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:

Динамічні режими суднової електроенергетичної установки при використанні частотно-керованих асинхронних електроприводів суднових механізмів

Виконав: студент 6 курсу, групи 3601
спеціальності:
271 – Морський та внутрішній водний транспорт
(шифр і назва спеціальності)
Спеціалізація: «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»

Руснак Костянтин Сергійович
(підпис, П.І.Б.)

Допущений до захисту 17.12.2024
(дата)

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

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

Нормо контролер _____ Анатолій Шестака
(підпис, ім'я та прізвище)

Рецензент _____ Владислав Михайленко
(підпис, ім'я та прізвище)

м. Одеса 2024 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра електричної інженерії та електроніки

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедрою ЕІ та Е

_____ Микола Муха

«17» 12 2024 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи магістра

Руснака Костянтина Сергійовича

Тема магістерської роботи

«Динамічні режими суднової електроенергетичної установки при використанні частотно-керованих асинхронних електроприводів суднових механізмів» затверджена наказом ректора університету від 04 грудня 2024 р. за № 1703

1. Термін здачі курсантом закінченої роботи до 20.12.2024 р.
2. Вихідні дані до роботи: технічна документація судна контейнеровозу
3. 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»:
   - 3.1. Аналітичний огляд науково-технічної літератури за предметом дослідження, аналіз методів дослідження СЕЕС з ЧРЕП. Обґрунтування теми дослідження, її актуальності та новизни.
   - 3.2. Розробка математичних моделей елементів суднової ЕЕС з ЧРЕП, обґрунтування допущень, оцінка адекватності моделей, розробка алгоритму проведення моделювання.

3.3. Проведення аналізу динамічних режимів СЕЕС з асинхронними електроприводами в перехідних режимах роботи. Модель асинхронного електродвигуна, підтримуюча реалізацію різних алгоритмів управління.

3.4. Огляд основних способів індивідуальної компенсації реактивної потужності. Огляд алгоритмічного та програмного забезпечення, використаного для аналізу роботи АД.

Дата видачі завдання: 01.11.2024 р.

Керівник _____ Муха Микола

Завдання прийняв до виконання _____ Руснак Костянтин

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1.	Аналітичний огляд науково-технічної літератури за предметом дослідження, аналіз динамічних режимів СЕЕС. Обґрунтування теми дослідження, її актуальності та новизни.	01.11.24- 15.11.24	
2.	Розробка математичних моделей елементів суднової ЕЕС з ЧРЕП, обґрунтування допущень, оцінка адекватності моделей, розробка алгоритму проведення моделювання.	16.11.24-26.11.24	
3.	Проведення аналізу динамічних режимів СЕЕС з ЧРЕП.	27.11.24-30.11.24	
7.	Огляд основних способів індивідуальної компенсації реактивної потужності в пускових режимах АД.	01.12.24-01.12.24	
8.	Огляд алгоритмічного та програмного забезпечення, використаного для аналізу роботи АД з динамічною компенсацією реактивної потужності	07.12.24-15.12.24	
9	Оформлення дипломної роботи. Підготовка презентації доповіді.	16.12.24-20.12.24	

Курсант-дипломник _____ Руснак Костянтин
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Муха Микола
(підпис) (прізвище та ініціали)

Перелік умовних позначень

АД – асинхронний двигун

АДГ – аварійний дизель-генератор

АІН - автономний інвертор напруги

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 – електропривод

КЗ – коротке замикання

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПЧ – перетворювач частоти

ТП – тиристорний перетворювач

РЩ – розподільний щит

СЕЕС – суднова електроенергетична система

СУ – система управління

ЦПК – центральний пункт керування

ЧРЕП – частотно-регульований електропривод

Анотація

Дипломна робота складається з 70 сторінок основного тексту, 46 посилань, 2 додатка та 33 рисунки.

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. Виконаний огляд і аналіз стану проблеми дозволяє відзначити такі основні напрямки підвищення енергоефективності суднових електротехнічних комплексів і систем.

У другому розділі розроблено імітаційну модель суднової електроенергетичної системи та частотно-регульованим електроприводом, яка реалізована в програмному пакеті MATLAB і дозволяє отримати динамічні характеристики асинхронного двигуна, синхронної машини, дизель-генераторної електростанції, навантаження (для прикладу використаний турбомеханізм – відцентровий насос) і дослідити динамічні процеси електроенергетичної системи в нормальних і аварійних режимах роботи.

У третьому розділі досліджуються динамічні режими суднової електроенергетичної системи відповідно до однолінійної схеми з одним дизель-генератором без використання берегового живлення судна та при використанні нерегульованого АД і ЧРЕП на прикладі електроприводу насосу. Виконаний аналіз енергетичних показників роботи.

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

Ключові слова: СУДНОВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНА СИСТЕМА, КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЧАСТОТНО_КЕРОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, НАСОС ЗАБОРТНОЇ ВОДИ

Abstract

The Diploma work consists of 70 pages of basic text, 46 references, 2 applications and 33 drawings.

The first section of the thesis conducted an analysis and inspection of special operations of electrical networks in the presence of powerful asynchronous engines. Particular attention is paid to determining the loss of voltage in the starting modes and the mutual influence of the voltage at the network node and the reactive load power. The criteria of efficiency and methods of analysis of the start -up modes of AD are considered. The inspection and analysis of the state of the problem allows to note the following main directions of improvement of energy efficiency of ship electrotechnical complies and systems.

The second section develops an imitation model of the ship's electricity system and a frequency-regulated electric drive, which is implemented in the Matlab software package and allows to obtain dynamic characteristics of the asynchronous engine, a synchronous machine, a diesel-generator power plant, a load (for example) The processes of electricity system in normal and emergency modes of operation.

The third section examines the dynamic modes of the ship's electroenergy system in accordance with a single-line circuit with one diesel generator without the use of the coastal power of the vessel and when using an unregulated AD and a frequency-regulated electric drive on the example of the pump electric drive. Analysis of energy performance indicators.

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

Key words: SHIP ELECTROENERGY SYSTEM, REACTIVE POWER COMPENSATION, ASYNCHRONOUS MOTOR, FREQUENCI CONTROLED ELECTRICAL DRIVE, SEA WATER PUMP.

ЗМІСТ

ВСТУП…… 10
1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ПРОБЛЕМА ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ…… 14

1.1 Особливості суднової електроенергетичної системи з установками компенсації реактивної потужності ……. 14
1.2 Обґрунтування концепції, задач дипломної роботи та методик дослідження…… 18
2. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ…… 20
2.1 Модель асинхронного електродвигуна, підтримуюча реалізацію різних алгоритмів управління ……. 20
2.2 Модель векторного керування АД …….. 28
2.3 Особливості асинхронного електроприводу з частотним регулюванням …… 31
2.4 Модель синхронного дизель-генератора ……. 35
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СУДНОВОГО МЕХАНІЗМУ……... 43
4. ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ …… 49
4.1 Характеристика процесу компенсації реактивної потужності в пускових режимах роботи АД …….. 49
4.2 Аналіз знижень напруги під час пуску АД та динамічній компенсації реактивної потужності ……. 53
ВИСНОВКИ 57
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ…… 59

Додаток А…… 66
Додаток Б…… 67

ВСТУП

Міжнародна конвенція щодо запобігання забрудненню із суден (МАРПОЛ) та енергетичної ефективності морських суден, Комітет по захисту морського середовища (КЗМС) Міжнародної морської організації (ІМО МЕРС), Резолюція МЕРС.214 (63) присвячені питанням запобігання забруднення повітряного середовища з суден, встановлюють ряд вимог до енергоефективності морських суден і спрямовані на поступове зниження обсягу викидів вуглекислого газу в атмосферу морськими транспортними засобами.

Через наявні 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 тономилю), передбачаються шляхи і способи підвищення енергоефективності експлуатації суден, а також встановлюються нові правила управління енергоефективністю судна і шляхи до зниження енергоспоживання на водному транспорті.

Одним із шляхів для 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 електроенергетичній системі виникають небажані втрати. Крім цього суднові споживачі електроенергії в основному мають активно-індуктивний характер (в основному асинхронні електроприводи суднових механізмів), де повний струм генератора, трансформаторів повинен бути збільшений по відношенню до необхідного активного струму навантаження на величину обернено пропорційну значенню коефіцієнта потужності, що відповідно збільшує встановлену потужність електрообладнання і перетин кабельних ліній. Тому суднові генеруючі установки повинні забезпечувати додаткові реактивні потужності, що в свою

чергу знижує їх ефективність роботи через перевитрату палива приводних двигунів (дизельних, газових, парових).

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

В судновій електроенергетичній системі прямі пуски потужних електродвигунів ускладнені або неможливі із-за необхідності генерування реактивних струмів саме впродовж перехідного процесу, співвимірного з номінальним струмом генератора (генераторів). При цьому істотно збільшується динамічний провал і час відновлення напруги генератора при включенні навантажень з низьким коефіцієнтом потужності.

Масове застосування частотно-регульованого електроприводу для суднових турбомеханізмів (вентилятори, відцентрові насоси, компресори), швартовних лебідок істотно змінює властивості і режими роботи суднових електроенергетичних систем, що впливає на якість електричної енергії. У зв'язку з цим дослідження динамічних режимів суднової електроенергетичної системи і масовим використанням частотно-регульованого електропривода, також є актуальним завданням.

Наразі існує щонайменше дві можливості вирішити названі проблеми [1,2,6]. Перша – це удосконалення технологічного процесу шляхом зменшення часу роботи недовантажених електроагрегатів за рахунок використання частотно-регульованих електроприводів: сучасних перетворювачів частоти. 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 урахуванням відмінностей та особливостей суднової електроенергетичної системи в порівнянні з береговими системами електропостачання автономні (суднові) електроенергетичні системи мають особливості, що впливають на їх статичні характеристики та динамічні процеси, які необхідно враховувати при їх експлуатації. Це насамперед пов’язано з більш швидкодіючими змінами напруги та частоти при комутації споживачів, при включенні на паралельну роботу та при коротких замиканнях (аварійних режимах). Зменшення сталих часу електричних кіл збільшують швидкодію електромагнітних динамічних процесів, менші маси дизельних, газових або парових приводних двигунів автономних генераторів призводять до швидкодіючих механічних процесів в енергетичних установках. Короткі лінії електропередачі автономної мережі не обмежують максимальні значення струмів та електромагнітних моментів в динамічних процесах, які відбуваються в електроенергетичних установках.

Приблизно однакова потужність приводних електродвигунів і генераторних агрегатів, різний нахил механічних 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 частотно-керовані електроприводи великої потужності призводять до більш тяжких перехідних режимів з небезпекою знеструмлення електроенергетичної установки.

Режими роботи сучасних багатогенераторних суднових електроенергетичних установок характеризуються різко змінним навантаженням з частими запусками електроприводів співвимірної потужності. Проте під час перехідних процесів комутації статичного навантаження і пуску електродвигунів наявні суднові 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 судновій електростанції джерел реактивної потужності буде ефективним, якщо при розробці системи керування будуть враховані особливості процесів в судновій електростанції, а також сучасні технологічні можливості вимірювання, синтезу законів керування і реалізації виконавчих елементів систем автоматизації [3-7, 13-16].

Об'єктом дослідження даної магістерської роботи є суднова електроенергетична система з конденсаторною установкою компенсації реактивної потужності та потужними частотно-регульованими електроприводами суднових механізмів.

Предметом дослідження є динамічні режими суднової електроенергетичної системи з конденсаторною установкою компенсації реактивної потужності при масовому застосуванні потужних частотно-керованих асинхронних двигунів.

Метою роботи є розробка та дослідження моделей динамічних режимів суднової електроенергетичної системи з конденсаторною установкою компенсації реактивної потужності при застосуванні потужних частотно-керованих асинхронних двигунів.

Для досягнення мети в роботі потрібно вирішити ***наступні завдання***:

1. Розробка моделі суднової електроенергетичної системи з частотно-регульованим електроприводом і установками компенсації реактивної потужності.

2. Дослідження впливу різних факторів при моделюванні статичних і динамічних режимів суднової електроенергетичної системи з установкою компенсації реактивної потужності та частотно-регульованим електроприводом.

3. Дослідження динамічних режимів суднової електроенергетичної системи з установкою компенсації реактивної потужності при пуску потужного асинхронного двигуна і в аварійних ситуаціях.

4. Дослідження динаміки суднової електроенергетичної системи з установкою компенсації реактивної потужності і використанням частотно-регульованого електропривода.

1.ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ. НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ПРОБЛЕМА

1.1. Особливості суднової електроенергетичної системи з установками компенсації реактивної потужності

Автономні суднові електроенергетичні системи в порівнянні зі стаціонарними (береговими) системами електропостачання мають наступні особливості, що впливають на їх статичні характеристики та динамічні перехідні процеси, які необхідно враховувати при їх проектуванні та експлуатації. Це насамперед пов’язано з більш швидкодіючими змінами напруги та частоти при перемиканні споживачів, при включенні на паралельну роботу та при аварійних коротких замиканнях. Зменшення сталих часу електричних кіл збільшують швидкодію протікання електромагнітних перехідних процесів, менші маси дизельних, газових або парових приводних двигунів автономних генераторів призводять до більш швидкодіючих механічних процесів в енергетичних агрегатах. Порівняно короткі лінії електропередачі автономної мережі живлення не обмежують максимальні значення струмів та електромагнітних моментів в перехідних процесах, що відбуваються в суднових електроенергетичних установках [1,2, 13, 14, 37].

Співвимірність потужностей приводних двигунів і генераторних агрегатів, різний нахил навантажувальних механічних характеристик приводних двигунів та швидкодія їх регуляторів, режими паралельної роботи генераторів з різнотипними приводними механізмами впливають на протікання процесів в судновій багатогенераторній електростанції. Крім того співвимірність потужності генераторів і їх електро двигунного навантаження, необхідність автономної роботи генераторів на електроприводи великої потужності призводять до більш напружених динамічних режимів з небезпекою можливого знеструмлення електроенергетичної установки [2, 13].

Крім того режими роботи багатогенераторних суднових електроенергетичних систем характеризуються різко змінним навантаженням з частими запусками електроприводів співвимірної потужності. Проте існуючі суднові компенсатори

реактивної потужності під час перехідних процесів комутації статичного навантаження і пуску електродвигунів управляються та змінюють свою реактивну потужність у відповідності зі сталим коефіцієнтом потужності навантаження, тобто динамічна компенсація реактивної потужності в перехідних процесах не здійснюється. Це свідчить про недостатність науково-технічних досліджень та розробок в області керування реактивним струмом саме в динамічних режимах роботи, тобто в продовж часу сумірного з періодом напруги живлення [14 36, 42].

Застосування в складі суднових електроенергетичних систем джерел реактивної потужності буде достатньо ефективним тоді, коли при розробці їх систем керування будуть враховуватись зазначені особливості режимів суднових електричних станцій та сучасні тенденції їх розвитку і компонування, включаючи нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії, а також сучасні технологічні можливості вимірювання, синтезу законів керування і реалізації виконавчих елементів систем автоматизації [26, 25].

Використання потужних АД в якості приводів суднових механізмів і їх пускові струми в динамічних режимах зумовлюють різке падіння напруги суднової мережі живлення, що спричиняє ряд негативних наслідків, до яких слід віднести збільшення тривалості пуску двигунів, значне зменшення запасу статичної та динамічної стійкості суднових електричних мереж саме обмеженої потужності. Тому динамічна компенсація реактивної потужності є одним із ефективних засобів підвищення рівня напруги під час пуску потужних двигунів. Для регулювання процесу комутації силових напівпровідникових елементів у пристроях динамічної компенсації реактивної потужності впродовж перехідних процесів є необхідність у визначенні їх оптимальних параметрів та оцінці ефективності процесу пуску. Задача визначення оптимальних параметрів в перехідних режимах ускладняється тим, що реактивна потужність АД являється складною функцією моменту навантаження АД, напруги мережі живлення, опорів обмоток двигуна та мережі, струму збудження синхронних генераторів, а ще залежить від нелінійності кривої намагнічування АД [27-30]. Таким чином, відсутні еквівалентні пасивні параметри, які можна використовувати в якості розрахункових для пускових режимів

електроприводів, забезпечуючи при цьому несуттєвий вплив статичних характеристик вузлів навантажень мережі. В умовах сучасної експлуатації електричної мережі номінальною напругою 0,4-1 кВ для забезпечення компенсації реактивної потужності та для мінімізації відхилень напруги при комутаціях навантаження застосовують нерегульовані конденсаторні установки (КУ) [18-24]. Пристрої для динамічної компенсації реактивної потужності в пускових режимах асинхронних електроприводів майже не застосовуються. Тому науково-прикладне завдання, яке полягає у підвищенні точності процесу динамічної компенсації реактивної потужності під час пуску потужних асинхронних електроприводів в суднових мережах обмеженої потужності, є актуальним.

Особливе значення має використання раціональних методів, що забезпечують мінімальне споживання електроенергії, способів керування технологічними процесами. Більшість сучасних технологічних установок на морському транспорті оснащені АД з к.з ротором в якості електроприводу з номінальною напругою 380/440 В. Такі АД характеризуються простотою конструкцією і обслуговування, високою економічністю та надійністю. Переваги АД очевидні, але великий пусковий струм (5-7 I_n) перекреслює всі ці переваги. В пускових режимах АД відбувається провал напруги, який призводить до збоїв електроустановок, підключених до тієї ж мережі живлення. Подібна «шокова терапія» негативно впливає і на сам електродвигун.

Найбільш ефективним технічним заходом, що забезпечує підвищення енергетичного ККД споживачів електричної енергії змінного струму є компенсація реактивної потужності. Тому одним із напрямків дослідження даної дипломної роботи - індивідуальна компенсація реактивної потужності АД на рівні його електромагнітної системи, що практично реалізується шляхом застосування компенсаторів реактивної потужності (КРП) під час пуску та в перехідних режимах потужного АД.

Саме ефективне використання електричної енергії являється одним їз найважливіших завдань для морського транспорту. Важливими 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) . Суттєвим недоліком АД є невисокий cosφ, що не перевищує 0,6-0,92. Для АД величина споживаного струму на 25-40 % визначається індуктивною реактивною потужністю (реактивний струм збуджує обертове магнітне поле двигуна і енергія цього магнітного поля в механічну енергію не перетворюється) та на 60-75 % активною потужністю. 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 %. Крім того реактивний струм створює в системі електроживлення і відповідно в самому електроприводі падіння напруги, що в свою чергу викликає непродуктивні втрати активної потужності. Навіть при найкращих режимах роботи АД втрати енергії складають 9-16 % через порівняно низький $cos\varphi$, що знижує енергоефективність електроприводу вцілому [10,11]. Враховуючи масштаби застосування АД, їх середній коефіцієнт навантаження ($К_з$ = 0,75) , коефіцієнт використання технологічного обладнання ($К_В$ = 0,6), коефіцієнт втрат через реактивних струмів (К = 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 [11].

Питанням 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 зазначеної проблеми досягнуто такими вітчизняними вченими, як М.Й. Бурбело, М.В. Пєтухов, А.В. Гадай, Ю.В. Грицюк [13-17].

Огляд технічних рішень [18, 21-24, 39] по підвищенню коефіцієнта потужності асинхронних двигунів та їх аналіз показує:

1) Застосування з метою підвищення коефіцієнта потужності АД спеціальних електромеханічних компенсуючих пристроїв, механічно з'єднаних з валом двигуна, на теперішній час не зовсім раціонально через ускладнення і відповідного зниження надійності системи.

2) Застосування постійних магнітів, вбудованих в ротор АД, дозволяють тільки частково компенсувати реактивну потужність. Крім того, АД зменшить максимальний обертовий момент, що є неприйнятним; реконструювати серійні ротори АД шляхом «впровадження» в них постійних магнітів можливо тільки в спеціалізованих електромашинобудівних підприємствах.
3) Компенсація реактивної потужності АД шляхом внесення у магнітну систему і обмотки ємнісних елементів не дозволяє повністю компенсувати реактивну потужність індуктивного характеру.

1.2. Обґрунтування концепції, задач дипломної роботи та методик дослідження

Виконаний огляд і аналіз стану проблеми дозволяє відзначити такі основні напрямки підвищення енергоефективності суднових електротехнічних комплексів і систем:

1. Компенсація реактивних індуктивних струмів і потужності реактивними струмами і потужностями ємнісного характеру, що досягається шляхом використання нерегульованих і регульованих компенсаторів реактивної потужності (конденсаторних, електромеханічних, напівпровідникових). При цьому, техніко-економічний ефект досягається за рахунок зменшення втрат активної потужності в електричних мережах від перетікання реактивної потужності. Такий напрямок базується на відомій концепції використання явища резонансу струмів в електричних ланцюгах. Реалізація цієї концепції в суднобудівній галузі найбільш ефективна в енергосистемах з напругою 6/10 кВ. Проте, в суднових системах електроживлення напругою до 1000 В, де понад 70% всього парку АД, застосування компенсації реактивної потужності ще не завжди економічно виправдано.

2. Перехід від нерегульованих асинхронних електроприводів до регульованих на основі застосування систем ПЧ-АД, НПЧ-АД. 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 відцентрові 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 та напруг, що знижують ККД електропривода на 3-6% і викликають додаткові проблеми - зниження показників якості електроенергії та електромагнітної сумісності.

3. 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 АД. Техніко-економічна ефективність цього напряму підтверджується збільшенням частки регульованого асинхронного електропривода в суднобудівній галузі.

Виходячи з вище наведеного, ідеєю дипломної роботи є розробка та дослідження моделей динамічних режимів суднової електроенергетичної системи з конденсаторною установкою компенсації реактивної потужності при застосуванні потужних частотно-керованих асинхронних двигунів.

Для реалізації зазначеної ідеї в роботі потрібно вирішити наступні завдання:

1. Розробка моделі суднової електроенергетичної системи з частотно-регульованим електроприводом і установками компенсації реактивної потужності.

2. Дослідження впливу різних факторів при моделюванні статичних і динамічних режимів суднової електроенергетичної системи з установкою компенсації реактивної потужності та частотно-регульованим електроприводом.

3. Дослідження динамічних режимів суднової електроенергетичної системи з установкою компенсації реактивної потужності при пуску потужного асинхронного двигуна і в аварійних ситуаціях.

4. Дослідження динаміки суднової електроенергетичної системи з установкою компенсації реактивної потужності і використанням частотно-регульованого електропривода.

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.

2. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Для більш докладного моделювання суднової електроенергетичної системи з можливостями моделювання інтегрованих комплексів та використанням методів графічного (візуального) програмування взятий програмний пакет MATLAB / SIMULINK [34, 35].

В роботі розроблено імітаційну модель суднової електроенергетичної системи та частотно-регульованим електроприводом, яка реалізована в програмному пакеті MATLAB і дозволяє отримати динамічні характеристики асинхронного двигуна, синхронної машини, дизель-генераторної електростанції, навантаження (для прикладу використаний турбомеханізм – відцентровий насос) і дослідити динамічні процеси електроенергетичної системи в нормальних і аварійних режимах роботи. Математичні моделі елементів СЕЕС, частотно-регульованого електроприводу докладно представлені в додатках А, Б.

2.1. Модель асинхронного електродвигуна, підтримуюча реалізацію різних алгоритмів управління

Математична модель АД побудована на основі рівнянь Парка-Горєва і дозволяє реалізувати алгоритм векторного керування. Векторне управління дозволяє регулювати збудження двигунів змінного струму, тому управління АД стає таким же простим як управління двигуном постійного струму з незалежним збудженням (ДПС).

Велика частина сучасного технологічного обладнання містить електроприводи змінного струму. Тому значної економії електроенергії можна досягти шляхом енергозбереження при роботі електродвигунів. На електричні машини доводиться велика частка втрат електроенергії. При цьому основні втрати електричних машин залежать від частоти струму. Для дослідження роботи електричних машин і аналізу енергетичних втрат необхідно розробити математичну модель, яка є функцією частоти.

Математичний опис електромеханічних процесів, що відбувається при векторному керуванні, наведене в роботах [19, 22,39,42] дозволяє побудувати модель, що дає досить хороше наближення до процесів векторного регулювання для цілей порівняння систем управління на основі різних регуляторів і алгоритмів управління.

Моделювання здійснимо шляхом вибору однієї з систем координат, щодо якої орієнтуємо вектор, який визначає електромагнітний момент АД. Проекція зазначеного вектора на іншу вісь координат дорівнює нулю, також як і в рівнянні для розрахунку електромагнітного моменту, що призводить його до виду рівняння електромагнітного моменту ДПС, який пропорційний основному магнітному потоку і струму якоря, [19].

Для здійснення управління АД за алгоритмом векторного управління слід спочатку привести його до спрощеної двополюсної машини, що має дві обмотки на статорі і роторі, та, відповідно, системи координат пов'язані зі статором, ротором і полем.

АД змоделюємо в системі координат - α, β, орієнтованої по осі фази А обмотки статора. У моделі АД у двофазній нерухомій системі координат статора α, β при $\omega_k = 0$ дійсні складові усіх просторових векторів статора збігаються з відповідними сигналами фази А, а уявні складові відстають за фазою від дійсних на 90º, [14, 20].

У математичній моделі АД в ортогональній системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора, для того, щоб напрямок дійсної осі ортогональної системи координат у будь-який час співпадав з напрямком узагальненого

вектора потокозчеплення ротора, система координат повинна обертатися синхронно з цим вектором. Вектор потокозчеплення ротора у ній буде мати тільки дійсну складову. Позначимо дійсну вісь цієї системи координат d, а уявну – q. Тоді початкові умови для математичної моделі АД у цих координатах матимуть вигляд:

$$\omega_k = \omega_{\psi_r}; \qquad (2.1)$$

$$\Psi_{rq} = 0; \quad \Psi_{rd} = |\Psi_r^{\sim}| = \Psi_{rm} \qquad (2.2)$$

$$U_{rd} = U_{rq} = 0 \qquad (2.3)$$

При живленні обмоток статора двигуна від джерела напруги (перетворювача частоти з АІН) система векторного керування має зворотні зв'язки за складовими струму статора та за потокозчепленням ротора. Тому ще однією умовою для розробки цієї моделі буде наявність у ній перелічених сигналів.

Запишемо рівняння для побудови моделі АД у ортогональних двофазних координатах у вигляді [19, 24]:

$$\begin{cases} \widetilde{U_s} = \widetilde{I_s} R_s + \dfrac{d\widetilde{\Psi_s}}{dt} + j\omega_k \widetilde{\Psi}_s, \\ 0 = \widetilde{I_r} R_r + \dfrac{d\widetilde{\Psi_r}}{dt} + j\left(\omega_k - Z_p\omega\right) \end{cases} \qquad (2.4)$$

Для забезпечення зазначеного складу сигналів моделі, знайдемо узагальнений вектор струму ротора та підставимо отриманий вираз у перше рівняння цієї системи (2.4) з урахуванням позначень[19]:

$$\widetilde{I_r} = \frac{1}{L_r}\widetilde{\Psi}_r - k_r\widetilde{I_s}\,; \qquad (2.5)$$

$$\widetilde{\Psi}_s = \sigma L_s \widetilde{I_s} + k_r \widetilde{\Psi}_r \qquad (2.6)$$

Далі (2.5) та (2.6) підставляємо у систему (2.4) і одержимо:

$$\begin{cases} \widetilde{U_s} = \widetilde{I_s} R_s + \sigma L_s \dfrac{d\widetilde{\mathrm{I}_s}}{dt} + k_r \dfrac{d\widetilde{\Psi_s}}{dt} + j\omega_k\left(\sigma L_s \widetilde{I_s} + k_r \widetilde{\Psi}_r\right), \\ 0 = \dfrac{1}{T_r}\widetilde{\Psi}_r + \dfrac{L_m}{T_r}\widetilde{I_s} + \dfrac{d\widetilde{\Psi_r}}{dt} + j\left(\omega_k - Z_p\omega\right)\widetilde{\Psi}_r \end{cases}$$

Щоб перше рівняння останньої системи отримувало похідну тільки від одного сигналу, виразимо похідну від потокозчеплення ротора з (2.8) та підставимо отриманий вираз у (2.7):

$$\frac{d\widetilde{\Psi}_r}{dt} = k_r R_r \widetilde{I}_s - \frac{1}{T_r}\widetilde{\Psi}_r - j\left(\omega_k - Z_p\omega\right)\widetilde{\Psi}_r, \qquad (2.7)$$

$$\widetilde{U_s} = \widetilde{I_s}R_{sr} + \sigma L_s \frac{d\widetilde{\mathrm{I}_s}}{dt} - \frac{k_r}{T_r}\widetilde{\Psi}_r + j\omega_k \sigma L_s \widetilde{I_s} - jZ_p\omega k_r \widetilde{\Psi}_r\,, \quad (2.8)$$

тут $R_{sr} = R_s + k_r^2 R_r$.

Переходячи від рівнянь в узагальнених векторах до рівнянь в їх дійсних та уявних складових, перетворимо рівняння в узагальнених векторах (2.7) та (2.8) у систему скалярних рівнянь та перепишемо одержані диференціальні рівняння в операторній формі, вводячи відповідні позначення, остаточно маємо:

$$\begin{cases} U_{sd} + \dfrac{k_r}{T_r}\Psi_{rm} + \omega_k L_{s1} I_{sq} = I_{sd} R_{sr}(T_{sr}p + 1) \\ U_{sq} - \omega_k L_{s1} I_{sq} - Z_p \omega k_r \Psi_r = I_{sq} R_{sr}(T_{sr}p + 1) \\ L_{sm} I_{sd} = \Psi_{rm}(T_r p + 1);\ \ \omega_k = k_r R_r \dfrac{I_{sq}}{\Psi_{rm}} + \omega_r \end{cases} \qquad (2.9)$$

тут $T_{sr} = \sigma L_s / R_{sr}$.

В системі (2.9) позначаємо: $\Delta\omega_r = k_r R_r I_{sq}/\Psi_{rm}$ (2.10). Доповнюючи (2.9) та (2,10) виразом для електромагнітного моменту:

$$M = \frac{3}{2} Z_p k_r \Psi_{rm} I_{sq};\ \ M - M_c = J\frac{d\omega}{dt} \quad (2.11)$$

асинхронного двигуна та рівнянням руху привода з постійним моментом інерції J одержимо модель короткозамкненого АД, що наведена на рис. 2.1.

Наведену модель АД можна застосовувати при дослідженні систем векторного управління асинхронним електроприводом з орієнтацією за полем ротора.

При дослідженні АД та систем електроприводу методом математичного моделювання за допомогою моделей необхідно мати інформацію про електромагнітні параметри АД, що визначають його статичні та динамічні характеристики.

В якості основних електромагнітних параметрів АД прийняті параметри Т-подібної схеми заміщення, рис. 2.2, а саме:

R_s, R_r - активні опори статорної та роторної обмоток;

$s = 1 - \omega/\omega_0$ – поточне ковзання АД;

$X_m = \omega_s \cdot L_s$ – індуктивний опір кола намагнічування;

$X_{s\sigma} = \omega_s \cdot L_{s\sigma}$; $X_{r\sigma} = \omega_s \cdot L_{r\sigma}$ – відповідно індуктивні опори розсіяння статора і ротора.

В якості вихідних даних для моделювання застосовуються номінальні дані АД, що наводяться на шильдику двигуна.

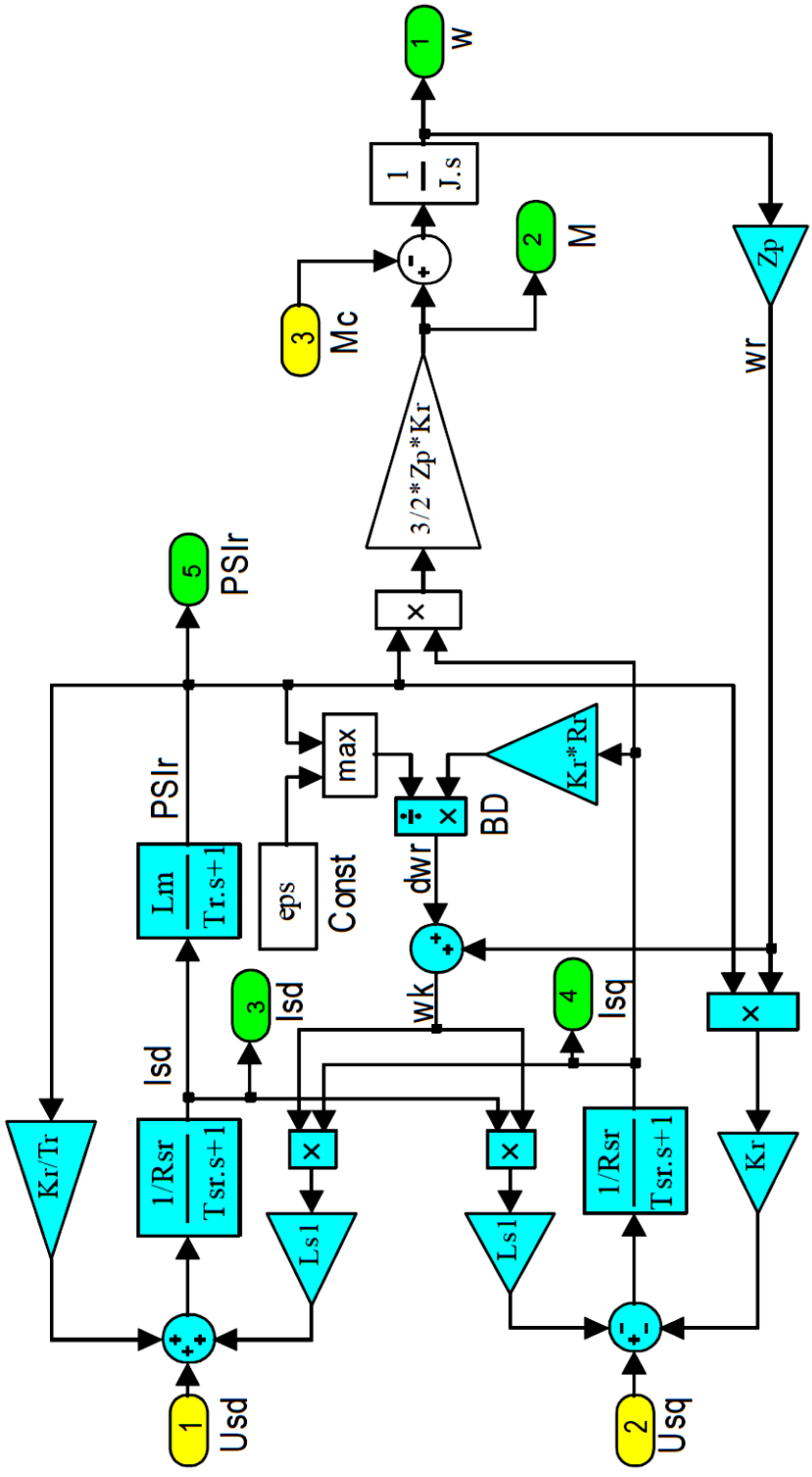


Рис. 2.1 – Модель короткозамкненого АД в ортогональній системі координат, орієнтованій за потокозчепленням ротора

При математичному моделюванні АД діапазон зміни моменту статичного навантаження може розширеним, включаючи імітацію перекидання електродвигуна. Те ж саме відноситься і до переліку реєстрованих координат. Приклад моделі, призначеної для розрахунку статичних характеристик АД (параметрів схеми заміщення), наведений на рис. 2.3, де в якості моделі АД застосований стандартний SPS-блок Asynchronous Machine (SI Units) [19].

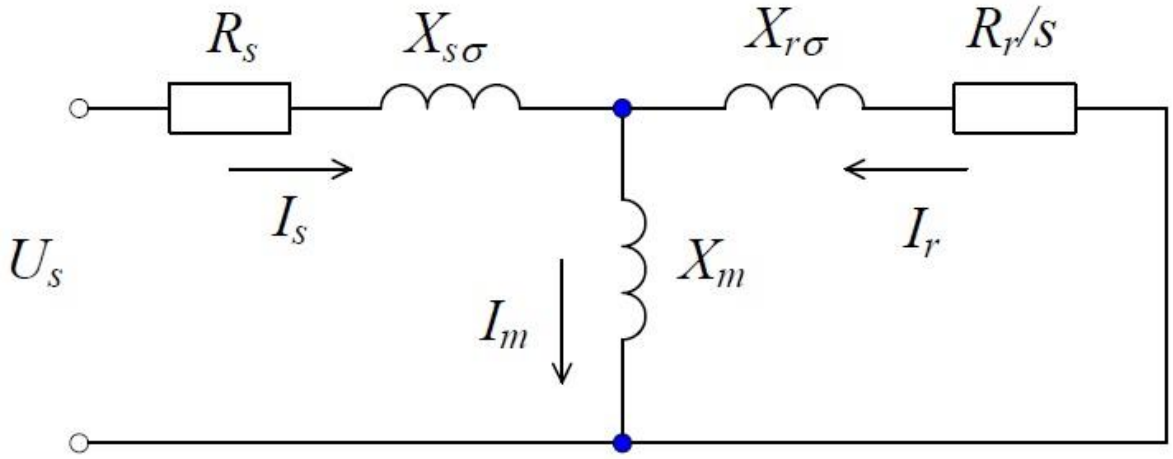


Рис. 2.2. – Т – подібна схема заміщення АД

Приклад обчислення природних механічних та електромеханічних характеристик АД за моделлю рис. 2.3 та паспортними параметрами (табл. 1.1) наведено на рис. 2.4 та рис. 2.5.

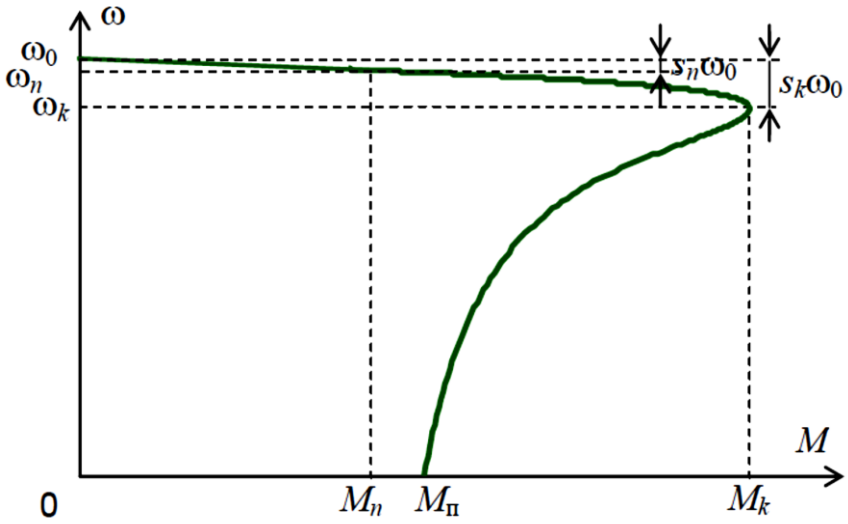


Рис. 2.4 – Природні механічні характеристики АД

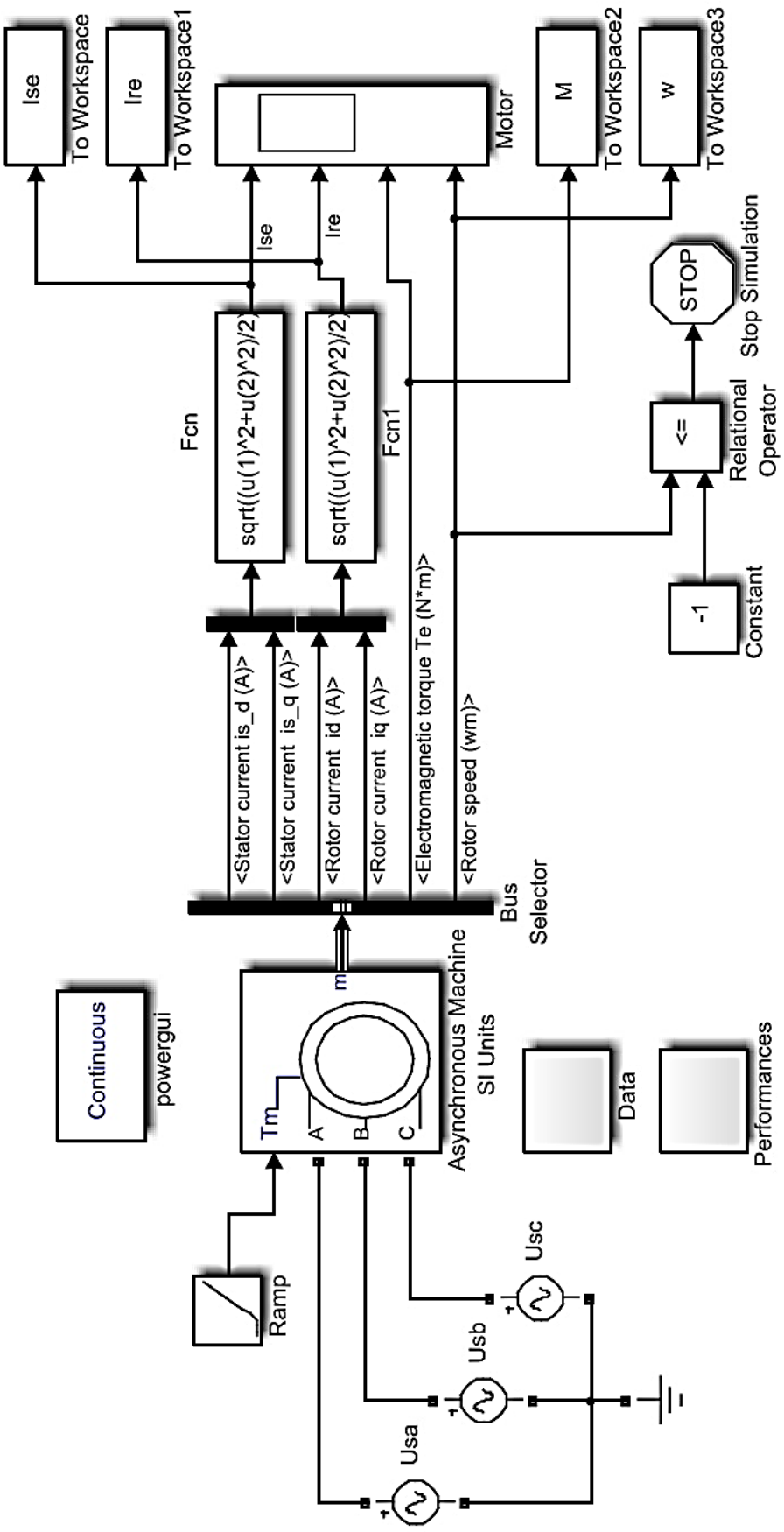


Рис. 2.3 – Модель, що розраховує природні статичні характеристики АД

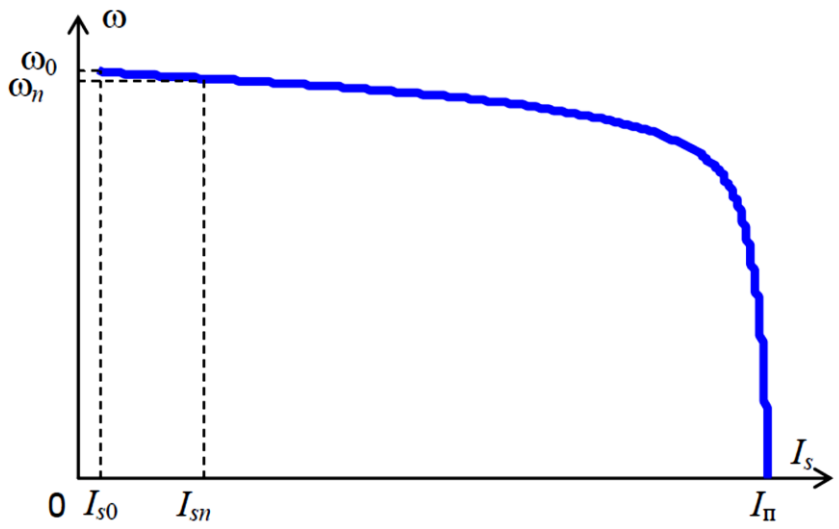


Рис. 2.5 – Електромеханічна характеристика АД

Розрахунок перехідних процесів АД наведений на рис.2.6.

Для можливості аналізу впливу алгоритмів управління на експлуатаційну надійність АД в математичну модель Парка - Горєва можуть бути введені співвідношення, що описують люфт валу. Статичний момент опору, що входить в рівняння руху електродвигуна, включає в себе момент навантаження і опір підшипників (коефіцієнт тертя визначено з механічних втрат, зазначених у паспорті):

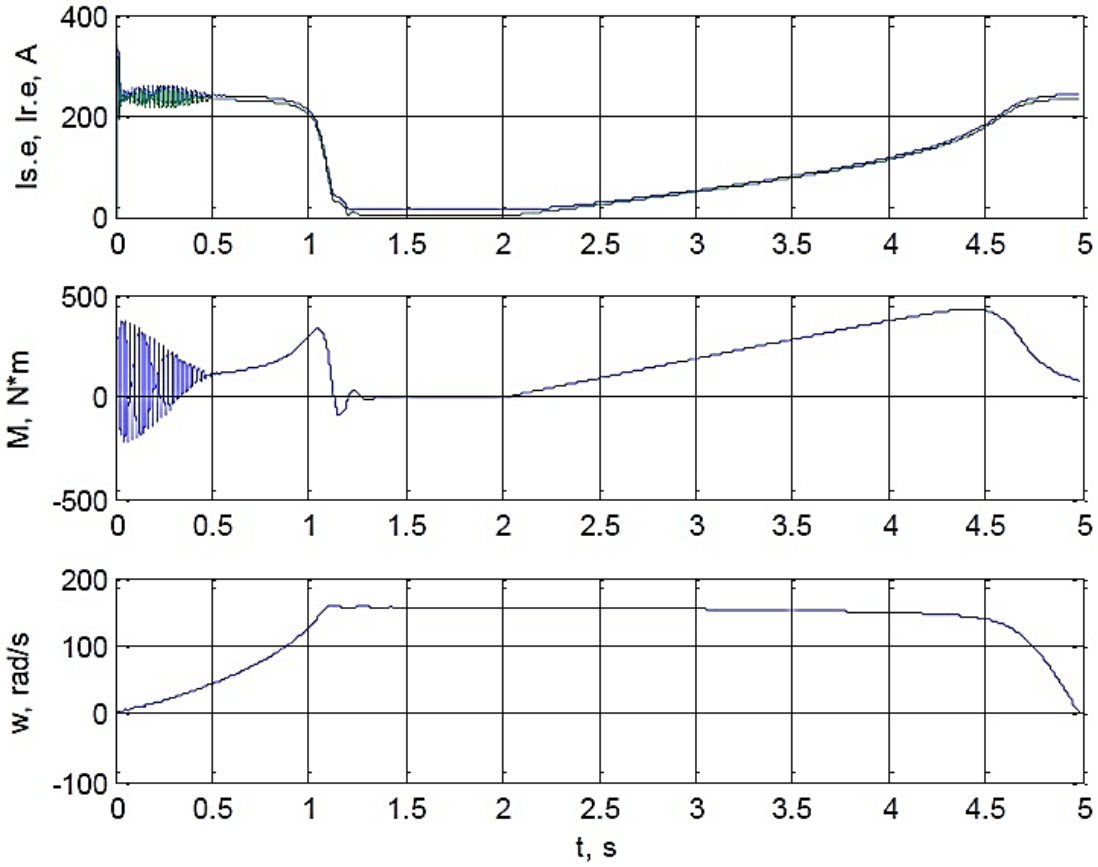


Рис. 2.6 – Перехідні процеси АД

$$M_c = f(d) \cdot M_{load} + k_f \cdot \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2, \qquad (2.12)$$

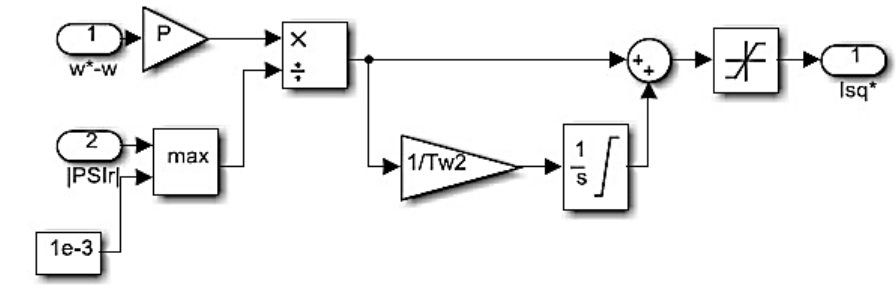
де: d, (рад) - величина невибраного люфту, що виникає при зміні знаку прискорення, M_{load} – момент навантаження, $k_f -$ коефіцієнт тертя підшипників, α (рад) – кут повороту ротора.

Вплив люфтів на динаміку процесів в дипломній роботі не досліджувався.

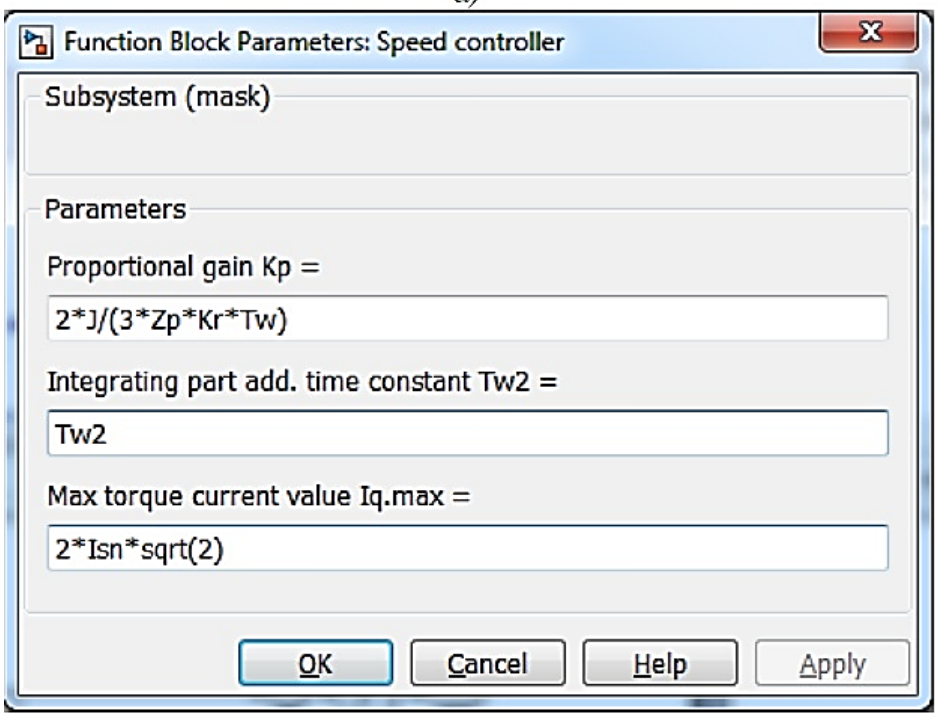
2.2. Модель векторного керування АД

Векторне керування швидкістю асинхронного електропривода, що синтезоване на базі математичної моделі АД в системі координат, орієнтованій за полем ротора, застосовуються при високих вимогах щодо якості перехідних процесів, точності відтворення режимної тахограми та широкому діапазоні регулювання. В даній роботі обраний варіант побудови системи векторного керування, в якій перетворювач частоти розглядається як ідеальне джерело синусоїдальної напруги регульованої амплітуди і частоти з використанням для моделювання СВК математичної моделі АД в ортогональній системі координат (модель показана на рис. 2.1), орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора. В цьому разі модель СВК не буде мати у своєму складі координатних перетворювачів. Така Simulink-модель СВК наведена на рис. 2.7. Застосування моделі двигуна у відповідній системі координат (вміст моделі поданий на рис. 2.1).

У моделі міститься два канали регулювання в системі векторного керування: модуля потокозчеплення ротора та електромагнітного моменту двигуна. При виконанні умови (2.2) складові, що відповідають проекціям векторів напруги та струму статора на вісь d, є потокоутворюючими складовими, проекції на вісь q –моментоутворюючими. Кожен канал виконаний у вигляді двоконтурної системи підпорядкованого регулювання, причому кожен з внутрішніх контурів регулювання певної складової вектора струму статора підпорядкований відповідному зовнішньому контуру.



а)



б)

Рис. 2.7 – Модель векторного регулятора швидкості (блок Speed controller) (а); діалогове вікно для встановлення параметрів (б)

В цій моделі усі регулятори являються пропорційно-інтегральними (ПІ). ПІ-регулятори струмів та ПІ-регулятор потокозчеплення ротора реалізовані за допомогою блоку PID Controller програми Simulink. Щодо регулятора швидкості, що визначає задане значення моментоутворюючої складової струму $Isq*$, то у моделі введений інструмент адаптації регулятора до зміни модуля вектора потокозчеплення ротора, а відповідний вміст такого блоку регулятора швидкості Speed controller з обмеженням вихідного сигналу наведений на рис. 2.8.

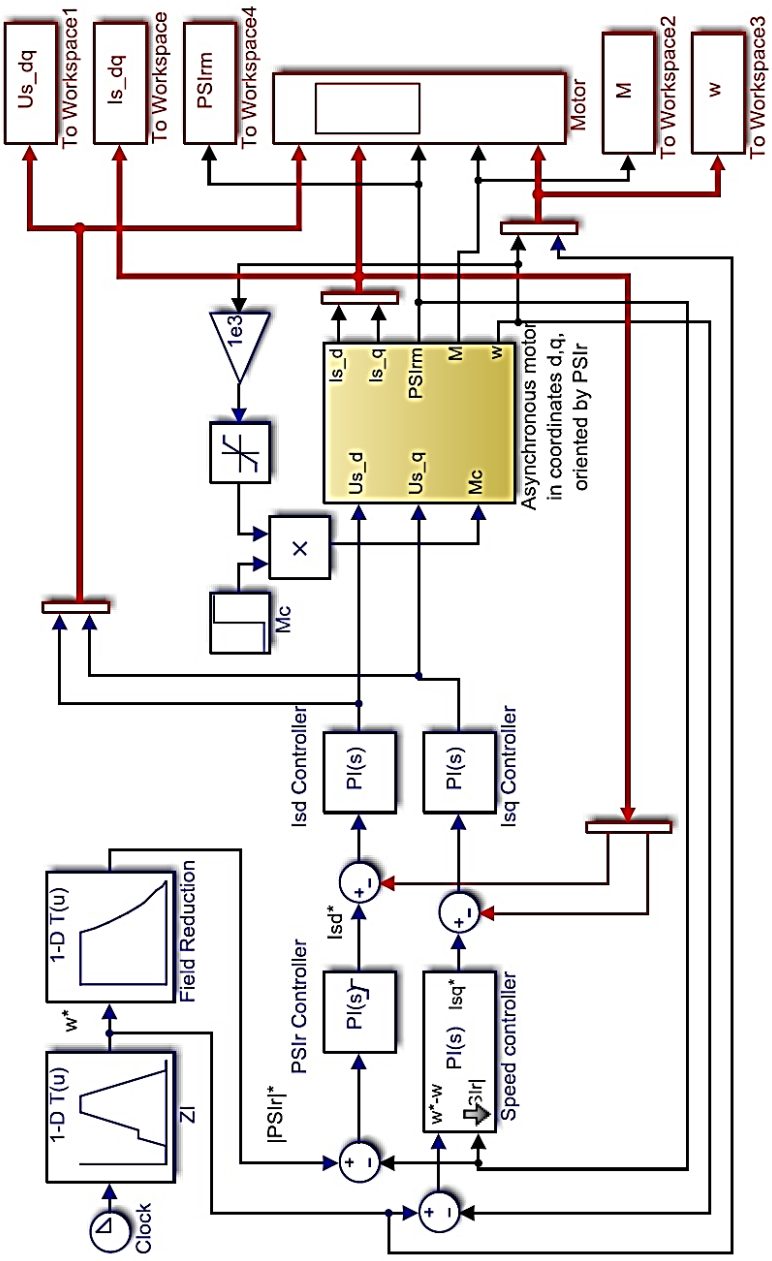


Рис. 2.8 – Модель СВК в системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора

Таким чином, наведена модель СВК в системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора, дозволяє аналізувати усі процеси, що характеризують застосований алгоритм керування, включаючи можливість перевіряти коректність налаштування регуляторів та аналізувати принципи структурного синтезу системи керування.

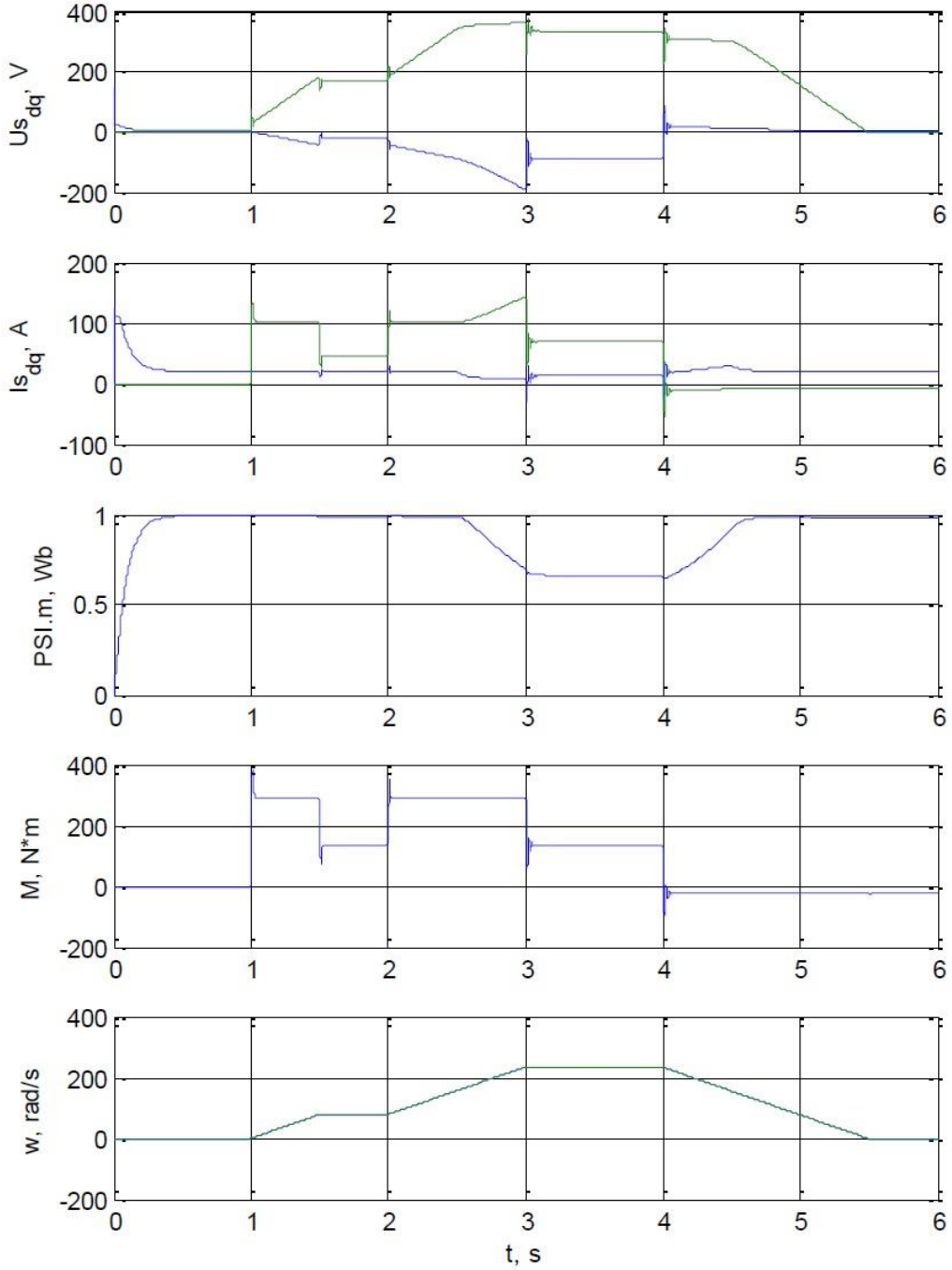


Рис. 2.9 – Криві перехідних процесів, які отримані на моделі рис.2.8

2.3. Особливості асинхронного електроприводу з частотним регулюванням

Сучасний частотно-регульований електропривод складається з асинхронного або синхронного електричного двигуна і перетворювача частоти (ПЧ) як показаний на рис.2.10.

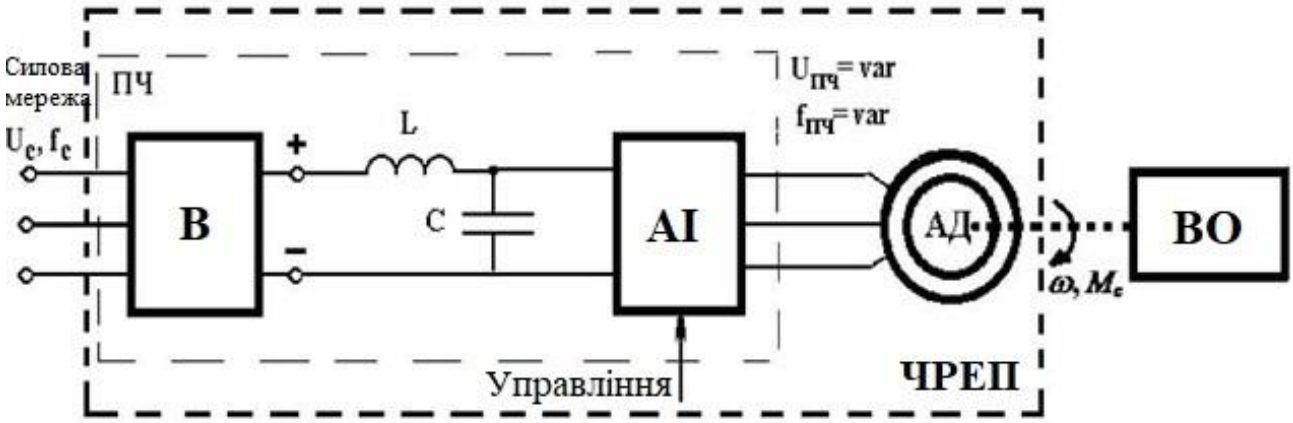


Рис. 2.10 – Частотно-регульований електропривод

Електричний двигун перетворює електричну енергію в механічну енергію і приводить в рух виконавчий орган (ВО) технологічного механізму. Перетворювач частоти управляє асинхронним двигуном і являє собою електронний статичний пристрій, що складається з випрямляча (В) і автономного інвертора (АІ). На виході перетворювача формується напруга зі змінною амплітудою і частотою. Назва «частотний електропривод» обумовлено тим, що регулювання швидкості обертання двигуна здійснюється зміною частоти напруги живлення, що подається на двигун від перетворювача частоти.

Актуальною проблемою керування електроприводами, де широко застосовуються в якості виконавчих двигунів асинхронні двигуни, є підвищення точності і досягнення граничних динамічних і енергетичних показників при регулюванні моменту і швидкості. Електроприводи змінного струму з частотним, частотно-струмовим і векторним керуванням є конкурентоспроможними за точністю, швидкодією і діапазонами регулювання швидкості по відношенню до електроприводів постійного струму [45].

На даний час з появою нової елементної бази та використання сучасних засобів мікропроцесорної техніки, що дозволяє розробникам створювати компактні, багатофункціональні і високоефективні системи управління ЕП змінного струму, застосування автоматизованого електроприводу забезпечує необхідні

регулювальні характеристики використовуваних машин і механізмів, а також дозволяє значно знизити споживання електроенергії [45, 44].

Серед переваг таких систем управління ЕП слід зазначити наступні:

- якісне управління швидкістю;

- високий момент при низьких швидкостях;

- низькі втрати і високу ефективність;

- високі динамічні характеристики;

- стабільну роботу з потужними двигунами.

Позитивні зміни відбулися і в області створення самих асинхронних двигунів – поява енергозберігаючих електродвигунів, наприклад, фірм Siemens і ABB, які в порівнянні зі звичайними електродвигунами мають [45]:

- підвищений термін служби за рахунок меншого температурного навантаження;

- достатньо високий ККД (за рахунок застосування якісної сталі і активних матеріалів), покращених систем охолодження і вузлів підшипників;

- менші втрати і знижену шумність.

Частотно-регульовані електроприводи з ПЧ дозволяють оптимізувати роботу механізмів в різних режимах і забезпечують плавний пуск, безступінчасте регулювання швидкості обертання і роботу механізму з необхідною швидкістю, безконтактний реверс, рівномірне обертання валу електродвигуна в зоні низьких частот, високі електричні показники електроприводу (ККД, коефіцієнт потужності).

З огляду на приклади застосування на підприємствах України випливає наступне [45]:

«- використання частотних перетворювачів на об'єктах нафтової промисловості дозволяє економити до 65% електроенергії;

- частотне регулювання приводів насосного обладнання забезпечує до 40% економії електроенергії;

- насоси з вбудованим електронним регулюванням приводу дають можливість скоротити витрату електроенергії на 50%,

- впровадження частотно-регульованих електроприводів на насосних станціях в житлово-комунальному господарстві знижує електроспоживання майже на 60%, зменшує витрату води на 25%, усуває гідроудари, що руйнують систему постачання, тобто має місце синергетичний (множувальний) енергозбереження;

- перехід до частотно-регульованого електроприводу в ліфтових підйомниках знижує витрату електроенергії на 50-60%, збільшує надійність роботи кінематичної схеми ліфтів завдяки обмеженню ударних моментів в перехідних режимах експлуатації підйомників, забезпечує дотримання ергономічних вимог щодо обмеження ривків і прискорень;

- застосування частотно-регульованих приводів в підйомно-транспортних механізмах покращує енергетичні характеристики електроприводів в порівнянні з параметричними перетворювачами і реостатним регулюванням, підвищує швидкість і якість регулювання швидкості, забезпечує плавність пуску і гальмування механізмів, підвищує комфортність управління ними, забезпечує збереження вантажу, запобігає від різких поштовхів, що дозволяє значно продовжити термін служби всіх механічних елементів крана…».

Поряд з великою кількістю переваг ЧРЕП мають і недоліки: більшість типів ПЧ являються джерелом електромагнітних завад, а частотно-регульовані електроприводи великої потужності достатньо дорогі.

Економія електроенергії при використанні ПЧ коливається від 15 до 85%. Найбільша ефективність від використання ЧРЕП проявляється при включенні їх в автоматизовані системи управління технологічними або виробничими процесами, тобто коли вони є як ланка управління технологічним процесом [45].

З урахуванням рівнянь (2.9 – 2.11) і структурної схеми побудована модель АД при його живленні від автономного інвертора напруги (АІН) в пакеті MatLAB / SIMULINK. Модель асинхронного електроприводу з регуляторами швидкості (РШ) і потоку (РФ) представлена на рис.2.11, і 2.12.

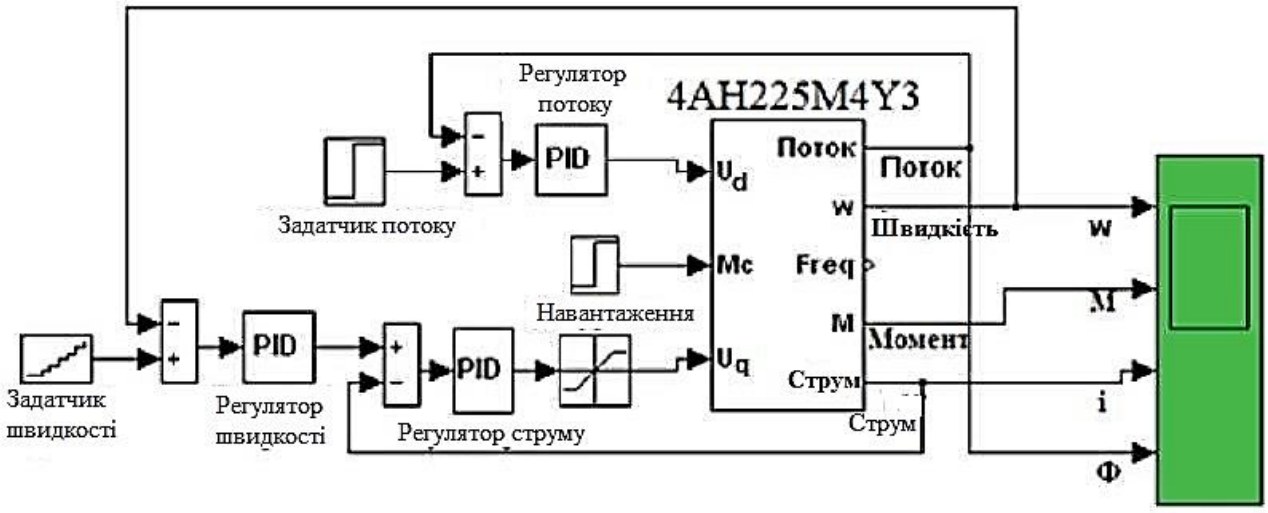


Рис. 2.11 – Модель АІН-АД

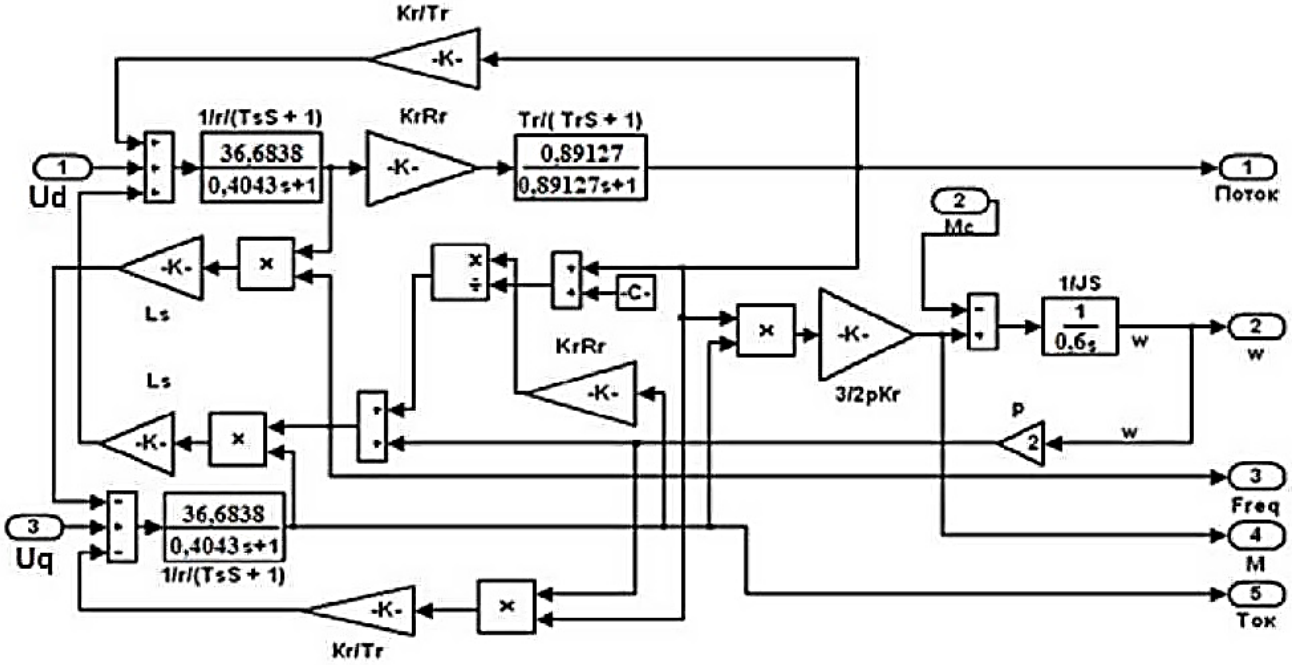


Рис. 2.12 - Математична модель АД з АІН в системі координат d-q

2.4. Модель синхронного дизель-генератора

Для дослідження суднових електроенергетичних систем з дизель-генераторними установками використаємо комп'ютерне моделювання [20, 27-32]. Оскільки синхронні генератори є джерелами електроенергії в складі електроенергетичних систем, їх точний математичний опис і грамотна комп'ютерна реалізація має важливе значення при моделюванні цих систем [29].

Застосування спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє спростити задачу створення комп'ютерної моделі суднової електроенергетичної системи. Одним з таких пакетів для моделювання електротехнічних пристроїв і систем, зокрема синхронного генератора, є середовище Simulink з бібліотекою блоків Sim Power Systems [29].

Математична модель синхронної машини, представлена в середовищі Simulink (додаток Sim Power System), є класичною моделлю синхронної машини з демпферними обмотками, рис. 2.13.

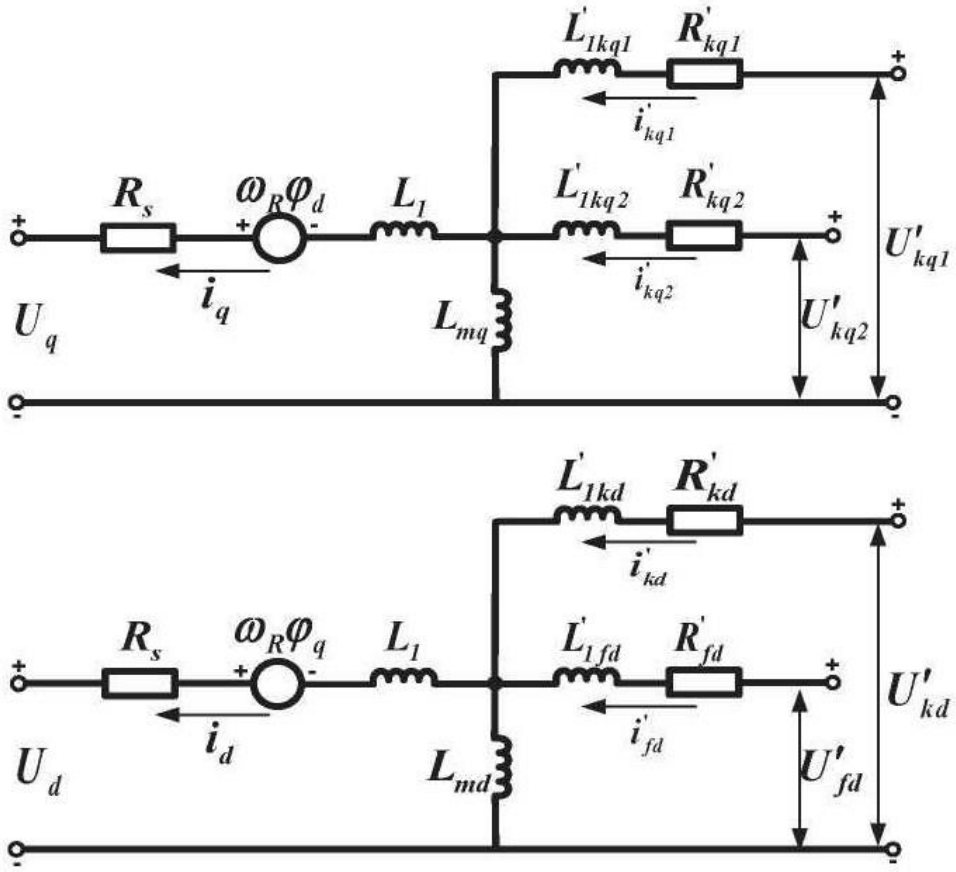


Рис. 2.13 - Схема заміщення СГ в системі координат q-d та використана при створенні моделі в середовищі Simulink

Математична модель синхронного генератора, що реалізована в середовищі MatLab/Simulink, складається з системи диференціальних рівнянь 6-го порядку: електричні рівняння напруг, які складені за законом Кірхгофа для фазної системи координат ротора і системи алгебраїчних рівнянь для розрахунку потокозчеплення.

Система рівнянь напруг відповідно для статора, обмотки збудження, демпферних обмоток [20,29]:

$$\left.\begin{aligned} U_d &= R_s i_d + \frac{d}{dt}\psi_d - \omega_R \psi_q \\ U_q &= R_s i_q + \frac{d}{dt}\psi_q - \omega_R \psi_d \\ U_{fd} &= R_{fd} i_{fd} + \frac{d}{dt}\psi_{fd} \\ U_{kd} &= R_{kd} i_{kd} + \frac{d}{dt}\psi_{kd} \\ U_{kd1} &= R_{kd1} i_{kd1} + \frac{d}{dt}\psi_{kd1} \\ U_{kd2} &= R_{kd2} i_{kd2} + \frac{d}{dt}\psi_{kd2} \end{aligned}\right\} \qquad (2.13)$$

У системі рівнянь (2.13) позначено: $\psi_d, \psi_q, \psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_{kd1}, \psi_{kd2}$ - відповідно потокозчеплення по поздовжній і поперечній осях (d, q), потокозчеплення обмотки збудження і потокозчеплення трьох демпферних обмоток синхронної машини, які розраховувались за допомогою системи алгебраїчних рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} \Psi_d &= L_d i_d + L_{md}\left(i_{fd} + i_{kd}\right) \\ \Psi_q &= L_q i_q + L_{md} i_{kq} \\ \Psi_{fd} &= L_{fd} i_{fd} + L_{md}(i_d + i_{kd}) \\ \Psi_{kd} &= L_{kd} i_{kd} + L_{md}\left(i_d + i_{fd}\right) \\ \Psi_{kd1} &= L_{kd1} i_{kd1} + L_{md} i_q \\ \Psi_{kd2} &= L_{kd2} i_{kd2} + L_{md} i_q \end{aligned}\right\} \qquad (2.14)$$

В системах рівнянь (2.13) і (2.14) позначені такі параметри:

ω_R – кутова швидкість обертання ротора;

U_d - напруга статора по поздовжній осі d;

U_q - напруга статора по поперечній осі q;

i_d - струм статора по осі d;

i_q - струм статора по осі q;

U_{fd} – напруга обмотки збудження;

i_{fd} – струм в обмотки збудження;

U_{kd}, U_{kd1}, U_{kd2} – напруги демпферних обмоток по осях d і q;

i_{kd}, i_{kd1}, i_{kd2} – струми демпферних обмоток по осях d і q;

R - активний опір фази статора;

L_d, L_q - індуктивність якірної обмотки по осях d і q;

L_{md} - взаємні індуктивності між обмотками по осях d і q;

R_{fd} – активний опір обмотки збудження;

L_{fd} – індуктивність обмотки збудження;

R_{kd}, R_{kd1}, R_{kd2} – активні опору демпферних обмоток по поздовжній і поперечній осях d і q;

L_{kd}, L_{kd1}, L_{kd2} – індуктивність демпферних обмоток по поздовжній і поперечній осях d і q.

Системи рівнянь (2.13 і 2.14) описують електричну частину СГ, схема заміщення показана на рис. 2.11.

Механічна частина СГ може бути представлена наступним чином[1]:

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{2J}(M_m - M_E - K_d\Delta\omega) \qquad (2.15)$$

$$\omega(t) = \Delta\omega - \omega_0 \qquad (2.16)$$

де $\Delta\omega$ – відхилення швидкості ротора від синхронної швидкості;

J - момент інерції ротора;

M_m – механічний момент;

M_E – електромагнітний момент;

K_d – коефіцієнт демпфірування;

$\omega(t)$ – кутова швидкість ротора;

ω_0 – синхронна швидкість (1, у в.о.)

Структурна модель механічної частини СГ представлена на рис. 2.14.

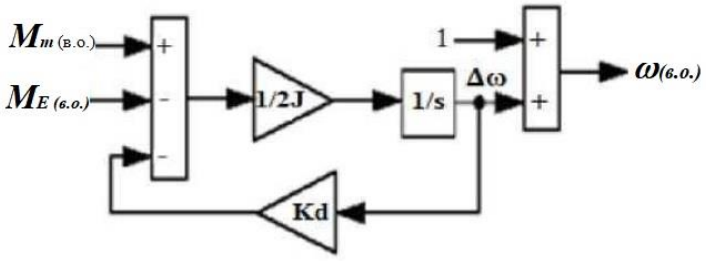


Рис. 2.14 – Механічна частина СГ [1]

Основні складові суднових дизель-генераторних установок: двигун, регулятори, система збудження і синхронний генератор показані на рис. 2.15.

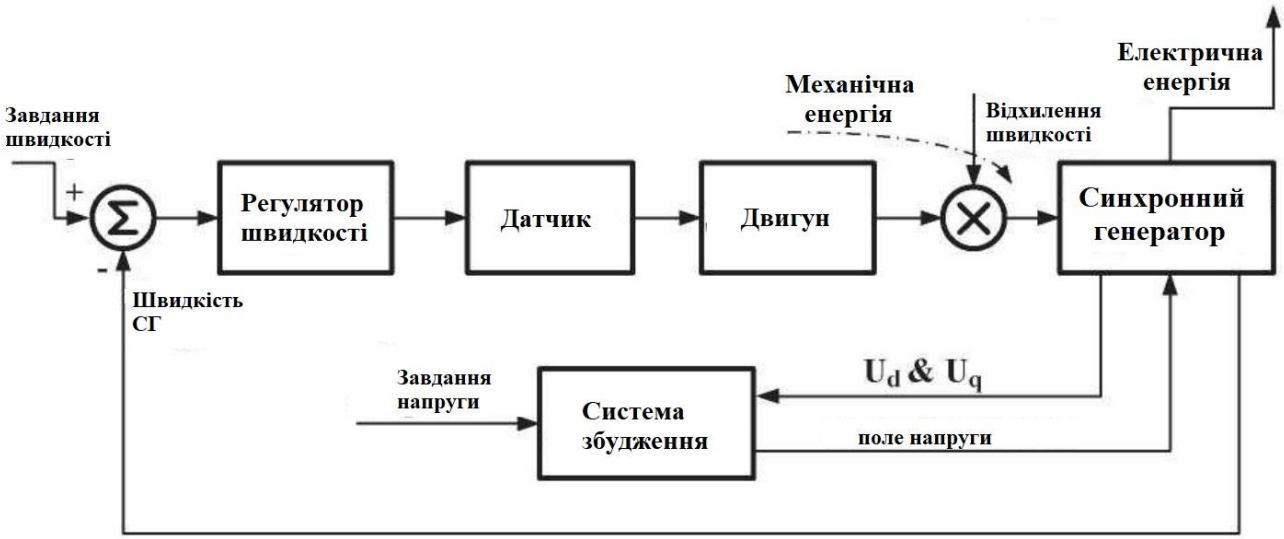


Рис. 2.15 – Основні складові Д-Г

Далі більш детально розглянуті моделі дизельного двигуна та синхронного генератора. Згідно блок-схеми дизель-генератора з регулятором і синхронним генератором (рис. 2.15) різниця швидкості або частоти обертання двигуна дає сигнал, що управляє, в результаті чого змінюється момент первинного двигуна. Дизельний двигун створює крутний момент, механічна потужність на валу представлена наступним рівнянням:

$$P_M = M_E \omega, \qquad (2.17)$$

де P_M – механічна потужність (параметр у відносних одиницях - в.о.)

ω – кутова швидкість обертання ротора (у в.о.)

M_E – крутний момент двигуна (у в.о.)

Відповідна математична модель дизельного двигуна представлена на рис. 2.18. Тут регулятор швидкості діє на сигнал відхилення швидкості і призначений для підтримки заданого швидкісного режиму дизельного двигуна, будучи основним засобом управління для дизельного двигуна під навантаженням (СГ). Управління швидкістю можливо моделювати за допомогою передавальної функції випередження-запізнювання [34, 35], або за допомогою ПІД - регулятора. У даній роботі ми користуємося передавальною функцією випередження-запізнювання, щоб

представити швидкодію контролера, як показано на рис. 2.16. Тут - К - коефіцієнт підсилення регулятора швидкості, T, T_1, T_2 – постійні часу регулятора швидкості, T_3, T_4, T_5 – постійні часу для приводу, T_6 – час затримки двигуна у виході на механічну енергію СГ.

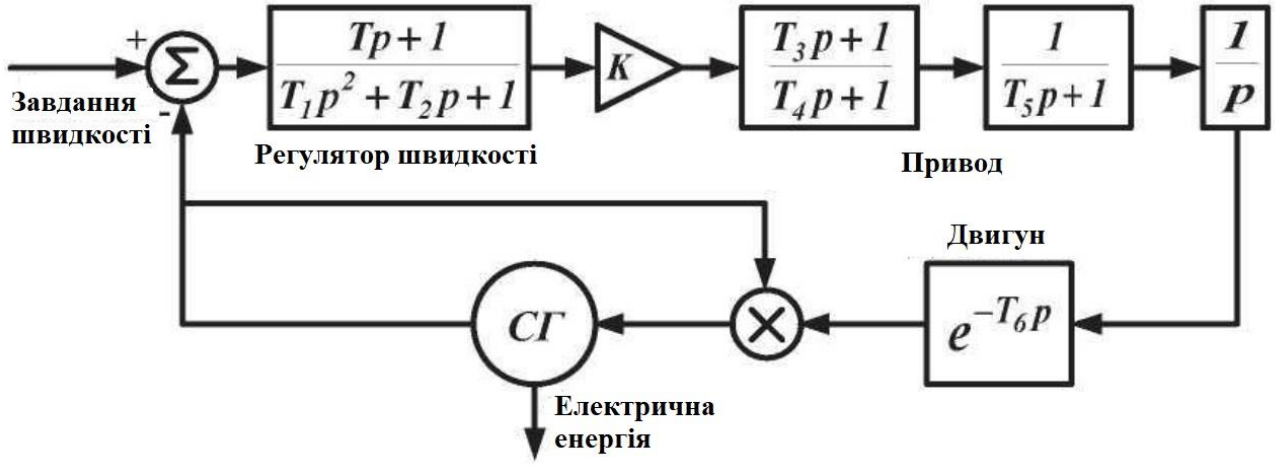


Рис. 2.16 - Математична модель дизельного двигуна [46]

Модель системи збудження синхронного генератора. Основним завданням управління системи збудження є регулювання напруги генератора. Узагальнена схема системи збудження СГ показана на рис. 2.17.

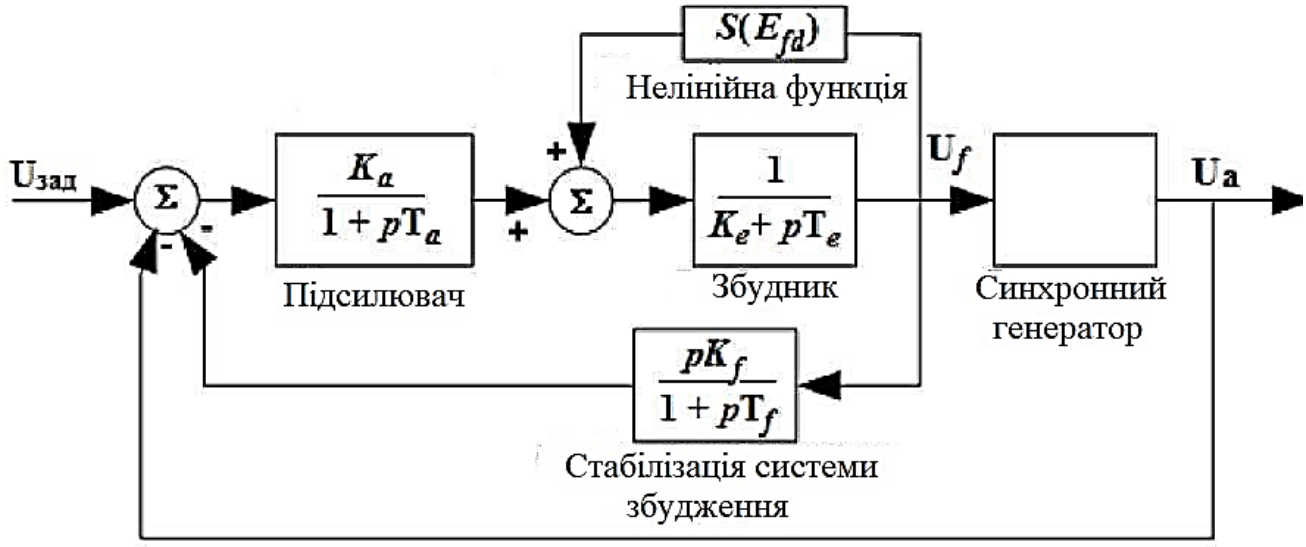


Рис. 2.17 – Узагальнена модель системи збудження СГ: K_a – коефіцієнт підсилення регулятора, T_a – постійна часу регулятора, K_e – коефіцієнт підсилення збудника, T_a – постійна часу збудника, K_f – коефіцієнт посилення стабілізатора зворотного зв'язку, T_f – постійна часу стабілізатора зворотного зв'язку

В якості можливого варіанту системи енергопостачання судна, пов’язаного з останніми тенденціями та вимогами класифікаційних товариств щодо зменшення енергоспоживання суден і відповідним зменшенням викидів парникових газів в атмосферу, що знаходяться в портах, на рис. 2.18 показана однолінійна схема берегового живлення судна.

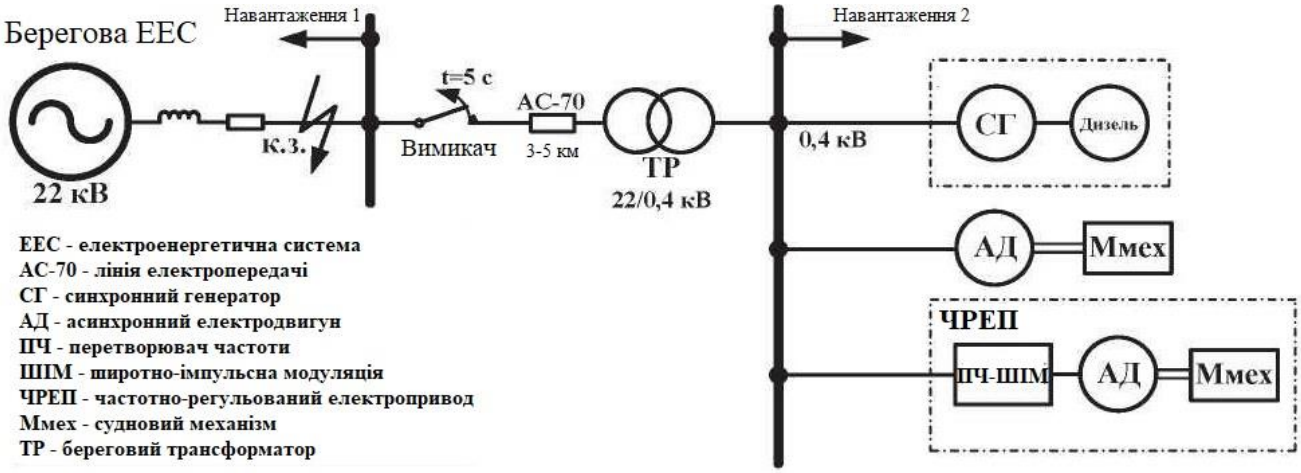


Рис. 2.18 - Варіант енергоживлення судна в порту через систему берегового живлення

Висновки до розділу 2.

У цьому розділі надано огляд сучасного стану розвитку суднових електроенергетичних систем і частотно-регульованого електроприводу суднових механізмів в їх складі в контексті підвищення енергоефективності експлуатації судна та зниження енергоспоживання та раціональних методів керування електричною енергією.

При виробництві, розподіленні, перетворенні та використанні електричної енергії у судновій електроенергетичній системі виникають небажані втрати, що пов’язані з активно-індуктивним характером навантаження, де повний струм генератора, трансформаторів повинен бути збільшений по відношенню до необхідного активного струму навантаження на величину обернено пропорційну значенню коефіцієнта потужності, що відповідно збільшує встановлену потужність

електрообладнання і перетин кабельних ліній. Тому суднові генеруючі установки повинні забезпечувати додаткові реактивні потужності, що в свою чергу знижує їх ефективність роботи через перевитрату палива приводних двигунів (дизельних, газових, парових).

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

В судновій електроенергетичній системі прямі пуски потужних електродвигунів ускладнені або неможливі із-за необхідності генерування реактивних струмів саме впродовж перехідного процесу, співвимірного з номінальним струмом генератора (генераторів). При цьому істотно збільшується динамічний провал і час відновлення напруги генератора при включенні навантажень з низьким коефіцієнтом потужності.

При використанні систем частотно-регульованого електроприводу – як засобу підвищення енергоефективності та зниження енергоспоживання, в електроенергетичній системі судна виникають проблеми забезпечення працездатності суднових електроприводів у можливих режимах - нормальних, ремонтних, аварійних і після аварійних. Вирішення цих проблем має ряд специфічних особливостей, однією з яких є моделювання динамічних режимів обладнання в суднові електроенергетичній системі.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СУДНОВОГО МЕХАНІЗМУ

В даній роботі досліджуються динамічні режими суднової електроенергетичної системи відповідно до однолінійної схеми, зображеній на рис. 2.18, без використання берегового живлення судна при живленні від одного СГ. Модель системи СГ-ЧРЕП представлена на рис. 3.1.

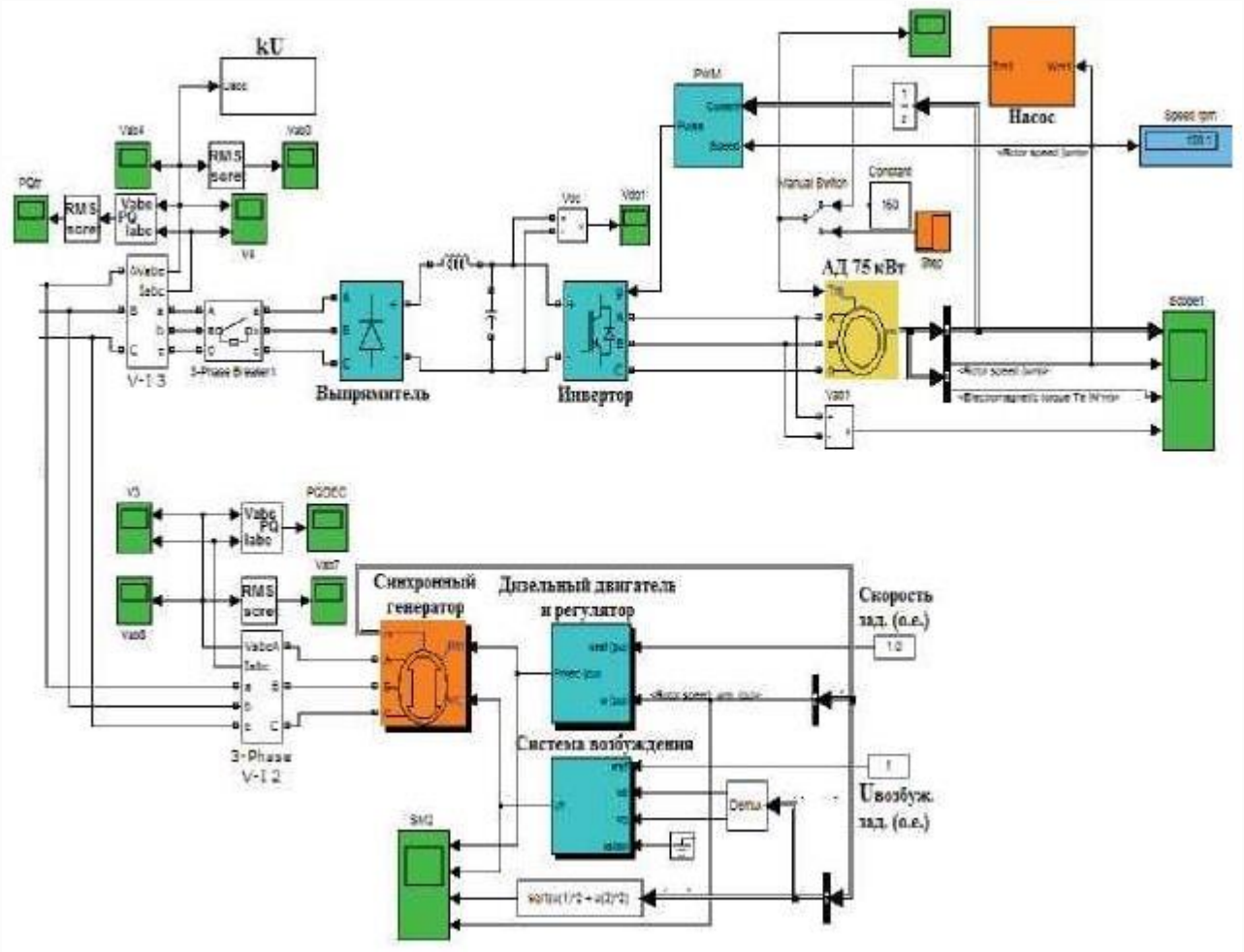


Рис. 3.1 – Модель системи СГ-ЧРЕП

У представлених моделях СГ-ЧРЕП та СГ-нерегульований АД (рис.3.1 та рис. 3.2) використані наступні основні блоки:

- ***Випрямляч***, що живить інвертор через ланку постійного струму, моделювався блоком Universal Bridge (Diode bridge) - трифазний випрямляч.

- ***Інвертор*** використано як джерело змінної частоти та змінної напруги для живлення АД, з використанням блоку Universal Bridge (IGBT/ Diode bridge) - біполярний транзистор з ізольованим затвором, що управляється в замкнутій системі регулювання з ПІ - регуляторами (струму і швидкості), для регулювання АД.
- **Навантаження 2**, підключено до шин ГРЩ, представлено блоком 3-Phase Series RLC Load з параметрами навантаження U=0,4 кВ, P=75 кВт, Q=45 кВАр, f=50 Гц.

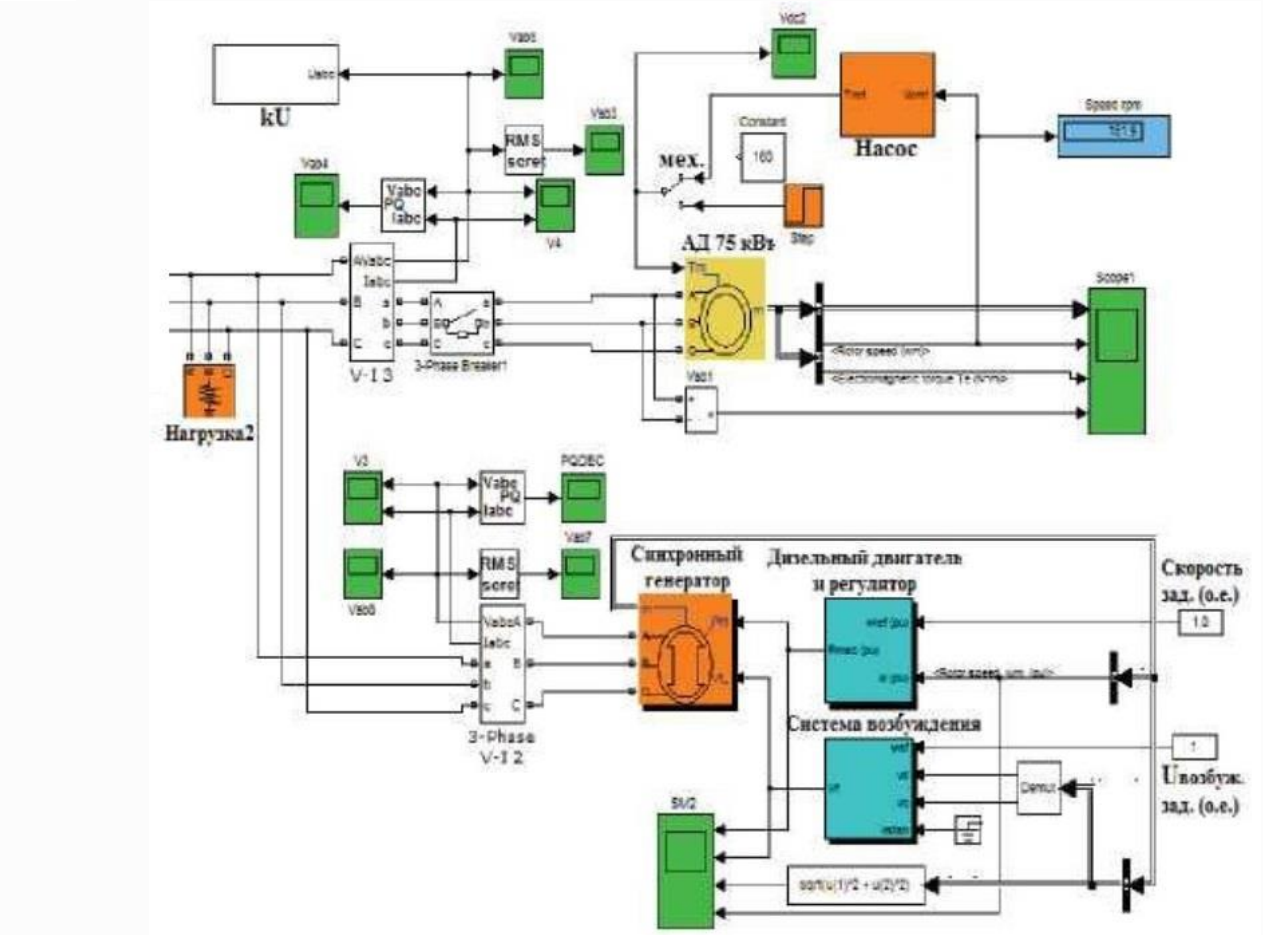


Рис. 3.2 – Модель СЕЕС з нерегульованим АД

У представлених моделях є всі необхідні вимірювальні блоки і пристрої для відображення миттєвих та діючих величин струмів і напруг. Для розгляду динаміки СЕЕС досліджувались наступні ситуації:

- прямий пуск АД від СГ;
- пуск частотно-керованого АД з ПЧ.

Для моделювання процесів пуску АД взяті конкретні паспортні дані асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу 4АН225М4У3 потужністю 75 кВт [1].

Динамічні характеристики АД при прямому пуску та з ПЧ приведені на рис. 3.3.

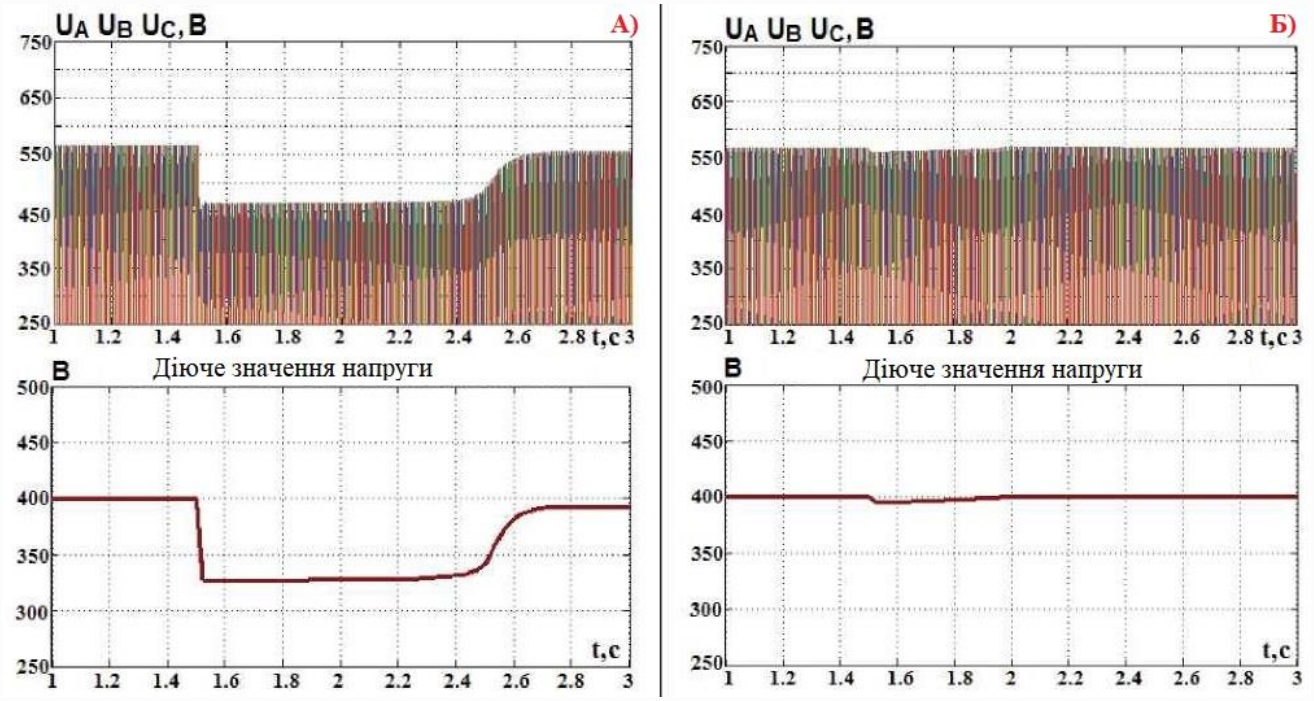


Рис. 3.3 – Осцилограми перехідних процесів прямого пуску нерегульованого АД, А) та пуску частотно-керованого АД з перетворювачем частоти, Б)

Величина первинного провалу напруги при прямому пуску АД складає близько 70 В (18, 3%), тривалість перехідного процесу відновлення напруги визначається настроювальними параметрами системи збудження СГ та характером навантаження АД суднового механізму. Використання ЧРЕП забезпечує плавний пуск АД і може здійснюватися в малопотужній мережі, тобто при достатньо невеликому співвідношенні генеруюча потужність (СГ)/ АД суднового механізму. Крім того завдяки ЧРЕП знижується ймовірність перегріву обмоток, пуск проходить плавно (без небезпечних гідравлічних ударів у випадку з відцентровими насосами).

Використовуючи моделі рис. 3.1 і 3.2 в роботі досліджувались динамічні процеси для нерегульованого АД з моментом опору суднових механізмів, характерних для відцентрових насосів ($M_C \equiv \omega^2$) – турбомеханізмів.і

Динамічні характеристика нерегульованого АД при значному коливанні напруги суднової мережі (працює один СГ) показані на рис. 3.4.

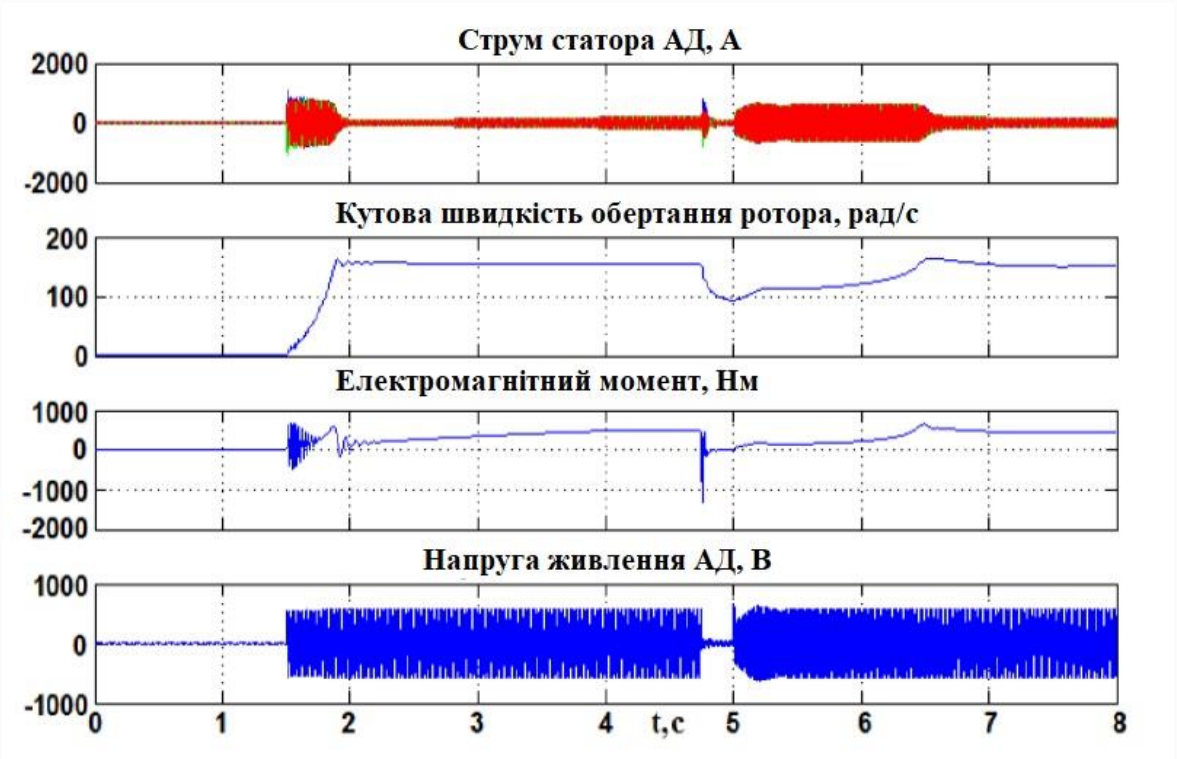


Рис. 3.4 – Динамічні характеристики нерегульованого АД при коливанні напруги живлення

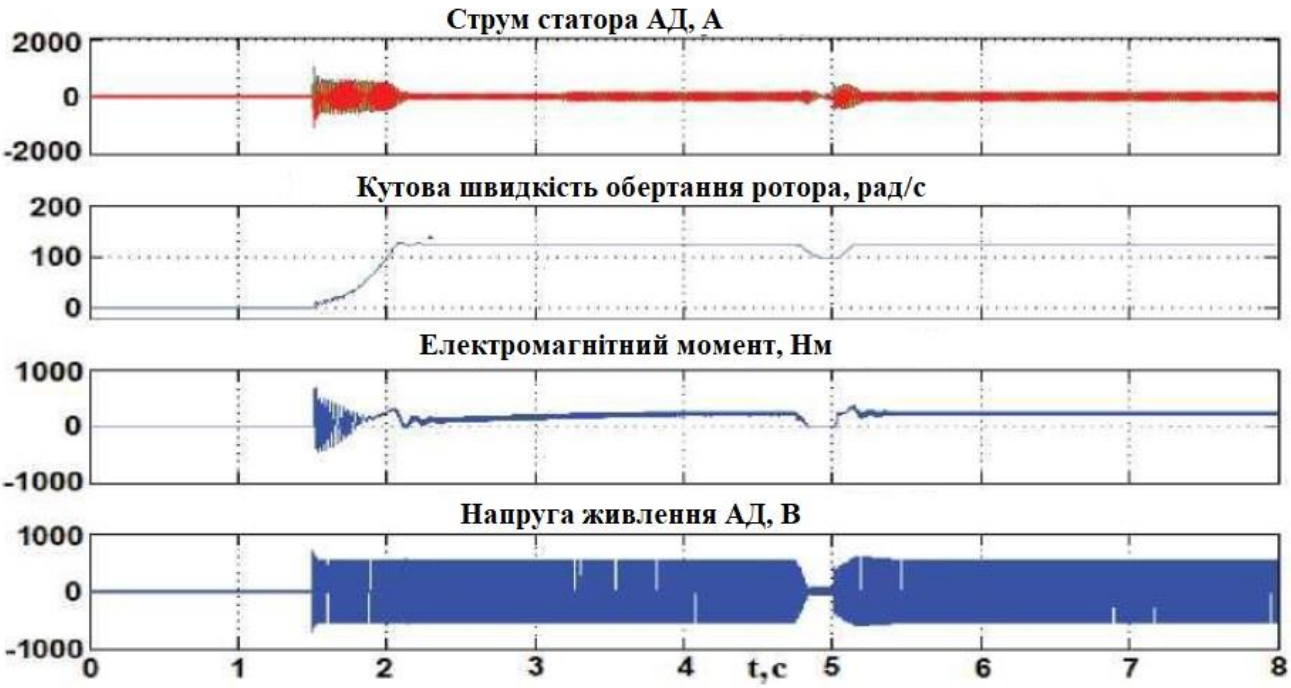


Рис. 3.5 – Динамічні характеристики ЧРЕП при нестабільній мережі живлення

Використання частотно-регульованого електропривода для насоса забезпечує швидке відновлення і стабілізацію після коливань напруги силової мережі судна (в роботі один СГ), див. рис. 3.5.

Для відцентрового насосу споживана потужність змінюється пропорційно кубу швидкості обертання АД. Тому впровадження ЧРЕП для суднових насосів зменшує електроспоживання в середньому на 50-60%, зменшує витрату води на 25%, усуває гідроудари [44]. Крім цього використання скалярного управління АД є обґрунтованою альтернативою для застосувань, де немає змінного навантаження і не потрібна добра динаміка, як для насоса і вентилятора. Результати моделювання динамічних характеристик АД і відцентрового насоса при регулюванні швидкості показані на рис.3.6.

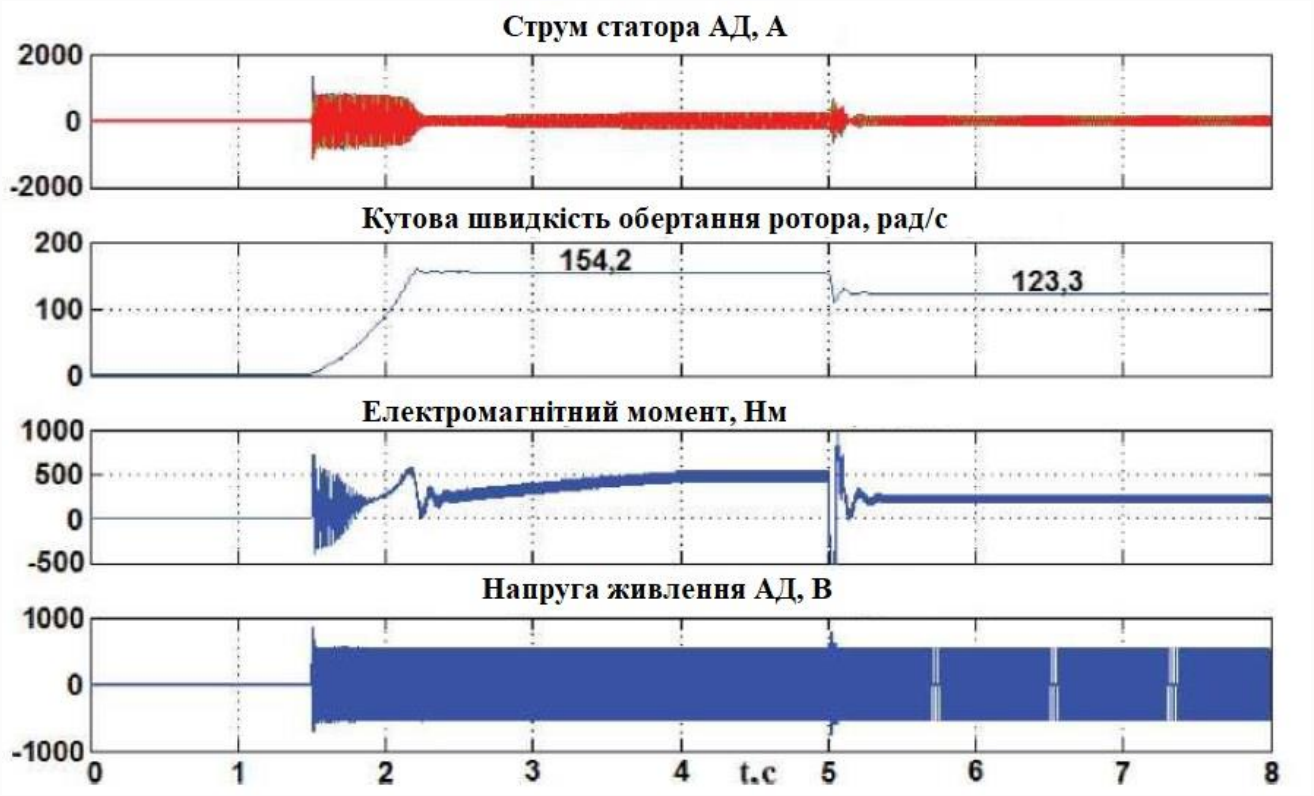


Рис. 3.6 – Регулювання швидкості АД для механізму типу відцентрових насосів

При використанні ЧРЕП споживана активна і реактивна потужності АД при регулюванні швидкості для механізму типу відцентрових насосів показана на рис. 3.7.

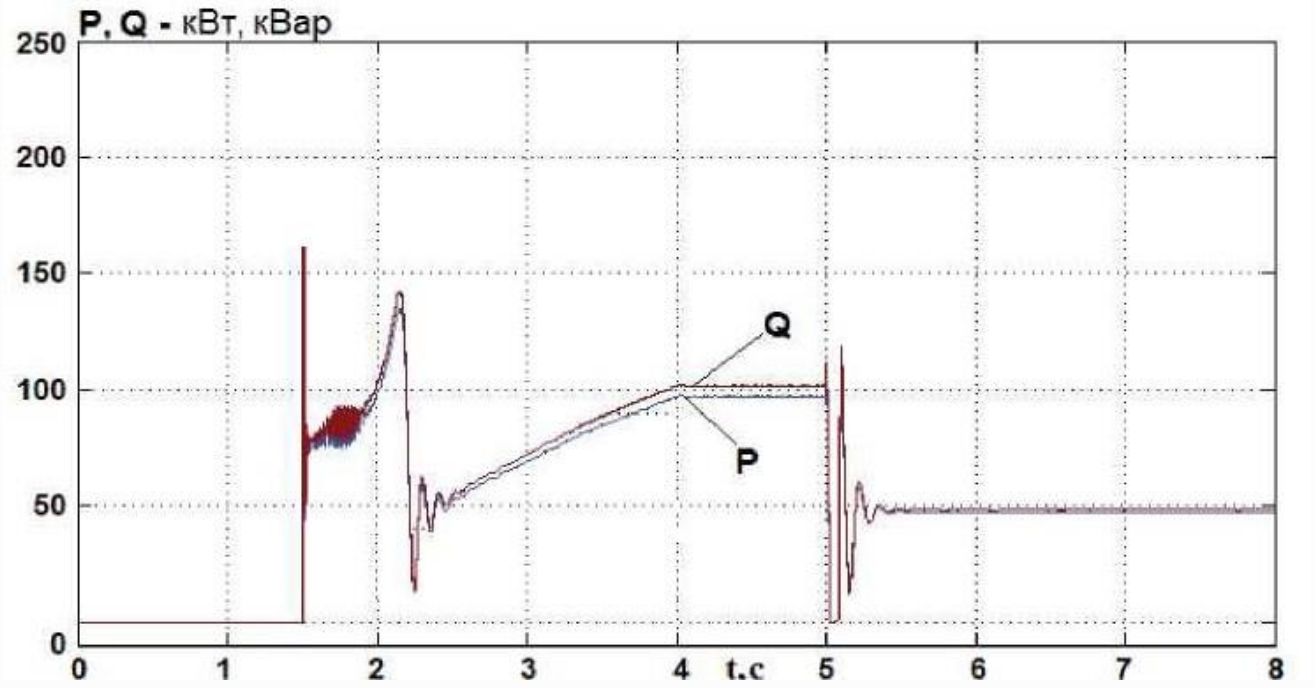


Рис. 3.7 - Споживана активна і реактивна потужності АД при регулюванні швидкості для механізму типу насосів

Висновки до розділу 3

1. Для дослідження динамічних процесів в судновій ЕЕС, що включає дизель-генераторну електростанцію і частотно-регульований електропривод розроблена відповідна математична модель в Simulink пакета MATLAB.

2. В результаті проведених досліджень на моделях асинхронного електроприводу з ЧРЕП було встановлено, що при застосуванні ПЧ підвищується не тільки точність регулювання, а й покращуються пускові режими АД, зокрема, зменшуються пускові струми і пусковий момент. Окрім того використання ЧРЕП стабілізує напругу силової мережі.

3. При масовому використанні ЧРЕП необхідно забезпечувати технічні засоби для покращення якості суднової мережі живлення, що необхідно досліджувати в наступних роботах.

4. ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

4.1. 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 [13-16]. Задача вибору оптимальних параметрів та оцінка ефективності роботи АД в перехідних режимах ускладняється 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. За основу вибраний електропривод насоса забортної води CSM 280S/M-4 номінальною потужністю 150 кВт.

Блок з параметрами двигуна представлений на рис. 4.1.

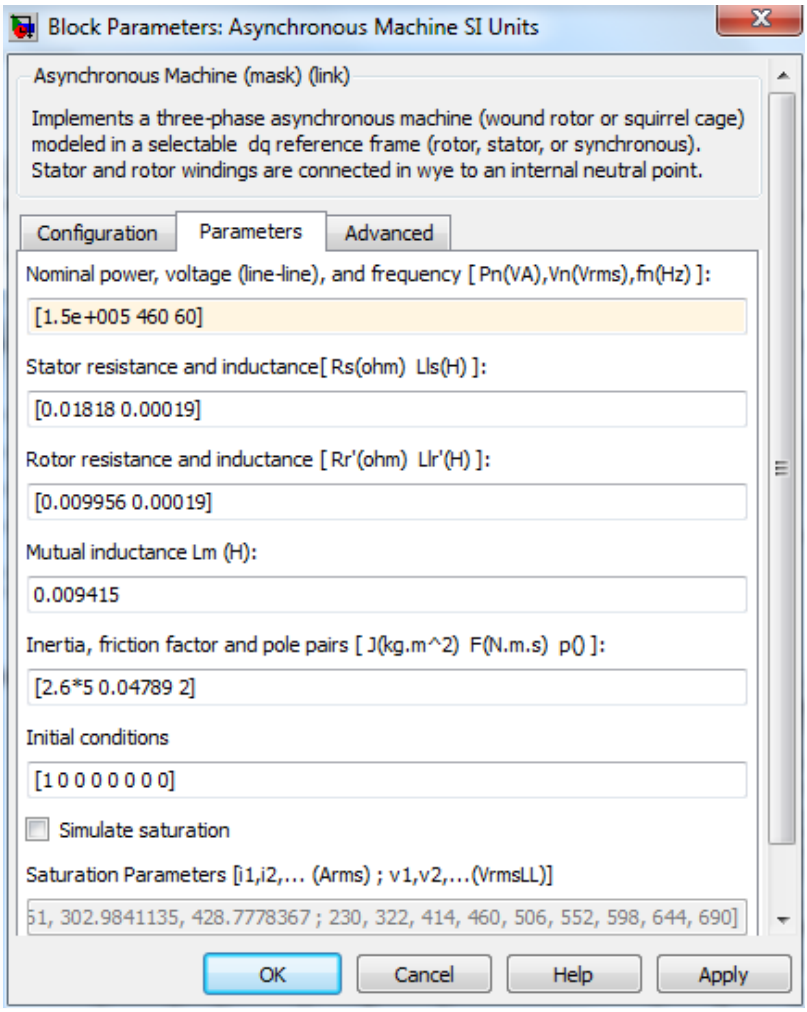


Рис. 4.1 - Параметри блоку АД

Для вибраного двигуна розроблена насосна характеристика навантаження представлена на рис. 4.2.

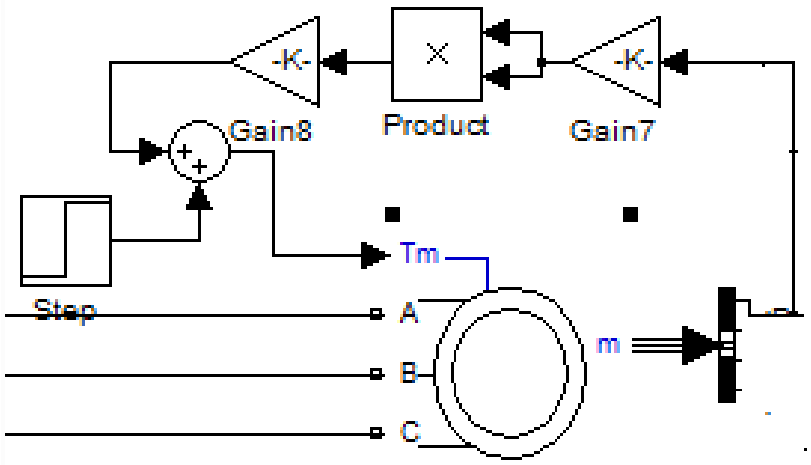


Рис. 4.2 – АД з навантаженням

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

моделювання проаналізовані графіки залежності коефіцієнта потужності АД та АД з ІКРП, які зображені на рис. 4.3 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.

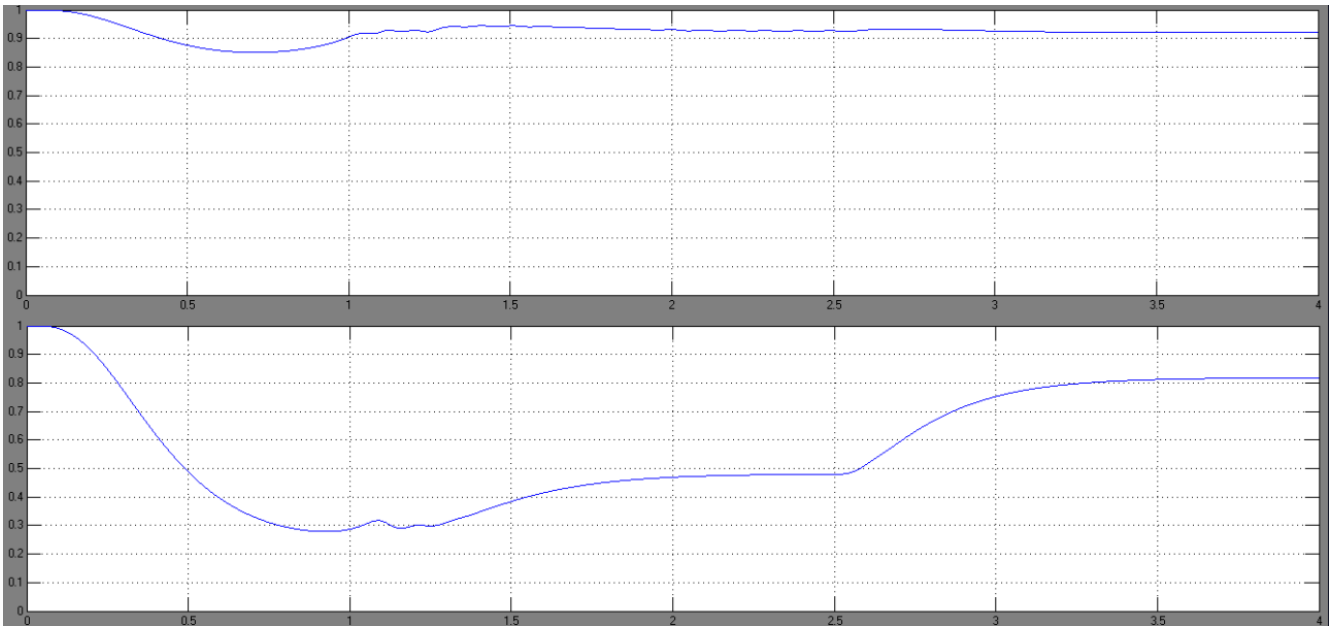


Рис. 4.3 – Значення $cos\varphi$ традиційного АД та АД з ІКРП

На рис. 4.4 та 4.5 зображено залежності активної і реактивної потужностей в лінії живлення під час пуску АД при компенсації реактивної потужності.

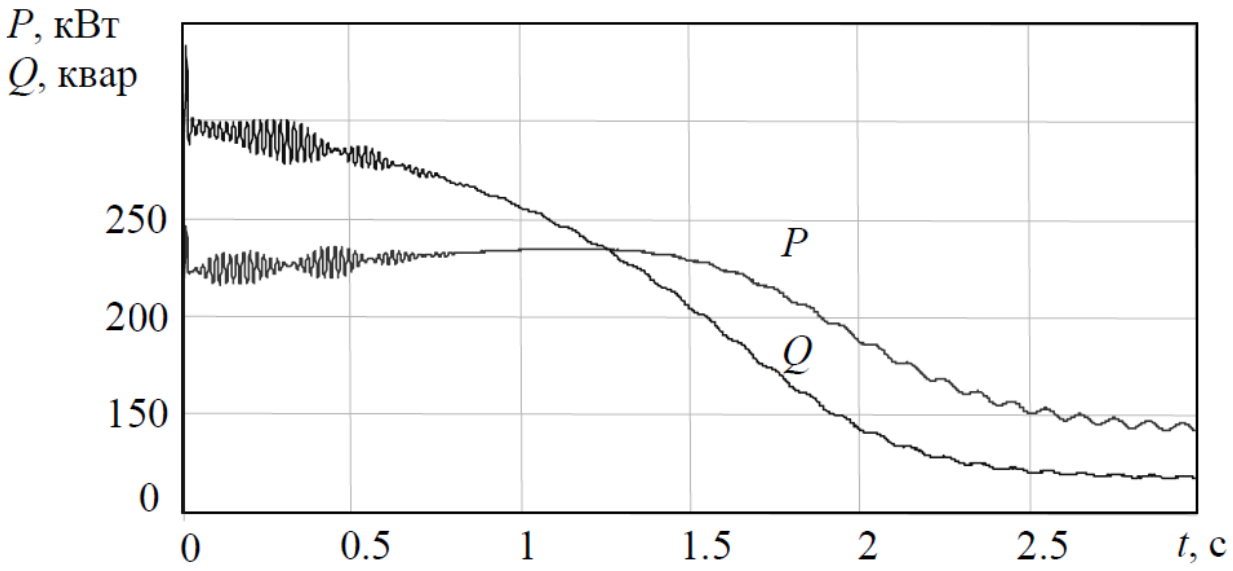


Рис. 4.4 – Залежності активної і реактивної потужностей в лінії живлення під час пуску традиційного АД

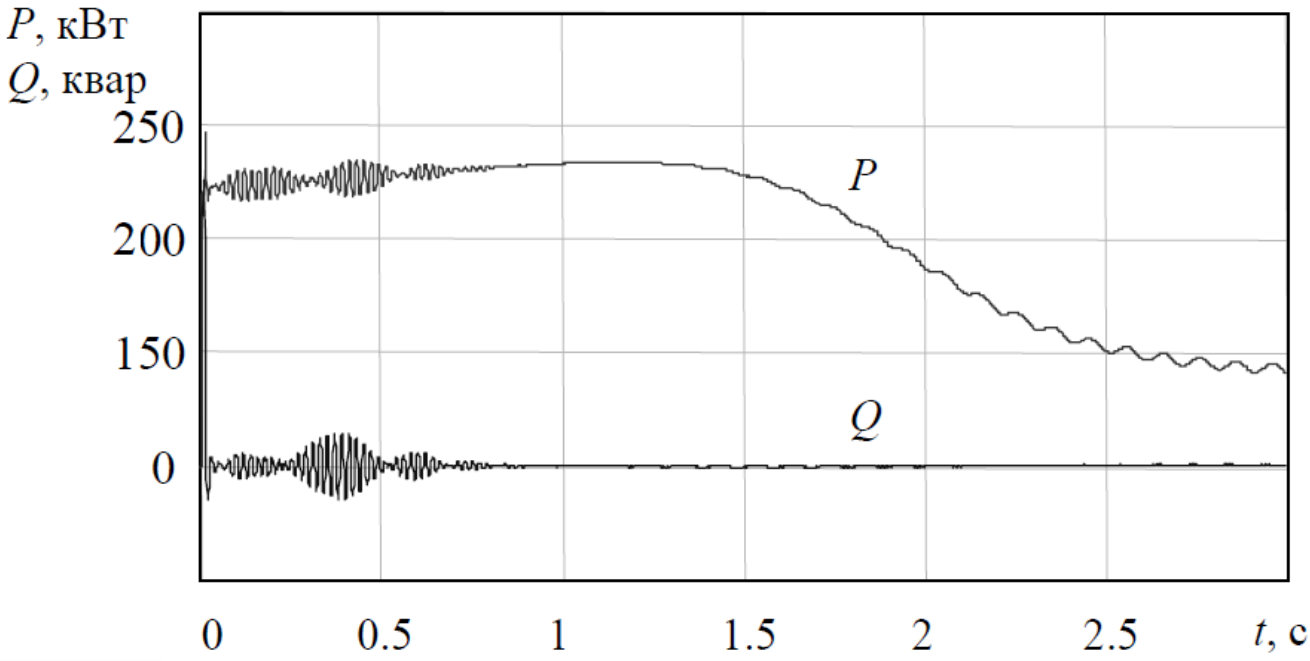


Рис. 4.5 – Залежності активної і реактивної потужностей в лінії живлення під час пуску АД з ІКРП

З порівняння залежностей реактивних потужностей, зображених на рис. 4.4 і на рис. 4.5, 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 (рис. 4.6) 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.

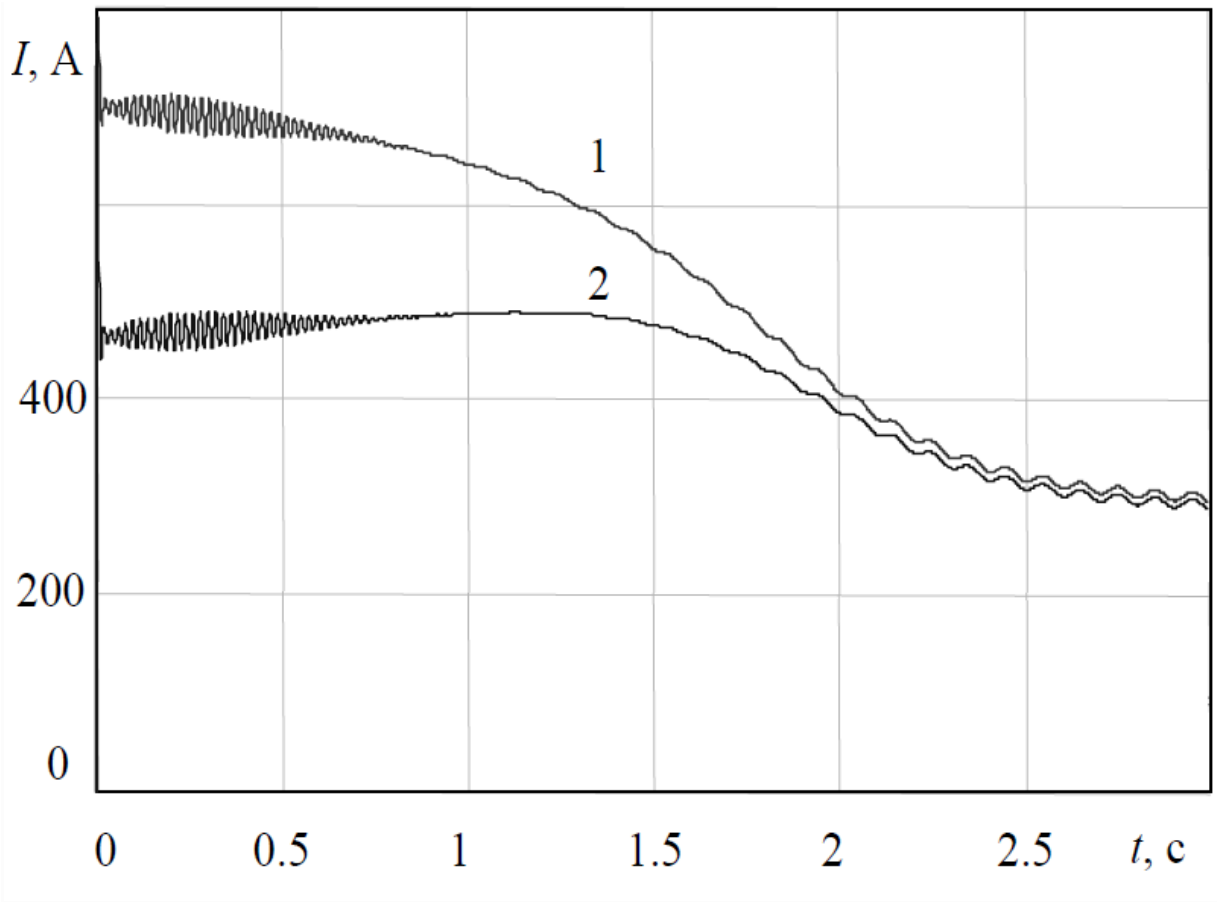


Рис. 4.6 – Залежності струму в лінії під час пуску АД

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.

4.2. Аналіз знижень напруги під час пуску АД та динамічній 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 рис. 4.7 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.

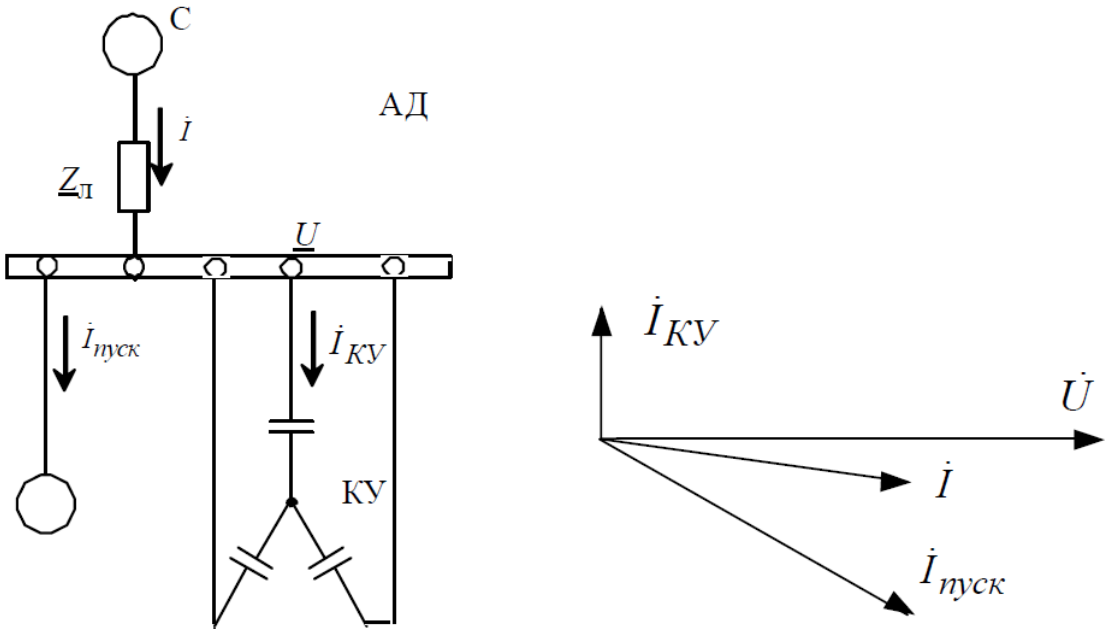


Рис. 4.7 – Схема живлення вузла навантаження і векторна діаграма

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 рис. 4.8 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.

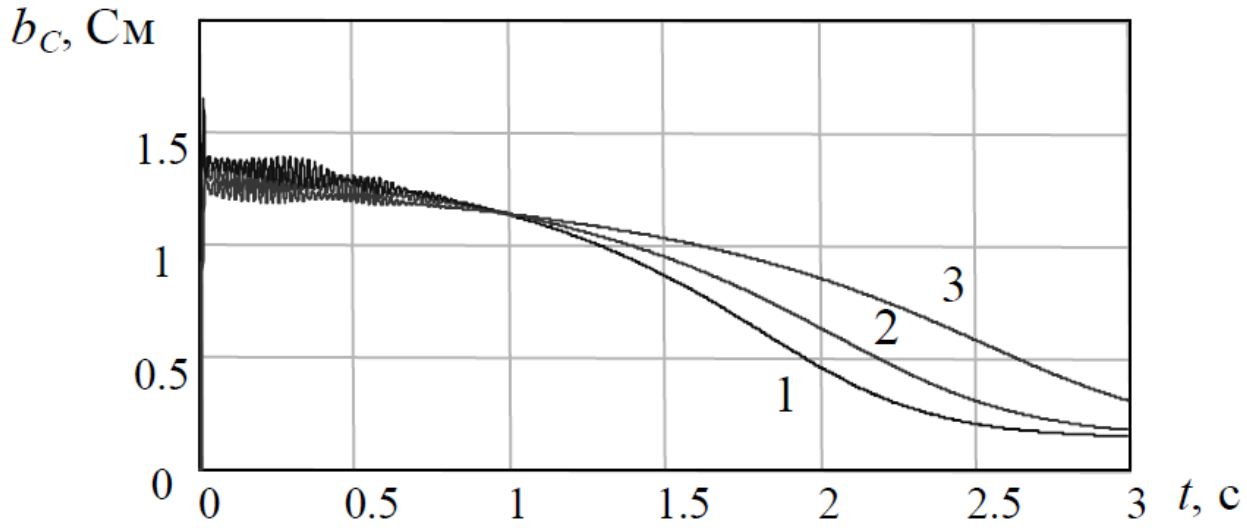


Рис.4.8 – Залежності спектральної реактивної провідності АД за номінальної напруги (крива 1) та у разі зниження напруги (криві 2 і 3)

В результаті моделювання отримані залежності напруги, представлений на рис. 4.9

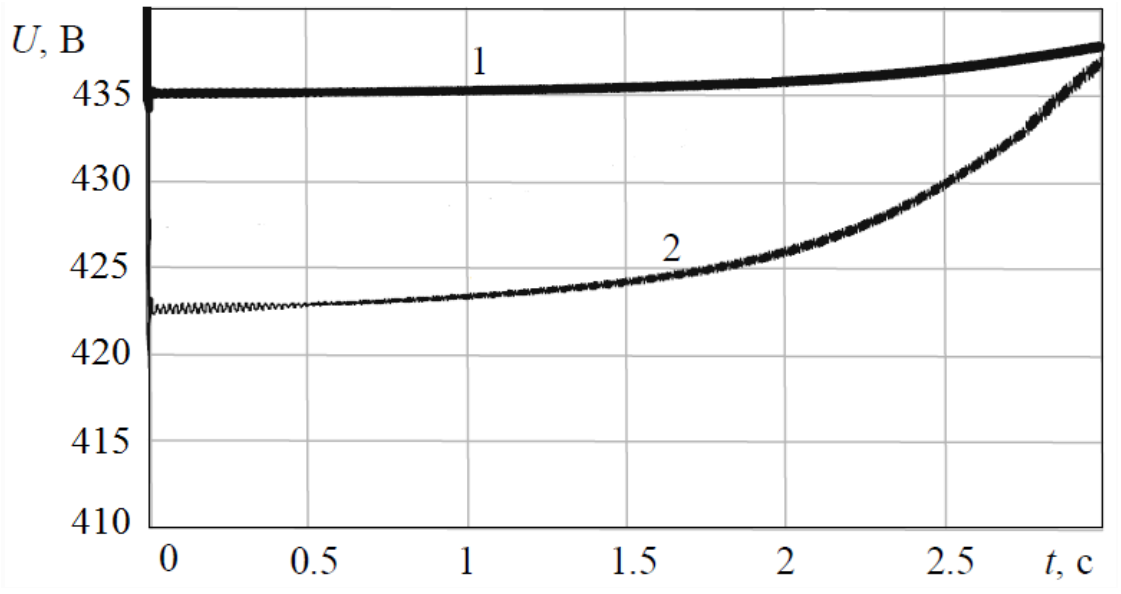


Рис. 4.8 - Залежності напруги під час пуску (2-традиційний АД), (1-АД з ІКРП)

З графіку видно, що в АД зІКРП значно менший просів напруги = 5В, що є значною перевагою.

Висновки до розділу 4

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.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведені дослідження динамічних режимів суднової ЕЕС з використанням традиційних АД та частотно-керованих та використанням 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 режимів традиційних 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. При використанні систем частотно-регульованого електроприводу – як засобу підвищення енергоефективності та зниження енергоспоживання, в електроенергетичній системі судна виникають проблеми забезпечення працездатності суднових електроприводів у можливих режимах - нормальних, ремонтних, аварійних і після аварійних. Вирішення цих проблем має ряд специфічних особливостей, однією з яких є моделювання динамічних режимів обладнання в суднові електроенергетичній 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.

4. Зниження споживаних та пускових струмів електроприводами на основі АД з ІКРП та більш масове використання ЧРЕП дозволяє підвищити енергоефективність та енергоспоживання суднових систем і механізмів і, як наслідок зменшити викид парникових газів в атмосферу від морського транспорту, розвантажити силові мережі 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. 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.
2. Вишневский Л.В. Пуск асинхронных электродвигателей с компенсацией реактивной мощности / Вишневский 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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 «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електро-приводу, Теорія і практика, - Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36 (1009), – С. 412-416.

7. 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. – № a2015 09542; заявл. 05.10.2015; опубл. 25.08.2016, Бюл. №16. – 4с.
8. 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.
9. 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.
10. Енергозбереження - пріоритетний напрямок державної політики України / Ковалко М.П., Денисюк С.П., Відпов. Ред. Шидловський А.К. – Київ: УЕЗ, 1998. – 506 с.
11. Шидловский А. К. Частотно-регулируемые источники реактивной мощности / А. К. Шидловский, В. С. Федий. – Киев: Наукова думка, 1980. – 304 с.
12. Adisa A. Modelling and Analysis of Squirrel Cage Induction Motor with Leading Reactive Power Injection [Електронний ресурс] / A. 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.
13. Бурбело М.Й. Підвищення ефективності електроспоживання асинхронних двигунів у перехідних режимах/ М.Й. Бурбело , А.В. Гадай / / Енергетика та електріфікація . - 2008 . - № 3 . - С. 57 - 58.
14. Бурбело М.Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різко змінних режимах навантаження / М.Й. Бурбело , А.В. Гадай / / Вісник Вінницького політехнічного інституту . - 2008 . - № 1 . -С. 65 - 68.

15. Бурбело М.Й. Аналіз асинхронних двигунів в перехідних режимах з використаних спектральних параметрів / М.Й. Бурбело , А.В. Гадай / / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету . -2008 року. - Вип. 4 (51), ч. 1 . - С. 150 - 154 .
16. Пєтухов М.В. Дослідження математичної моделі параметричного статичного компенсатора реактивної потужності / М.В. Пєтухов , А.В. Гадай, Ю.В. Грицюк / / Вісник НУ "Львівська політехніка" . Електроенергетичні та електромеханічні системи . 2001 року. - № 421 . - С. 154 – 159.
17. Пєтухов М.В. Інтегральні показники енергетичного процесу тиристорних компенсаторів реактивної потужності при їх живлені від мережі обмеженої потужності / М.В.Пєтухов , Ю.В. Грицюк , А.В. Гадай / / Вісник Приазовського державного технічного університету . - Маріуполь : ПДТУ, 2005 . - С. 100 - 104.
18. Low voltage motors Motor guide [Електронний ресурс] // ABB. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: http://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/low-voltage-motor-guide.pdf
19. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія / О. П. Чорний, О. І. Толочко, В. К. Титюк, Д. Й. Родькін, Г.С. Чекавський. – Кременчук: ПП Щербатих О. В, 2016. – 302 с.: іл.
20. Математичні методи моделювання : навчальний посібник / О. П. Чорний, В К. Титюк, Н. М. Істоміна та ін. ; заг. ред. О. П. Чорний. – Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2016. – 232 с. : іл.
21. Comparison between Direct-On-Line, Star-Delta and Auto-transformer Induction Motor Starting Method in terms of Power Quality [Електронний ресурс] // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: http://new.abb.com/docs/librariespro-vider53/about-downloads/low-voltage-motor-guide.pdf
22. Tomar A. Starting Time Calculation for Induction Motor [Електронний ресурс] / A. Tomar, A. Garg // Electr Electron System. – 2015. – Режим доступу до

ресурсу: https://www.omicsonline.org/open-access/starting-time-calculation-for-induction-motor-2332-0796-1000136.php?aid=57248&view=mobile

23. Vijay K. G. Power Factor Improvement of Induction Motor by Using Capacitors [Електронний ресурс] / K. G. Vijay // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: http://www.ijettjour-nal.org/volume-4/issue-7/IJETT-V4I7P138.pdf
24. Howell M. Correcting induction motor power factor [Електронний ресурс] / M. Howell // Electrical Apparatus Service Association Inc. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: https://www.plantengineering.com/single-article/correcting-induc-tion-motor-power-factor/79ef3367298419400cbd845cf65cb3dc.html
25. M. Mukha “A Full Mission Simulator of the Ship’s Automated Electric Power Sys-tem for Training and Competence Testing of Marine Engineers”. David Pub-lishing Company. Journal of Shipping and Ocean Engineering, vol. 4, (2017) P. 153-160. doi 10.17265/2159-5879/2017.04.002.
26. Energy efficiency handbook. Toward zero emission ship operations. Helsinki: ABB Marine & Ports, 2020. – 196 p. 9AKK107680A8255 1.9.2020. https://new.abb.com/marine/energy-efficiency-handbook
27. Подимака, В.І. Математичне моделювання перехідних процесів в електроенергетичній системі [Текст]: Навчальний посібник / В.І. Подимака, С.М. Новогрецький. - Миколаїв : НУК, 2013.- 76 с.
28. Математичне моделювання в електроенергетиці: Підручник / О.В. Кириленко, М.С. Сегеда, О.Ф. Буткевич, Т.А. Мазур. –Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 213. – 608 с.
29. Математичні методи моделювання: навчальний посібник / О. П. Чорний, В К. Титюк, Н. М. Істоміна та ін.; заг. ред. О. П. Чорний. – Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2016. – 232 с.: іл.
30. Павленко П.М. Основи математичного моделювання систем і процесів: навч. посіб. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2013. − 201 с.

31. PSCAD/EMTDC (Power Systems Computer Aided Design / ElectroMagnetic Transients including DC). [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org_structura/instit_fakul_k...
32. DIGSILENT POWER SYSTEM SOLUTIONS [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.digsilent.de/en/
33. DIGSILENT POWERFACTORY [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.rtsoft.ru/project-cards/sgt/PowerFactory/
34. SimPowerSystems User's Guide For Use with Simulink, 1998-2006 TransÉnergie Technologies Inc., under sublicense from Hydro-Québec, and The MathWorks, Inc.
35. MATLAB power system blockset user's guide, The Mathworks Inc., 1997г.MATLAB [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://exponenta.ru/matlab
36. Аналіз методом математичного моделювання перехідних процесів в системі генерування електроенергії турбогенератором з безщітковою системою збудження [Електронний ресурс] / А. С. Куцик, М. Б. Семенюк, А. А. Євченко, Т. Я. Дзьоба // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Електроенергетичні та електромеханічні системи. - 2017. - № 870. - С. 41-47. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPEEC_2017_870_9
37. Математична модель суднової електростанції [Електронний ресурс] / О. Г. Плахтина, А. С. Куцик, Б. Бастіан // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2011. - № 3. - С. 292-295. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2011_3_103
38. Математична модель системи "частотно-керований електропривод – насос – водопровідна мережа" [Електронний ресурс] / А.С. Куцик, А. О. Лозинський, О. Ф. Кінчур // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Електроенергетичні та електромеханічні системи. - 2015. - № 834. - С. 48-55. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPEEC_2015_834_10

39. Математичне моделювання в реальному часі асинхронного генератора з інвертором напруги в колі ротора [Електронний ресурс] / А. С. Куцик, О. Г. Плахтина // Electrical power and electromechanical systems. - 2019. - Vol. 1, № 1. - С. 25-35. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/elpoels_2019_1_1_6

40. Вороненко С.В., Іщенко І.М., Рудакова Г.В., Лебеденко Ю.А. Математична модель суднової комплексної електроенергетичної турбокомпресорної установки. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2019. No 2 (69). Частина 2. С. 31−38.

41. Маслов, І. Математична модель функціонування системи перетворювача частоти в судновій автономній енергетичній системі / Маслов І. З., Кулагін Д. О. // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2024. – № 1. – С. 76-80.

42. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Собчук Д. С. Оцінювання впливу на якість функціонування локальної електричної системи відновлюваних джерел електроенергії. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження АПК України. Харків: ХНТУСГ, 2013. Випуск 141. С. 8 – 10.

43. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепіков В.Б. та інш. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепіков та інш. – К.: Либідь, 2005. Ч1.– 397 с.; Ч2. – 680 с.

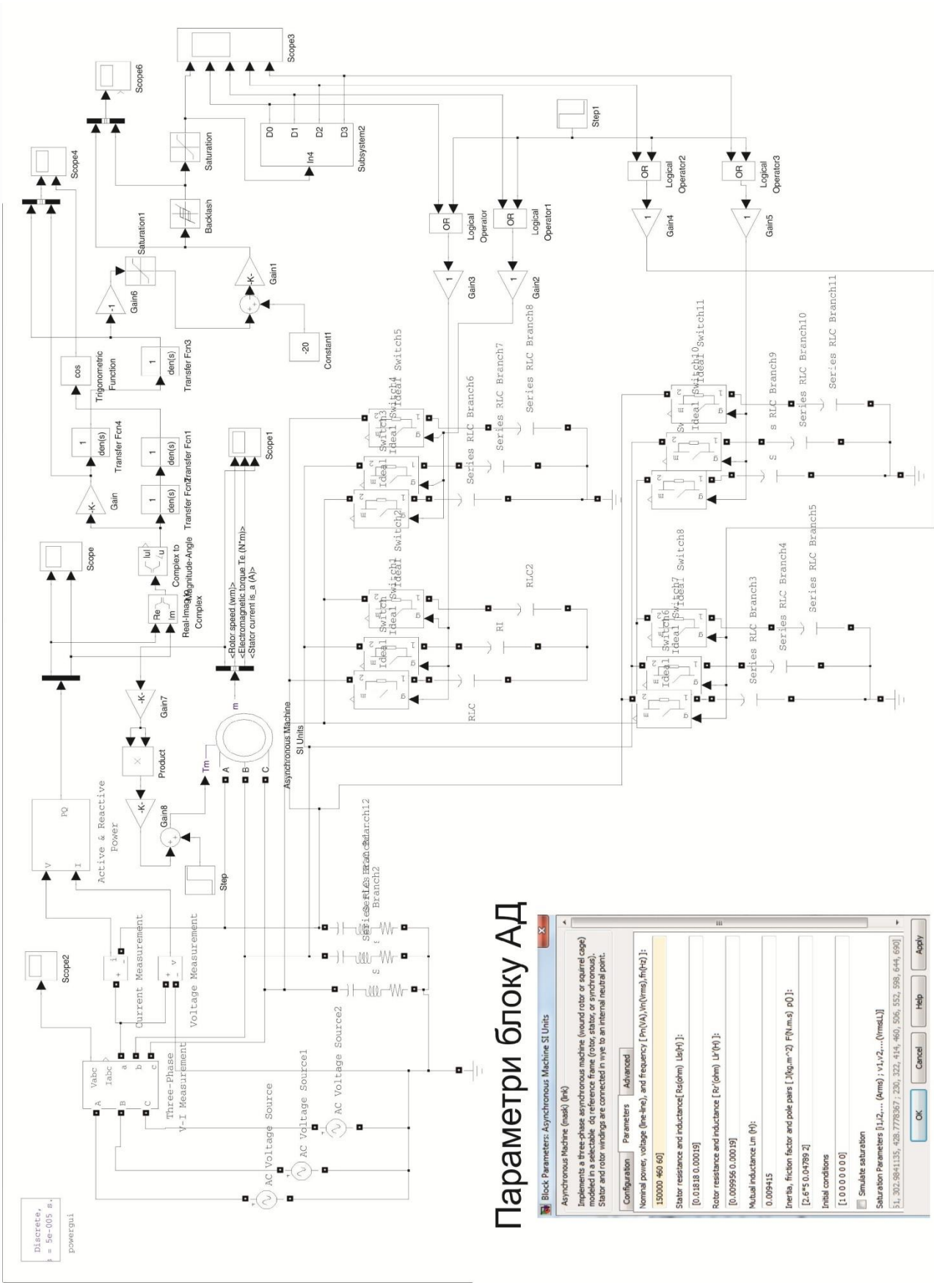
44. Загірняк М.В., Клепіков В.Б., Ковбаса С.М., Михальський В.М., Пересада С.М., Садовой О.В., Шаповал І.А. Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Київ: НАН України, 2018. – 310 с.

45. Сільвестров А.М., Островерхов М.Я., Шефер О.В., Ладік Н.А., Зіменков Д.К. Сучасні системи автоматичного керування технологічними комплексами. – К..: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 386 с.

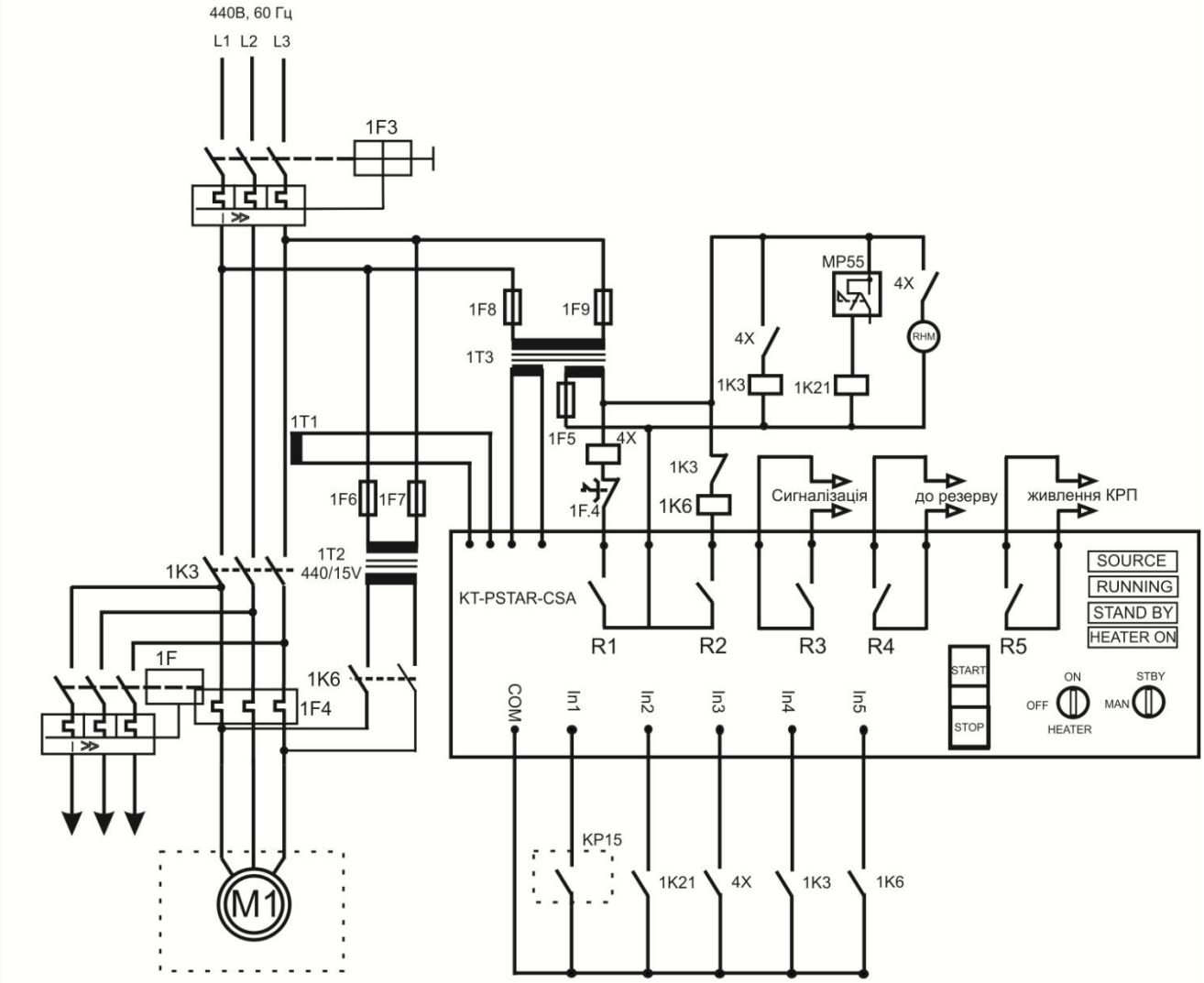
46. Ju-chirl Park. Modeling and simulation of selected distributed generation sources and their assessment.// Thesis submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University. – Morgantown, 1999.

ДОДАТКИ

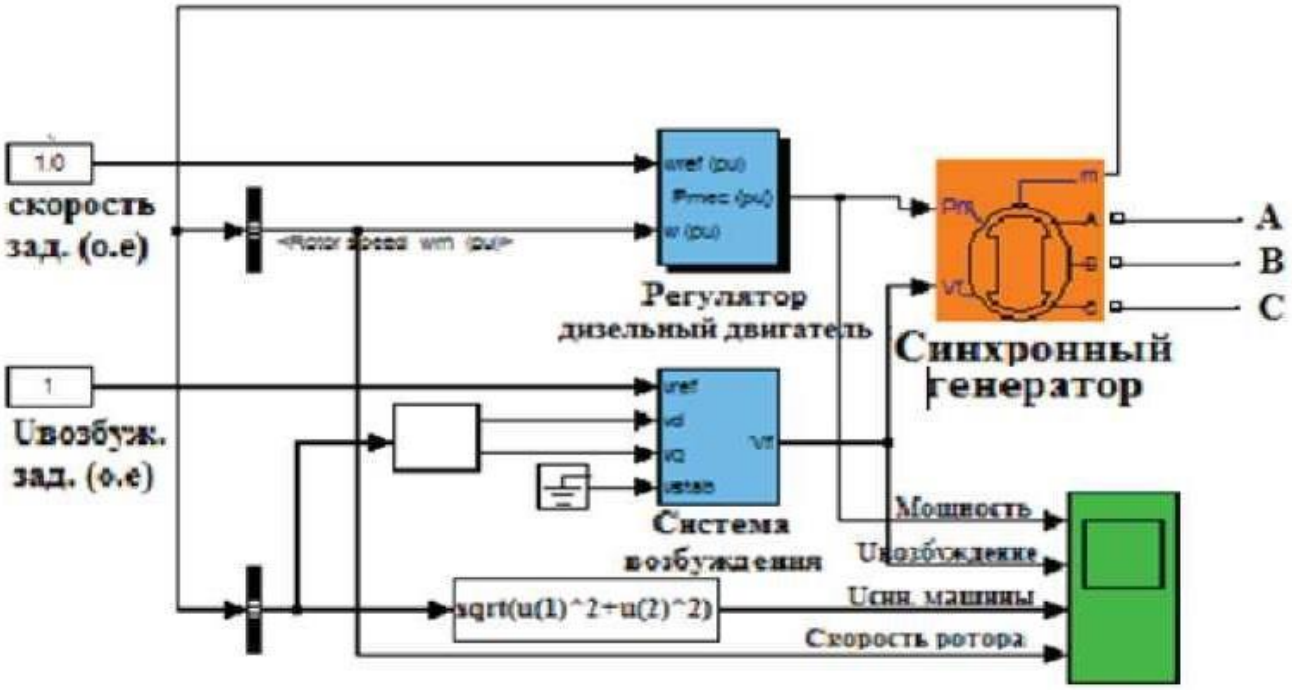
Додаток А Модель в програмному середовищі Matlab



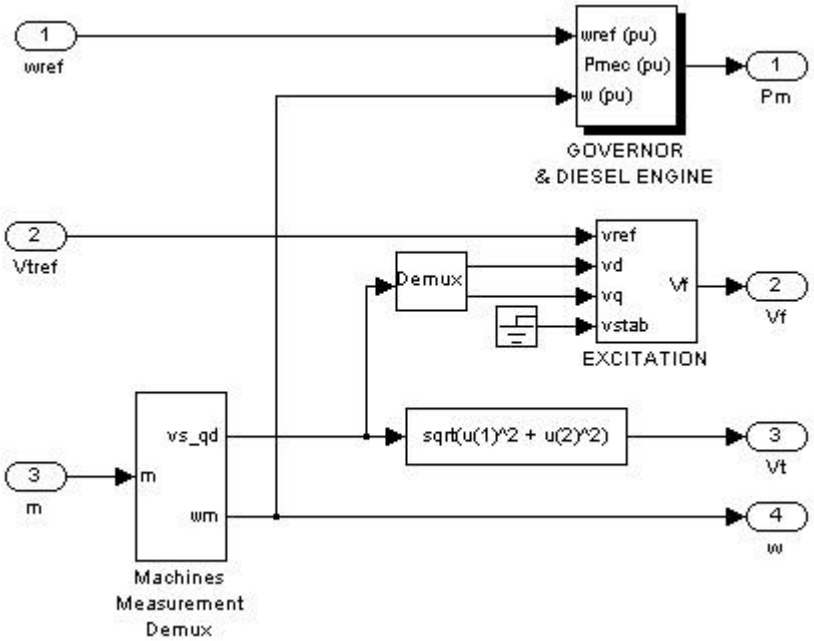
Додаток Б Принципова схема насосу забортної води



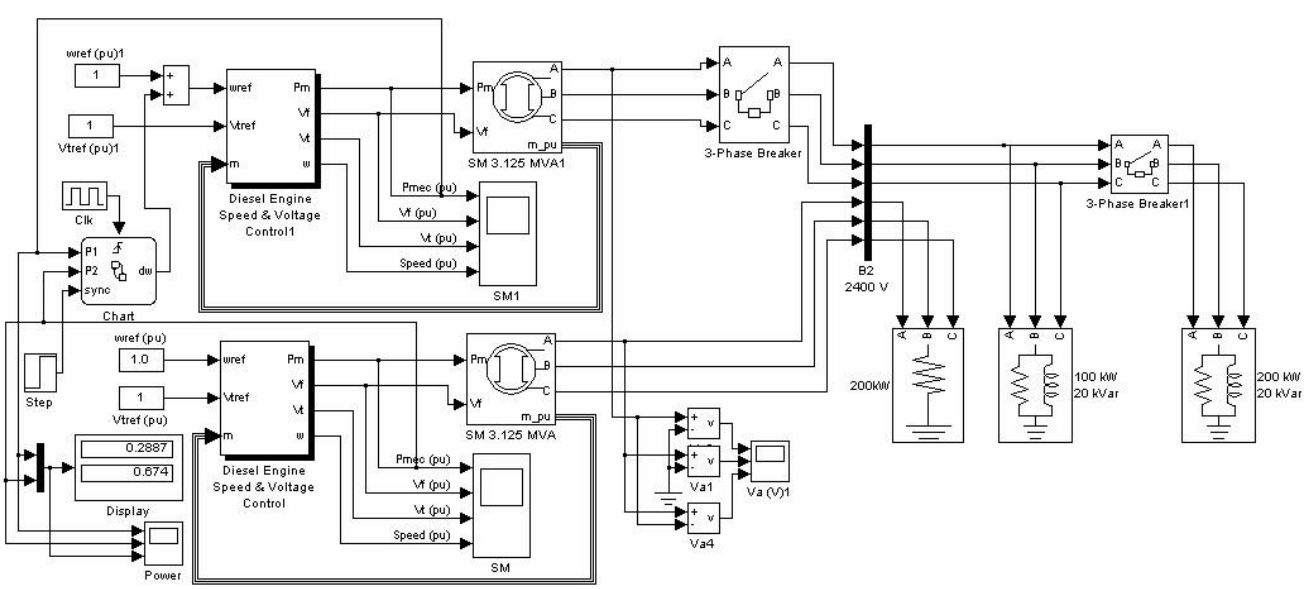
Позначення	Найменування	Примітки
1F3	Автомтичний вимикач	Номінальний струм 400А
FO	Автоматичний вимикач	Номінальний струм 150А
1F4	Теплове реле	350А-450А
1К3	Контактор	400А
1К6,1К21	Контактори	5А
1Т1	Трансформатор току	400/5А
1Т3	Трансформатор	440/220/24В
4Х	Контактор	10А
1F6,1F7,1F5,1F8,1F9	Запобіжники	5А



Модель дизель-генератора



Модель дизеля


wref (pu)1
1
Vtref (pu)1
Clk
P1
P2
sync
dw
Chart
wref
Vtref
m
Pm
Vf
Vt
w
Diesel Engine
Speed & Voltage
Control1
Pmec (pu)
Vf (pu)
Vt (pu)
Speed (pu)
SM1
Pm
Vf
A
B
C
m_pu
SM 3.125 MVA1
3-Phase Breaker
3-Phase Breaker1
B2
2400 V
200kW
100 kW
20 kVar
200 kW
20 kVar
wref (pu)
1.0
Step
Vtref (pu)
0.2887
0.674
Display
Power
Diesel Engine
Speed & Voltage
Control
SM 3.125 MVA
SM
Va1
Va4
Va (V)1

Модель CEEC