, при відключеному ключі K і допущення $R_3=0$, $X_3=0$.

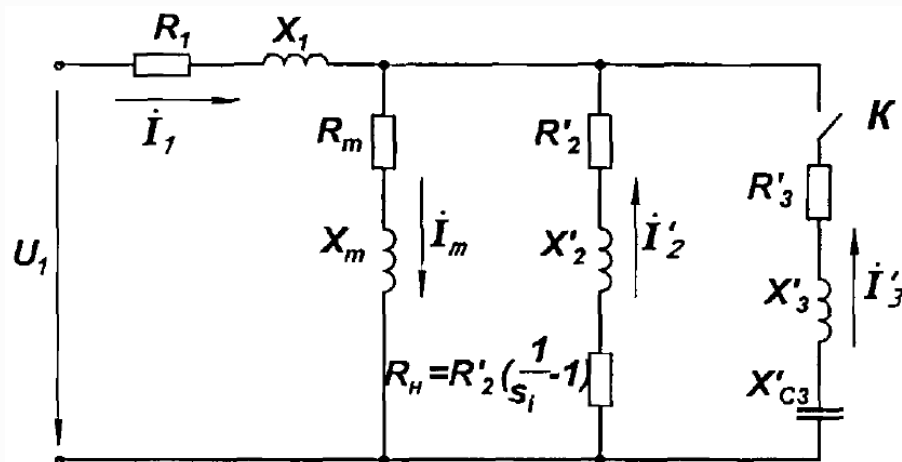


Рисунок 2.7 - Схема заміщення АД з ІКРП

$$R_3 = R_1 + \frac{\frac{R_2 Z_m^2}{s_1} + R_m Z_2^2}{Z_m^2 + Z_2^2 + 2\left(\frac{R_2 R_m}{s_1} + X_2 X_m\right)} \quad (2.58)$$

$$X_3 = X_1 + \frac{X_2 Z_m^2 + X_m Z_2^2}{Z_m^2 + Z_2^2 + 2(\frac{R_2 R_m}{s_1} + X_2 X_m)} \quad (2.59)$$

$$L_3 = \frac{X_3}{2\pi f_1}; \quad Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2}; \quad \sin \varphi_3 = X_3/Z_3; \quad \cos \varphi_3 = R_3/Z_3 \quad (2.60)$$

В рівняннях(2.3.8-2.3.10) $X_1 = 2\pi f_1 L_1$; $X_m = 2\pi f_1 L_m$; $X_2 = 2\pi f_1 L_2$, $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$; $Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2}$; $Z_2 = \sqrt{(R_2 + R_n)^2 + X_2^2}$
 $s_1 = s_{XX}/s_n/s_k$ ковзання, пропорційне навантаженню прикладаному до валу двигуна

$$s_k = \frac{C_1 R_2}{\sqrt{R_2 + (X_1 + C_1 X_2)^2}} \quad C_1 \approx 1 + X_1/X_m \quad (2.61)$$

Рівняння (2.60, 2.61) перевірені на працездатність методом моделювання електричної схеми заміщення АД з ІКРП типу типа CSM 280S/M-4 номінальною потужністю 151 кВт в програмі MATLAB. Моделювання виконано при наступних параметрах схеми заміщення: $f_{1H} = 60$ Гц , $U_{1H} = 440$ В, $R_1 = 0,058$ Ом, $L_1 = 0,000362$ Гн, , $R_m = 1$ Ом, $L_m = 0,045$ Гн, $R'_2 = 0,065$ Ом, $L'_2 = 0,0005$ Гн, $R'_3 = 0,0438$ Ом, $L'_3 = 0,000362$, $C'_3(C_3) = 366(52)$ мкФ. При моделюванні досліджували залежність ємності компенсуючого конденсатора в функції частоти живлячої напруги f_1 і різних коефіцієнтах завантаження двигуна. Результати моделювання представлені у вигляді графіку на рисунку 2.8.

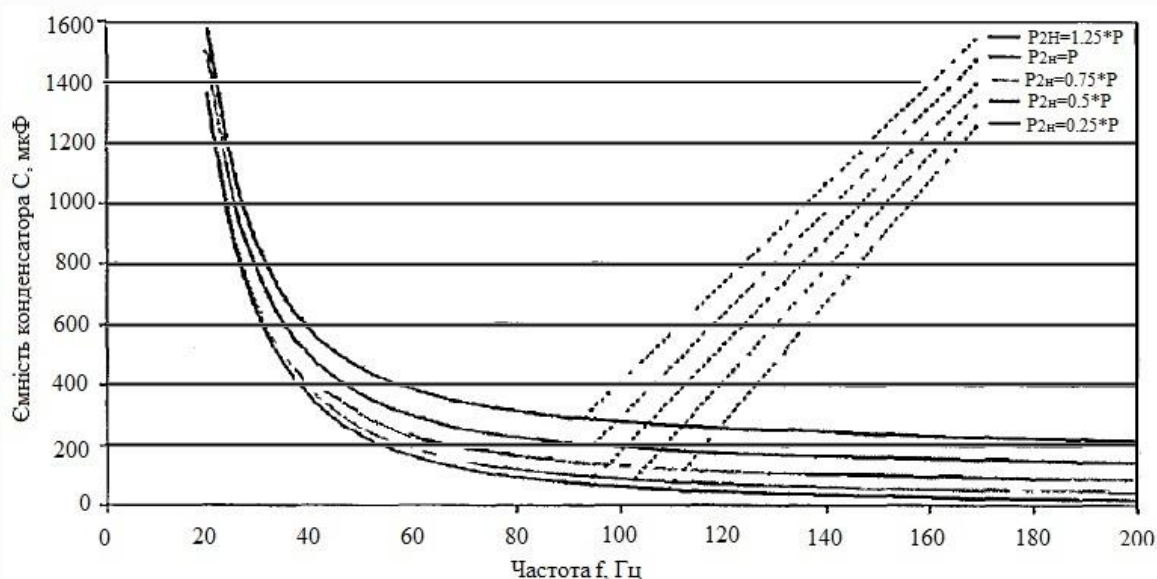


Рисунок 2.8 – Результати моделювання функції $C(f_1)$ – залежність ємності компенсуючого конденсатора від частоти живлячої напруги, підтримуючий постійний $\cos \varphi$

Рівняння (2.57) може бути використаним для визначення величини ємності компенсуючого конденсатора АД з ІКРП при його проектуванні, при реконструкції традиційних асинхронних двигунів на АД з ІКРП, при дослідженнях робочих і механічних характеристик АД з ІКРП, які працюють в системі «ПЧ - АД з ІКРП».

2.4. Розробка математичного опису сталих режимів навантажень і електроспоживання нерегульованих і регульованих електроприводів насосних агрегатів на основі АД з ІКРП і ТАД

Математичний опис електроприводу «ПЧ-ЭАД» насосного агрегату уявімо складається з двох блоків рівнянь. Перший блок рівнянь описує безпосередньо енергетичні співвідношення насоса і трубопроводу, а другий блок- енергетичні співвідношення в його асинхронному електроприводі. Математичні співвідношення, що визначають енергетику насоса.

Рівняння опірно-видаткової характеристики насоса має вигляд:

$$H_i = H_\phi - S_\phi Q_i^2 \quad (2.62)$$

де H_i ; - напір насоса, м; H_ϕ - фіктивний напір при нульовій подачі насоса, тобто при $Q=0$; S_ϕ - гідравлічне фіктивне опір насоса; Q_i - подача насоса, м³/год. Залежність $H_i(Q_i)$ насоса може бути представлена графіком на рисунку 2.9.

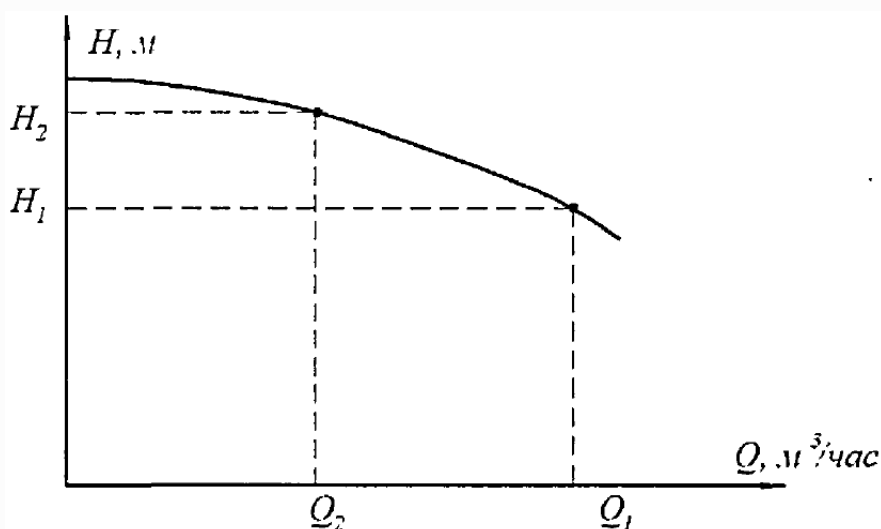


Рис. 2.9 - Опірно-витратна характеристика насоса

Характеристика $H_i(Q,)$ насоса приводиться у відповідних каталогах або знімається експериментально за відомою методикою. Параметри рівняння (2.62) визначаються з експериментальної залежності $H_i(Q,)$ за виразами:

$$S_\phi = (H_1 - H_2)/(Q_2^2 - Q_1^2) \quad (2.63)$$

$$H_\phi = H_1 + S_\phi Q_1^2 \quad (2.64)$$

Потужність насоса, визначається рівнянням:

$$N_i = \frac{\rho g Q_i H_i}{\eta_i 3600} \quad (2.65)$$

де ρ - щільність рідини, кг/м³; $g=9,81$ м/с² - прискорення вільного падіння; η_i - ККД насоса, о.е.; 3600 - кількість секунд в одній годині. ККД насоса залежить від частоти обертання робочого колеса, тобто від частоти обертання його електроприводу і від подачі. Від частоти обертання ККД визначається виразом:

$$\eta_{\max n_1} = 1 - \frac{1 - \eta_{\max n_H}}{(n_i)^{0,36}} \quad (2.66)$$

де $\eta_{\max n_H}$ - максимальний ККД насоса при номінальній частоті обертання; n_i - відносна частота обертання насоса, n - номінальна частота обертання робочого колеса насоса, об/хв., (наводяться в паспортних даних насоса). При постійній частоті обертання робочого колеса, ККД насоса залежить від подачі і визначається рівнянням:

$$\eta_{n_1} = [1 - (1 - Q_i)^{2,3}] \eta_{\max n_1} \quad (2.67)$$

де Q_i - відносна подача насоса; Вид графіків $\eta = f(n, Q)$ для різних величин подачі і частот обертання представлений на рисунку 2.10

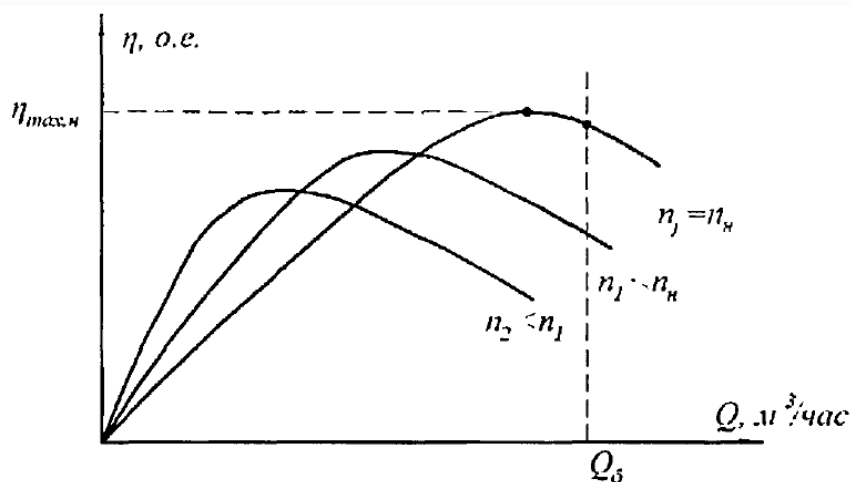


Рисунок. 2.10 – Залежність ККД насоса від подачі при різних частотах обертання

При роботі насоса з змінними частотами обертання і подачами його натиск визначається рівнянням:

$$H_{(n_j, Q_i)} = H_\phi \left(\frac{n_j}{n_H} \right)^2 - S_\phi Q_i \quad (2.68)$$

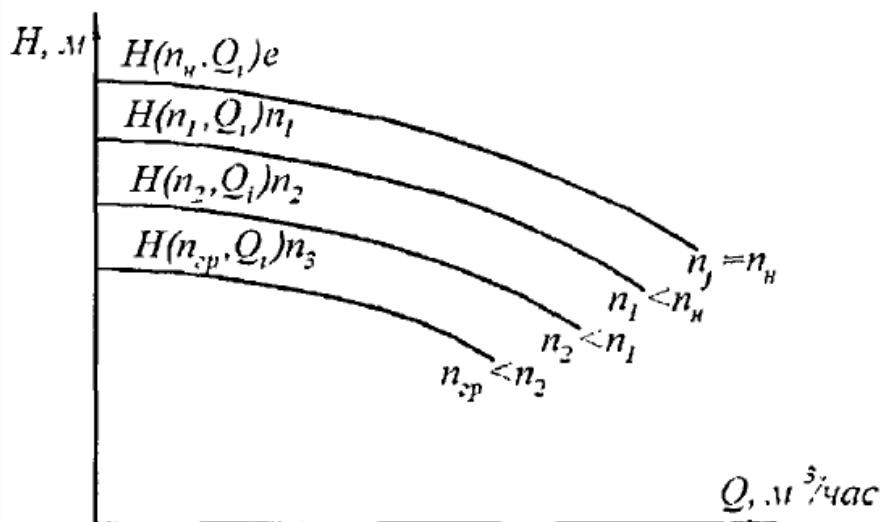


Рисунок 2.11 - Графіки опірно-витратних характеристик насоса при різних частотах обертання

З рисунку 2.11 видно, що при зменшенні частоти обертання штучні опірно-витратні характеристики насоса опускаються паралельно вниз по осі ординат від природної характеристики. опірно-витратна характеристика трубопроводу описується рівнянням:

$$H_{Ti} = H_n + S_T Q_i^2 \quad (2.69)$$

де H_{Ti} - напір на початку трубопроводу, м; $H_n = H_{ст}$ - напір протитиску або статичний напір обумовлений різницею геодезичних відміток подачі і прийому рідини, м; S_T - гідравлічний опір трубопроводу. На рисунку 2.11 представлені напірно-витратні характеристики трубопроводу для різних величин H_n . Напірно-витратні характеристики трубопроводу можуть бути розраховані при проектуванні або зняті експериментально за відомими методиками і представлені еквівалентированими у вигляді, зображеному на рисунку 2.12.

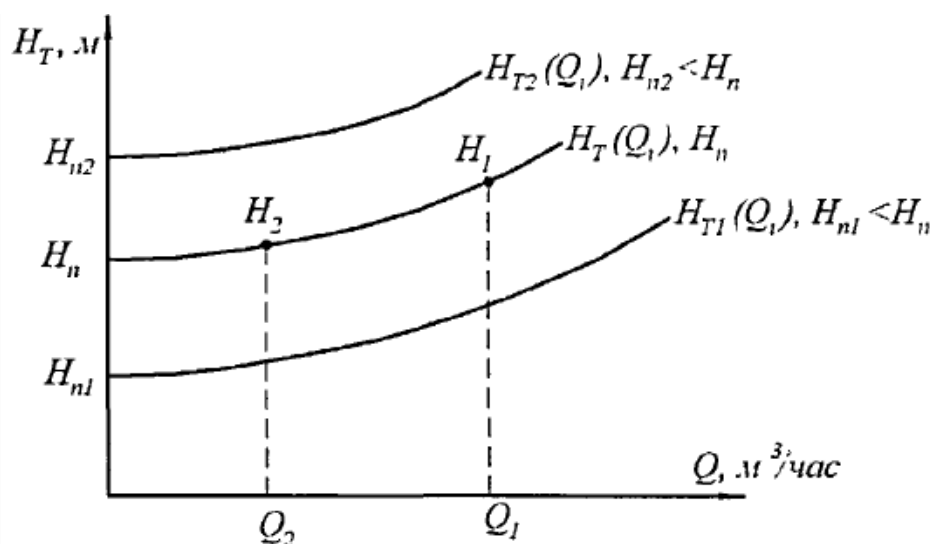


Рисунок 2.12 - Опірно-витратні характеристики трубопроводу для різних статичних напорів (протитиску)

З експериментальних залежностей трубопроводу його гідравлічний опір визначається відношенням:

$$S_T = (H_1 - H_2)/(Q_1^2 - Q_2^2) \quad (2.70)$$

При роботі насоса з подачею рідини в трубопровід величина подачі від частоти обертання визначається на підставі спільного рішення рівнянь (2.68) і (2.70) щодо Q і представляється рівнянням:

$$Q_i = Q_6 \sqrt{\frac{(n_j/n_H)^2 - (H_n/H_\phi)}{1 - (H_n/H_\phi)}} \quad (2.71)$$

Рівняння (2.71) показує, що подача насоса залежить як від частоти обертання робочого колеса, так і від протитиску, обумовленого роботою інших насосів або статичної складової. Спільне рішення рівнянь напірної характеристики насоса (2.61) і трубопроводу (2.68) щодо частоти обертання робочого колеса насоса дозволяє отримати залежність:

$$n_j = n_u \sqrt{\frac{H_n}{H_\phi} + \left(1 - \frac{H_n}{H_\phi}\right) \left(\frac{Q}{Q_6}\right)^2} \quad (2.72)$$

Спільна робота системи «насос-трубопровід» визначається точкою (А) перетину опірно-витратних характеристик насоса і трубопроводу. На рисунку 2.13 зображені графіки опірно-витратних характеристик при спільній роботі системи «насос-трубопровід» при повністю відкритій засувці

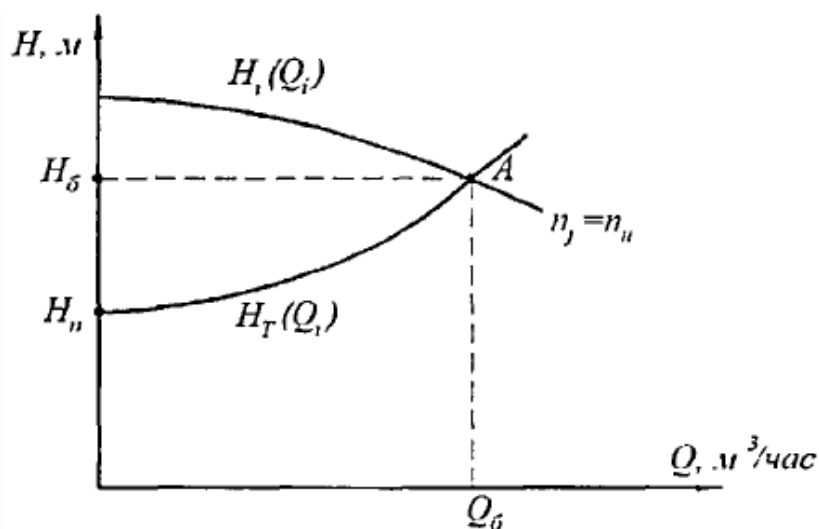


Рисунок 2.13 - Графіки опірно-витратних характеристик при спільній роботі системи «насос-трубопровід» при повністю відкритій засувці

При моделюванні роботи насосного агрегату необхідно враховувати методи регулювання подачі рідини. Регулювання подачі насоса можливо наступними методами:

- зміною опору трубопроводу, тобто прикриттям засувки, при незмінній частоті обертання робочого колеса (метод дроселювання);
- зміною частоти обертання робочого колеса при повністю відкритій засувці (регулювання швидкістю обертання електроприводу);
- і зміною частоти обертання робочого колеса насоса і дроселюванням. Спільна робота насоса і трубопроводу при регулюванні подачі дроселюванням - прикриттям засувки, пояснюється рисунком 2.14. У цьому методі регулювання подачі зі збільшенням прикриття засувки робоча точка А системи «насос-трубопровід» зміщується по характеристиці насоса вліво: точки А, А". При цьому напір насоса зростає. Робота насоса з перевищенням напору (тиску) веде до збільшення електроспоживання.

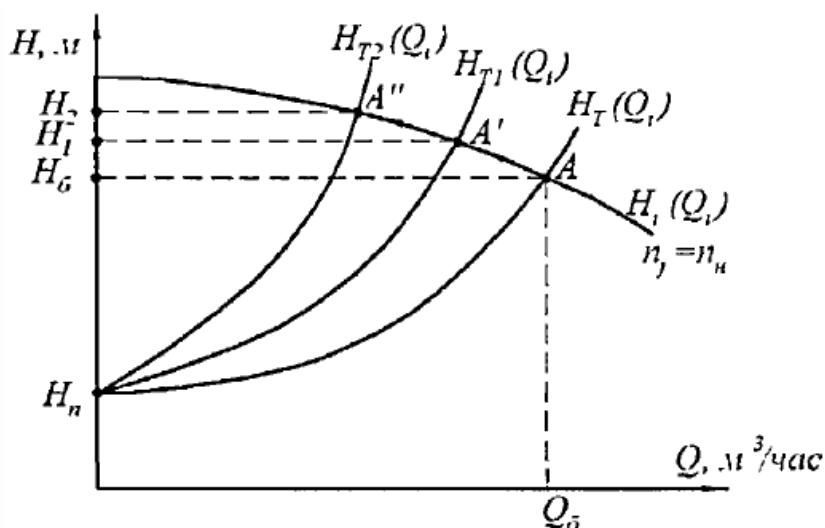


Рисунок 2.14 - Опірно-витратні характеристики насоса і трубопроводу при регулювання подачі дроселюванням трубопроводу;

При регулюванні подачі насоса зміною частоти обертання робочого колеса при повністю відкритій засувці пояснюється рис. 2.15. При зменшенні частоти обертання робочого колеса насоса робоча точка A системи «насос-трубопровід» зміщується за характеристикою трубопроводу вниз і вліво. При цьому напір насоса знижується від H_0 до $H_{\min}$

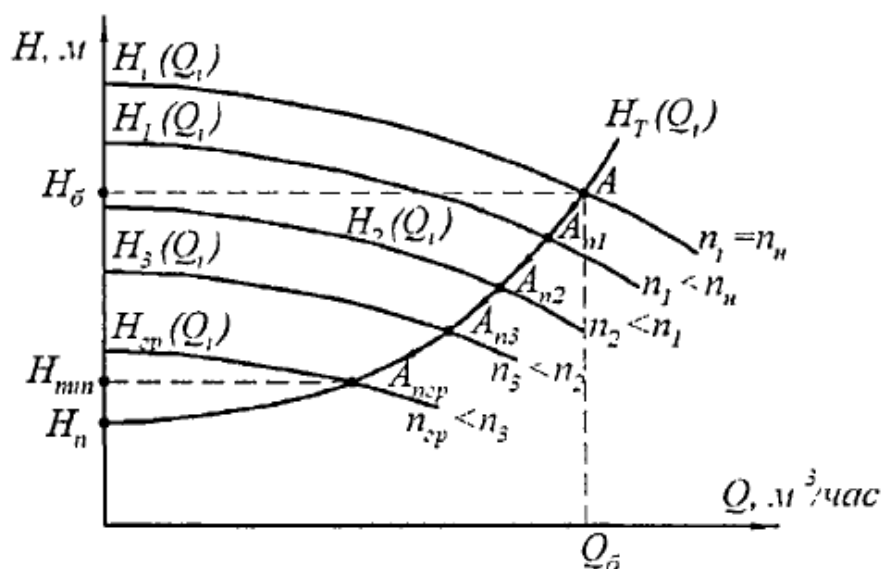


Рисунок 2.15 - Регулювання подачі насоса зміною частоти обертання робочого колеса при повністю відкритій засувці

Регулювання подачі зміною частоти обертання робочого колеса можливо до деякої граничної частоти обертання, при якій напір насоса $H_{\min}$ зрівняється з

напором підпору H_n . При частоті обертання насоса $\Pi; = \Pi_{гр}$ подача насоса стає рівною нулю. Гранична частота обертання визначається рівнянням

$$n_{cp} = n_H \sqrt{\frac{H_n}{H_\phi}} \quad (2.72)$$

Регулювання подачі насоса і зміною частоти обертання робочого колеса і дроселюванням пояснюється рис.2.16.

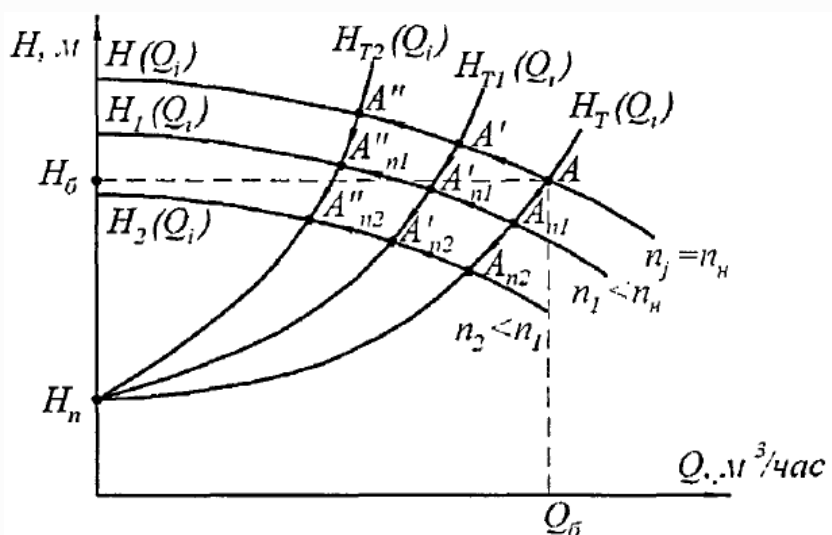


Рис 2.16 - Опірно-витратні характеристики насоса і трубопроводу при регулюванні подачі і частотою обертання і дроселюванням

При роботі насосного агрегату в сталому режимі при подачі Q_i і частоті обертання n_j потужність на валу електродвигуна повинна бути дорівнює потужності насоса ,тому при моделюванні приймають:

$$P_{2i} = N_{Q_i n_i} \quad (2.73)$$

Електродвигун долає момент опору насоса, який визначається відношенням:

$$M_{ci} = \frac{N_{Q_i n_i}}{\omega_i} \quad (2.74)$$

або з урахуванням (2.74) і (2.73)

$$M_{ci} = \frac{\rho g Q_i H_i}{\eta_i \omega_i 3600} \quad (2.75)$$

В відносних одиницях:

$$M_{cij} = \frac{Q_i H_i}{\eta(Q_i n_i) \omega_i} \quad (2.76)$$

Подача та напір залежать від частоти обертання, тому дійсним є рівність:

$$\frac{M_{cl}}{M_{ci}} = (n_i/n_H)^k \quad (2.77)$$

де k - коефіцієнт, що характеризує крутизну напірно-видатковою характеристики насоса; для реальних насосів ; при роботі насоса з $N_p = N_{ст} = 0$ коефіцієнт $k=2$. При частоті обертання насоса нижче граничної частоти, момент опору:

$$M_{ci} = (M_0 - M_m)(n_i/n_H)^2 + M_m \quad (2.78)$$

де M_0 - момент опору насоса при закритій засувці, $Q_j = 0$; M_t – момент опору, обумовлений силами тертя; $M_m = i(0,05-0,07)M_H$.

Таким чином, механічна характеристика насоса при моделюванні описується рівняння (2.77) і (2.78) і представляється графіком, рисунок 2.17

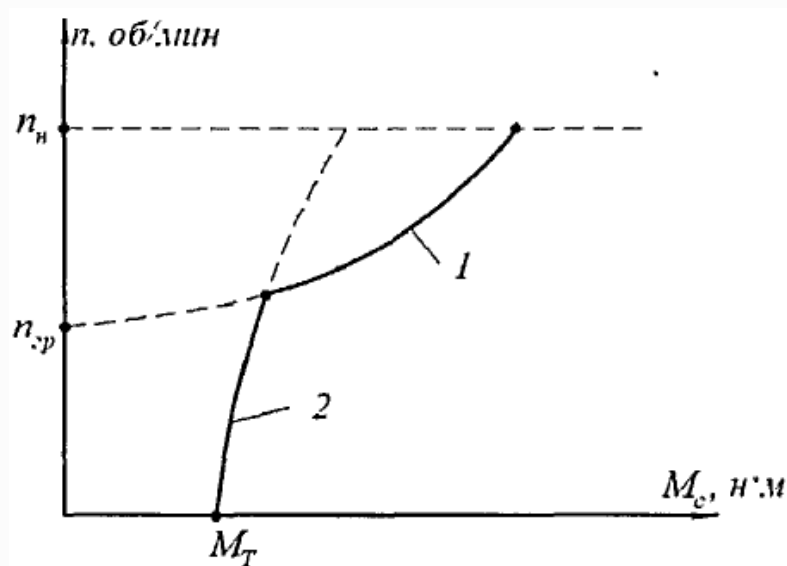


Рис. - 2.18 Механічна характеристика насоса

Ділянка 1 механічної характеристики насоса описується рівнянням (2.77), а ділянка 2 - рівняння (2.78).

При моделюванні насосних агрегатів рівняння (2.71-2.78) використовуються відомою методикою визначення електроспоживання. Однак ці рівняння не описують енергетичні процеси, що мають місце в електроприводах насосних агрегатів. У зв'язку з цим, далі розробляються рівняння, що описують електричну частину насосного агрегату. Блок рівнянь, що описують електричну частину насосного агрегату. Ці рівняння засновані на математичних співвідношень, що визначають робочі та механічні характеристики двигуна. Робочі і механічні характеристики

виходять з рішення електричних схем заміщення ТАД і ЭАД. Корисна потужність на валу АД (P_{2i}) визначається рівнянням :

$$P_{2i} = m I_2^2 R_{Hi} \quad (2.79)$$

де m - число фаз; I_2^2 - струм ротора, приведений до обмотки статора; R_{Hi} - опір, пропорційний потужності насоса, прикладеної до валу АД. Математичні моделі, використовувані для оцінки електроспоживання насосними агрегатами, включає в себе рівняння, за якими розраховуються електричні схеми заміщення ТАД і АД з ІКРП.

Механічне навантаження насоса, прикладена до валу двигуна, в електричних схемах заміщення еквівалентується із змінним у функції від потужності насоса активним опором R_{Hi} . Механічну потужність асинхронного двигуна можна уявити відомим рівнянням:

$$P_{2i} = m_1 I_{2i}^2 R_{2i} (1/s_i - 1) \quad (2.80)$$

Виразимо механічну потужність в вигляді

$$P_{2i} = m_1 U_{li}^2 \frac{R_{Hi}}{(R_{Hi} + R_k)^2 X_k^2} \quad (2.81)$$

де $R_k = R_1 + R_2$ $X_k = X_1 + X_2$ активний та індуктивний опір короткого замкнення АД.

Опір R_{Hi} обчислюється рішенням квадратного рівняння:

$$R_{Hi} = \frac{m_1 U_{li}^2}{2P_{2i}} - R_k + \sqrt{\left(\frac{m_1 U_{li}^2}{2P_{2i}} - R_k\right)^2 - Z_k^2} \quad (2.82)$$

де $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{R_k^2 + (2\pi f_{li}(L_1 + L_2))^2}$ - модуль короткого замкнення АД; $L_{li} = L_{IH}$ - індуктивності обмоток статора, ротора при $f_{li} = f_{IH}$.

При моделюванні режимів роботи електроприводів насосних агрегатів для рішення рівняння (2.82) механічна потужність двигуна приймається рівною механічної потужності насоса, тобто $P_{2i} = N_{2i}$. Причому, при моделюванні нерегульованих електроприводів напруга і частота струму джерела живлення приймаються рівними номінальним значенням:

$$U_{li} = U_{IH}; \quad f_{li} = f_{IH} \quad (2.83)$$

Для регульованого електроприводу ПЧ-АД, при визначенні $R_{нi}$ напруга і частота струму джерела живлення визначаються з урахуванням прийнятого закону зміни відношення $k=U/f$.

$$U_{li} = k_U U_{lH} \quad f_{li} = k_{fi} f_{lH} \quad (2.84)$$

Отримаємо рівняння, що зв'язують між собою частоту обертання робочого колеса насоса і вихідні параметри ПЧ. Частота обертання робочого колеса насоса, рівна частоті обертання ротора АД при навантаженні P_{2i} , прикладеної до валу, на лінійній робочій частини механічній характеристиці, може бути описана рівнянням:

$$n_{1i} = n_{2i} / (1 - s_H P_{2i} / P_{2H}) \quad (2.85)$$

З іншого боку та ж величина обчислюється відомою формулою:

$$n_{1i} = 60 f_{li} / p \quad (2.86)$$

Порівняємо (2.4.25) і (2.4.26)

$$n_{2i} / (1 - s_H P_{2i} / P_{2H}) = 60 f_{li} / p \quad (2.87)$$

Та виразимо частоту струму відношенням:

$$f_{li} = \frac{n_{2i} p}{60(1 - s_H P_{2i} / P_{2H})} \quad (2.88)$$

Відомо, що в залежності від характеру навантаження вихідні параметри ПЧ (напруга та частота) повинні мати певні стосунки. Для насосів і вентиляторів, можуть використовуватися відносини виду:

$$a) \frac{U_{li}}{U_{1H}} = \frac{f_{li}}{f_{lH}} \text{ или } k_U = k_f \quad \text{где } k_f = \frac{U_{li}}{U_{1H}} \quad (2.89)$$

$$б) \left(\frac{U_{li}}{U_{1H}}\right)^\beta = \left(\frac{f_{li}}{f_{lH}}\right)^\beta \text{ или } k_{U\beta} = k_{f\beta} \quad (2.90)$$

Енергетичні показники насосного агрегату моделюються для режимів: - подання, регульованою дроселюванням, при $n_j = const$. $U_{ii} = U_{iH}$, $f_n = f_{iH}$; - подання, що регулюється зміною частоти обертання насоса при повністю відкритій засувці.

3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

3.1. Характеристика процесу компенсації реактивної потужності в пускових режимах роботи АД

Пускові струми потужних АД з короткозамкненим ротором зумовлюють різке зниження напруги у вузлі мережі. Це, в свою чергу, призводить до збільшення тривалості пуску АД та зниження запасу стійкості вузлів навантажень. Одним із ефективних заходів підвищення рівня напруги під час пуску АД є динамічна компенсація реактивної потужності. Водночас для вибору силових елементів пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності в перехідних режимах необхідним є визначення їх оптимальних параметрів та оцінка ефективності процесу пуску АД [62–64]. Задача вибору оптимальних параметрів та оцінка ефективності роботи АД в перехідних режимах ускладнюється через нелінійність кривої намагнічування магнітопроводу АД та незавершеність теорії потужності в електричних колах з несинусоїдними формами напруги та струму. У зв'язку з цим відсутні еквівалентні пасивні параметри, які можна було б однозначно використовувати як розрахункові в пускових режимах АД, забезпечивши при цьому мінімальний вплив статичних характеристик вузлів навантажень.

Для моделювання розроблена схема в програмному пакеті MATLAB SIMULINK. Модель представлена на Додатку 1. За основу вибраний електродвигун насоса заборотної води CSM 280S/M-4 номінальною потужністю 150 кВт.

Блок з параметрами двигуна представлений на рисунку 3.1.

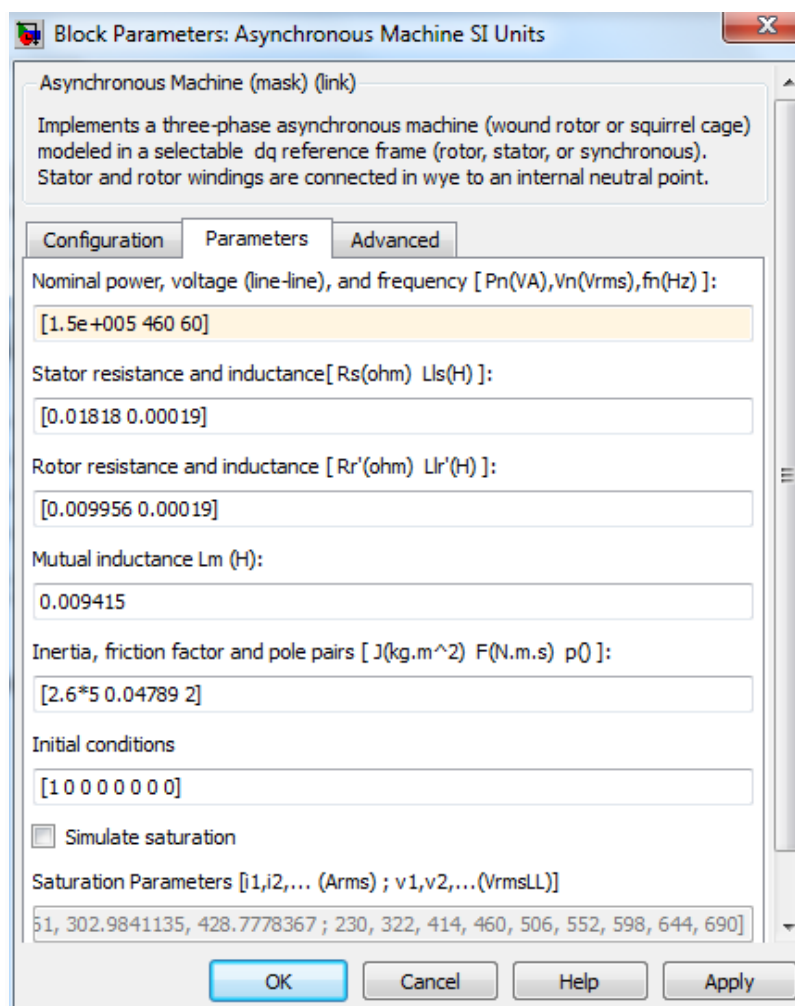


Рисунок 3.1 - Параметри блоку АД

Для вибраного двигуна розроблена насосна характеристика навантаження представлена на рисунку 3.2.

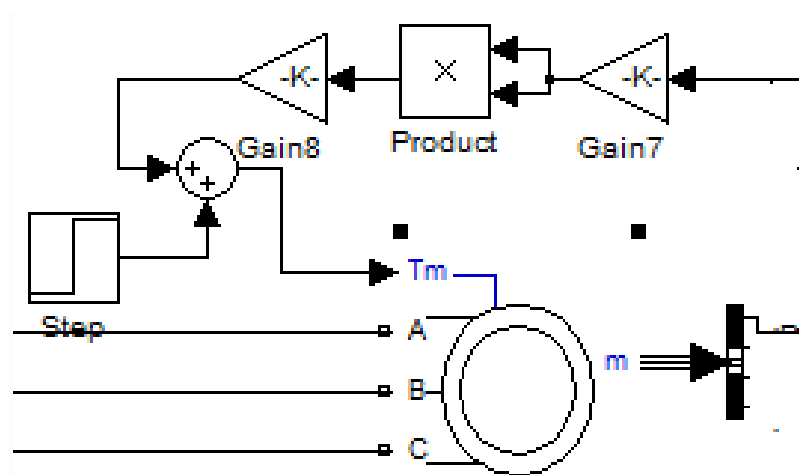


Рисунок 3.2 – АД з навантаженням

Моделюється перші 4 секунди роботи АД – пуск двигуна з половинним навантаженням та накид навантаження до номінального на 2,5 секунд. В результ

модельовання проаналізовані графіки залежності коефіцієнта потужності ТАД та АД з ІКРП, які зображені на рис. 3.3 Можемо зробити висновок, що в результаті компенсації вдалося значно підвищити коефіцієнт потужності(в межах 0.85) при пуску. Після накиду номінального навантаження на 2,5 секунді значення коефіцієнта досягає 0,92 в сталому режимі роботи двигуна.

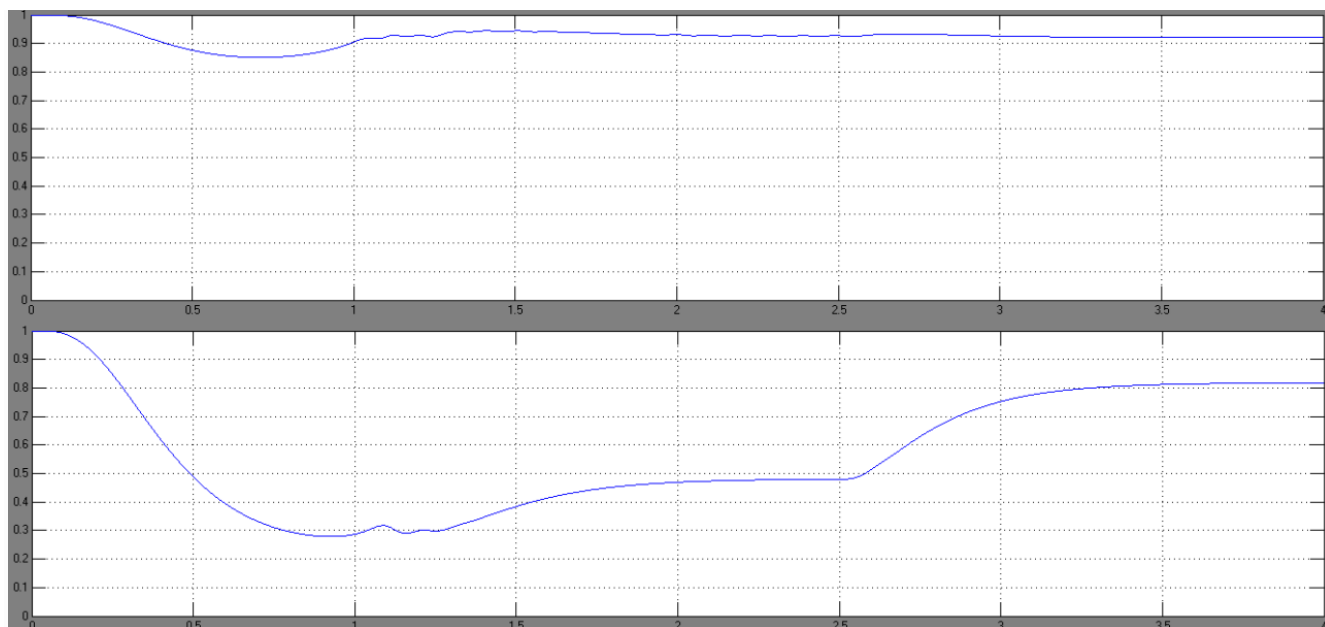


Рисунок - 3.3 Значення $\cos\varphi$ ТАД та АД з ІКРП

На рисунках 3,4 та 3,5 зображено залежності активної і реактивної потужностей в лінії живлення під час пуску АД при компенсації реактивної потужності.

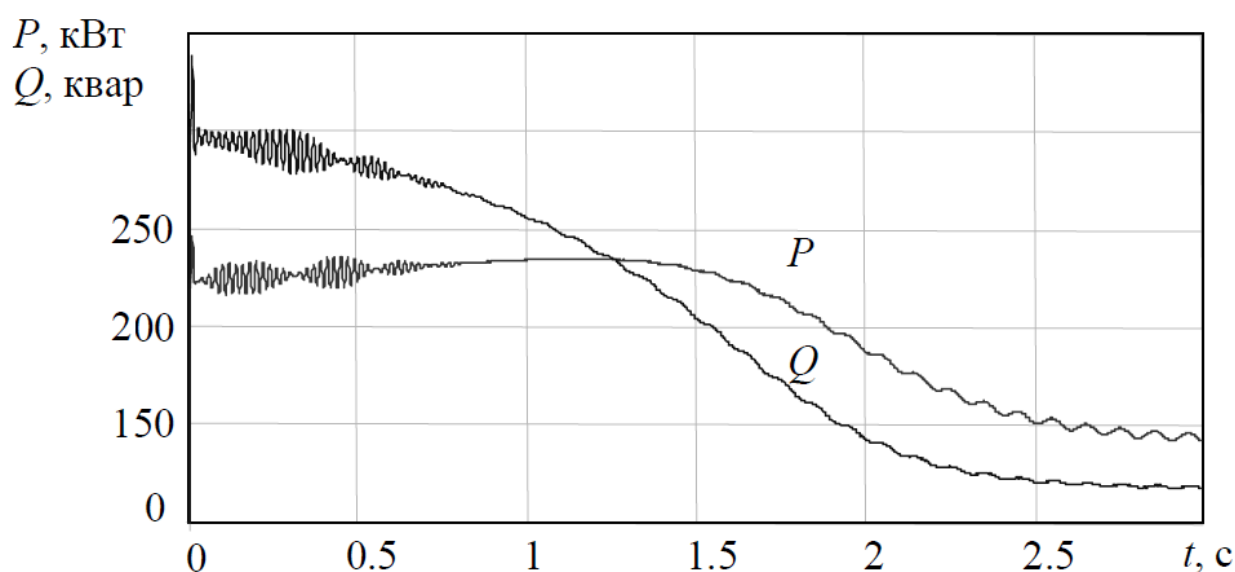


Рисунок -3.4 Залежності активної і реактивної потужностей в лінії живлення під час пуску ТАД

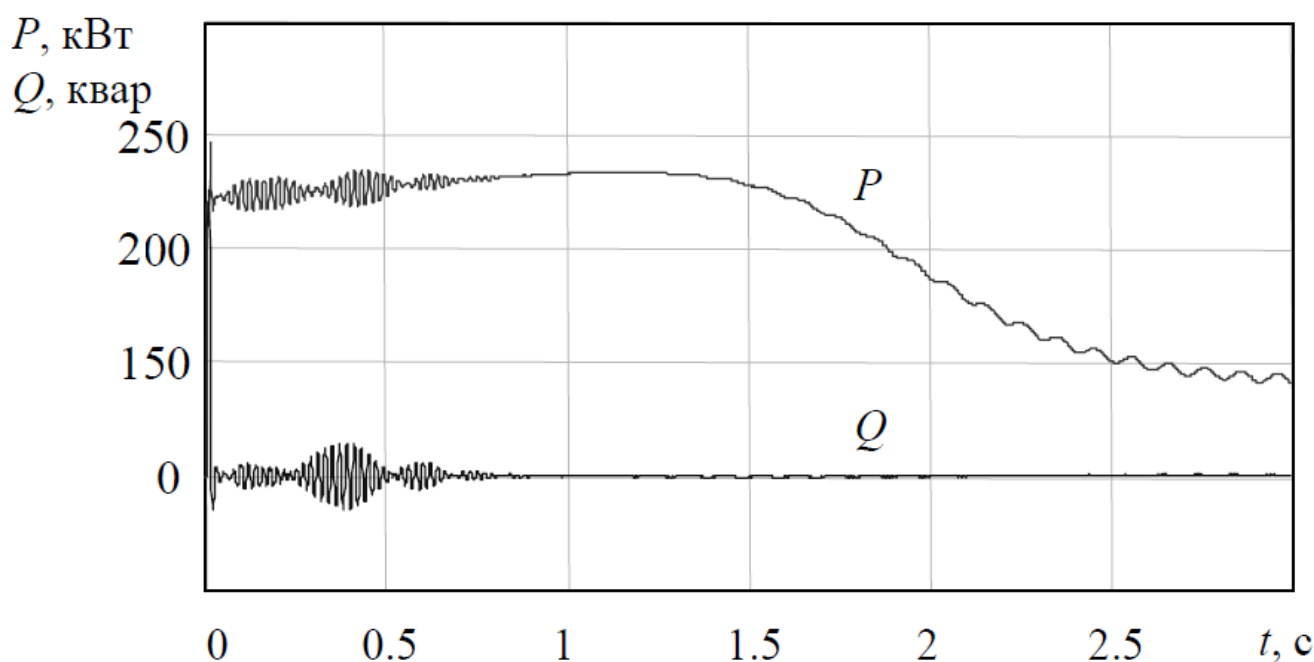


Рисунок - 3.5 Залежності активної і реактивної потужностей в лінії живлення під час пуску АД з ІКРП

З порівняння залежностей реактивних потужностей, зображених на рисунок 3.4 і на рисунок 3.5, випливає, що забезпечується повна компенсація реактивної потужності під час перехідних електромеханічних процесів. Використання реактивної провідності приводить до незначної перекомпенсації реактивної потужності при пуску АД за значної несинусоїдності напруги живлення або нелінійності АД. Використання реактивної провідності, визначеної на основі теорії Фрізе, приводить до ще більшої перекомпенсації реактивної потужності під час пуску АД і в змінному режимі навантаження.

Залежності струму в лінії під час пуску АД (рисунок 3.6) наглядно показує, що використання динамічної компенсації реактивної потужності приводить до зменшення струму в лінії (залежність 2) порівняно зі струмом до компенсації (залежність 1) практично вдвічі під час пуску.

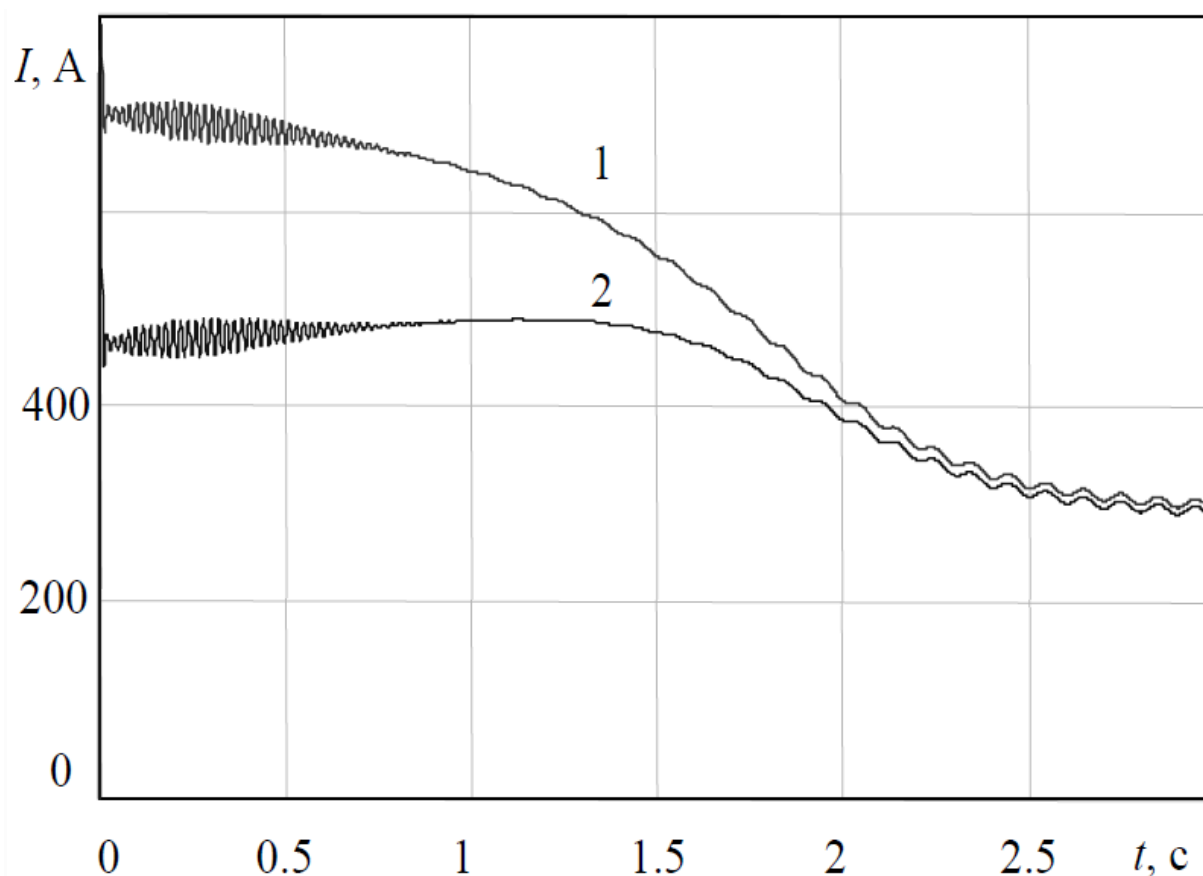


Рисунок - 3.6 Залежності струму в лінії під час пуску АД

Таким чином, динамічна компенсація реактивної потужності істотно покращує пускові режими і таких двигунів. Оскільки під час пуску двигунів змінюється період синусоїдного струму, то в процесі вимірювання активної та реактивної потужностей з використанням поточного інтегрування не вдається повністю усунути коливання. Коливання мають синусоїдну форму, а їх частота дорівнює частоті основної гармоніки. Ці коливання можна усунути шляхом повторного інтегрування на періоді.

3.2. Аналіз знижень напруги під час пуску асинхронних двигунів за динамічної компенсації реактивної потужності

Робота асинхронних двигунів (АД) під час їх пуску характеризується значним споживанням реактивної потужності, яке в деяких випадках перевищує споживання активної потужності. Пускові струми АД з короткозамкненим ротором

зумовлюють різке зниження напруги у вузлі мережі. Це, в свою чергу, призводить до зниження запасу стійкості вузлів навантажень. Зменшена напруга призводить додатково до зменшення продуктивності і часто ускладнює нормальну експлуатацію електроприводів, особливо їх пуск.

Розглянемо вплив наявних конденсаторних установок на значення напруг. На рисунку 3.7 наведена схема живлення вузла навантаження з вмиканням до виводів АД конденсаторної установки КУ. При пуску двигуна в живлячій лінії протікає струм, утворений векторною сумою пускового струму і струму конденсаторної установки. В лінії виникають втрати напруги, які впливають на процес пуску АД.

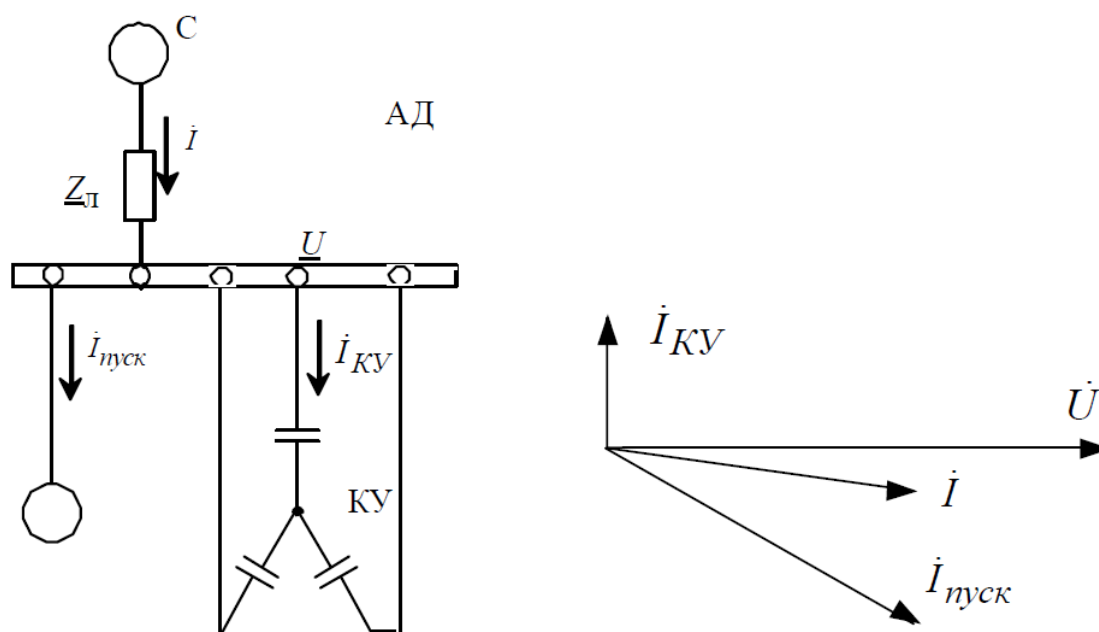


Рисунок - 3.7 Схема живлення вузла навантаження і векторна діаграма

Для врахування знижень напруги в математичних моделях АД використано ітераційний алгоритм визначення миттєвих напруг і струмів статора, згідно з яким нові значення α , β складових миттєвої напруги на статорі, визначають за попередніми (початковими) значеннями α , β складових миттєвих напруг. Під час пуску двигунів за синусоїдної напруги пусковий струм має практично синусоїдну форму, тому для визначення втрат напруги використано індуктивний опір.

На рисунку 3.8 зображено залежності реактивної складової спектральної провідності під час пуску АД за номінальної напруги живлення (крива 1) та у разі

зниження амплітудного значення напруги на 10 В (крива 2) і на 20 В (крива 3). Моделювання виконано шляхом розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь з використанням методу Рунге-Кутта четвертого порядку за номінальної напруги живлення і номінального моменту на валу двигуна.

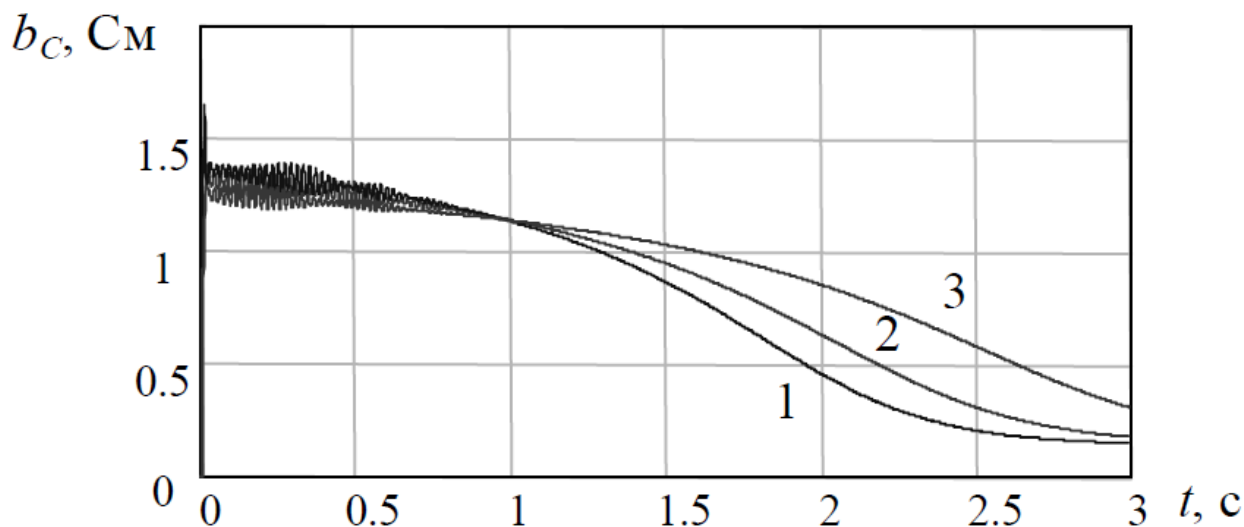


Рисунок 3.8 - Залежності спектральної реактивної провідності АД за номінальної напруги (крива 1) та у разі зниження напруги (криві 2 і 3)

В результаті моделювання отримані залежності напруги, представлений на рисунку 3.9

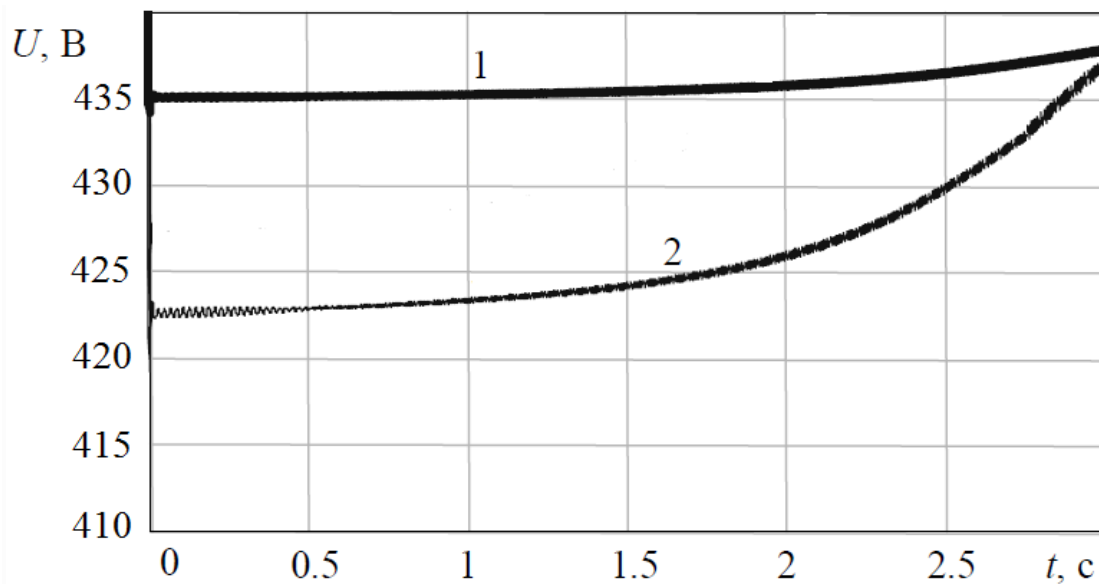


Рисунок - 3.8 Залежності напруги під час пуску (2-ТАД), (1-АД з ІКРП)

З графіку видно, що в АД з ІКРП значно менший просід напруги = 5В, що є значною перевагою.

3.3. Висновки до розділу 3

1. Проаналізовано процеси динамічної компенсації реактивної потужності в пускових режимах роботи асинхронних електроприводів з короткозамкненим та фазним ротором з використанням спектральних провідностей. Отримано критерії для оптимізації пускових режимів роботи та запропоновано метод контролю якості процесів пуску асинхронних електроприводів, в основу якого покладено спектральні провідності.

2. Розроблено математичну модель асинхронного двигуна, в якій враховано насичення і втрати в сталі, а в якості змінних стану використані струми статора та ротора. Нові математичні моделі електричних машин вигідно відрізняються від традиційних тим, що, незважаючи на ступінь деталізації фізичного процесу, їх застосування дозволить точніше визначати параметри керування під час перехідних процесів АД з короткозамкненим ротором, а також АД з фазним ротором. Спільне інтегрування рівнянь АД та мережі дає змогу детально досліджувати реальні процеси в системі.

3. На основі аналізу пускових режимів АД з короткозамкненим ротором, а також АД з фазним ротором з введенням активного опору в коло ротора показано, що під час пуску АД для керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності можуть бути використані спектральні параметри, які доцільно характеризувати їх поточними значеннями. Запропоновано критерій якості перехідних процесів АД, який на відміну від існуючих методів підвищує точність компенсації реактивної потужності та забезпечує підтримання напруги у вузлі електричної мережі.

4. Проаналізовано вплив динамічної компенсації реактивної потужності під час пуску АД з використанням спектральних провідностей як критеріїв якості пускових режимів на зменшення втрат напруги і зменшення тривалості пуску.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ІНДИВІДУАЛЬНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Для дослідження фактичної енергоефективності електроприводів насосних агрегатів, створених за системою ТАД та АД з ІКРП, проведено експеримент на повномасштабному тренажері СЕЕС з електричною схемою, представленою на рисунку 4.1

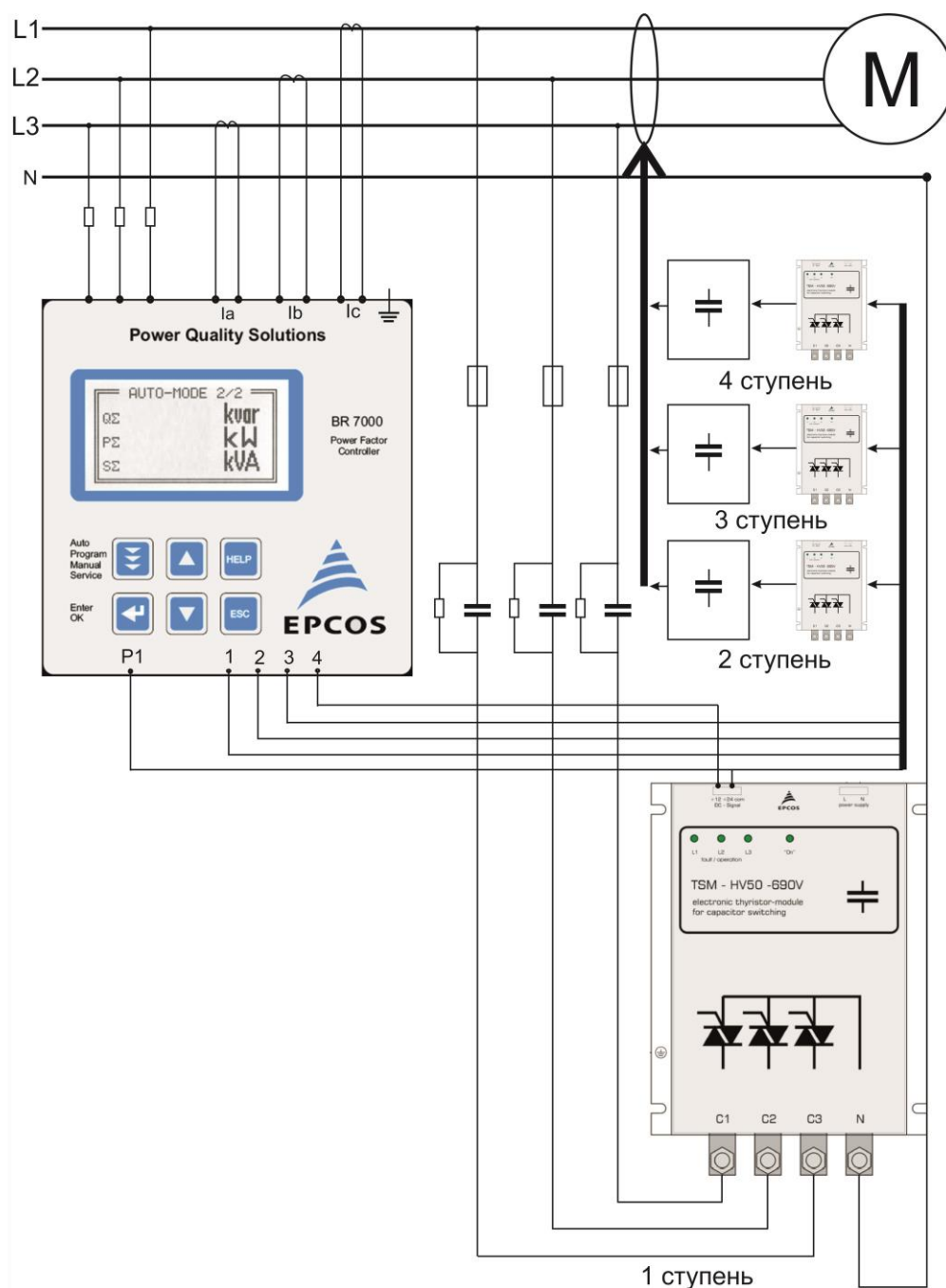


Рисунок 4.1 - Схема експериментальної установки

В результаті експерименту отримані осцилограми для двигуна дані, якого представлені на рисунку 4.2

Таблиця 4.1 Дані асинхронного двигуна в чисельнику ТАД, в знаменнику – АД з ІКРП

№ п/п	Виміряно							
	U_1 , В	I_1^* , А	I_3 , А	P_1^* , Вт	Q_1^* , ВАд	S_1^* , ВА	$\cos\varphi^*$, о.е.	n_2 , об/мин
1	225	$\frac{0,91}{1,20}$	0,26	$\frac{607}{674}$	$\frac{87}{453}$	$\frac{614}{812}$	$\frac{0,93}{0,83}$	2915

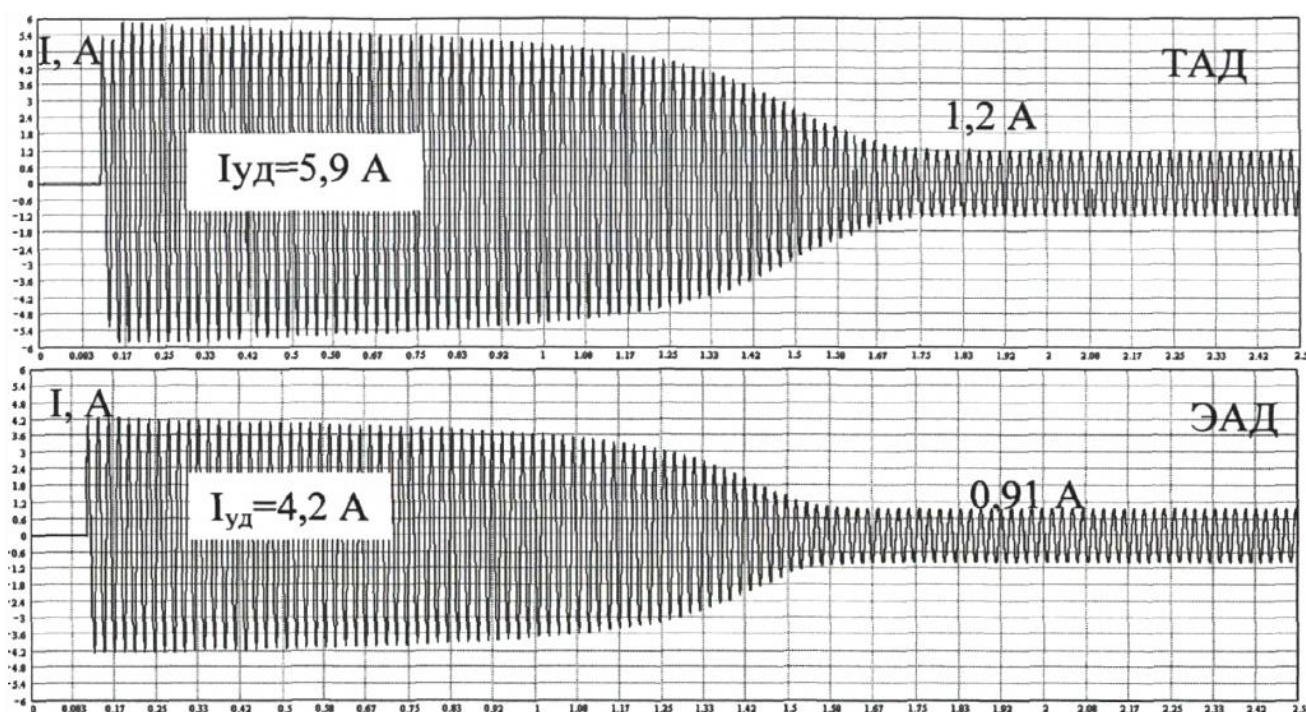


Рисунок 4.2 - Пускові струми ТАД та АД з ІКРП

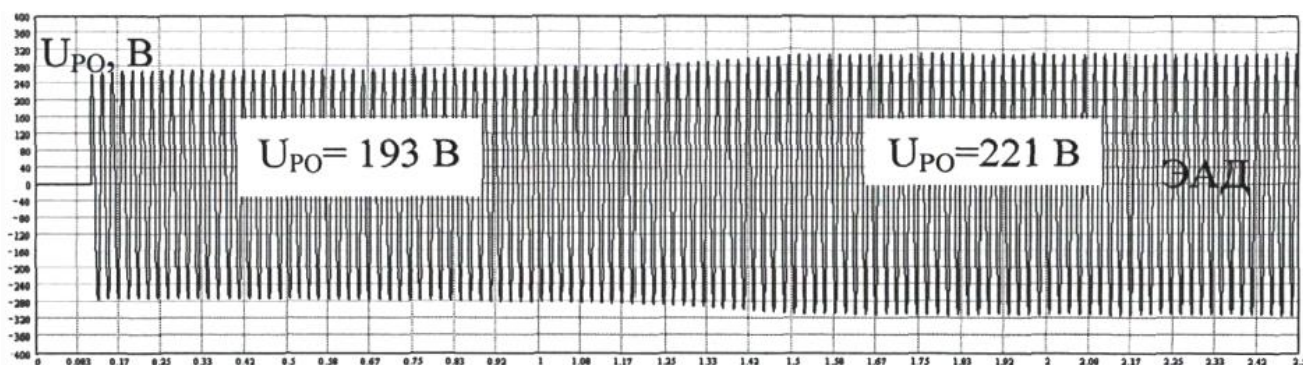


Рисунок 4.3 - Падіння напруги при пуску АД з ІКРП

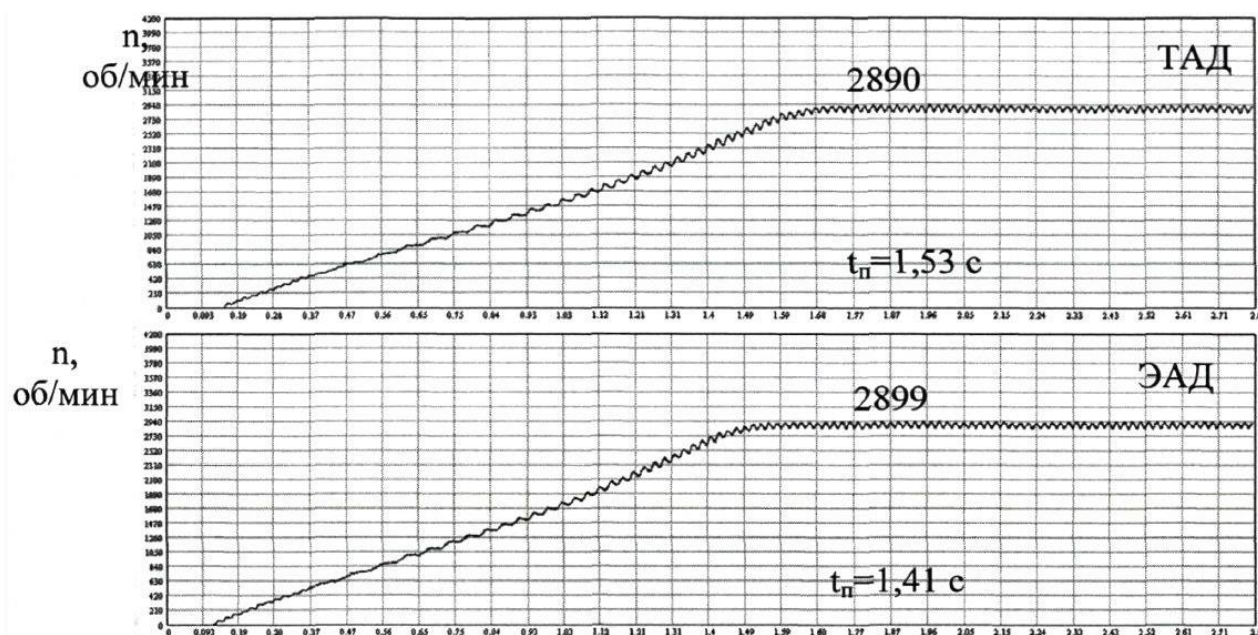


Рисунок 4.4 - Розгін ТАД та АД з ІКРП

Порівняльний аналіз сталих струмів електроприводів на основі ТАД і АД з ІКРП, показує, що струм електроприводу на основі АД з ІКРП (0,91 А) менше струму електропривода на основі ТАД (1,2 А) на 24,2 %. Таким чином, результати експериментальних досліджень нерегульованих електроприводів на основі АД з ІКРП і ТАД насосних агрегатів показують, що електропривод на основі АД з ІКРП є, енергозберігаючим, більш енергоефективним, ніж електропривод, на основі ТАД. Зіставлення середніх значень зниження питомих витрат електроенергії, таблиці. 4.1, отриманих методом математичного моделювання та експериментальних методом, а також застосування теорії подібності, показують досить гарну адекватність розробленої моделі та методу моделювання електроспоживання електроприводами насосних агрегатів. Зниження питомої витрати електроенергії електроприводів на основі АД з ІКРП, отримане методом моделювання (9,5 %) і експериментальним методом (13,3 %) відрізняються не більше ніж на 3-4 %, що є цілком прийнятним для інженерних розрахунків.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі викладено підходи щодо підвищення точності динамічної компенсації реактивної потужності під час пуску потужних асинхронних електроприводів. Основні теоретичні та експериментальні дослідження можуть бути узагальнені такими висновками:

1. На основі аналізу пускових процесів асинхронних електроприводів обґрунтовано доцільність використання спектральних провідностей в якості інформативних параметрів для систем локальної динамічної компенсації реактивної потужності. На відміну від відомих інформативних параметрів, спектральні провідності забезпечують підвищення точності компенсації реактивної потужності та покращення напруги.

2. Розроблено математичну модель асинхронного двигуна, в якій враховано насичення і втрати в сталі, а в якості змінних стану використані струми статора та ротора. Нові математичні моделі електричних машин відрізняються від традиційних тим, що їх застосування дозволить точніше визначати параметри керування під час перехідних процесів АД з короткозамкненим ротором, а також АД з фазним ротором. Спільне інтегрування рівнянь АД та мережі дає змогу досліджувати реальні процеси в системі.

3. Удосконалено системи динамічної компенсації реактивної потужності з керуванням за збуренням, в основу яких покладено швидкодіючі вимірювальні канали з отриманням інформації про активне та реактивне навантаження, що забезпечує підвищення точності та швидкодію компенсування реактивних навантажень і зменшення провалів напруг.

Обґрунтована електрична схема заміщення АД з ІКРП; отримані залежності для визначення лінійного струмового та теплового навантажень статора, для визначення ємності компенсуючого конденсатора і розроблені методики електромагнітного розрахунку АД з ІКРП та перерахунку ТАД в АД з ІКРП, що дозволяють створити енергозберігаючі асинхронні двигуни. Розроблено математичні моделі та методика визначення електроспоживання і показників енергоефективності електроприводів насосних агрегатів, забезпечують можливість математичного

моделювання, оперативного обліку та управління енергоефективністю транспортування рідини. Досліджені методом математичного моделювання електроспоживання, енергоефективність електроприводів насосних агрегатів на основі АД з ІКРП. Показано: для електроприводів насосних агрегатів, створених на основі АД з ІКРП, енергоефективність електроприводів насосних агрегатів на основі ТАД складає 9,5-9,7%; середнє споживання струму нерегульованими електроприводами на основі АД з ІКРП нижче, ніж середнє споживання струму електроприводами на основі ТАД на 11%.

Зниження споживаних та пускових струмів електроприводами на основі АД з ІКРП дозволяє розвантажити силові трансформатори за струмом і реактивною потужністю, дозволяє вибрати силовий кабель з меншим перетином. Одним з основних переваг компенсованого АД являється зменшення просідання напруги та фільтрація гармонік, що позитивно впливає на інші споживачі електроенергії підключених до тієї ж мережі.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Бурбело М.Й. Підвищення ефективності електроспоживання асинхронних двигунів у перехідних режимах/ М.Й. Бурбело , А.В. Гадай // Енергетика та електрифікація . - 2008 . - № 3 . - С. 57 - 58.
2. Бурбело М.Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різкозмінних режимах навантаження / М.Й. Бурбело , А.В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту . - 2008 . - № 1 . -С. 65 - 68.
3. Бурбело М.Й. Аналіз асинхронних двигунів в перехідних режимах з використанням спектральних параметрів / М.Й. Бурбело , А.В. Гадай // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету . -2008 року. - Вип. 4 (51), ч. 1 . - С. 150 - 154 .
4. Петухов М.В. Дослідження математичної моделі параметричного статичного компенсатора реактивної потужності / М.В. Петухов , А.В. Гадай, Ю.В. Грицюк // Вісник НУ "Львівська політехніка" . Електроенергетичні та електромеханічні системи . 2001 року. - № 421 . - С. 154 – 159.
5. Петухов М.В. Інтегральні показники енергетичного процесу тиристорних компенсаторів реактивної потужності при їх живленні від мережі обмеженої потужності / М.В.Петухов , Ю.В. Грицюк , А.В. Гадай // Вісник Приазовського державного технічного університету . - Маріуполь : ПДТУ, 2005 . - С. 100 - 104.
6. Муха М.Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в суднових автономних електроенергетичних системах. – Дисертація докт. техн. наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2018. – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2018. – 404 с.
7. Вишне夫斯基 Л.В. Пуск асинхронных электродвигателей с компенсацией реактивной мощности / Вишне夫斯基 Л.В., Муха Н.И., Павленко С.С. – Монография – Одесса: НУ «ОМА», – 2016. – 161 с. – Библиогр.: с. 150-160. ISBN: 978-966-7591-67-0.

8. Муха Н.И. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя на основе экспертных оценок / Муха Н.И., Кувшинов А.И., Они-щенко О.А. – Автоматизация судовых технических средств: Науч.-техн. сб. – Вып. 12. – Одесса: ОНМА. – 2007. – С.78-85.
9. Муха Н.И. Анализ алгоритмов управления судовыми установками компенсации реактивной энергии / Муха Н.И., Дудко С.А.//Науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 3 (15). – С. 83-86.
10. Вишневский Л.В. Управление судовыми конденсаторными установками компенсации реактивной энергии / Вишневский Л.В., Муха Н.И., Дудко С.А. - Електротехнічні та комп'ютерні системи: наук.-техн. сб. – Київ: Видавництво «Техніка». – 2011. – №3(79). – С.330-333.
11. Муха Н.И. Динамические свойства системы стабилизации напряжения в режиме пуска асинхронного двигателя от судовой электростанции / Муха Н.И., Павленко С.С. - Электротехнические и компьютерные системы. Электротехнические комплексы и системы. Научно-технический журнал. Киев «Техника» – 2013. – Вып. 09(85). – С. 50-56.
12. Муха Н.И., Павленко С.С. Дискретное управление конденсаторным компенсатором реактивной мощности в пусковых режимах мощных асинхронных двигателей /Муха Н.И., Павленко С.С. – Вісник Національного технічного університету «ХП», Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електро-приводу, Теорія і практика, - Харків: НТУ «ХП». – 2013. – № 36 (1009), – С. 412-416.
13. Патент на винахід UA112396 Україна, МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P9/46. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою / Вишневський Л.В., Муха М.Й., Тумольський О.П., Дудко С.А.; заявник і патентовласник автори патенту. – № а2015 09542; заявл. 05.10.2015; опубл. 25.08.2016, Бюл. №16. – 4с.
14. Моніторинг, діагностика та управління процесами та обладнанням суднових енергетичних установок. Рукопис. Заключний звіт по НДР Інв. №

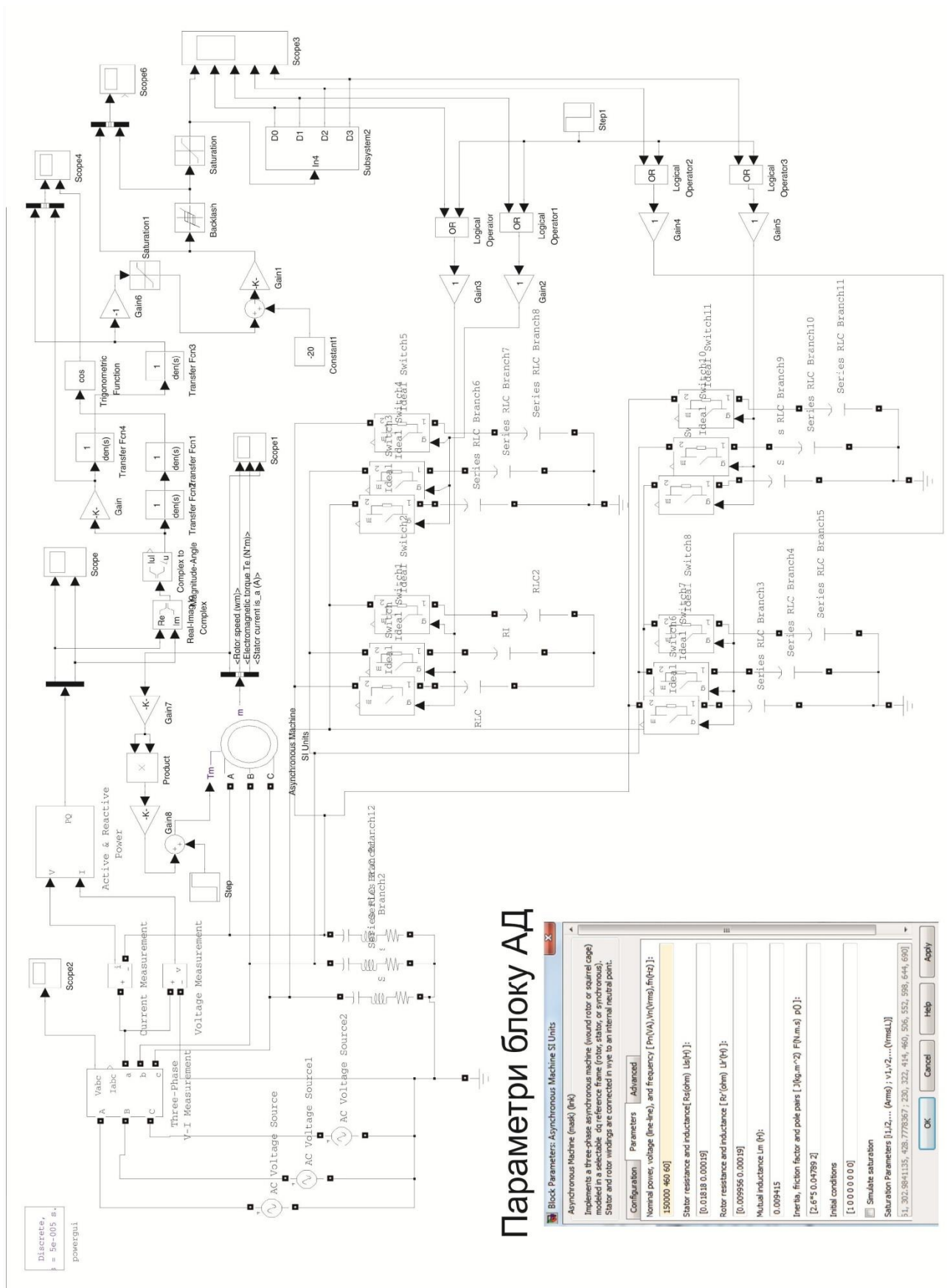
- 0716U002367, ОНМА, керівник роботи Муха М.Й., № ДР 0113U000637. - Одеса, 2015. – 178 с.
15. M. Mukha “A Full Mission Simulator of the Ship’s Automated Electric Power System for Training and Competence Testing of Marine Engineers”. David Publishing Company. Journal of Shipping and Ocean Engineering, vol. 7, No 4 (2017) – pp. 153-160. doi 10.17265/2159-5879/2017.04.002; ISSN: 2159-5887.
 16. PLC-based ship’s electromechanical systems laboratory / M. Mukha, A. Drankova, V. Bousher, A. Shestaka// Proceedings of the 13–th International Conference on the Engine Room Simulators, September 20-21. – Odessa, Ukraine: National University “Odessa Maritime Academy”, 2017. – pp. 183-190, ISBN 978-966-7591-72-4.
 17. Энергозбереження - пріоритетний напрямок державної політики України / Ко-валко М.П., Денисюк С.П., Відпов. Ред. Шидловський А.К. – Київ: УЕЗ, 1998. – 506 с.
 18. Шидловский А. К. Частотно-регулируемые источники реактивной мощности / А. К. Шидловский, В. С. Федий. – Киев: Наукова думка, 1980. – 304 с.
 19. Demenko A., Nowak L., Numerical calculation of eddy-current loss in hollow conductors of electrical machine windings, Proceedings of 4-th International IGTE Symposium and European TEAM Workshop, Edited by Richter, Graz 1990, pp. 173-178.
 - 20.181. Doncer R., Gcyscn W.: A three phase self-excitation generator loaded by controlled rectifier bridge. Part 1, Proc. J., IEE (IPEC), Tokyo, 1983, Nr 183, p. 643–649.
 - 21.182. Gientkowski Z., Muckc J.: The voltage source inverter applied as reactive power source in voltage stabilization circuit for the asynchronous generator. Conf. Power Electronics, Motion Control, Warsaw, 20-22 Sept. 1994, p. 1256–1209.
 22. Adisa A. Modelling and Analysis of Squirrel Cage Induction Motor with Leading Reactive Power Injection [Електронний ресурс] / А. Adisa // Tshwane University of Technology. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/40918/InTech->

Modelling_and_analysis_of_squirrel_cage_induction_motor_with_leading_reactive_power_injection.pdf.

23. LeGal C., Canal M. Method pour une planification optimale de la compensation de energie reactive sur les reseaux de distribution. – AIM Liege. – CIRED, 1971.
 24. Murphy B.E., Nagarai M.: Design-based computational procedure performance prediction and analysis of selfexcited induction generators. IEE Proc., v. 135, Pt. B, Nr 1,1988, p. 8–16.
 25. Mc Quin N.P., Williams P.N.: Transient electrical and mechanical behavior or large induction generator installations. 4. Intern. Conf. on Electr. Mach. and Drives, IEEE Conf. Publ., Nr 310, 1989, p. 251-255.
 26. Melkebeek J.A., Novotny D.M.: Steady state modeling of regeneration and self-excitation in induction machines. IEEE Trans. on Appar. and Syst., v. 8, 1988 p. 2725-2733.
 27. Murthy S.S., Nagamani C.: Studies on the use of conventional induction motors as self-excited induction generators. IEEE Trans, on En, Conv., v. 3, Nr 4, 1988, p. 842-848.
 28. Murthy S.S., Singh B.P.: Suitability of using normally-designed induction motor as a capacitor self-excited induction generator. Proc. of the Intern, Conf, on Electrical Machines, Switzerland, 1984, p. 1173-1176.
 29. Low voltage motors Motor guide [Электронный ресурс] // ABB. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <http://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/low-voltage-motor-guide.pdf>
 30. Power Factor Correction. Power Factor Controller BR7000-I series [Электронный ресурс] // TDK. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: http://www.processtechnique.com/pdf/PFC_Catalogue/Regulator_CXD.pdf
- Power Factor Correction: Thyristor Module TSM-LC-I for dynamic PFC [Электронный ресурс] // TDK. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: http://www.processtechnique.com/pdf/PFC_Catalogue/Regulator_CXD.pdf
- Comparison between Direct-On-Line, Star-Delta and Auto-transformer Induction Motor Starting Method in terms of Power Quality [Электронный ресурс] // Pro-

- ceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: <http://new.abb.com/docs/librariespro-vider53/about-downloads/low-voltage-motor-guide.pdf>
33. Tomar A. Starting Time Calculation for Induction Motor [Электронный ресурс] / A. Tomar, A. Garg // Electr Electron System. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.omicsonline.org/open-access/starting-time-calculation-for-induction-motor-2332-0796-1000136.php?aid=57248&view=mobile>
34. Vijay K. G. Power Factor Improvement of Induction Motor by Using Capacitors [Электронный ресурс] / K. G. Vijay // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.ijettjournal.org/volume-4/issue-7/IJETT-V4I7P138.pdf>
35. Howell M. Correcting induction motor power factor [Электронный ресурс] / M. Howell // Electrical Apparatus Service Association Inc. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.plantengineering.com/single-article/correcting-induction-motor-power-factor/79ef3367298419400cbd845cf65cb3dc.html>
36. M. Mukha “A Full Mission Simulator of the Ship’s Automated Electric Power System for Training and Competence Testing of Marine Engineers”. David Publishing Company. Journal of Shipping and Ocean Engineering, vol. 4, (2017) P. 153-160. doi 10.17265/2159-5879/2017.04.002.

Додаток А Модель в програмному середовищі Matlab



Параметри блоку АД

Додаток Б Принципова схема насосу заборної води

