

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально - науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

«На правах рукопису»  
УДК 62-83:621.867.2

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри АЕМК  
Сергій Бойченко  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
“ ” 2024 р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг інтелектуальних  
електротехнічних та мехатронних комплексів»  
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

На тему: «Синтез адаптивної системи керування для асинхронного  
частотно-регульованого електроприводу»

Виконав:

Студент VI курсу, групи ОА-21мп Кобзар О.В.  
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н. доцент Данілін О.В.  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант з \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Студент Кобзар Олександр Васильович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Навчально – науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту**  
**Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів**  
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)  
Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітньо-професійна програма «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АЕМК

\_\_\_\_\_ Сергій БОЙЧЕНКО

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

**Кобзарю Олександрю Васильовичу**

1. Тема дисертації *«Синтез адаптивної системи керування для асинхронного частотно-регульованого електроприводу»*, науковий керівник дисертації Данілін Олександр Валерійович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_ 2023 р. № \_\_\_\_\_
2. Термін подання студентом дисертації «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ р.
3. Об'єкт дослідження – система скалярного керування тягового асинхронного електроприводу на базі напівпровідникового перетворювача частоти з ШІМ-модуляцією
4. Предмет дослідження – показники якості регулювання електроприводу зі скалярним законом керування при динамічній зміні навантаження на валу та заданої швидкості обертання.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
  - а) Провести аналіз джерел інформації щодо скалярного керування тяговим електроприводом; б) обрати критерій для оцінки енергоефективності використання законів частотного керування; в) обґрунтувати постановку математичної задачі оптимізації, на основі обраного критерію; г) розробити алгоритм комплексної оптимізації скалярних, розімкнутих по швидкості,

систем керування; д) синтезувати структурну схему керування швидкістю електроприводу з комплексною оптимізацією режимів роботи; е) провести комп'ютерне моделювання в середовищі MathLab Simulink енергетичних і динамічних характеристик асинхронного двигуна

6. Орієнтовний перелік графічного матеріалу: презентація 15-20 слайдів – наочні матеріали за результатами дослідження

7. Орієнтовний перелік публікацій: Виступ в конференції із публікуванням результатів дисертаційної роботи на тему «адаптивна система керування частотно-регульованого електроприводу тягового електротранспорту»

8. Консультант розділів дисертації

Розділ	ПІБ викладача	Підпис	
«Стартап проект»	Шевчук Н.А.	Завдання видав	Завдання прийняв

9. Дата видачі завдання: «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Вибір і затвердження теми.		
2.	Аналіз джерел інформації за темою досліджень. Вибір критерію оцінки енергоефективності постановка математичної задачі оптимізації		
3.	Розробка алгоритму скалярного керування, синтез системи автоматичного регулювання. Дослідження законів керування системи ПЧ-АД		
5.	Імітаційна робота системи керування в середовищі Mathlab Simulink. Оцінка показників регулювання		
5.	Розробка стартап проекту		
6.	Оформлення реферату та презентації, рецензування		
7.	Подання магістерської дисертації до екзаменаційної комісії. захист		

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Олександр КОБЗАР  
(ім'я, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Олександр ДАНИЛІН  
(ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Синтез адаптивної системи керування для асинхронного частотно-регульованого електроприводу»: 102 с., 4 р., 19 табл., 34 рис., 26 джерел.

**Об'єкт дослідження** – система скалярного керування тягового асинхронного електроприводу на базі напівпровідникового перетворювача частоти з ШІМ-модуляцією

**Мета роботи** – підвищення енергетичних показників тягового асинхронного двигуна шляхом використання закону екстремального керування моментом в системі адаптивної скалярної системи керування.

**Актуальність:** Дисертація присвячена темі подальшого розвитку скалярних систем керування частотно-регульованим асинхронним приводом. Традиційні рішення при проектуванні систем керування тяговим приводом, що характеризується широким діапазоном моменту навантаження, забезпечують регульовальні характеристики з забезпеченням заданого значення швидкості. Питання енергозбереженні і підвищення енергоефективності електротранспортних систем є досить актуальним в умова розвитку інфраструктури України.

Застосування екстремальних законів скалярного керування приводом дозволяють досягти цілей поставленої комплексної оптимізаційної задачі і максимізують критерій оцінки енергоефективності – відношення момент навантаження до споживаного значення струму. Проте, щоб повністю використати потенціал екстремальних законів управління, зробити їх простими та зручними в налаштуванні, надійними в експлуатації необхідно: застосування векторних СУ; початкова ідентифікація параметрів АД; адаптація параметрів двигуна, що змінюються у процесі його нагрівання; обчислення швидкості обертання ротора двигуна, при розімкнутому управлінні за швидкістю.

**Ключові слова:** тяговий асинхронний двигун, електротранспорт, скалярна система керування, перетворювач частоти, динамічні характеристики, розімкнута система, комп'ютерне моделювання

## ABSTRACT

Master's thesis on the topic " Synthesis of an adaptive control system for an asynchronous frequency-regulated electric drive": 102 pages, 4 sections, 19 tables, 34 figures, 26 sources.

*The object of the research* is a scalar control system of a traction asynchronous electric drive based on a semiconductor frequency converter with PWM modulation

*The purpose of the work* is to increase the energy performance of the traction asynchronous motor by using the law of extreme torque control in the system of the adaptive scalar control system.

**Relevance:** The thesis is devoted to the topic of further development of scalar control systems for a frequency-regulated asynchronous drive. Traditional solutions in the design of traction drive control systems, characterized by a wide range of load moment, provide control characteristics to ensure a given speed value. The issue of energy saving and increasing the energy efficiency of electric transport systems is quite relevant in terms of infrastructure development in Ukraine.

The application of extreme laws of scalar control of the drive allows you to achieve the goals of the set complex optimization problem and maximize the energy efficiency assessment criterion - the ratio of the load moment to the consumed current value. However, in order to fully use the potential of extreme control laws, to make them simple and convenient to configure, reliable in operation, it is necessary to: use vector control systems; initial identification of AD parameters; adaptation of engine parameters that change during its heating; calculation of the speed of rotation of the engine rotor, when the speed control is switched on.

**Keywords:** traction asynchronous motor, electric transport, scalar control system, frequency converter, dynamic characteristics, open system, computer simulation

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АД – асинхронний двигун;
- ТАД – ьяговий асинхронний двигун;
- БО – блок обмеження;
- САР – система автоматичного регулювання;
- САК – система автоматичного керування;
- СК – система керування;
- ЕП – електропривод;
- РШ – регулятор швидкості;
- РТ – регулятор струму;
- РМ – регулятор моменту;
- РП – регулятор потокозчеплення ротора;
- ІБ – інтелектуальний блок;
- ОР – оптимізатор режимів;
- РК - регулятор корекції закону управління;
- НЕ – нелінійний елемент;
- ФЗЗ - формувач зворотного зв'язку;
- ПКН - перетворювач координат напруги;
- ПЧ – перетворювач частоти;
- ДАС – датчик активного струму;
- ДСЗ – датчик струму статора;
- ФП – функціональний перетворювач;
- ЗІ – задатчик інтенсивності;
- КПС, КПН – координатні перетворювачі струму та напруги;
- ФЗ - формувач завдань;
- ФСС - формувач синусоїдальних сигналів.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	9
1.1 Загальна характеристика умов роботи тягових електроприводів електротранспорту.....	14
1.2 Аналіз проблем використання асинхронного електроприводу .....	19
1.3 Математична постановка комплексного оптимізаційного завдання.....	24
1.3.1 Варіанти реалізації комплексної оптимізаційної задачі.....	25
1.4 Вибір математичної моделі асинхронного електроприводу .....	29
1.4.1 Вимоги та вихідні положення .....	29
1.4.2 Узагальнена модель асинхронного двигуна в вільно орієнтованій двовимірній системі координат, що обертається.....	30
1.4.3 Модель двофазної асинхронної машини з короткозамкненим ротором для задач екстремального керування .....	32
1.4.4 Алгоритм розрахунку екстремального закону управління .....	34
1.4.5 Розрахунок та аналіз оптимального закону управління.....	36
Висновки до розділу 1 .....	39
2 СИНТЕЗ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ СКАЛЯРНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ .....	40
2.1 Розрахунок параметрів математичної моделі двигуна АИУЕ225М6.....	40
2.2 Типова структура скалярної розімкненої САК електроприводу .....	45
2.3 Електромеханічний показник якості енергоефективності скалярних систем керування.....	47
2.4 Аналіз законів скалярного регулювання .....	50
2.4.1 Управління за максимуму моменту при обмеженнях .....	53
2.4 Синтез скалярної системи керування змінної структури .....	54
Висновки до розділу 2 .....	60
3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ СКАЛЯРНОГО КЕРУВАННЯ ЗМІННОЇ СТРУКТУРИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	62

3.1 Система стурмообмеження електроприводу .....	62
3.1.1 Система струмообмеження електроприводу зі скалярною системою керування .....	64
3.1.2 Синтез ПІ регулятора системи струмообмеження електроприводу зі скалярною системою керування .....	66
3.2 Результати математичного моделювання системи скалярного управління змінної структури асинхронного електроприводу .....	68
3.2.1 Механічні характеристики під час використання законів оптимального управління .....	68
3.2.2 Порівняння зі скалярною системою у тестових режимах .....	70
3.2.3 Тестування з різними видами навантаження .....	72
Висновки до розділу 3 .....	78
<b>4 СТАРТАП-ПРОЄКТУ ТЕХНОЛОГІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИВОДУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ .....</b>	<b>79</b>
<b>4.1 Обґрунтування актуальності та новизни інноваційної ідеї стартап-проєкту .....</b>	<b>80</b>
<b>4.2 Аналіз конкурентного середовища та SWOT – аналіз .....</b>	<b>82</b>
<b>4.3 Фінансове обґрунтування стартап-проєкту та капіталовкладення ...</b>	<b>85</b>
<b>4.4 Визначення собівартості продукту стартапу .....</b>	<b>89</b>
4.5 Витрати на оплату праці .....	90
4.6 Амортизаційні відрахування .....	91
<b>4.7 Обґрунтування собівартості інноваційної ідеї стартап-проєкту .....</b>	<b>93</b>
4.8 Бізнес модель стартапу .....	96
<b>Висновки з розділу .....</b>	<b>97</b>
ВИСНОВКИ .....	98
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	100

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Основними споживачами електричної енергії (близько 70%) промислових підприємств є електродвигуни. Найбільшого поширення серед всіх типів приводів набув асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором, який має ряд переваг над двигунами постійного струму послідовного чи незалежного збудження, що використовується в електротранспорті, а саме: простота конструкції та обслуговування, відносно невелика ціна, відсутність щіток, надійність, хороші показники ККД та коефіцієнта потужності. [1] Проте асинхронний двигун АД має свої недоліки, основним з яких є малий пусковий момент при досить великому струмі статора.

Технологічне завдання, що поставлене до тягового електротранспорту, характеризується широким діапазоном зміни моменту навантаження при фіксованому значенні заданого значення швидкості. Доцільне застосування законів екстремального керування – з одного боку, потрібне забезпечення максимально можливого моменту електроприводу на всьому діапазоні зміни швидкостей, з іншого боку при зміні моменту навантаження та задання на швидкість потрібне збереження енергетичних показників ( $\cos\phi$ , ККД) на максимально можливому рівні. Тенденція збільшення вартості одиниці електричної енергії для споживачів, а також часті випадки дефіциту потужності (зниження якості енергії) в енергосистемі України вимагає від промислових підприємств запроваджувати енергоефективні технології з можливістю обмежувати споживану потужність [2].

Внаслідок масовості виробництва перетворювальної напівпровідникової техніки, вдосконалення технологій та зменшення цін все більшого поширення в різних галузях промисловості набуває система перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД). Така система задовольняє як і умови до технічної частини регулювання (діапазон і швидкодія) так і з енергоефективної – ПЧ, який в своєму складі має фільтр електромагнітної сумісності, споживає з мережі тільки активну потужність, має високі показники ККД системи при регулюванні електропривода, хоч і вимагає відносно великих капітальних вкладень [3].

Підвищення вимог до енергетичної та електромеханічної ефективності електроприводу, а також до його технологічних показників таких, як здатність навантаження, діапазон регулювання та ремонтпридатність визначили основні напрямки розвитку асинхронних електроприводів:

- створення систем автоматичного регулювання електроприводів з урахуванням високопродуктивних мікропроцесорних систем;
- застосування досконалішої елементної бази;
- створення енергоефективних приводів.

Основними результатами теорії екстремального управління асинхронними частотно-регульованими приводами стали закони управління з мінімуму втрат, мінімуму струму статора та максимуму моменту при обмеженнях на струм та напруги напівпровідникового перетворювача частоти [2, 4].

Практичне застосування законів екстремального управління знайшли у векторних системах управління [7, 8, 11]. Слід зазначити, такі системи відрізняються, зазвичай, високої складністю, чутливістю до параметрів об'єкта регулювання [16]. Також відомі рішення [6] екстремального управління стаціонарними режимами асинхронних електроприводів, що характеризуються постійним моментом навантаження.

Спираючись на досвід цих досліджень, можна сказати, що практична реалізація екстремальних систем регулювання вимагає подальшого розвитку та вивчення.

Щоб повністю використати потенціал екстремальних законів управління, зробити їх простими та зручними в налаштуванні, надійними в експлуатації необхідно:

- а. Застосування векторних СУ;
- б. Початкова ідентифікація параметрів АТ;
- в. Адаптація параметрів двигуна, що змінюються у процесі його нагрівання;
- г. Обчислення швидкості обертання ротора двигуна, при розімкнутому управлінні за швидкістю.

У результаті основна перешкода в практичному застосуванні законів

екстремального управління - це необхідність подальшого розвитку питань реалізації алгоритмів оптимізації, в системах управління асинхронними електроприводами та складність їх реалізації.

У зв'язку з цим загальним напрямом роботи є пошук простого в реалізації алгоритму оптимізації, що доставляє максимум обраного показника якості.

**Методи дослідження**, що використовувались при дослідженнях – методи аналітичної теорії електричних машин змінного струму, перетворювальної техніки; методи теорії автоматизованого електроприводу; теорії систем автоматичного регулювання; чисельні методи оптимізації; методи математичного моделювання. метод динамічного програмування, метод цифрового імітаційного моделювання із використанням прикладного програмного забезпечення MATLAB в середовищі Simulink, метод математичного моделювання та апроксимація характеристик в середовищі MathCAD Prime.

**Мета роботи** - підвищення енергетичних показників тягового асинхронного двигуна шляхом використання закону екстремального керування моментом в системі адаптивної і розімкнутою по швидкості скалярної системи керування, режим роботи якого характеризується широким діапазоном зміни моменту навантаження.

Відповідно сформульовані наступні **задачі дослідження**:

а) Провести аналіз джерел інформації щодо скалярного керування тяговим електроприводом;

б) обрати критерій для оцінки енергоефективності використання законів частотного керування; Провести аналіз законів частотного управління за вибраним показником якості;

в) обґрунтувати постановку математичної задачі оптимізації, на основі обраного критерію для скалярних розімкнених за швидкістю систем керування асинхронним електроприводом;

г) розробити алгоритм комплексної оптимізації скалярних, розімкнутих по швидкості, систем керування, що забезпечує збереження енергетичних показників електроприводу в умовах змінного навантаження. Провести аналіз

запропонованого алгоритму управління за вибраним показником якості;

д) синтезувати структурну схему керування швидкістю електроприводу з комплексною оптимізацією режимів роботи;

е) провести комп'ютерне моделювання в середовищі MathLab Simulink енергетичних і динамічних характеристик асинхронного двигуна зі скалярною системою керування з комплексною оптимізацією режимів роботи.

**Об'єкт дослідження** – система скалярного керування тягового асинхронного електроприводу на базі напівпровідникового перетворювача частоти з ШІМ-модуляцією

В даний час електроприводи такого типу використовуються переважно в транспортних механізмах, таких як електронавантажувачі, електрокари, самохідні вагони, рідше електротранспорт [6]. Виконувана ними технологічна задача характеризується широким діапазоном зміни моменту навантаження при, як правило, фіксованому завданні на швидкість і незалежних від даного електроприводу значення швидкості [6].

**Предмет дослідження** – показники якості регулювання електроприводу зі скалярним законом керування при динамічній зміні навантаження на валу та заданої швидкості обертання.

#### **Наукова новизна роботи:**

1. Розроблено оригінальний алгоритм розрахунку законів екстремального управління, що забезпечують оптимізацію за вибраним критерієм у заданій області моментів двигуна, що відрізняється від інших розробок [2,8, 11] автоматичним визначенням зон частотного регулювання.

2. Запропоновано концепцію модернізації скалярної системи у вигляді двоканальної структури, один з каналів якої призначений для оптимізації процесів управління в режимах, що встановилися, інший в режимах роботи при виході струму або напруги ПЧ на обмеження.

3. Розроблено оригінальну систему струмообмеження, що забезпечує чотириквadrantний режим роботи електроприводу, що включає рекуперативне електричне гальмування. Основним завданням системи струмообмеження є утримання електроприводу на екстремальному законі управління, що забезпечує

оптимізацію режимів роботи електроприводу за електромеханічним показником якості.

### **Практичне значення даної роботи:**

1. Розроблено умови визначення зон роботи електроприводу, у яких умови досягнення обраного критерію оптимізації виявляються різними. Розробка таких умов дозволяє створювати автоматичні алгоритми розрахунку екстремальних законів управління за обраним критерієм оптимізації.

2. Розроблено концепцію модернізації скалярних систем управління, що забезпечує комплексну оптимізацію режимів роботи електроприводу.

3. Розроблено універсальну систему струмообмеження для електроприводів як зі скалярною, так і з векторною системою керування.

### **Особистий внесок автора.**

Автору належать ідеї реалізації адаптивної інтелектуальної системи керування зі скалярним законом регулювання розімкнутими по швидкості асинхронного двигуна.

### **Апробація результатів дисертації.**

Результати магістерської дисертаційної роботи доповідались на Міжнародній науково-технічній конференції «Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереження», що відбулася у м.Одеса 6-7 грудня 2023 року.

# **1 ОГЛЯД ВАРІАНТІВ РЕАЛІЗАЦІЇ КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

## **1.1 Загальна характеристика умов роботи тягових електроприводів електротранспорту**

Використання електроприводів для підземних транспортних систем почалося ще на початку 20-го століття. За час експлуатації практично всі компоненти системи підземних перевезень зазнали конструктивних змін, але основні принципи і виконавчі механізми залишилися незмінними і донині. Двигуни постійного струму з послідовним збудженням займають особливе місце в цій складній системі. На це є кілька причин:

По-перше, теоретична і практична база їх експлуатації накопичена з тих пір, як цей вид транспорту набув широкого поширення в міському русі і на магістральних залізницях, де більшість всіх тягових електроприводів, що експлуатувалися, були засновані на єдиному принципі.

По-друге, системи тягового електропостачання постійного струму з використанням перетворювальних підстанцій виявилися найбільш придатними для експлуатації за своїми загальними характеристиками [1].

По-третє, в якості мережі електропостачання в шахті використовувалися акумуляторні станції або джерела живлення тягового приводу вагонеток, що обмежувало застосування інших типів електродвигунів.

Двигуни постійного струму з послідовним збудженням мають, завдяки притаманним властивостям цієї електричної машини, тобто високим мевам перевантаження, м'які механічні властивості, які спрощують експлуатацію та налагодження багаторухомих систем з індивідуальним розподілом навантаження на попередні стволи, а також позитивні сторони як тягові приводи, багаторічна експлуатація яких довів протягом тривалого періоду часу. Однак існує ряд суттєвих недоліків, таких як складність підтримання швидкості на різних рівнях руху рейкового транспортного засобу, низька енергоефективність через часте використання релейно-короткозамкненого керування та втрати потужності в активних елементах. Складність конструкції приводу та складність технічного

обслуговування під час експлуатації є основними недоліками цього типу двигунів і є предметом подальшої модернізації.

Реостатні системи керування з регуляторами потужності найчастіше використовуються в поєднанні з двигунами постійного струму. Цей спосіб керування фактично застарів і використовується на гірничодобувних підприємствах завдяки своїй простоті та відносній легкості в обслуговуванні. У той же час, використання цього методу тягне за собою значні втрати енергії. Наявність реостата в ланцюзі якоря знижує жорсткість механічної реакції, що ускладнює керування електровозами.

Керування приводом за допомогою силових контролерів також має свої недоліки:

- Скінченне початкове положення контролера та складність регулювання швидкості/крутного моменту електроприводу в момент контакту, що призводить до ривкового руху та пробуксовування колісних пар при перевищенні моменту опору.

- складність введення блокувань або аварійних режимів для запобігання некоректної роботи машиніста. Як відомо, більшість відмов і несправностей обладнання спричинені ненормальним використанням механізмів за межами дозволених режимів роботи: різким перемиканням положення регулятора під час розгону, застосуванням екстреного гальмування з обходом тощо [3];

- складність керування та моніторингу систем з багатьма змінними. Тому існуючі рішення використовують комбінацію електровозів з силовими ланцюгами. За допомогою цього методу неможливо зістикувати два або більше електровозів. Існують також рішення для автоматичного керування за допомогою мікроконтролерів. Запропоноване рішення полягає у використанні контролера потужності в поєднанні з сервоприводом для забезпечення необхідних обмежень для управління контурами швидкості і моменту.

- Стабільність на низьких швидкостях важко підтримувати. Це може бути необхідним через вимоги безпеки або залізничні умови. Цей недолік проявляється при русі з низьким навантаженням, особливо при порожньому русі або при високому ухилі колії. Крім того, на нерівних ділянках рейкового

транспортного засобу водій використовує механічне гальмо як додатковий канал керування, що збільшує крутний момент, енергоспоживання та знос гальм. Це підвищує втомлюваність машиніста і, як наслідок, збільшує ризик порушень правил безпеки.

Для підвищення безпеки експлуатації обладнання в електровозах нового покоління впроваджено низку блокувань безпеки. Наприклад, електровози К14[4] обладнані захистом від запуску двигуна. Якщо двері кабіни відчинені, машиніст не сидить, а захист дорівнює нулю, автоматично спрацьовують пневматичні гальма в разі відключення електроенергії, автоматичної нормалізації завдання швидкісного режиму або інших аварійних ситуацій. Впровадження цих блокувань стало можливим завдяки спеціальним станціям, обладнаним силовими контакторами.

Більшість з перерахованих вище недоліків можна усунути, впровадивши імпульсне керування пристроями РПН з приводом від електродвигуна постійного струму з безконтактними ключовими елементами. Такий спосіб реалізовано в системі ТЕРА-1М. Ця система дозволяє побудувати оптимальний закон керування для заданого процесу і гарантує плавне регулювання параметрів з точки зору енергоефективності та точності.

Мікропроцесорне керування на базі контролера з сигнальним процесором дозволяє реалізувати широкий спектр алгоритмічних задач, зокрема реалізацію аварійних режимів, блокування та автоматичне перемикання (допомога оператору), без необхідності модернізації апаратного забезпечення [5]. Це дозволяє вирішувати такі завдання, як стабілізація заданих значень швидкості, стабілізація крутного моменту, що створюється двигуном, та обмеження струму.

Недоліком розглянутої системи ТЕРА-1М є низький на той час рівень розвитку силової електроніки. Тригер скидання живлення був побудований на одному операційному тиристорі зі штучною схемою перемикання, а період тактового сигналу був обмежений до 0,005 с, що значно збільшувало розмір замкненого контуру. В результаті аналізований блок містив багато елементів з великими габаритами, які не використовувалися. На додаток до вищесказаного,

слід зазначити, що апаратура була виконана на іноземній елементній базі і цей факт обмежував розповсюдження технології, використаної в ТЕРА-1М.

На сьогоднішній день існує низка розробок, як зарубіжних, так і вітчизняних, що базуються на сучасній елементній базі. Було створено прототип електровоза з імпульсною системою керування на основі (IGBT) транзисторів [6,7]. Побудований на основі повністю керованих напівпровідникових перемикачів, цей привід дозволяє вирішувати широкий спектр завдань, таких як зміна режиму руху (тяга - гальмування), захист від занулення, введення обмежень струму і моменту двигуна, а також керування попередженням машиніста.

Інші подібні розробки з сучасним мікропроцесорним управлінням забезпечують вирішення основних технічних завдань. Спільною рисою є те, що всі розглянуті рішення використовуються в поєднанні з двигунами постійного струму послідовного збудження, яким притаманні всі вищезгадані недоліки, за винятком обмежень, що накладаються реостатно-контакторною системою керування.

Необхідність підвищення надійності та продуктивності шахтного транспорту призвела до широкого інтересу розробників до заміни двигунів постійного струму іншими типами двигунів, які не мають вищезгаданих недоліків. Наприклад, такими машинами є асинхронні двигуни.

Використання асинхронних приводів в якості тягових машин почалося з моменту виникнення магістральних залізниць. Перші електровози були обладнані струмоприймачами, що живилися трифазним струмом від тягової мережі. Швидкість обертання регулювалася введенням в ланцюг ротора рідинного реостата, але конструктивні та технічні складнощі у виготовленні цього типу двигунів не дозволили цій розробці набути широкої популярності.

Обмежений розвиток тягових асинхронних двигунів в середині 20-го століття був пов'язаний з відсутністю елементів і матеріальної бази, які могли б використовувати технічні переваги ТАД в порівнянні з двигунами постійного струму з послідовним збудженням. У зв'язку з цим до 1970-х років розвиток АД відбувався виключно в рамках експериментів і стендових досліджень.

Розроблялася можливість застосування дво- і трифазних тягових двигунів з живленням від однофазних тягових мереж змінного струму з електромеханічними перетворювачами проміжної потужності. Розглянуті приводи конструктивно складні у виготовленні.

Спроби використання силової електроніки та керованих випрямлячів з підлоговим керуванням почалися в середині 1970-х років на основі тиристорів односторонньої дії. Розробки в Японії були зосереджені на створенні магістральних електровозів з асинхронними тяговими двигунами і статичними напівпровідниковими перетворювачами. Також були побудовані експериментальні електровози VL80A і VL86F [8].

Існує також давня історія використання двигунів інших конструкцій для підземного видобутку корисних копалин. Зокрема, перші спроби використання асинхронних конденсаторних двигунів були зроблені ще в середині 20-го століття; живленням ТАД була однофазна мережа змінного струму (частота 50 Гц. Технічною реалізацією розробки став електровоз марки KE-2, описаний в роботі [12]. У цьому електровозі використовувався двофазний асинхронний привід з підвищеним ковзанням, а регулювання швидкості забезпечувалося перемиканням кількості пар полюсів і введенням активних резисторів в ланцюг статора. Ця система була не вигідною з точки зору енергоефективності та ходових характеристик.

Були спроби використовувати асинхронні приводи в самохідних рейкових транспортних засобах. У цих транспортних засобах використовуються спеціальні ТАД шахтного виконання. Ці транспортні засоби живляться від трифазної мережі з вибухозахищеними кабелями і регулюються шляхом перемикання пар полюсів.

З появою частотно-керованих ТРС на магістральних залізницях були адаптовані існуючі рішення для шахтного транспорту. Досвід проектування двигунів для акумуляторних шахтних електровозів описано в роботі [13].

Підготовлено конструкції та основну технічну документацію для розробки спеціальних тягових двигунів з асинхронним приводом для шахтних електровозів, наприклад, [14], які доведено до промислових випробувань.

## 1.2 Аналіз проблем використання асинхронного електроприводу

Про важливість цього сектору свідчить достатня кількість публікацій, присвячених спробам використання асинхронних приводів в електровозах для гірничодобувної промисловості. Технічний та експлуатаційний знос шахтного транспорту вимагає заходів з модернізації та впровадження нових технологій. Крім того, існуючі розробки мають ряд недоліків:

- Тягові приводи електровозів для гірничодобувної промисловості базуються на використанні двигунів постійного струму з низькою експлуатаційною надійністю та високими витратами на технічне обслуговування;

- традиційні системи керування електровозами характеризуються підвищеними втратами енергії, особливо на складних ділянках шляху, які потребують спеціальних алгоритмів обробки сигналів через наявність каналів завад;

- Відставання від зарубіжних компаній у сфері технологій підземного транспорту. Сучасна елементна база та технології дозволили створити нові тягові приводи для підземних перевезень на основі вітчизняних розробок, які відповідають усім сучасним тенденціям.

Як зазначалося в огляді, проблема підземних перевезень майже повністю вирішена магістральним залізничним транспортом. Причини відсутності таких рішень у відповідних галузях можна сформулювати як з наукового, так і з технічного боку.

Вони можуть бути сформульовані як з наукового, так і з технічного боку. Наприклад, в електровозах метрополітену не використовується електрообладнання загального призначення, і крім конструктивних особливостей кузовів ТАД, вплив має також середовище експлуатації двигуна, а шахтні перевезення характеризуються жорсткими пиловими і вибухонебезпечними умовами. Другим обмеженням є вага та габарити. Для того, щоб переобладнати існуючі локомотиви для шахтних перевезень, необхідно дотриматися габаритів двигуна, який буде використовуватися, зберігаючи при

цьому характеристики тягового приводу, який перевантажений за крутним моментом і струмом. Це завдання не є тривіальним, і існує кілька способів його вирішення.

Іншим технічним обмеженням є необхідність внесення специфічних модифікацій в перетворювач частоти, необхідних для вирішення досліджуваної задачі. Подібні існуючі перетворювачі частоти мають загальнопромислове виконання і розраховані на стандартні напруги. Для роботи в підземному транспорті тролейбусного типу напруга ланки постійного струму обмежена до 250 В. Це питання потребує більш детальних досліджень і можливі різні підходи до вирішення проблеми.

Незважаючи на те, що згадані вище фактори ускладнюють використання асинхронних приводів у процесі підземних перевезень, існує низка науково-технічних питань для розробників шахтних електровозів, обладнаних ТАД, які потребують вирішення. До таких питань відносяться

- Узгодження навантажень дводвигунових систем на базі FC-ТАД. Жорсткі механічні характеристики в поєднанні зі складним рельєфом місцевості та режимами роботи електровозів накладають додаткові труднощі при створенні систем управління двомоторними системами. Через варіації природних характеристик крутний момент, що генерується, відрізняється, і необхідно вжити певних заходів для рівномірного розподілу навантаження між тяговими двигунами;

- Потребує вирішення проблема вибору раціональної форми синтезованих тягових характеристик асинхронних електроприводів;

- Крім того, необхідно вирішити технічні проблеми ковзання та рискання. Відомо, що використовувані двигуни постійного струму мають високу перевантажувальну здатність через свої конструктивні характеристики; обмеження, що накладаються при використанні систем FC-ТАД, призводять до перевантаження за моментом 2-2. Враховуючи п'ятикратне перевищення номінального значення, складне робоче середовище машини та жорсткі температурні умови, синтез системи керування є нетривіальним завданням і потребує більш ретельного розгляду для вирішення проблеми ковзання та

проковзування. Дослідження процесу зчеплення колісної пари з робочими контактними точками рейки.

З появою сучасних мікропроцесорних електроприводів з'явилася можливість формувати необхідні тягові характеристики шляхом мікропроцесорного керування, особливо за рахунок використання статичних перетворювачів частоти. І в цьому контексті вибір характеристик залежить від рельєфу місцевості, навантаження та осьової сили. Також можна змінювати коефіцієнт зчеплення.

Розглянемо, як вирівняти навантаження на тяговий двигун для рейкового транспортного засобу з ТАД.

Найпростіше і найочевидніше рішення - використовувати окремі частотні перетворювачі для кожного двигуна. У такій реалізації кількість приводів дорівнює кількості частотних перетворювачів. Перевагами такого підходу є: Індивідуальне керування кожною віссю ТАД за допомогою налаштування частоти, крутного моменту та напруги. Практичні можливості для замкнених систем керування зі зворотним зв'язком за швидкістю, струмом і положенням; Зменшення енергоспоживання за рахунок побудови енергоефективних алгоритмів керування силовим ключем.

Недоліком такого рішення є апаратна складність. Проте в цьому випадку можна створити мехатронний модуль з інтегрованим частотним перетворювачем всередині корпусу електродвигуна.

У роботі [5] питання вирівнювання навантаження також розглядається стосовно магістральних електровозів: відомі системи автоматичного вирівнювання з окремими каналами керування тяговими двигунами постійного та змінного струму.

Інший підхід до вирішення проблеми вирівнювання навантаження тягових двигунів полягає в живленні ТАД від загального перетворювача частоти. У цьому випадку будується виключно скалярна система керування. Без складних адаптивних алгоритмів складно реалізувати енергоефективну систему. Однак переваги такого рішення можна оцінити з точки зору

- Зменшення габаритних розмірів і ваги перетворювального агрегату за рахунок зменшення кількості перетворювачів частоти;
- Спрощення системи керування.

Як зазначалося вище, ця система має деякі суттєві недоліки:

- Один перетворювач частоти використовується для двох двигунів, а це означає, що керування здійснюється послідовно;
- Підвищені коливання струму через необґрунтоване використання характеристик асинхронного двигуна;
- Використання замкнутих систем керування є складним і їх реалізація вимагає переробки конструкції перетворювача частоти (потрібні додаткові інверторні мости) і введення надмірних навантажень на мікропроцесорну систему;
- Проблемою, для якої наразі не існує рішення, є неможливість створення способу індивідуального керування напругою двигунів, що працюють від одного джерела живлення;
- Відведення тепла ускладнюється зі збільшенням потужності перетворювального агрегату.

Відомий також спосіб вирівнювання крутного моменту на валу двомоторної системи шляхом з'єднання обмоток електричної машини по фазі з вихідними клемми перетворювача частоти. Перевагою такої системи є простота реалізації та алгоритм керування, що впливає на вартість розробки. Однак представлене рішення завищує вимоги до вихідної напруги інвертора вдвічі, збільшує масогабаритні показники перетворювача частоти і підвищує його вартість. Крім того, не до кінця досліджена стійкість таких систем у випадку великих розбіжностей в моменті опору між осями [5]. В такому випадку локомотив буде перебувати в режимі ковзання або ризикання, що дуже негативно позначається на ефективності використовуваної системи.

Іншим способом вирішення проблеми розподілу навантаження між ТАД є використання спеціальних двигунів. Зокрема, в роботах [16-18] використовується спеціальне з'єднання обмоток, яке поєднує механічні характеристики моментних ТАД двигунів шляхом послідовного з'єднання

половини фазних обмоток одного двигуна з фазними обмотками іншого двигуна. Обмеженнями цього способу є складність конструкції двигуна і велика кількість виводів обмотки статора.

Розглянемо деякі технічні проблеми:

Масогабаритні показники, розташування АД в межах габаритів, визначених для електровозів метрополітену для двигунів постійного струму, низькі швидкості обертання АД і підвищене навантаження на конструкцію тягового механізму.

Аналіз літературних джерел дозволяє зробити попередні висновки про необхідність використання спеціальних двигунів в електровозах для гірничих робіт.

Електровози для гірничодобувної промисловості живляться або від контактної мережі, або від акумуляторних батарей; використання акумуляторів у вигляді живлення ТАД на практиці більш поширене, ніж при русі вагонеток. Стандартна напруга контактної мережі - 250 В постійного струму. Експлуатуються мережі з більш високою напругою 550 В, особливо на спеціальних локомотивах зі збільшеною зчіпною масою [4]. Відносно швидкі коливання напруги можуть відбуватися при живленні від тягової мережі.

Колівання напруги повністю зникають при від'єднанні силового колектора. Цей факт в основному пов'язаний зі зносом механічних контактів візка. Іноді оператору доводиться підтримувати пружинні контакти візка рукою, щоб підтримувати фіксований контакт з частинами, що знаходяться під напругою.

Основним обмежуючим фактором є низька напруга, що унеможливорює використання загальнопромислових серійних інверторів та двигунів, які застосовуються на магістральному транспорті.

Існують різні підходи до вирішення цієї проблеми:

- Підвести живлення до перетворювача і розробити двигун для більш низьких напруг. Це найпростіше рішення. Для реалізації проекту необхідно враховувати наступні параметри: необхідність розробки двигунів спеціального

призначення для нестандартних напруг; інвертори, які працюють на знижених напругах зі струмами, що відповідають номінальному моменту двигуна;

- подача живлення на перетворювач частоти через перемикаючий трансформатор з метою підвищення напруги мережевого живлення до промислових стандартів. Таке рішення знімає частину навантаження з інвертора напруги, дозволяючи йому працювати в полегшеному режимі, тим самим знижуючи вимоги до силового ключа, зменшуючи витрати на монтаж і уніфікуючи вибір обладнання. Однак апаратна складність подвійного перетворення енергії збільшує втрати і не підходить з точки зору енергоефективності.

Проміжним варіантом є додавання перетворювача, який виконує функцію керування приводом на додаток до підвищення напруги. Однак такий підхід робить апаратну частину перетворювача частоти дуже складною. Тому виникають додаткові труднощі при написанні алгоритмів керування. Як перевагу можна відзначити готову конструкцію пристрою. Це значно полегшує монтаж і створює пристрій з необхідним ступенем захисту (ІР).

### 1.3 Математична постановка комплексного оптимізаційного завдання

Згідно з [5] і [6], комплексну оптимізаційну задачу можна сформулювати так: у кожній робочій точці приводу необхідно вибрати керування, яке забезпечує екстремальну межу обраного показника якості, а коли струм і/або напруга статора досягають своєї межі, необхідно вибрати керування, яке забезпечує максимальну перевантажувальну спроможність.

Математична постановка комплексної оптимізаційної задачі має наступний вигляд [5]:

$$\beta_e = \begin{cases} \arg m(\omega^*, i_s^*_{max}, \beta) \rightarrow \max, \beta \in \Omega_{\beta 1} \\ \arg m(\omega^*, u_s^*_{max}, \beta) \rightarrow \max, \beta \in \Omega_{\beta 2} \\ \arg J_i(\omega^*, m, \beta) \rightarrow \inf, \beta \in \Omega_{\beta 3} \end{cases} \quad (1.1)$$

де:

$$\Omega_{\beta 1} = \{\beta | i_s(m, \omega^*, \beta) = i_s^*_{max}, u_s(m, \omega^*, \beta) \leq u_s^*_{max}\};$$

$$\Omega_{\beta 2} = \{\beta | u_s(m, \omega^*, \beta) = u_s^*_{max}, i_s(m, \omega^*, \beta) < i_s^*_{max}\};$$

$$\Omega_{\beta_3} = \{\beta | i(m, \omega^*, \beta) < i_{s \max}^*, u_s(m, \omega^*, \beta) < u_{s \max}^*\};$$

де  $\beta_e$  – оптимальне керування;  $J_i$  – енергетичний критерій;  $\omega^*$  - задане значення швидкості;  $m$  – момент навантаження;  $i_{s \max}^*$  - максимально допустиме значення струму статора;  $u_{s \max}^*$  - максимально допустиме значення напруги статора;  $\beta$  - абсолютне ковзання.

Оптимальні режими керування електроприводом  $\beta_e$  досягаються шляхом формування завдань на струм  $i_s^*$  та ковзання  $\beta^*$  за законами, таким, що задовольняють заданий критерію оптимізації, і можуть мати різну складність алгоритму обчислення  $i_s^*$  та  $\beta^*$ .

Відповідно до [7], всередині робочої області приводу (до виходу струму або (і) напруги статора на обмеження), як показник якості можливо вибрати наступні типові завдання оптимізації режимів двигунів:

1) за мінімумом втрат (струму) у відкритій області управлінь (завдання безумовної оптимізації  $\Delta p \rightarrow \min$ );

2) по мінімуму втрат (струму) при сталості головного магнітного потоку ( $\Delta p \rightarrow \min$  при  $\psi_m = \text{const}$ );

3) щонайменше втрат (струму) при обмеженні реактивної потужності, споживаної від силового перетворювача або від мережі ( $\Delta p \rightarrow \min$  при  $q_s, q_r = \text{const}$ );

4) по мінімуму втрат (струму) при сталості головного магнітного потоку та обмеження реактивної потужності, що споживається від перетворювача або від мережі ( $\Delta p \rightarrow \min$  при  $\psi_m = \text{const}$  і  $q_s, q_r = \text{const}$ ).

При виході напруги та струму силового перетворювача на обмеження розв'язується задача екстремального керування за максимумом моменту ( $m \rightarrow \max$ ).

### 1.3.1 Варіанти реалізації комплексної оптимізаційної задачі

У роботах [5], [6] і [12] було детально досліджено закони оптимального (екстремального) управління асинхронних електроприводів на базі напівпровідникових перетворювачів частоти з широтно-імпульсною

модуляцією. У роботі [12] чудово викладено стратегію управління асинхронним електроприводом при комплексній оптимізації режимів його роботи.

Розглянемо, наведені в [5] та [12], приклади реалізації комплексної оптимізаційної задачі на базі векторних та скалярних САР, замкнутих за швидкістю.

У роботі [5] було розглянуто варіант реалізації алгоритму комплексної оптимізації із запровадженням у типову систему підлеглого регулювання інтелектуального блоку (ІБ), формує оптимальне управління. Інтелектуальний Блок виконаний у двох варіантах: з використанням математичної моделі машини та без неї (див. рис. 1.1).

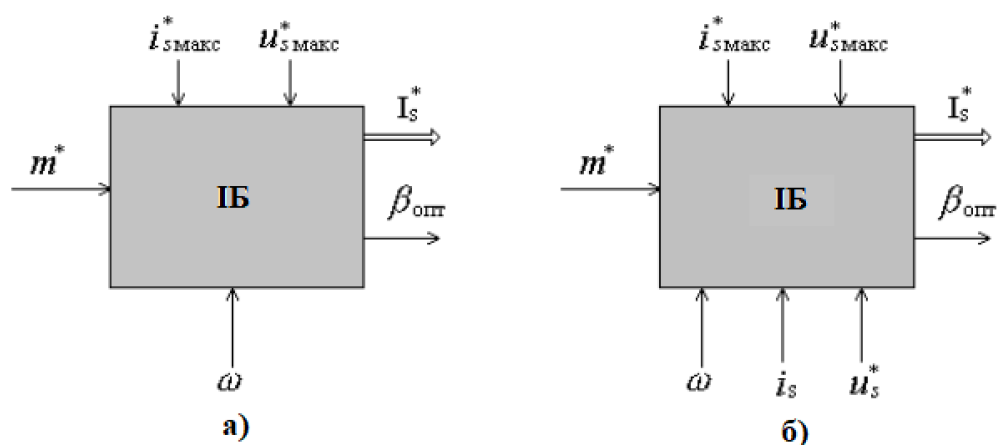


Рисунок 1.1 - Інтелектуальний блок формування закону оптимального управління: а – з використанням математичної моделі машини; б – без використання математичної моделі машини.

Структурну схему звичайної скалярної системи регулювання швидкості зі складним алгоритмом оптимізації [5] показано на рисунку 1.2. Вона має замкнутий контур керування амплітудою струму статора та частотою обертання синхронного двигуна. Залежно від вимог до якості керування запропоновано два варіанти реалізації інтелектуального блоку (з/без математичної моделі АД). Детальна структура інтелектуального блоку описана в [5].

Цей варіант не потребує значних додаткових мікропроцесорних ресурсів з точки зору швидкодії, зберігаючи при цьому всі переваги даного приводу [5].

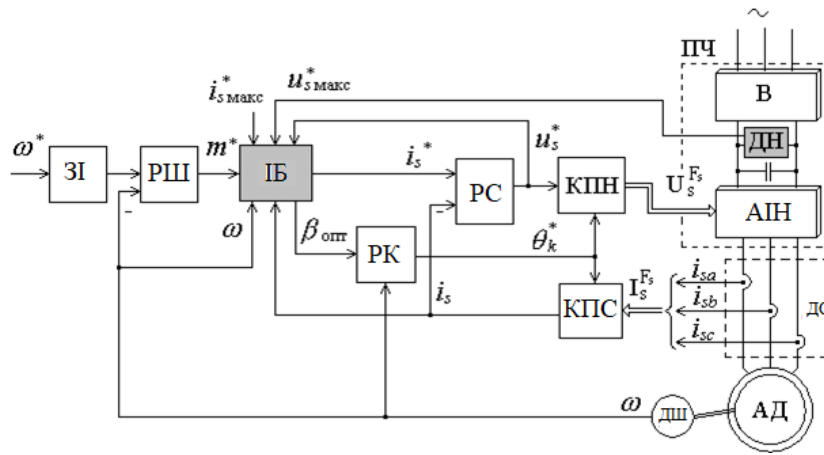


Рисунок 1.2 – Блок-схема скалярної САК з інтелектуальним блоком:

ПЧ – перетворювач частоти; АД – асинхронний двигун; КПН, КПС – координатні перетворювачі напруги та струму; ДС, ДН, ДШ – датчики струму, напруги, швидкості; ЗІ – задатчик інтенсивності; РШ, РС, РК – регулятор швидкості, струму статора, ковзання; ІБ – інтелектуальний блок.

В [5] також розглядається варіант впровадження інтелектуальних блоків в структуру векторного керування. Основні особливості систем векторного керування розглянуто в [7, 8, 10]. На рисунку 1.3 наведено структурну схему системи векторного керування електроприводом з полем в системі координат з керованою швидкістю обертання [8]. Як видно з рисунка 1.3 Як видно з рисунка 1.3, при розробці даної САК було використано комбінацію регулятора моменту та інтелектуального блоку.

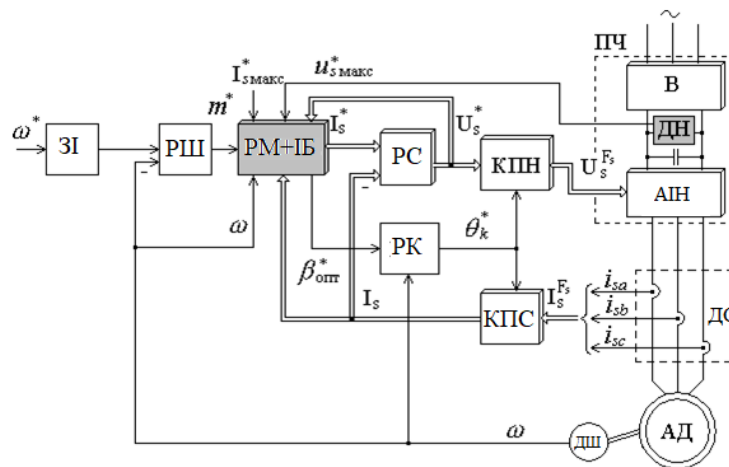


Рисунок 1.3 – Блок-схема векторної САК з інтелектуальним блоком:

РМ- регулятор струму

Структура інформаційної частини САР та системи керування детально описана в [5]. Синтез регулятора системи автоматичного керування здійснюється за методикою, описаною в [11]. З метою комплексної оптимізації режиму роботи електропривода в систему керування введено інтелектуальний блок, який формує закон керування з урахуванням обмежень [5]. Структура та робота інтелектуального блоку, а також перехідні процеси скалярної та векторної САР детально розглянуті в [5].

В [8] запропоновано комплексну оптимізацію режимів роботи асинхронних електроприводів шляхом введення в класичну структуру скалярного та векторного керування оптимізатора режимів (МО). Структурні схеми скалярної та векторної САР з комбінованою оптимізацією наведено на рис. 1.4, 1.5 На рис. 1.4 показано структуру скалярної САР, а на рис. 1.5 - структуру векторної САР з комбінованою оптимізацією відповідно. Оптимізатор режимів як у випадку скалярної, так і векторної САК реалізує алгоритм комплексної оптимізації.

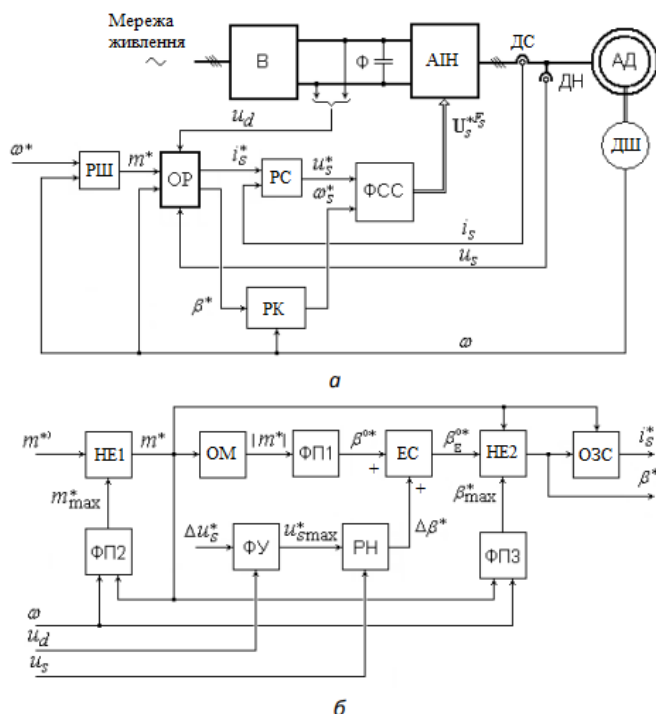


Рисунок 1.4 - Схеми скалярної САК (а) та оптимізатора режимів (б)

асинхронного електроприводу при комплексній оптимізації:

В – випрямляч; Ф – фільтр; ФСС - формувач синусоїдальних сигналів; ФЗ - формувач завдань; НЕ – нелінійний елемент; ОМ – обчислювач модуля; ФП – функціональний

перетворювач; ЕС – елемент підсумовування; ОЗС - обчислювач завдання струму; ФУ-формувавч уставки напруги;

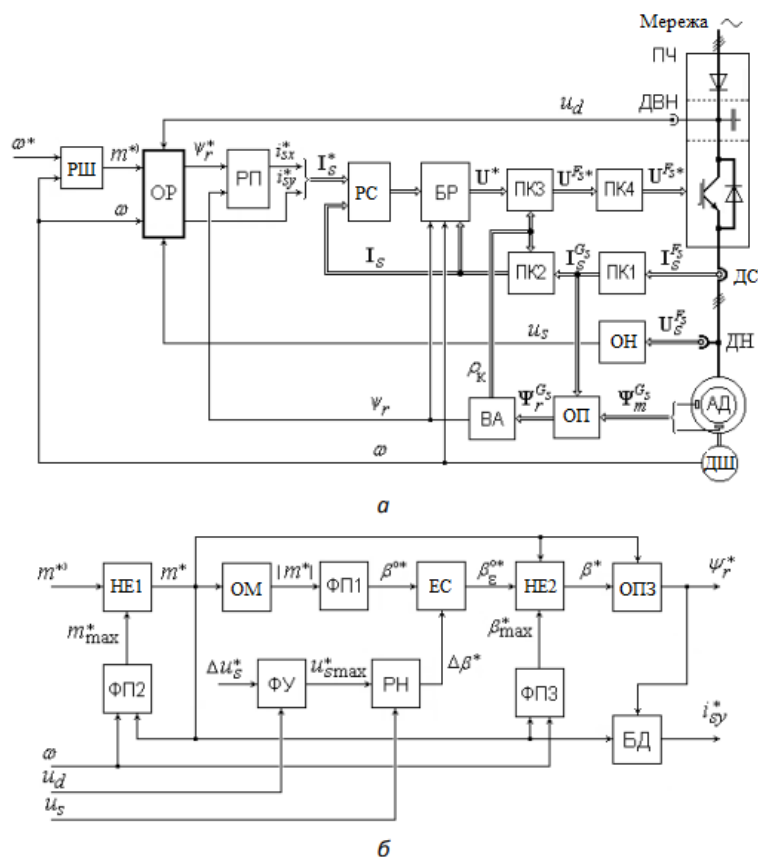


Рисунок 1.5 – Схеми САК (а) та оптимізатора режимів (б) асинхронного електроприводу з орієнтацією системи координат по полю ротора:

ДВН – датчик випрямленої напруги; ОП – обчислювач поточкозчеплень ротора; ПК1-ПК4 – перетворювачі координат; ВА – векторний аналізатор; БД – блок ділення; РС, РП та РШ – регулятори складових вектора струмів статора, поточкозчеплення та швидкості; ОР – оптимізатор режимів; НЕ – нелінійний елемент; ОМ – обчислювач модуля; ФП – функціональний перетворювач; ЕС – елемент підсумовування; ОПЗ – обчислювач поточкозчеплення;; БР – блок розподілу.

## 1.4 Вибір математичної моделі асинхронного електроприводу

### 1.4.1 Вимоги та вихідні положення

Розробка математичних моделей асинхронних двигунів широко обговорюється в технічній літературі. Тут представлено декілька робіт, що детально описують основні особливості побудови моделей двигунів змінного

струму [13, 14].

Результати математичного аналізу асинхронних електроприводів безпосередньо залежать від реальних характеристик, що відображаються їх математичними моделями. Для розв'язання та аналізу екстремальних задач керування математичні моделі асинхронних двигунів повинні відповідати ряду вимог [2, 3]. Наведемо найважливіші вимоги до розв'язання поставленої задачі:

1. Враховувати всі фактори, що впливають на розв'язок екстремальної задачі. До них відносяться: явна полярність, насичення, вихрові струми, електромагнітні та електромеханічні перехідні процеси, енергетичні процеси тощо

2. Існування різних формулювань (умов) екстремальної крайової задачі означає, що модель повинна бути описана різними варіантами змінних стану;

3. Компактний формат запису є найбільш придатним для чисельних методів оптимізації.

Цим вимогам, як відомо, задовольняє варіант представлення математичної моделі катодної машини змінного струму в обертовій системі координат відносних одиниць [7, 13].

Далі розглянуто основні етапи моделювання об'єктно-орієнтованої моделі асинхронної машини змінного струму.

#### **1.4.2 Узагальнена модель асинхронного двигуна в вільно орієнтованій двовимірній системі координат, що обертається**

Для електромеханічних систем з асинхронними двигунами модель описується системою рівнянь для електромагнітного кола двигуна та механічної частини. При необхідності модель також може бути доповнена рівняннями для розрахунку потужності та втрат електромеханічної системи.

Спочатку записуються рівняння електромагнітного кола для кожної фази машини. У цьому випадку для трифазної машини існують три рівняння для ланцюгів статора і ротора. При цьому електромагнітний зв'язок обмоток статора і ротора описується змінним коефіцієнтом взаємної індукції, який залежить від кута повороту ротора відносно статора. Якщо обмотки двигуна з'єднані в зірку

без нейтралі, то рівняння для фазних змінних (напряга, струм і потік) лінійно залежні, що робить тривимірну модель симетричного двигуна надлишковою.

Тому для усунення надлишковості вихідної системи та усунення періодичних коефіцієнтів рівнянь, вихідні рівняння слід перетворити з тривимірної системи координат у вільну систему координат з довільною орієнтацією. При такому перетворенні моделювання режиму роботи АД включає наступні кроки [14]:

- 1) Безпосереднє перетворення вхідних впливів (фазних напруг статора);
- 2) Розв'язання системи рівнянь електромагнітного кола у двовимірній вільній системі координат
- 3) розв'язання рівнянь руху машини та розрахунок електромагнітного моменту двигуна
- 4) зворотнє перетворення вихідних змінних (струмів і потоків), які необхідно проаналізувати в тривимірній системі.

Для виконання цих етапів модель повинна містити відповідні функціональні блоки.

Як відомо, моделі об'єктів представляються у вигляді ланцюгів послідовно з'єднаних ланок. Тому основою для побудови системи керування електроприводом є представлення структури асинхронного двигуна як об'єкта керування, як показано на рис. 1.6

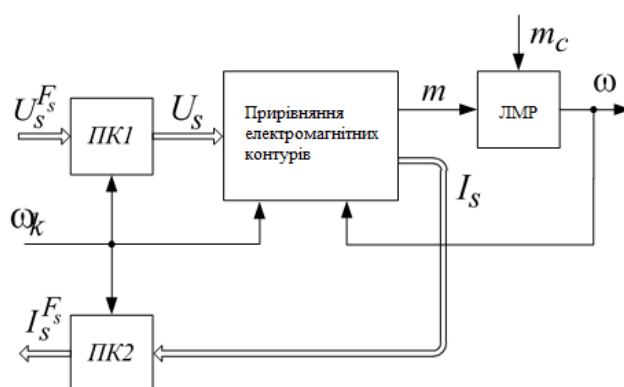


Рисунок 1.6 - Блок-схема моделі асинхронної машини із короткозамкненим ротором

Модель асинхронного двигуна представлена у вигляді сукупності рівняння електромагнітних контурів та ланки механічного руху (ЛМР). Блоки ПК1 і ПК2 здійснюють пряме та зворотне перетворення координат, відповідно.

### 1.4.3 Модель двофазної асинхронної машини з короткозамкненим ротором для задач екстремального керування

Відомо [2, 11], що основою математичних моделей машин для завдань оптимізації служать рівняння режимів роботи, що встановилися. Тому, з метою спрощення розрахунку законів екстремального управління, буде використана система рівнянь (2.27) режиму роботи асинхронного двигуна, що встановився [2]:

$$\begin{aligned}
 U_s &= \omega_k B \Psi_s + R_s I_s; \\
 0 &= (\omega_k - \omega) B \Psi_r + R_r I_r; \\
 \Psi_s &= \Psi_m + L_{s\sigma} I_s; \\
 \Psi_r &= \Psi_m + L_{r\sigma} I_r; \\
 \Psi_m &= F_m I_m; \\
 I_m &= I_s + I_r; \\
 m &= \xi_N B \Psi_m \cdot I_s; \\
 m &= m_c; \\
 \beta &= \omega_k - \omega.
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

де

$$U_s = \begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \end{bmatrix}, \quad I_s = \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix}, \quad \Psi_s = \begin{bmatrix} \psi_{sx} \\ \psi_{sy} \end{bmatrix}, \quad \Psi_r = \begin{bmatrix} \psi_{rx} \\ \psi_{ry} \end{bmatrix}, \quad \Psi_m = \begin{bmatrix} \psi_{mx} \\ \psi_{my} \end{bmatrix}, \quad I_m = \begin{bmatrix} i_{mx} \\ i_{my} \end{bmatrix}$$

двовимірні алгебраїчні вектори напруг  $U_s$ , струмів статора  $I_s$ , потокозчеплень статора  $\Psi_s$  і ротора  $\Psi_r$ , головних потокосцеплень  $\Psi_m$  і струмів, що намагнічують  $I$ .

Розрахунок статичних електромеханічних характеристик асинхронного двигуна проводиться при живленні джерела синусоїдальної напруги. При цьому задані частота  $\omega_s$  і проекції зображуючого вектора напруг джерела живлення  $u_{sx}, u_{sy}$ , що синхронно обертається системі координат ( $\omega_k = \omega_s$ ) [15]. Нижче, згідно [15], наведено рівняння описують усталений режим роботи асинхронного двигуна.

$$i_{sx} = \frac{r_e u_{sx} + \omega_s I_e u_{sy}}{r_e^2 + \omega_s^2 I_e^2} \quad (1.3)$$

$$i_{sy} = \frac{-\omega_s I_e u_{sx} + r_e u_{sy}}{r_e^2 + \omega_s^2 I_e^2} \quad (1.4)$$

Потокозчеплення ротора:

$$\psi_{rx} = \frac{k_r r_r}{\alpha_r^2 + \beta^2} (\alpha_r i_{sx} + \beta i_{sy}); \quad (1.6)$$

$$\psi_{ry} = \frac{k_r r_r}{\alpha_r^2 + \beta^2} (-\beta i_{sx} + \alpha_r i_{sy}). \quad (1.7)$$

Для розрахунку координат магнітного стану АД був використаний алгоритм наведений на рис. 1.7 [15]. Розрахунок проводиться за заданих величинах  $u_s$ ,  $\omega_s$ ,  $\beta$ .

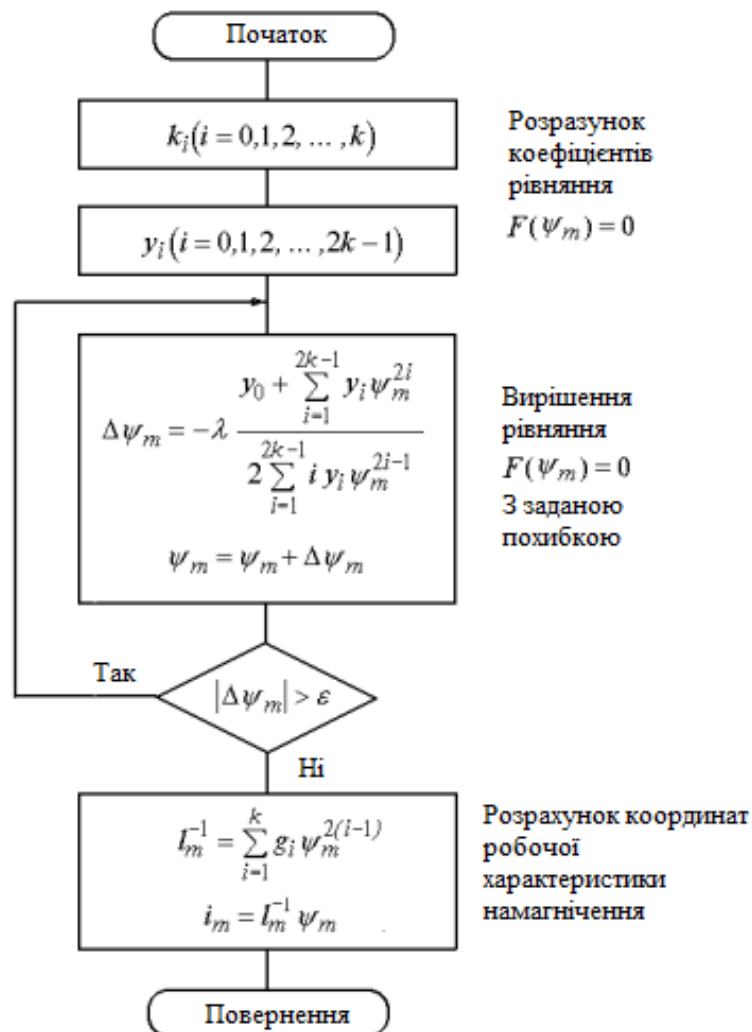


Рисунок 1.7 - Алгоритм розрахунку координат магнітного стану АД

Процес електромеханічного перетворення енергії у двигуні описується у загальному вигляді наступним рівнянням енергетичного балансу:

$$p_{\text{ел}} = p_{\text{мех}} + \Delta p \quad (1.8)$$

де  $p_{\text{ел}}$  – активна електрична потужність, споживана двигуном від джерела живлення;  $p_{\text{мех}}$  – механічна потужність, що розвивається двигуном;  $\Delta p$  – Втрати потужності в двигуні.

Втрати потужності в асинхронному двигуні можуть бути розраховані як сума електричних, магнітних, додаткових та механічних втрат.

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ел}} + \Delta p_{\text{магн}} + \Delta p_{\text{дод}} + \Delta p_{\text{мех}} \quad (1.9)$$

Ці складові виражаються так:

$$\Delta p_{\text{ел}} = \xi_N (r_s i_s^2 + r_r i_r^2) \quad (1.10)$$

$$\Delta p_{\text{маг}} = (k_r \omega_s + k_b \omega_s^2) \cdot \left( \frac{\psi_m}{\psi_{mN}} \right)^2 \quad (1.11)$$

$$\Delta p_{\text{доб}} = k_{\text{доб}} i_s^2 \quad (1.12)$$

$$\Delta p_{\text{мех}} = k_{\text{мех}} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_N} \right)^n \quad (1.13)$$

#### 1.4.4 Алгоритм розрахунку екстремального закону управління

Для розв'язання задачі максимізації моменту при обмеженнях виділяють три зони, умови досягнення максимуму в яких різні:

1 зона: при  $0 \leq \omega \leq \omega_1$ ;  $i_s = i_{\text{гр}}$ ;  $u_s \leq u_{\text{гр}}$ ;

2 зона: при  $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$ ;  $i_s = i_{\text{гр}}$ ;  $u_s = u_{\text{гр}}$ ;

3 зона: при  $\omega > \omega_2$ ;  $i_s \leq i_{\text{гр}}$ ;  $u_s = u_{\text{гр}}$ ;

При обчисленнях, залежно та умовами роботи приводу, використовують два варіанти математичної моделі АД, для розрахунку статичних режимів роботи: «напруги статора - потокозчеплення ротора» та «струми статора - потокозчеплення ротора».

На рис. 1.8 представлений алгоритм розрахунку відповідних законів частотного управління, що відрізняється автоматичним визначенням меж зон та розрахунок результуючих оптимальних характеристик.

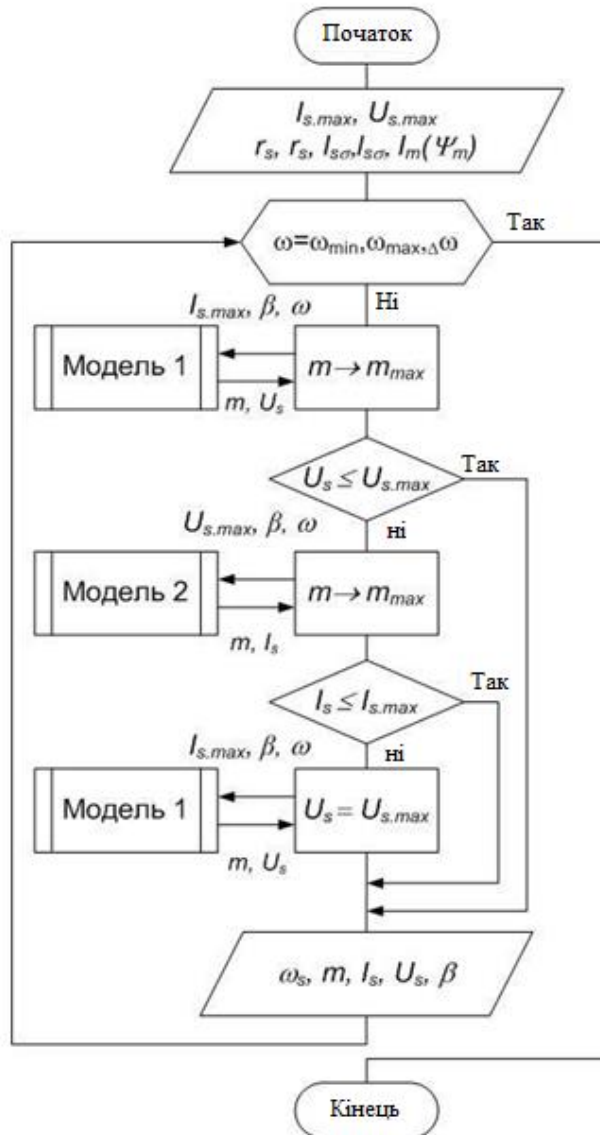


Рисунок 1.8 - Блок-схема розрахунку оптимізованих законів частотного керування

У межах швидкісного циклу математична модель "напруга статора - потік ротора" (модель 1 на рис. 1.8) використовується як частина стандартного алгоритму оптимізації для визначення екстремальних значень моменту двигуна при допустимих значеннях струму статора і відповідних оптимальних значеннях абсолютного ковзання і напруги статора, ймовірно, першими характеристики спочатку розраховуються для швидкісної зони. Якщо умова  $U_s \leq U_{s,max}$  порушується, виконується новий оптимізаційний розрахунок.

В рамках оптимізаційного алгоритму визначення екстремальних значень моменту двигуна при допустимих значеннях напруги статора і відповідних

оптимальних значеннях абсолютного ковзання струму статора, можливо, з використанням математичної моделі "струм статора - потокозчеплення ротора" (модель 2 на рисунку 1.8), виконується новий оптимізаційний розрахунок виконується новий оптимізаційний розрахунок. Якщо умова  $I_s \leq I_{s,max}$  порушується, розраховується закон керування для другої зони з використанням математичної моделі "зв'язок напруги статора - потокозчеплення ротора" (модель 1 на рис. 1.8) в рамках алгоритму оптимізації, що визначає екстремальні значення моменту двигуна при обмеженнях за струмом і напругою. За результатами цих перевірок формуються закони керування, які автоматично визначають межі та стикування першої, другої та третьої зон керування в заданому діапазоні швидкостей.

#### 1.4.5 Розрахунок та аналіз оптимального закону управління

Результат розрахунку оптимального управління за умови обмеження напруги  $U_{s,доп} = U_N$  представлений на рис. 1.9, 1.19. Характеристики розраховані у відносних одиницях для асинхронного короткозамкнутого двигуна типу АИУЕ225М6 ( $P_N=40$  кВт), номінальні дані якого наведені у п. 2.1.

Тут аргументом є бажана швидкість, а вихідними змінними оптимальні значення струму статора, амплітуди напруги та абсолютного ковзання.

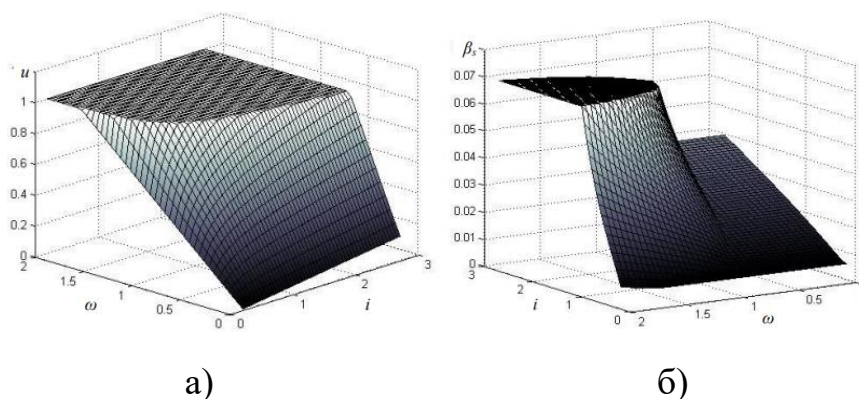


Рисунок 1.9 - Оптимальна напруга статора  $u_s$  (а) та ковзання  $\beta_s$  (б) за критерієм максимуму

На рис. 1.10, представлено відношення моменту двигуна до струму статора функції навантаження (ковзання) і швидкості АД. На рис. 1.10б–1.11

представлені залежності сумарних втрат у двигуні та його ККД для отриманих оптимальних законів частотного керування.

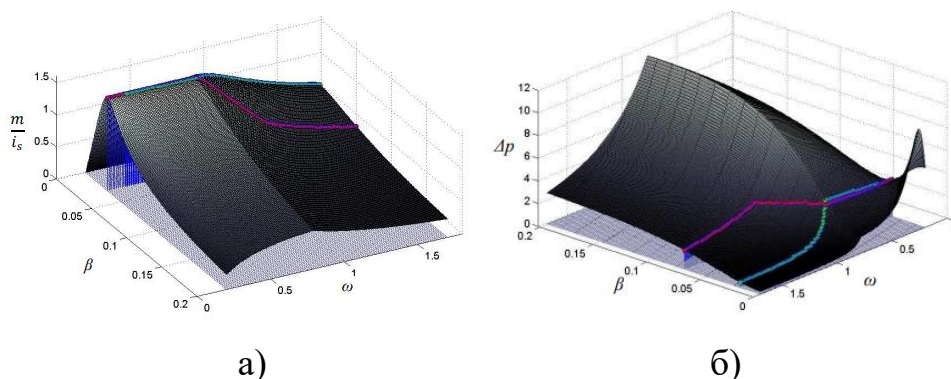


Рисунок 1.10 – Зміна відношення момент/струм (а) та втрат в АД (б) при обмеженні струму статора ( $I_{s,доп}=2,0 I_N$ )

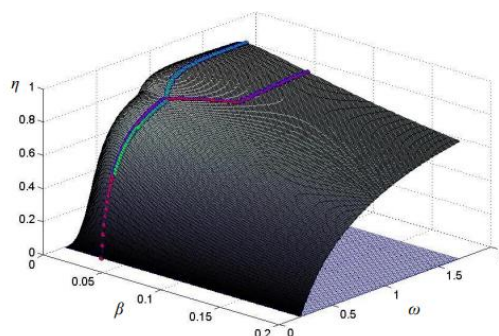


Рисунок 1.11 - Зміна ККД при обмеженні струму статора ( $I_{s,доп}=2,0 I_N$ )

На рис. 1.10, 1.11 синіми маркерами показані значення, що відповідають максимальному значенню відношення момент/струм. Червоними маркерами показано значення, що відповідають максимальному електромагнітному моменту при заданому струмі статора  $i_s$ .

Зауважимо, що у другій та третій зонах максимум відношення момент/струм не збігається з максимумом електромагнітного моменту.

Рис. 1.10, 1.11 ілюструють зміну втрат у двигуні та його ККД при різних моментах навантаження та заданих швидкостях. Зауважимо, у більшій частині діапазону робочих швидкостей і ковзань втрати двигуна перевищують номінальне значення, що виключає тривалу роботу двигуна в цьому режимі.

Для порівняння на рис. 1.12, 1.13 покажемо зміну відношення момент/струм, втрат та ККД для закону оптимального управління, розрахованого для номінального струму двигуна.

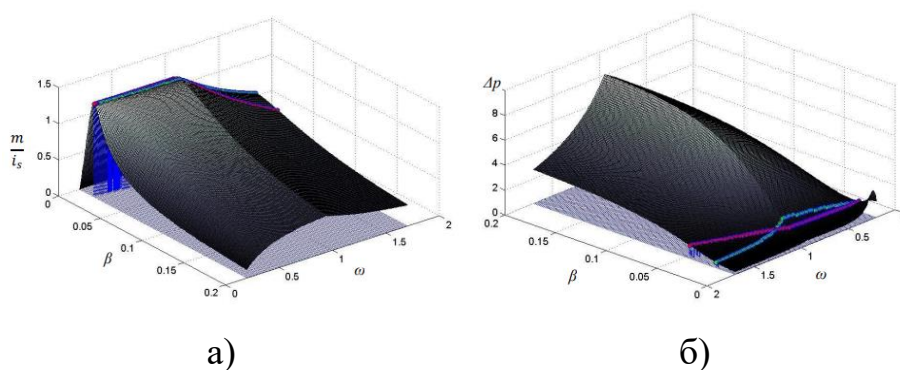


Рисунок 1.12 - Зміна відношення момент/струм (а) та  $\Delta p$  (б) при обмеженні струму статора ( $I_{s, \text{доп}}=1,0 I_N$ )

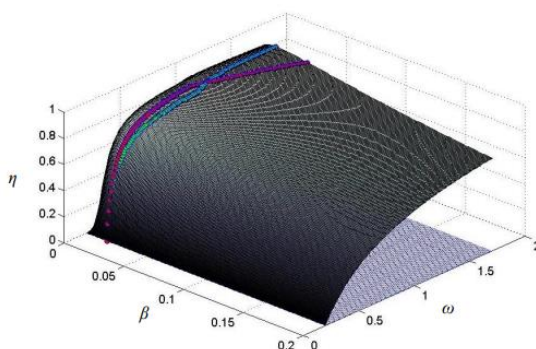


Рисунок 1.13 - Зміна відносин ККД при обмеженні струму статора ( $I_{s, \text{доп}}=1,0 I_N$ )

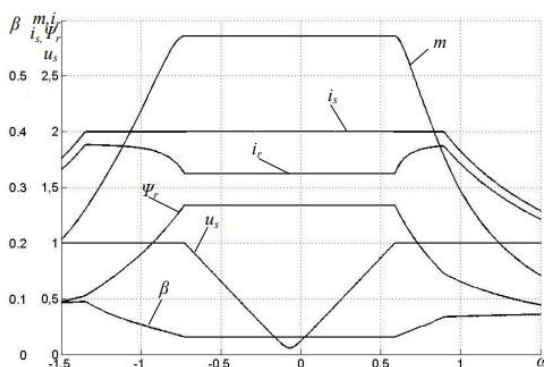


Рисунок 1.14 –Закони оптимального частотного управління асинхронним двигуном при обмеженнях струму ( $I_{s, \text{доп}}=2,0 I_N$ ) та напрузі ( $U_{s, \text{доп}}=U_N$ )

Окремим рішенням задачі оптимального управління за критерієм максимального моменту є графік закону частотного управління при фіксованому значенні статора струму  $i_s$  і незмінному значенні моменту статичного навантаження двигуна (рис. 1.14).

Для реалізації такого закону в системах скалярного керування необхідно використовувати два функціональні перетворювачі за напругою статора  $u_s$  і ковзання  $\beta$  у функції сигналу завдання, фізичний зміст якого – бажана швидкість  $\omega_{AD}$ .

## Висновки до розділу 1

1. Викладено теорію комплексної оптимізації режимів роботи двигуна та наведено основні проблеми оптимізації режимів роботи двигуна

2. Практична реалізація задачі комплексної оптимізації зводиться до введення в типову структуру скалярних і векторних САР додаткових блоків, у тому числі алгоритмів керування

3. Оптимізаційна задача відрізняється в межах робочої області електроприводу та при досягненні обмежень

4. Блоки, що виконують комплексну оптимізацію режимів роботи двигуна, для своєї роботи потребують поточного значення швидкості АД і їх використання обмежується лише швидкістю приводу САР у замкненому контурі.

Отримано наступні теоретичні результати

1. Представлено динамічну та статичну математичні моделі асинхронних двигунів, орієнтовані на розрахунок оптимального закону керування з урахуванням ефектів насичення основного магнітного кола та впливу витіснення струму ротора

2. Запропоновано алгоритм розрахунку оптимального закону керування, який відрізняється автоматичним визначенням меж робочої зони приводу.

## 2 СИНТЕЗ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ СКАЛЯРНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

### 2.1 Розрахунок параметрів математичної моделі двигуна АИЕУ225М6

Для математичного моделювання передбачуваних режимів роботи електроприводу та їх аналізу, у цьому пункті проведено розрахунок параметрів математичної моделі електроприводу.

Номінальні дані аналізованого двигуна зведені у табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Технічний паспорт обраного двигуна

Марка двигуна	АИЕУ 225 М6 У5	Номінальна частота $f_{sN}$ , Гц	50
Номінальна потужність $P_N$ , кВт	40	Число пар полюсів двигуна $z_p$ .	3
Номінальний момент $M_N$ , Нм	392	Номінальний ККД $\eta_N$	0,90
Тривалість ввімкнення ПВ	0,3	Номінальний коефіцієнт потужності $\cos\phi_N$	0,88
Синхронна частота обертання $n_0$ , об/хв	1000	Кратність пускового струму $I_{Пуск}/I_N$	4,9
Номінальна частота обертання $n_N$ , об/хв	975	Кратність пускового моменту $M_{Пуск}/M_N$	1,87
Лінійна напруга $U_{лN}$ , В	660	Кратність пускового моменту $M_{Крум}/M_N$	1,89
Номінальний струм двигуна $I_{sN}$ , А	44,2	Критичне ковзання $S_{Крум}$ , %	11,9

Параметри Т-подібної схеми заміщення наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення опорів двигуна зі схеми заміщення АИЕУ225М6У5

Активний опір статора $R_s$	0,354 Ом	0,0411 в.о.
Приведений до статора, активний опір кола ротора $R_r$	0,221 Ом	0,0253 в.о.
Індуктивний опір розсіювання статора $X_s$	0,758 Ом	0,0879 в.о.
Приведене достатора значення індуктивного опору ротора $X_r$	2,142 Ом	0,2485 в.о.

В результаті досвіду холостого ходу отримана наступна характеристика намагнічування  $f_s=f_{sN}$ :

Таблиця 2.3 – Характеристика намагнічування АД

$U_0, В$	120	140	200	260	320	360	420	480	540	600	660	720	780	840
$I_0, А$	1,8	2,2	3,4	4,2	5,0	5,7	6,7	7,8	9	10,6	12,2	14,6	18	22,6

Далі розрахована ЕРС намагнічування на підставі формули:

$$E_m = |U_0 - R_s I_0 - jX_s I_0| \quad (2.1)$$

Значення струму холостого ходу в області малих значень коригуються відповідно до рис. 2.1.

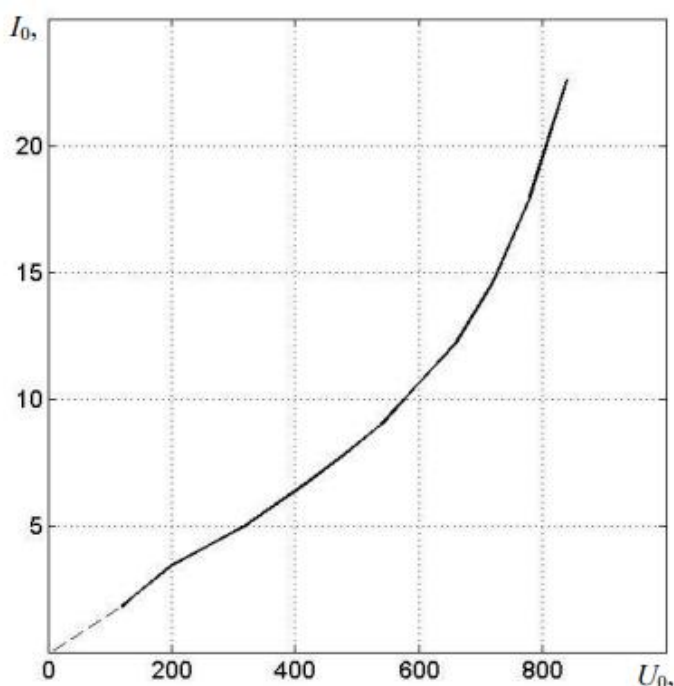


Рисунок 2.1 - Розрахункові дані дослідження холостого ходу та його апроксимація для двигуна АИЕУ225М6 40кВт

Таблиця 2.4 – ВАХ електромагнітного кола двигуна

$E_m, В$	68,65	80,06	114,3	148,65	183,02	205,87	240,17
$I_m, А$	1,8	2,2	3,4	4,2	5,0	5,7	6,7
$E_m, В$	274,43	308,66	342,75	376,84	410,67	444,17	477,28
$I_m, А$	7,8	9	10,6	12,2	14,6	18	22,6

Базисні величини та параметри математичної моделі обрані відповідно до формул, наведених у [6], та зведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Базисні величини параметрів АД

Базисна величина	Значення		
$U_{\phi}, \text{В}$	538,89	$\Psi_{\phi}, \text{Вб}$	1,715
$I_{\phi}, \text{А}$	62,5	$Z_{\phi}, \text{Ом}$	8,62
$\Omega_{\phi}, \text{рад/с}$	314	$L_{\phi}, \text{Гн}$	0,0274
$\Theta_{\phi}, \text{ел. рад}$	1	$P_{\phi}, \text{Вт}$	42529
$T_{\phi}, \text{с}$	0,0032	$M_{\phi}, \text{Нм}$	406,33

За даними таблиці 2.3 побудовано криву намагнічування машини, представлену на рис. 2.2. На графіках виділено точку, що відповідає номінальному режиму.

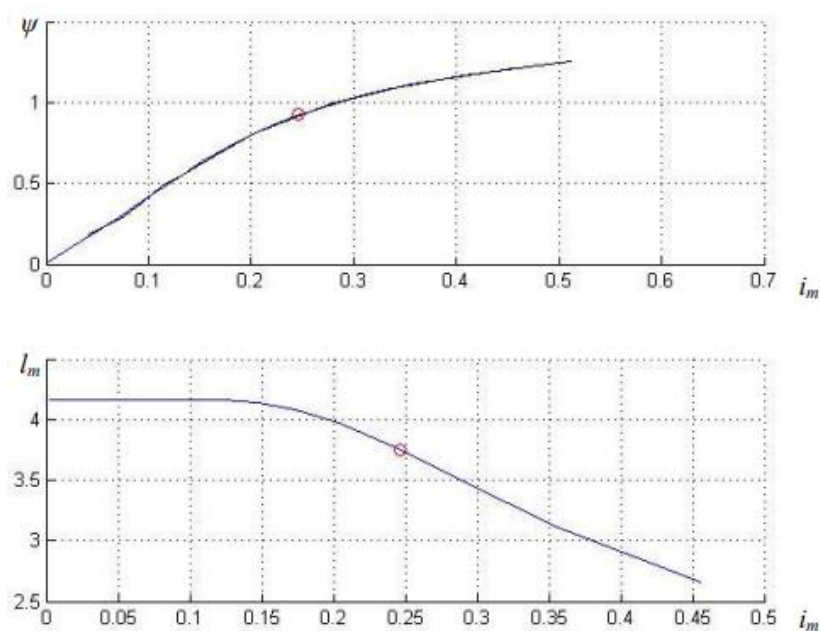


Рисунок 2.2 - Характеристика намагнічування двигуна АІЕУ225М6 40кВт

Відповідно до виразів (1.2) отримані наступні значення основних координат двигуна в номінальному режимі:

$$\begin{aligned}
 u_{sx} &= 1; & u_{sy} &= 0; & u_s &= 1; \\
 i_{sx} &= 0,88636; & i_{sy} &= -0,5424; & i_s &= 1,03; \\
 i_{rx} &= -0,9011; & i_{ry} &= 0,2993; & i_r &= 0,9495;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_{mx} &= -0,0148; & i_{my} &= -0,2431; & i_m &= 0,2435; \\
 \psi_{sx} &= 0,0223; & \psi_{sy} &= -0,9636; & \psi_s &= 0,9639; \\
 \psi_{rx} &= -0,2795; & \psi_{ry} &= -0,8415; & \psi_r &= 0,8868; \\
 \psi_{mx} &= -0,0557; & \psi_{my} &= -0,9159; & \psi_m &= 0,9176; \\
 m &= 1,0.
 \end{aligned}$$

Природні механічна та електромеханічна характеристики двигуна представлені на рис. 2.3.

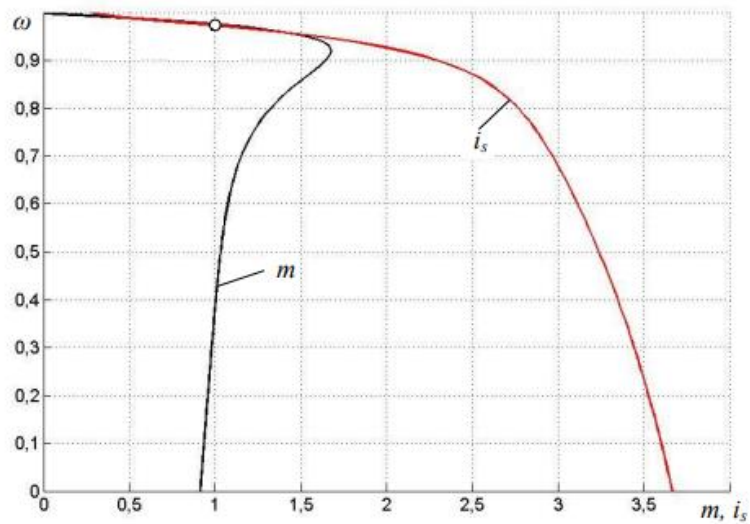


Рисунок 2.3 - Природна механічна та електромеханічна характеристики двигуна АІУЕ255М6 40кВт

Даний електропривод використовується для самохідного електровоза В17К-02 (рис.2.4), параметри якого наведені в таблиці 2.6



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд самохідного електровоза В17К-02

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики В17К-02

Назва параметру	Од. виміру	Значення
Вантажопідйомність	кН	17
Маса вагону	т	19.1
об'єм кузова	м <sup>3</sup>	10
Максимальна швидкість руху	км/год	9
Габаритні розміри: довжина, ширина, висота	мм	8800x2800x1850
Коля	мм	2460
Максимальний кут	°	±15
Радіус повороту	м	7,5
Тип приводу	-	Частотнорегульований з рекуперацією
Кількість ведучих та поворотних колес	-	4
Потужність двигунів	кВт	4x40
Тип конвеєру	-	скребковий
Ширина скребка	мм	870
Сумарна потужність	кВт	200
Номінальна напруга	В	660
Довжина кабельного барабану	м	220
Частота струму	Гц	50

Вибір перетворювача частоти для асинхронних двигунів у електротранспорті визначається декількома особливостями, які варто враховувати:

1. Частота і швидкість: Перетворювач повинен мати здатність працювати на високих частотах, оскільки асинхронні двигуни ефективно функціонують при високих швидкостях обертання. Також важливо мати можливість регулювання частоти для забезпечення контролю над швидкістю.
2. Ефективність: Оптимальний вибір полягає в обранні перетворювача з високою ефективністю. Це дозволяє зменшити втрати енергії і підвищити загальну продуктивність системи.
3. Керування моментом: Перетворювач повинен забезпечувати можливість ефективного керування моментом, оскільки це важливо для точного контролю руху транспортного засобу.
4. Система охолодження: Висока ефективність перетворювача також пов'язана з його системою охолодження. Деякі застосовані в електротранспорті перетворювачі можуть потребувати ефективної

системи охолодження для забезпечення стабільної роботи при великих навантаженнях.

5. Робочий діапазон напруги: Оскільки електротранспорт може використовувати акумулятори або інші джерела енергії з різними рівнями напруги, перетворювач повинен бути спроектований для роботи в широкому діапазоні напруг.
6. Компактність та вага: Особливо для електротранспорту важливо, щоб перетворювач був компактним і легким, щоб не надто навантажувати конструкцію транспортного засобу та забезпечувати оптимальне співвідношення ваги та продуктивності.

Враховуючи ці особливості, обрання перетворювача частоти для асинхронних двигунів допоможе забезпечити ефективну та надійну роботу електротранспорту. Тому для керування електродвигуном обираємо перетворювач частоти **Siemens SINAMICS G120P 6SL3225-0BH33-7UA1**. Параметри наведені в табл.2.7.

Таблиця 2.7 – Параметри обраного ПЧ

SKU	6SL3225-0BH33-7UA1.
Номінальна потужність	55 кВт
Живлення на вході	3 ф, 690 В
Перевантажувальна здатність	150%
Номінальний струм	62 А
Максимальний струм	84 А
Вбудований ПІД контролер	наявний
Скалярне керування	є
Векторне керування без енкодера	є
Векторне керування з енкодером	є
ККД	0.95
Максимальна частота	100 Гц

## 2.2 Типова структура скалярної розімкнутої САК електроприводу

Як вихідна система управління, що підлягає оптимізації, була обрана розімкнена скалярна система управління швидкістю електроприводу, з пропорційним законом  $U_s/\omega_s$ .

Типова структура скалярної розімкнутої системи управління представлена на рис. 2.5 [14]. Основна її частина складається з двох блоків: задатчика інтенсивності (ЗІ), який являє собою нелінійний пристрій, що обмежує темп (А) зміни в часі впливу  $u^*$ , і функціонального перетворювача (ФП1) – нелінійного пристрою, що реалізує функціональну залежність між впливом, що задає  $u^*$  (фізичний зміст якого є задана частота напруги статора  $\omega_s$ ) та амплітудою напруги статора  $u_s$ .

У загальному випадку, основними вимогами, які пред'являють до скалярних розімкнених за швидкістю систем управління, є: по-перше, формування необхідних механічних характеристик, по-друге, регулювання швидкості АЛ у необхідному діапазоні і, по-третє, формування необхідної якості пуско-гальмівних режимів.

При використанні традиційних законів регулювання діапазон регулювання швидкості в таких системах складає від  $D=1:5$  до  $D=1:10$ .

Формування необхідних пуско-гальмівних режимів (обмеження пускового струму та, визначене технологією, час розгону) здійснюється, як правило, за допомогою задатчика інтенсивності (ЗІ), що обмежує похідну заданої частоти функції часу.

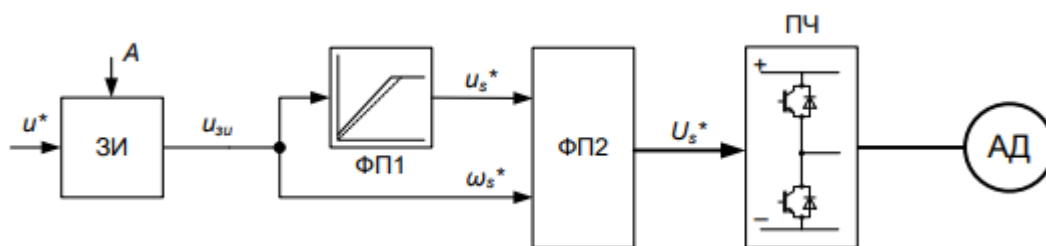


Рисунок 2.5 - Типова структура скалярної системи керування

Структура показана на рис. 3.1, містить наступні змінні та блоки:  $u^*$  - задаючий валив;  $\omega_s^*$  - задана частота напруги статора;  $u_s^*$  - задана амплітуда напруги статора;  $u_{зі}$  - вихід задатчика інтенсивності;  $U_s^*$  - задані фазні значення напруги статора; А - темп задатчика інтенсивності; ЗІ - задатчик інтенсивності; ФП1 - функціональний перетворювач напруги; ФП2 - функціональний

перетворювач 3х фазної напруги;

Формування необхідних механічних властивостей є важливою особливістю розглянутої скалярної системи. Тип механічної характеристики визначається точною функціональною залежністю між частотою та амплітудою напруги статора. Як правило, обрана функціональна залежність забезпечує необхідну перевантажувальну здатність і жорсткість механічних властивостей. При вирішенні конкретних технічних завдань можливість задати функціональну залежність між частотою і амплітудою напруги статора дозволяє максимізувати або мінімізувати один з параметрів приводу (наприклад, крутний момент, струм, ККД) з урахуванням обмежень джерела живлення.

### 2.3 Електромеханічний показник якості енергоефективності скалярних систем керування

Оцінку ефективності скалярних систем управління слід проводити з огляду на те, що асинхронний двигун має нелінійні характеристики [6]. З робіт [11], [12], [15] відомо, що асинхронний двигун як об'єкт управління має екстремальні характеристики показників якості.

Оцінка ефективності може бути проведена за такими критеріями, що забезпечують мінімізацію наступних показників:

- Сумарна потужність втрат  $\Delta p \rightarrow \min$ ;
- Реактивна потужність  $Q_s \rightarrow \min$ ;
- Струму статора  $i_s \rightarrow \min$  і ротора  $i_r \rightarrow \min$ .

Модель розрахунку показника якості показано на рис. 2.6.

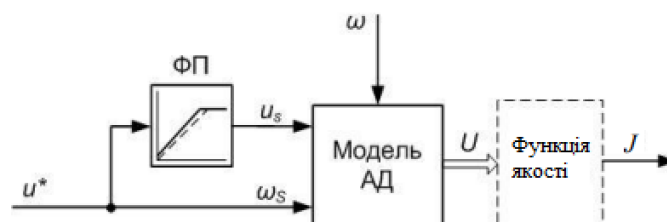


Рисунок 2.6 – Модель розрахунку показника якості

Модель містить такі блоки та змінні:  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора;  $J$  – критерій якості;  $U$  – вектор вхідних величин функції якості; ФП – функціональний перетворювач напруги, до нього закладається обраний закон частотного управління; Модель АД – містить рівняння статичної моделі АД.

Аналіз оптимізованої системи керування асинхронним двигуном, представленої в роботах [5, 8], дозволяє зробити наступні висновки

- Певне збалансоване співвідношення між амплітудою та частотою напруги статора може гарантувати екстремальні значення обраних показників якості;

- у законі керування з фіксованою частотою екстремальні значення досягаються лише при певних навантаженнях.

З наведеного вище видно, що для оптимізації режиму роботи АД корекцію скалярного закону регулювання частоти слід проводити з акцентом на мінімізацію (або максимізацію) значень обраних показників якості.

Для оцінки якості керування максимальним електромагнітним моментом двигуна в скалярній системі введено електромеханічний показник якості "електромагнітний момент/струм статора":

$$J_{m-i_s} = \frac{m}{i_s} \rightarrow \max \quad (2.2)$$

де  $m$  - електромагнітний момент АД,  $i_s$  - модуль струму статора АД.

Єдиним критерієм оцінки електромеханічного показника якості є досягнення максимально можливих значень.

На рис.2.7 представлено модель розрахунку електромеханічного показника якості.

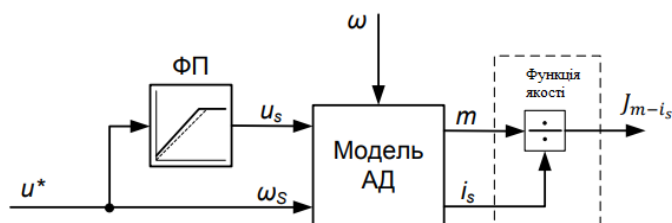


Рисунок 2.7 – Модель розрахунку електромеханічного показника якості

Електромеханічний показник розраховується за наступним алгоритмом: зміною кутової швидкості обертання ротора при фіксованих значеннях амплітуди напруги статора  $u_s$  і частоти  $\omega_s$ , визначених відповідно до обраного закону частотного керування.

Розглянемо характер зміни електромеханічного показника якості від моменту навантаження на осі АД на прикладі пропорційного закону частотного керування. Пропорційний закон регулювання частоти проілюстровано на рисунку 2.8, де показано пропорційний закон регулювання частоти (залежність 1) та два скориговані закони регулювання частоти (залежності 2 і 3). За допомогою математичної моделі розрахунку електромеханічного показника (див. рис. 2.7) розрахуємо його значення функції навантаження на валу двигуна при фіксованому завданні на частоту і амплітуду напруги статора АД (рис. 2.8).

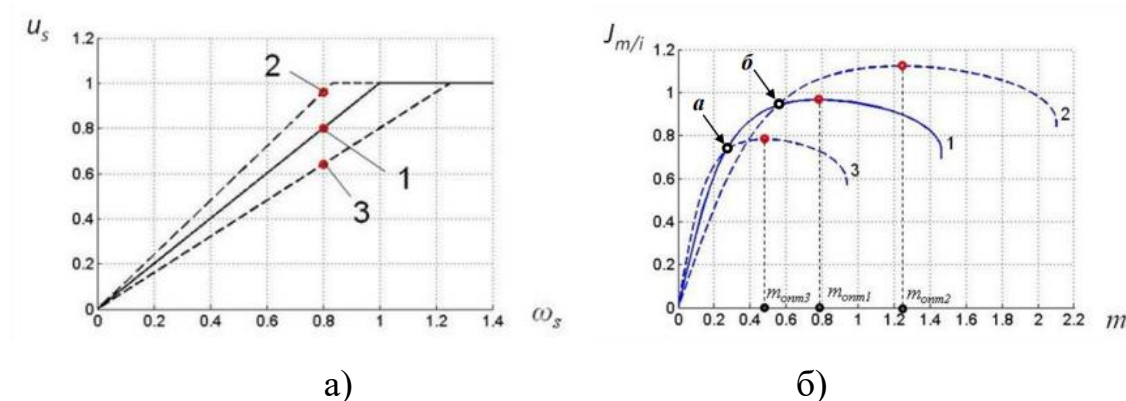


Рисунок 2.8 – Залежність показника якості при варіації закону частотного керування

Як бачимо, при зміні закону пропорційного частотного керування в бік збільшення амплітуди напруги статора (залежність "2") електромеханічний показник зростає і його максимум зміщується в область більшого моменту і відповідно більшого струму, що протікає. Однак при зменшенні амплітуди напруги статора (залежність "3") електромеханічний показник зменшується і його максимум зміщується в область меншого моменту і меншого струму. Від початкової точки осі координат до точки "а" максимальне значення електромеханічного показника має залежність "3", від точки "а" до точки "б"

максимальне значення досягається залежністю "1" і в області, розташованій праворуч від точки "b", максимальне значення досягається залежністю "2".

Важливим висновком є те, що для кожного закону регулювання частоти максимальний електромеханічний показник досягається тільки при певних значеннях навантаження на валу двигуна. Для підтвердження цього висновку проведено аналогічний аналіз для типових скалярних законів керування.

## 2.4 Аналіз законів скалярного регулювання

1. При нехтуванні активним опором обмотки статора  $R_s$  цей закон забезпечує постійний критичний момент, що не залежить від частоти. Таке припущення справедливе для двигунів великої потужності. У двигунах середньої та малої потужності падіння напруги на опорі статора призведе до того, що умова сталості критичного моменту не виконуватиметься. На рис. 2.9а представлений закон пропорційного регулювання при обмеженні амплітуди напруги функції кутової частоти напруги статора  $\omega_s$ . На рис. 2.10а показано сімейство механічних характеристик за пропорційного закону управління. Залежність показника якості  $J_{m-is}$  від частоти та моменту навантаження при пропорційному законі частотного керування показано на рис. 2.11а. Як впливає з рис. 2.11а максимум електромеханічного показника для пропорційного закону становить  $0,9 \div 1,1$ , перевантажувальна здатність машини значно зменшується на низьких частотах.

2. Пропорційний закон частотного регулювання із добавкою. Даний закон управління дозволяє значно збільшити критичний момент двигуна в бажаному діапазоні частот за рахунок додаткової компенсації падіння напруги активному опорі статора (рис. 2.9-2.11б). Як впливає з рис. 2.11б. максимум електромеханічного показника лежить в діапазоні навантажень, близьких до номінального значення моменту і становить  $1,04 \div 1,2$ , перевантажувальна здатність машини на низьких частотах залишається приблизно постійною.

3. Закон частотного керування для вентиляторного типу навантаження. У випадках, коли момент навантаження зростає зі збільшенням швидкості, доцільно змінювати амплітуду напруги за законом  $U_s \sim \omega_s^n (n > 1)$ . (рис.2.9-2.11в). Як впливає з рис. 2.11в електромеханічний показник для вентиляторного

навантаження змінюється в широкому діапазоні.

4. Закон частотного керування за сталості потужності. Зазвичай застосовують у тягових електроприводах транспортних систем. Для реалізації такого закону необхідно використовувати наступну залежність:  $\sqrt{U_s} \sim \omega_s$ . (рис.2.9-2.11г). Як впливає з рис. 2.11г максимум електромеханічного показника лежить в області низьких швидкостей і становить  $1,5 \div 1,45$ , зі збільшенням швидкості величина критерію зменшується.

5. Компенсація падіння напруги на активному опорі статора обмотки. Цей закон реалізує залежність  $E_s/\omega_s = const$ . Для забезпечення цього закону регулювання необхідно збільшувати амплітуду напруги статора порівняно з ЕРС двигуна на величину падіння напруги в обмотці статора. Жорсткість характеристик підвищується з допомогою збільшення значення  $E_s$ , що забезпечує сталість критичного моменту. Як впливає з рис. 2.11д в максимум електромеханічного показника становить 1,05, при цьому перевантажувальна здатність машини зберігається на всьому діапазоні швидкостей нижче номінальної.

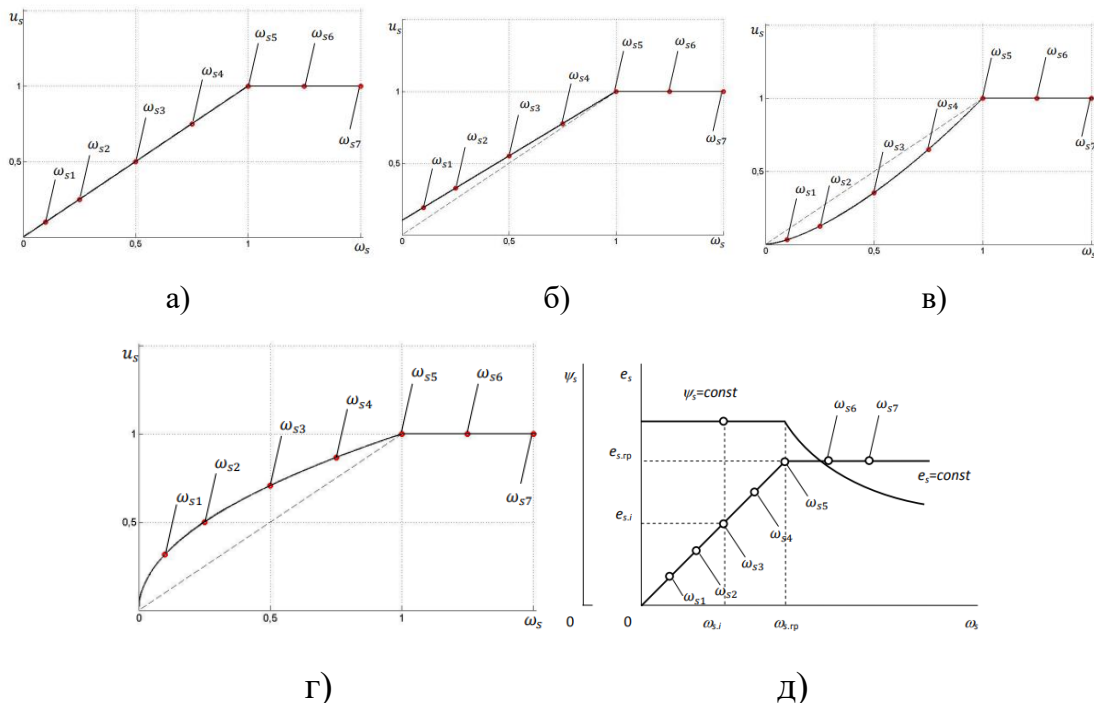


Рисунок 2.9 – Закони керування: а – пропорційний з обмеженням напруги, б – пропорційний з добавкою, в – вентиляторного типу, г – за сталості потужності, д – компенсація падіння напруги

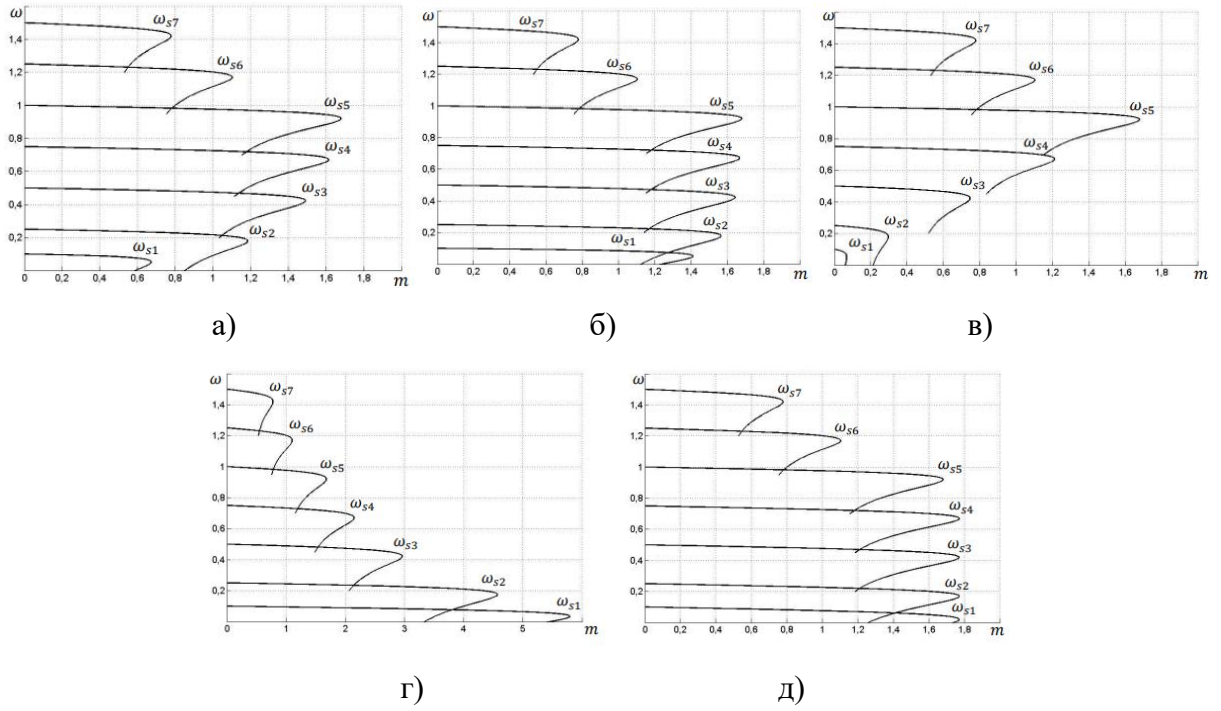


Рисунок 2.10 – Сімейство механічних характеристик для законів керування: а – пропорційний з обмеженням напруги, б – пропорційний з добавкою, в – вентиляторного типу, г – за сталості потужності, д – компенсація падіння напруги

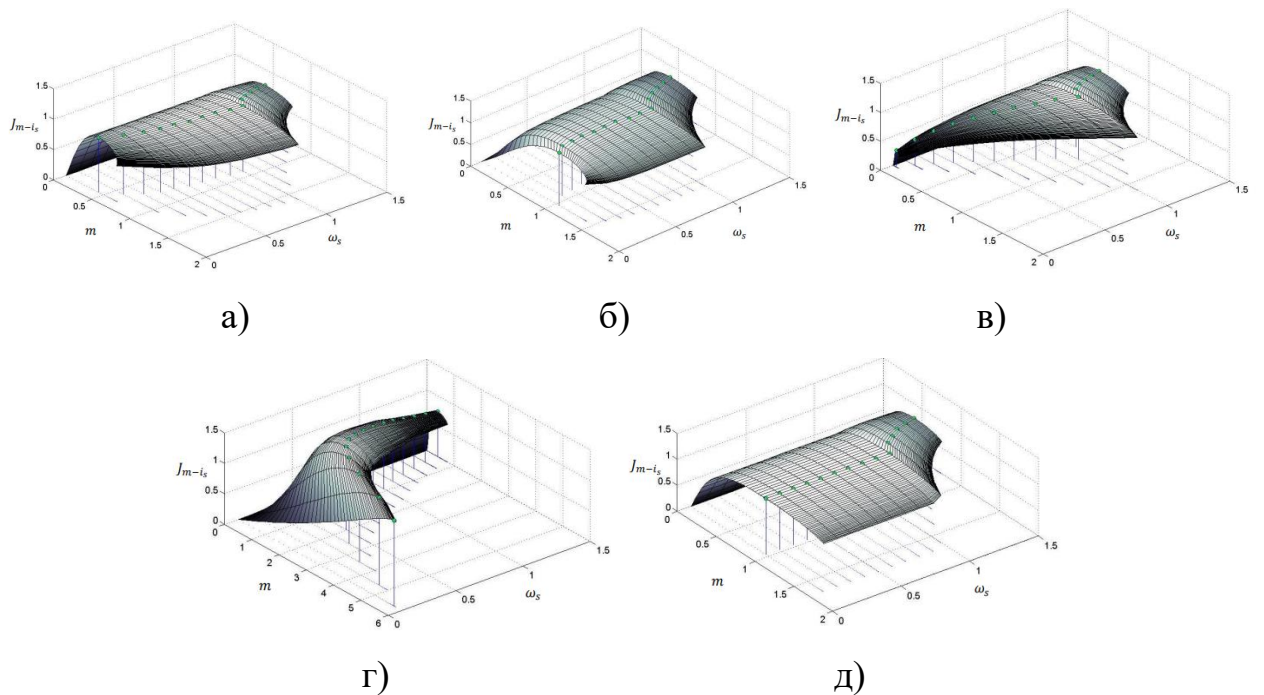


Рисунок 2.11 - Залежність показника якості  $J_{m-is}$  від частоти та моменту навантаження для законів керування: а – пропорційний з обмеженням напруги, б – пропорційний з добавкою, в – вентиляторного типу, г – за сталості потужності, д – компенсація падіння напруги

### 2.4.1 Управління за максимуму моменту при обмеженнях

Цей закон повинен задовольняти такі умови:

$$m \rightarrow \max; i_s \leq i_{гр}; u_s \leq u_{гр}. \quad (2.3)$$

Закон управління враховує типові обмеження, що накладаються напівпровідниковим перетворювачем частоти на струм ( $i_s \leq i_{гр}$ ) та напруга ( $u_s \leq u_{гр}$ ) живлення АД.

На рис. 2.12а наведено розв'язання задачі керування при максимумі моменту з урахуванням обмежень за допомогою алгоритму наведеного в розділі 1. При використанні у скалярній системі, показаний на рис. 2.5 такий закон доцільно розглядати як закон, що доставляє максимум електромагнітного моменту при фіксованому струмі. При вирішенні задачі максимізації моменту при обмеженнях виділяють три зони, умови досягнення максимуму в яких різні:

1 зона: при  $0 \leq \omega \leq \omega_1$ :  $i_s = i_{гр}$ ;  $u_s \leq u_{гр}$ ;

2 зона: при  $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$ :  $i_s = i_{гр}$ ;  $u_s = u_{гр}$ ;

3 зона: при  $\omega > \omega_2$ :  $i_s \leq i_{гр}$ ;  $u_s = u_{гр}$ .

На рис. 2.12б показано сімейство механічних характеристик при використанні в типовій скалярній СК закону, що доставляє максимум моменту при фіксованому струмі. Залежність показника якості  $J_{m-is}$  від частоти та моменту навантаження при законі частотного управління, що забезпечує максимум моменту з урахуванням обмежень, наведено на рис. 2.12в.

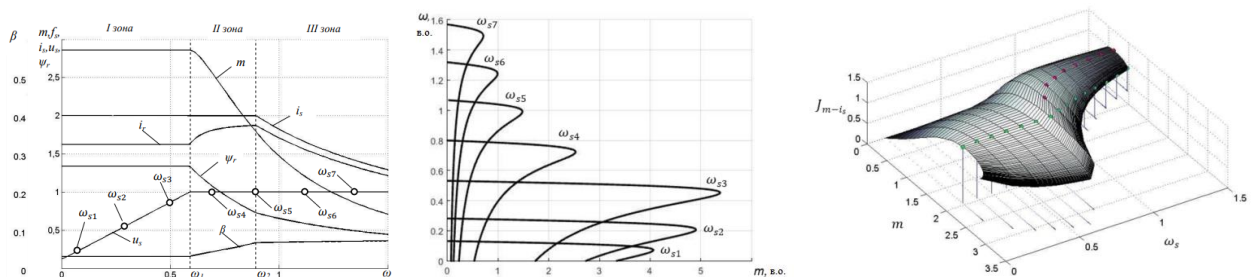


Рисунок 2.12 – Характеристики (а), механічні характеристики (б), задежність показнику якості при законі керування , що забезпечує максимум моменту

Такий закон керування забезпечує постійне значення електромеханічного індикатора в першій зоні регулювання при заданому навантаженні. Слід

зазначити, що в другій і третій зонах максимальне значення електромеханічного показника займає значення моменту навантаження, відмінне від максимально можливого значення моменту при заданих обмеженнях (позначено червоними маркерами на поверхні).

Враховуючи результати аналізу, комплексну оптимізацію режиму роботи електропривода за електромеханічним показником якості можна сформулювати наступним чином: в кожній робочій точці електропривода обирається керування, яке забезпечує найбільше значення електромеханічного показника якості  $J$ . В якості параметрів для вибору регулятора можна використовувати момент або струм статора АД.

Математична постановка цієї задачі має наступний вигляд:

$$\beta_e = \begin{cases} \beta_{e1} \langle J_{m-is1}(I_s) \geq J_{m-is \text{ гран}}(I_s) \rangle \\ \beta_{e \text{ гран}} \langle J_{m-is \text{ гран}}(I_s) \geq J_{m-is 1}(I_s) \rangle \end{cases} \quad (2.4)$$

де  $\beta_{e1}$  – оптимальне керування в робочій області приводу;  $\beta_{e \text{ гран}}$  – оптимальне керування при виході на обмеження;  $J_{m-is1}$  – значення електромеханічного показника для закону управління в робочій області приводу;  $J_{m-is \text{ гран}}$  – значення електромеханічного показника для закону, що забезпечує максимальну перевантажувальну здатність;  $I_s$  – Струм статора АД.

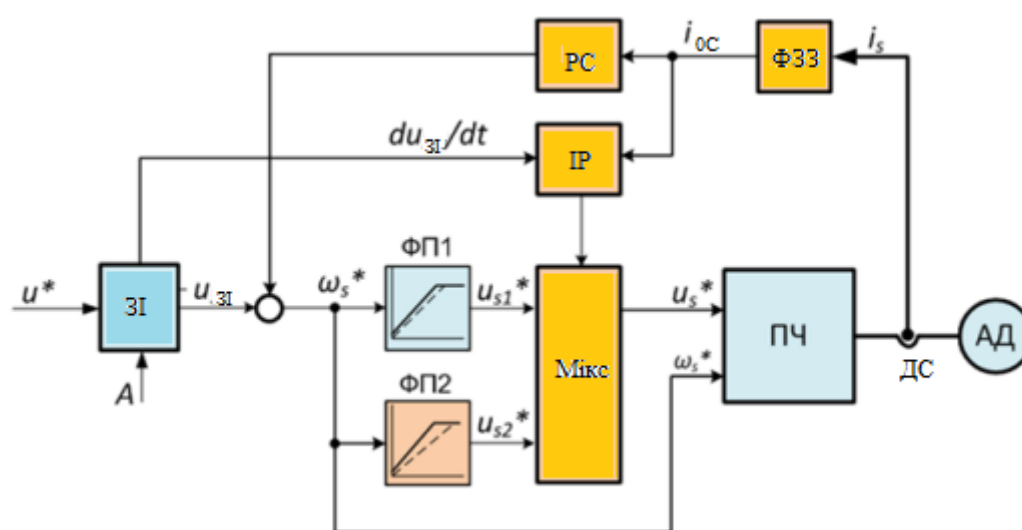
## 2.4 Синтез скалярної системи керування змінної структури

Типова концепція модернізації скалярної системи включає два варіанти закону регулювання частоти, один з яких орієнтований на оптимальне функціонування двигуна в робочій зоні в залежності від технічної задачі, що вирішується, а інший – на забезпечення максимальної перевантажувальної здатності приводу. Ці дві задачі є. Вибір закону регулювання частоти під час роботи приводу здійснюється за критерієм найбільшого значення електромеханічного показника якості  $J_{m-is}$ , який визначається за значенням струму на статорі асинхронного двигуна.

Ідентифікатори режимів передбачені для з'єднання відповідних блоків, що формують наведені вище закони керування, в скалярну систему, формуючи

єдиний керуючий силовий вплив, що подається з перетворювача на двигун. Структура скалярної системи зі змінною структурою показана на рисунку 2.13.

Функціональні перетворювачі ФП1 і ФП2 реалізують закон максимального моменту при заданому струмі, тому для підтримки струму на заданому рівні в перехідному режимі в структуру необхідно додати ланцюг обмеження струму. Ідентифікатор режиму (ІР) формує керуючий вплив на змішувальний пристрій (ЗП) і реалізує необхідні закони керування в залежності від режиму роботи приводу і статичного навантаження на валу двигуна.



Рисунк 2.13 – Структура модернізації скалярної системи керування

Формувач зворотного зв'язку (ФЗЗ) синтезує сигнал зворотного зв'язку, знак якого відображає знак активної потужності, що споживається, або генерується електроприводом, що необхідно для реалізації чотириквadrантного режиму роботи. Система струмообмеження, що реалізується регулятором струму (РС), та функціональний перетворювач ФП2, що реалізує закон частотного управління, що максимізує момент при фіксованому струмі, налаштовані на граничний струм перетворювача.

Виходячи з концепції побудови скалярної системи керування зі змінною структурою, за допомогою алгоритму розрахунку оптимального закону керування, наведеного в розділі 1, було розраховано закон керування для робочого режиму електроприводу (статичний закон керування) та закон

керування при досягненні граничних значень струму та напруги, що забезпечують максимальну перевантажувальну здатність перетворювача (граничний закон керування).

**Граничний закон керування.** Він синтезується на основі забезпечення максимально можливого електромагнітного моменту двигуна при обмежених ресурсах джерела живлення двигуна - максимально допустимих струмі та напрузі. Як відомо, теоретичне рішення цієї задачі дає три швидкісні зони [2,4], перша з яких (відносно низькошвидкісна) вимагає підтримки струму на максимально допустимому рівні з оптимальним значенням ковзання, що визначається з урахуванням насичення магнітопроводу для досягнення максимального моменту. У другій зоні (зона середньої швидкості) струм і напруга повинні підтримуватися на максимально допустимих рівнях. У третій зоні максимальний крутний момент досягається при максимально допустимій напрузі і оптимальному значенні ковзання, близькому до критичного.

**Статичний закон керування.** При формуванні оптимального закону керування двигуном в усталеному режимі можливі різні підходи і відповідні закони керування, в тому числі найпростіший пропорційно-частотний закон керування [2]. Якщо відома область, де статичне навантаження двигуна найімовірніше буде змінюватися, можна використовувати описану вище процедуру оптимізації для отримання закону керування двигуном в усталеному режимі при заданому навантаженні на валу.

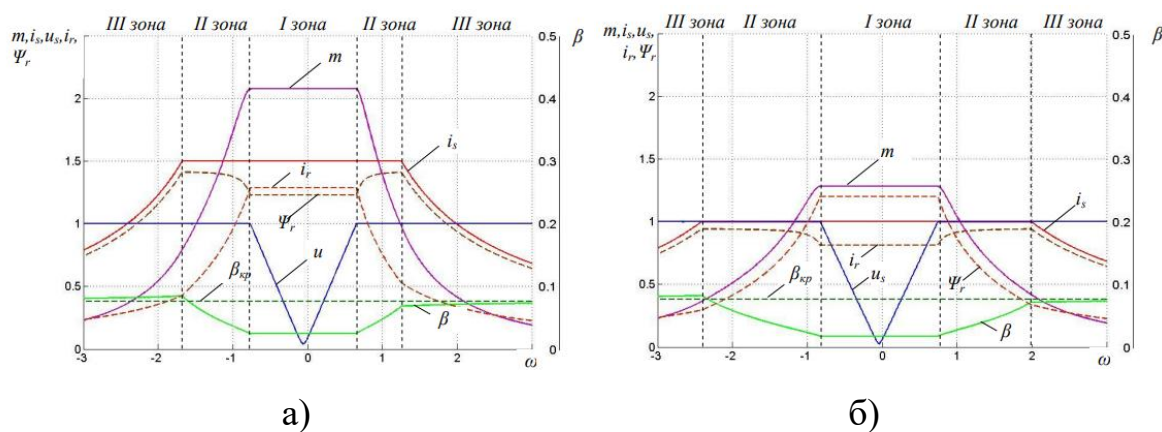


Рисунок 2.14 – Граничний (а) і статичний (б) закони керування

Звернемо увагу, що закони управління наведені у функції швидкості, тому при синтезі модернізованої скалярної СК сигнал завдання є заданою швидкістю двигуна. Керуючі впливи – амплітуда напруги статора  $u_s$  та його частота  $\omega_s$  – формуються за допомогою відповідних функціональних перетворювачів.

Розраховані закони частотного управління містять два керуючі впливи: амплітуду напруги статора  $u^*$  і величину абсолютного ковзання  $\beta^*$ . Тому при формуванні заданих оптимальних амплітуди і частоти напруги статора для кожного закону необхідні два функціональні перетворювачі. Відповідна структурна схема представлена на рис. 2.17.

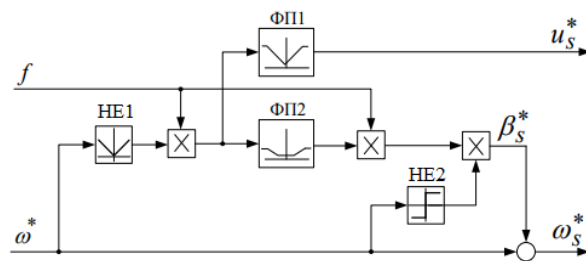


Рисунок 2.17 - Структурна схема перетворення сигналу завдання швидкості

Функціональні перетворювачі ФП1 і ФП2 формують, функції модуля швидкості, оптимальні значення амплітуди напруги і величини абсолютного ковзання. Ідентифікатор  $f = \pm 1$  визначає режим роботи електроприводу. Нелінійні елементи HE1 та HE2 забезпечують коректну роботу при негативних значеннях сигналу завдання.

Виходячи із запропонованої концепції побудови скалярної системи управління змінної структури, необхідно:

- доповнити систему скалярного управління перемикачем, який здійснює вибір закону управління;
- Сформувати сигнал керування перемикачем;
- Сформувати сигнал вибору режиму електроприводу.

Структурна схема керуючої частини модернізованої скалярної системи із двома законами частотного управління представлена на рис. 2.18.

Задатчик інтенсивності ЗІ формує сигнал заданої швидкості  $\omega^*$  і ідентифікатор визначальний режим роботи електроприводу в пуско-гальмівних режимах роботи і перемикання між частотними законами управління. Блок БО формує ідентифікатори  $f_1$  та  $f_2$ . При цьому 1 визначає генераторний або руховий режим роботи приводу. За допомогою  $f_2$  у блоці МІКС здійснюється вибір між статичним та граничним законами управління.

$$f = \begin{cases} +1, & \text{при } d\omega^*/dt > 0 \\ 0, & \text{при } d\omega^*/dt = 0 \\ -1, & \text{при } d\omega^*/dt < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

У функціональні перетворювачі ФП1, ФП2 та ФП3, ФП4 закладено граничний та статичний закон управління, відповідно. При формуванні логіки роботи даної системи було прийнято наступне припущення: при розгоні електроприводу під дією керуючого сигналу  $G$  режим роботи завжди вважається руховим ( $f = +1$ ), при гальмуванні - генераторним ( $f = -1$ ).

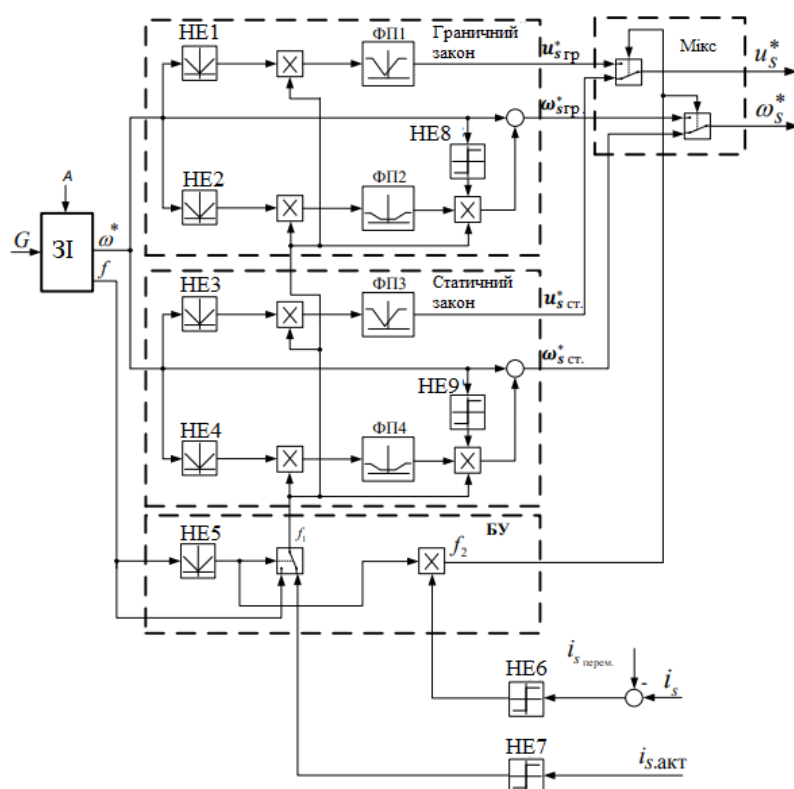


Рисунок 2.18 - Структурна схема керуючої частини скалярної СК змінної структури

У режимі роботи ( $f = 0$ ) вибір режиму (рухового або генераторного) здійснюється за допомогою НЕ7. Знак активного струму  $i_{s,акт}$ , що формується елементом НЕ7, визначає квадрант роботи електроприводу в режимах, що встановилися. Зазначимо, що знак активного струму дозволяє ідентифікувати руховий, або генераторний режим роботи двигуна, незалежно від напрямку його обертання (у руховому режимі  $i_{s,акт} > 0$ , а в генераторному навпаки) Нелінійний елемент НЕ6 формує сигнал, визначальний момент перемикання між законами управління функції різниці між значенням струму статора АД і струму перемикання  $i_{s,перем}$  між законами управління. Значення струму перемикання  $i_{s,перем}$  відповідає струму статора АД, при якому залежності електромеханічного показника для законів управління перетинаються. Для формування плавного переходу між законами частотного керування на виходах цієї системи слід встановити фільтри.

На рис. 2.19 представлено структурну схему скалярної системи управління змінної структури.

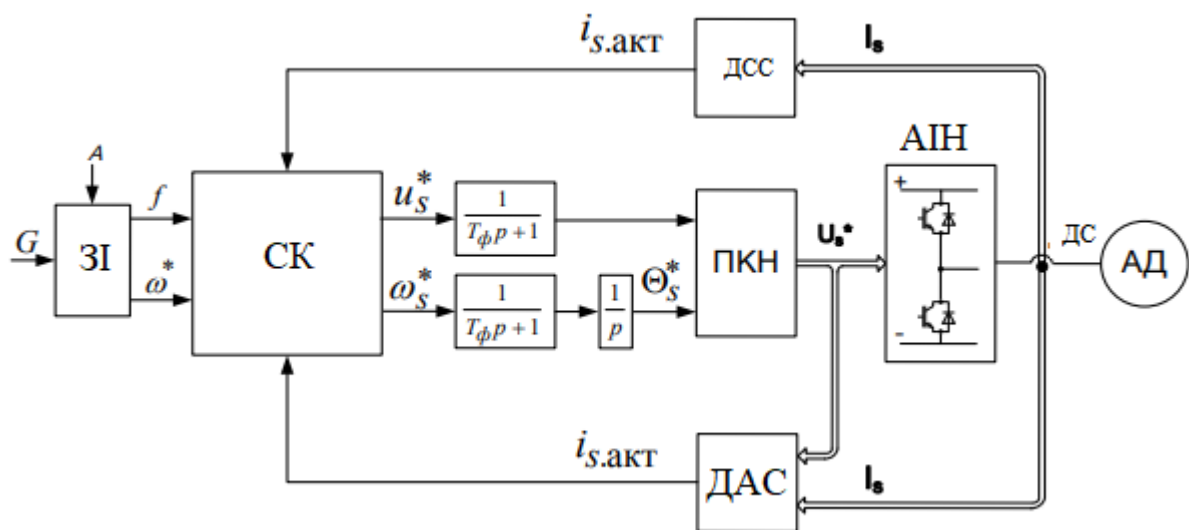


Рисунок 2.19 – Модель Структурна калярної системи керування змінною структури

Блок СК реалізує систему управління змінної структури, яка наведена на рис. 2.18. Сигнал модуля струму статора (ДСС) формується безпосередньо за

миттєвими значеннями фазних струмів.

$$i_s = \sqrt{\frac{2}{3}(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2)}. \quad (2.6)$$

Активна складова струму формується датчиком активної складової струму (ДАС) за миттєвим значенням фазних струмів з урахуванням миттєвих значень заданих фазних напруг:

$$i_{s \text{ акт}} = \frac{2}{3} \left( \frac{i_{sa} u_{sa}^* + i_{sb} u_{sb}^* + i_{sc} u_{sc}^*}{u_s^*} \right). \quad (2.7)$$

Для обмеження смуги пропускання та забезпечення плавного переходу між законами управління на виходах функціональних перетворювачів встановлені фільтри першого порядку з передатною функцією:

$$\Phi(p) = \frac{1}{T_\phi p + 1}, \quad (2.8)$$

де  $T_\phi$  - постійна часу фільтра.

Перетворювач координат заданої напруги (ПКН) забезпечує перетворення впливів, що задають по амплітуді і частоті до фазних змінних ( $u^*$ ), які задаються на входи широтно-імпульсних модуляторів силового ПЧ

$$\begin{aligned} u_{sa}^* &= u_s^* \cos \theta_{us}^*; & u_{sb}^* &= u_s^* \cos \left( \theta_{us}^* - 2\pi/3 \right); \\ u_{sc}^* &= u_s^* \cos \left( \theta_{us}^* + 2\pi/3 \right), & \theta_{us}^* &= \int \omega_s^* dt \end{aligned} \quad (2.9)$$

## Висновки до розділу 2

1. Введено показник електромеханічної якості  $J_{m-is}$ , що дозволяє наочно оцінити наслідки комплексної оптимізації режимів роботи АД

2. Сформульовано задачу комплексної оптимізації при виборі в якості критерію оптимізації електромеханічного показника якості  $J_{m-is}$  в робочій зоні електропривода та при виконанні обмеження максимізації електромеханічного показника якості.

3. Розроблено систему керування частотном асинхронним електроприводом зі скалярною змінною структурою для забезпечення максимального електромагнітного моменту при обмеженні струму перетворювача у всіх режимах роботи двигуна

4. Система керування даним електроприводом виконана у вигляді багатозонної системи автоматичного керування, де в першій зоні на двигун впливають шляхом зміни амплітуди та частоти напруги статора, пов'язаних між собою певними законами, а в другій зоні змінюється тільки частота, а амплітуда напруги - частота не змінюється відповідно до граничних можливостей перетворювача.

5. Система відрізняється в своїй конструкції використанням двох законів регулювання частоти, один з яких призначений для забезпечення оптимального функціонування системи під час роботи максимально допустимого навантаження і системи обмеження струму, а інший - для оптимального функціонування в усталеному режимі роботи

6. В якості керуючого сигналу використовується сигнал заданої швидкості електроприводу. При цьому структура, що реалізує частотний закон керування, містить два функціональних перетворювача, один з яких формує завдання амплітуди напруги живлення, а інший - частоти. Закон частотного керування розраховується як для режиму двигуна, так і для режиму генератора з урахуванням положень розділу 1.

7. перемикання між двигунним і генераторним режимами роботи системи керування здійснюється відповідно до поточного стану електропривода, що ідентифікується за модулем струму статора та сигналом активної складової струму статора; перемикання між двома законами частотного керування здійснюється за критерієм максимуму електромеханічного показника, модуля струму статора виконується як функція АД.

8. Система передбачає розробку концепції застосування двох законів регулювання частоти. Використання спеціальних алгоритмів реалізації функціональних перетворювачів дозволяє оптимізувати роботу системи при максимально можливих значеннях навантаження.

# 3 ІМІТАЦІНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ СКАЛЯРНОГО КЕРУВАННЯ ЗМІННОЇ СТРУКТУРИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

## 3.1 Система стурмообмеження електроприводу

Через обмежений запас потужності, що міститься в АЕП силового перетворювача, система керування АЕП зазвичай доповнюється локальними системами автоматичного регулювання, які обмежують керовані величини до заданих рівнів [9].

Оскільки локальні системи регулювання передбачені для основних регульованих величин підпорядкованих систем керування, ці величини обмежуються шляхом накладання обмежень на задавальні сигнали цих локальних систем автоматичного регулювання.

У системах регулювання швидкості обмеження на змінні величини (в основному електромагнітний момент і струм статора) досягається шляхом введення обмежень на вихідний сигнал регулятора швидкості генератора в разі векторного регулювання моменту і на частоту і амплітуду фіксованої напруги живлення дитини в разі скалярного регулювання. Для цього використовуються два основні методи

- Введенням в канал швидкості (завдання на частоту) інерційного елемента задатчика інтенсивності, що обмежує темп зміни задаючого впливу;
- Прямим обмеженням вихідного сигналу регулятора швидкості (завдання на частоту).

Перший спосіб може обмежити струм і момент статора тільки під час виконання операції керування, але не захищає привід від перевантаження в разі значного збільшення навантаження або при зупинці механізму.

Другий спосіб обмежує струм і момент як під час розгортання керуючих впливів, так і при значній зміні навантаження на валу двигуна.

Тому на практиці використовуються обидва ці способи, перший з яких забезпечує нормалізовану реакцію системи в нормальному режимі роботи електроприводу, а другий - при значному навантаженні або зупинці механізму.



Як видно, основним елементом контуру обмеження змінних є Блок Управління (БО) містить елемент пам'яті, в даному випадку це тригер, і два нелінійних елементи НЕ1 і НЕ2. БО забезпечує замикання контуру обмеження змінних при перевищенні регульованої змінної допустимої величини та розмикання контуру обмеження змінних у функції інтегральної складової ПІ регулятора.

### 3.1.1 Система струмообмеження електроприводу зі скалярною системою керування

На рис. 3.3 представлена структурна схема системи струмообмеження зі скалярною системою управління.

Формувач сигналу зворотного зв'язку (ФЗЗ) містить датчик модуля струму статора (ДСС), датчик активного струму (ДАС), нелінійні елементи (НЕ1, НЕ2) і блок множення, на виході якого синтезується сигнал зворотного зв'язку  $i_{от}$ , абсолютне значення якого дорівнює модулю вектора струму статора, а знак характеризує руховий чи гальмівний режим роботи двигуна.

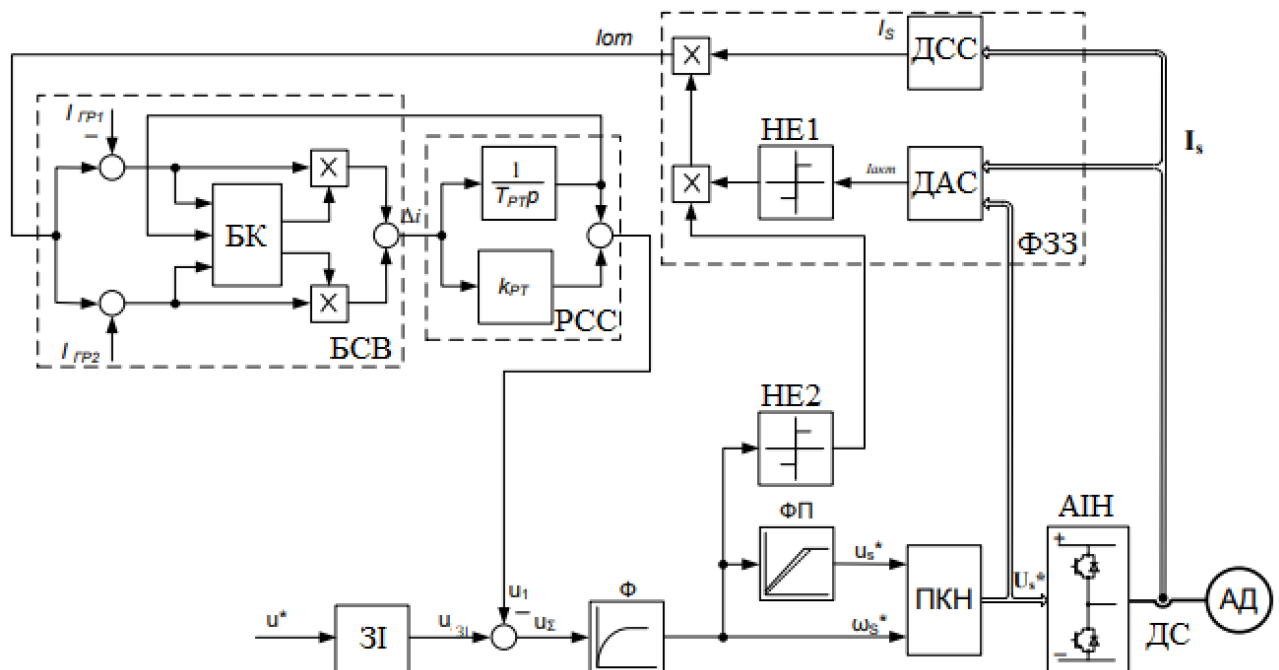


Рисунок 3.3 - Структурна схема системи струмообмеження

Сигнал модуля струму статора формується безпосередньо за миттєвими

значеннями фазних струмів:

$$i_s = \sqrt{\frac{2}{3}(i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2)}. \quad (3.1)$$

Активна складова формується за миттєвими значеннями фазних струмів з урахуванням миттєвих значень заданих фазних напруг:

$$i_{s \text{ акт}} = \frac{2}{3} \left( \frac{i_{sa}u_{sa}^* + i_{sb}u_{sb}^* + i_{sc}u_{sc}^*}{u_s^*} \right). \quad (3.2)$$

Зазначимо, що знак активного струму дозволяє ідентифікувати руховий, або генераторний режим роботи двигуна, незалежно від напрямку його обертання (у рушійному режимі  $I_{\text{акт}} < 0$ , а в генераторному  $I_{\text{акт}} > 0$ ). Це дозволяє синтезувати для вузла відсічення сигнал  $i_{OT}$ , абсолютне значення якого дорівнює модулю вектора статора, а знак характеризує руховий або гальмівний режим роботи двигуна:

$$i_{OT} = i_s \text{sign}(i_{s \text{ акт}}). \quad (3.3)$$

Нелінійне перетворення сигналу  $i_{OT}$  елементом НЕ2 дозволяє сформувати сигнал зворотного зв'язку по струму  $u_1$ , який забезпечує коректну роботу БСВ як у руховому, так і в генераторному режимі роботи.

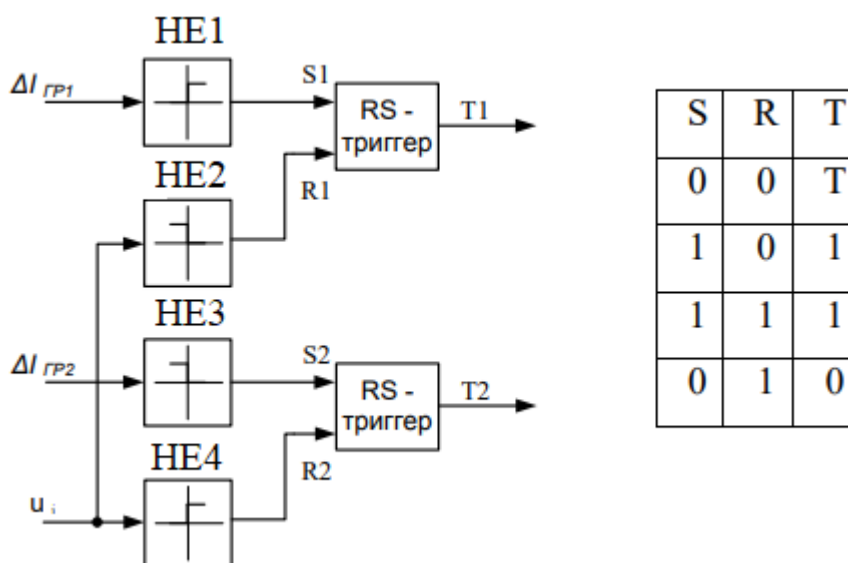


Рисунок 3.4 – Структурна схема БК

Блок струмової відсічки (БСВ), див. рис. 3.4 містить чотири нелінійних елементи (блок БК). Елементи НЕ1, НЕ3 мають нелінійну характеристику і формують сигнал, що характеризує перевищення сигналу зворотного зв'язку  $i_{OT}$  над граничними значеннями  $i_{гр1}$  (для рухового режиму),  $i_{гр2}$  (для генераторного режиму), що визначає бажану величину модуля струму статора двигуна в режимі струмообмеження.

Крім того в БСВ передбачений елемент пам'яті, що забезпечує замикання контуру струмового відсікання при перевищенні сигналу зворотного зв'язку по струму, щодо уставок відсічення

Блок управління замикає контур ТО при  $i_s > i_{гр}$  і розмикає його, коли інтегральна складова ПІ регулятора струму  $u_u$  і дорівнює 0.

### 3.1.2 Синтез ПІ регулятора системи струмообмеження електроприводу зі скалярною системою керування

Розглянемо процедуру синтезу ПІ регулятора струму та особливості його застосування у системі струмообмеження. Основою синтезу є аналіз об'єкта, що включає асинхронний двигун і автономний інвертор напруги. Структурна схема математичної моделі об'єкта у відносних одиницях представлена малюнку 3.5.

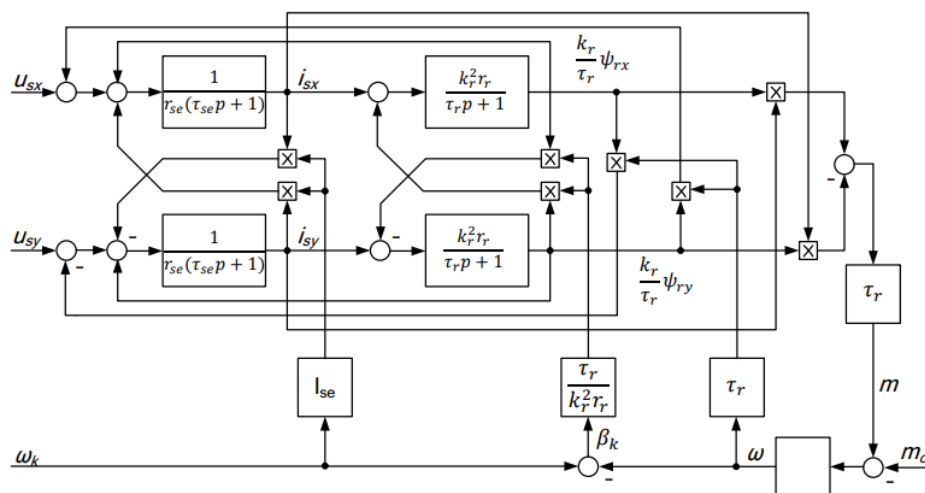


Рисунок 4.5 – Імітаційна модель АД-АІН

Тут об'єкт управління описаний в системі координат, що обертається, з довільною величиною швидкості  $\omega_k$  і характеризується як складний



- ланка струму АТ. Дана ланка представлена в системі координат, що обертається, орієнтованої по вектору напруги статора.

Відповідна функціональна схема модернізованої скалярної системи управління, доповненої струмовим відсіканням, представлена малюнку 3.7.

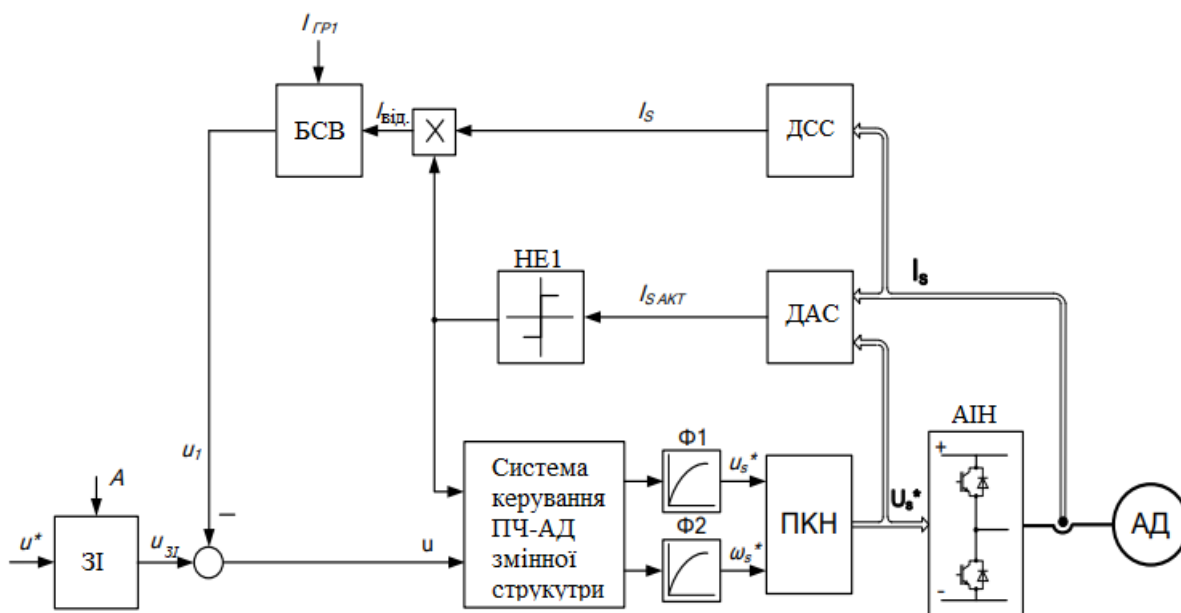


Рисунок 3.7 - Функціональна схема скалярної системи керування із системою струмообмеження

На схемі позначено: ЗІ – задатчик інтенсивності, який являє собою нелінійний пристрій, що обмежує темп (А) зміни в часі задаючого значення напруги  $u^*$ ; НЕ – нелінійний елемент; АІН – автономний інвертор напруги (мостовий); АД – асинхронний двигун; ДСС – датчик струму статора; ДАС – датчик активного струму;  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$  – функціональний перетворювач; БСВ – блок струмової відсічки; ПКН – перетворювач координат напруги.

## 3.2 Результати математичного моделювання системи скалярного управління змінної структури асинхронного електроприводу

### 3.2.1 Механічні характеристики під час використання законів оптимального управління

Розраховано сімейство механічних характеристик двигуна для граничного

та статичного законів частотного керування. Граничний закон розрахований для струмового навантаження  $i_s = 1,44$ , статичний – для номінального струму двигуна. Закони управління представлені на рис. 3.8 - 3.9, де показаний пунктиром закон пропорційного частотного керування та величина критичного ковзання, а також значення швидкостей, що відповідають робочим швидкостям електроприводу. Розраховані механічні показники представлені на рис. 3.10.

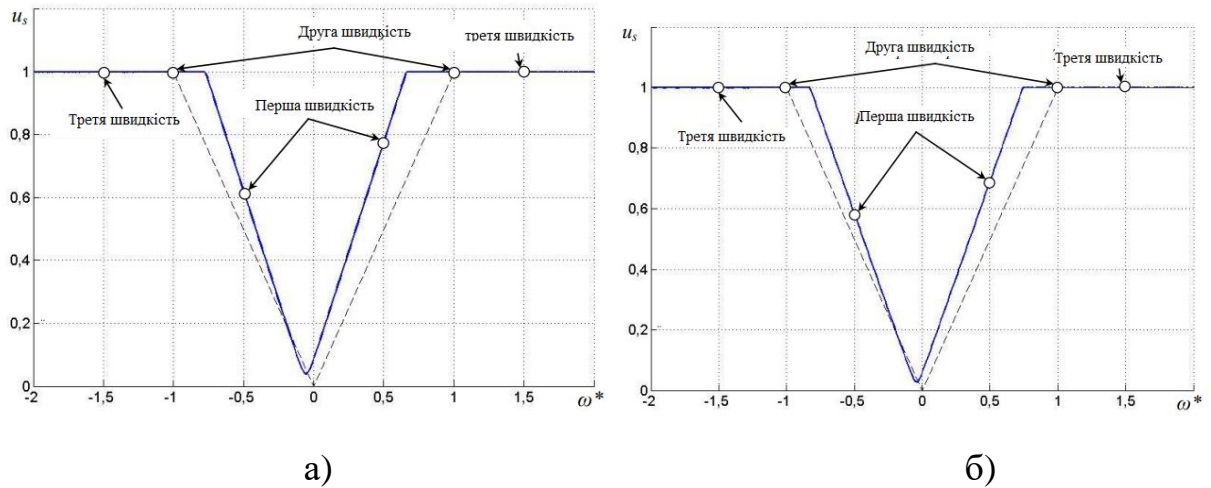


Рисунок 3.8 – Залежність напруги від заданої швидкості для граничного (а) і статичного закону частотноо керування

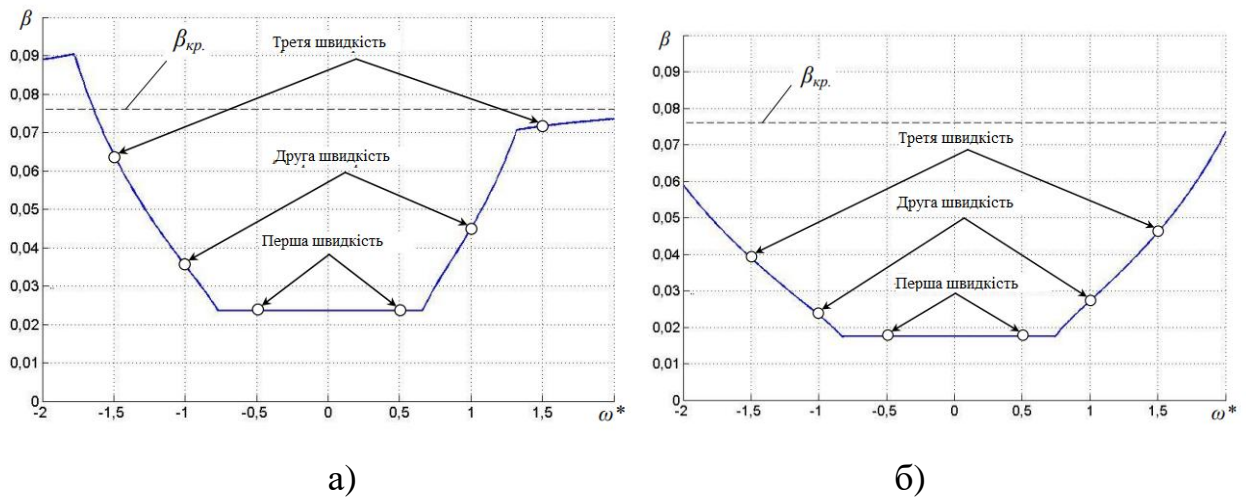


Рисунок 3.9 – Залежність ковзання від заданої швидкості для граничного (а) і статичного закону частотноо керування

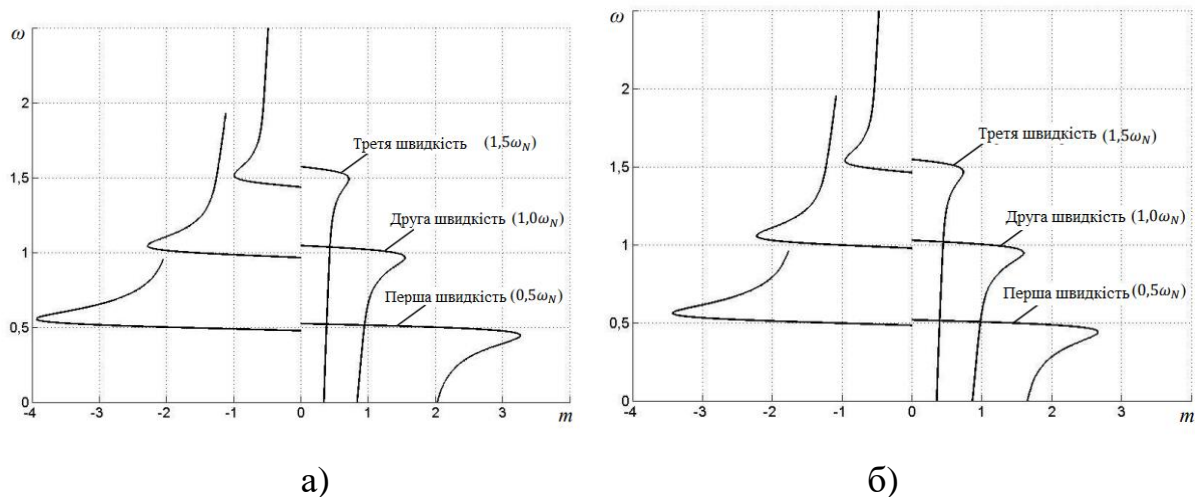


Рисунок 3.10 – Сімейство механічних характеристик для граничного (а) і статичного закону частотноо керування

Слід звернути увагу, що як сигнал, що задає, використовується швидкість електроприводу, тому на механічних характеристиках присутній розрив.

### 3.2.2 Порівняння зі скалярною системою у тестових режимах

Для оцінки ефективності синтезованої системи методом чисельного моделювання виконано порівняння показників, що забезпечуються нею, з показниками типової скалярної системи. Нижче наведено порівняння пуско-гальмівних режимів роботи електроприводу зі скалярною системою з пропорційним законом управління з добавкою та електроприводу з модернізованою скалярною системою управління.

Як типова скалярна система управління обрана система, представлена на рис. 2.5 із законом управління, наведеним на рис. 2.9а. Рівень початкової добавки напруги обраний лише на рівні 5% від номінального. Ця величина добавки обрана з міркувань забезпечення допустимого рівня нагрівання машини при тривалій роботі на знижених швидкостях.

Для модернізованої скалярної системи статичний закон розрахований для номінального струму двигуна, граничний на рівні струму перетворювача  $I_{\text{доп}} = 1,44$ , що відповідає його перевантажувальній здатності протягом 60 с. При цьому максимальний струм перетворювача дорівнює  $i_{\text{max}} = 2,3$ .

Як видно із рис. 4.11а та 4.11б, здатність навантаження типовий скалярної

системи значно нижча порівняно з модернізованою при заданому максимальному струмі. Тому при моделюванні момент навантаження на валу підбирається так, щоб забезпечити заданий допустимий струм. Для коректності порівняння моделювання даних систем проводиться без системи струмообмеження.

Аналіз рис. 4.11а і 4.11б показує, що під час пуску при тому самому значенні струму статора дані системи розвивають різний момент. При цьому момент у модернізованій скалярній системі приблизно на 25% перевищує момент у типовій системі.

На рис. 4.12а та 4.12б представлені процеси гальмування в модернізованій та типовій скалярних системах. Якісно, процеси гальмування у двох системах досить схожі. Підвищена коливальність модернізованої системи пояснюється переходом зі статичного закону на граничний при вході в гальмування.

На рис. 4.13а та 4.11б показаний начерк навантаження у модернізованій та типовій системах відповідно. Як видно, при накиданні навантаження в модернізованій системі момент, що розвивається, для даного двигуна, приблизно на 25% перевищує момент у типовій скалярній системі.

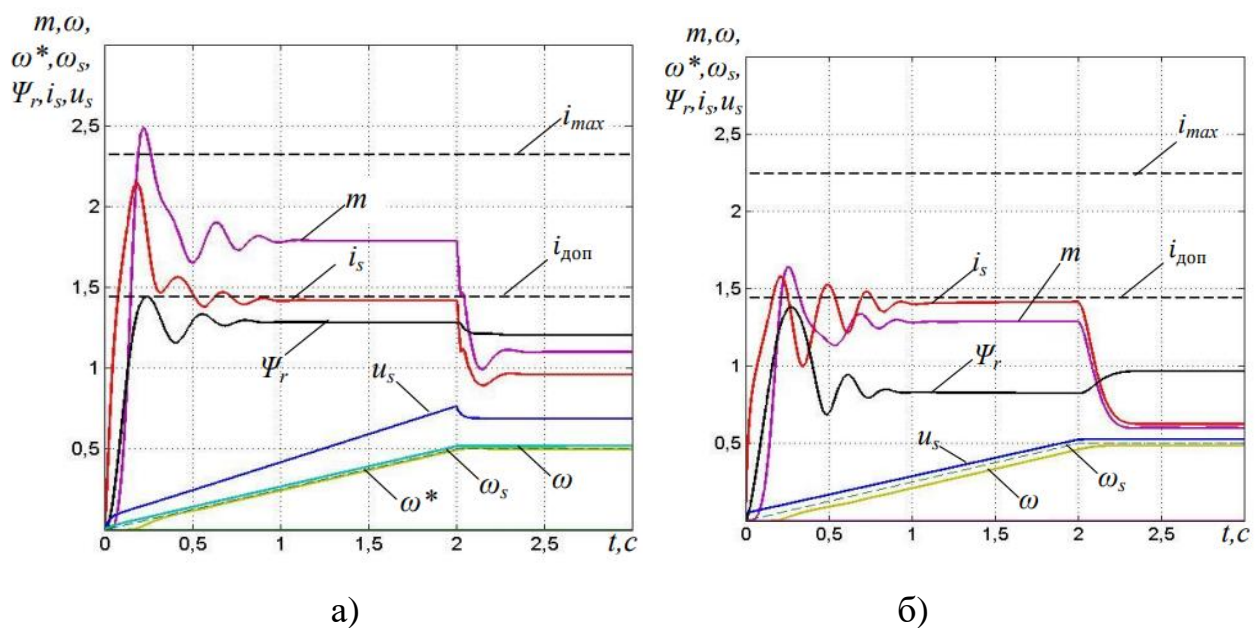
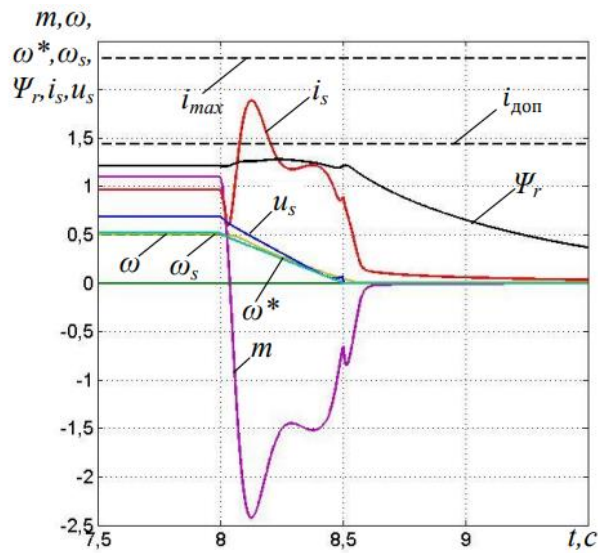
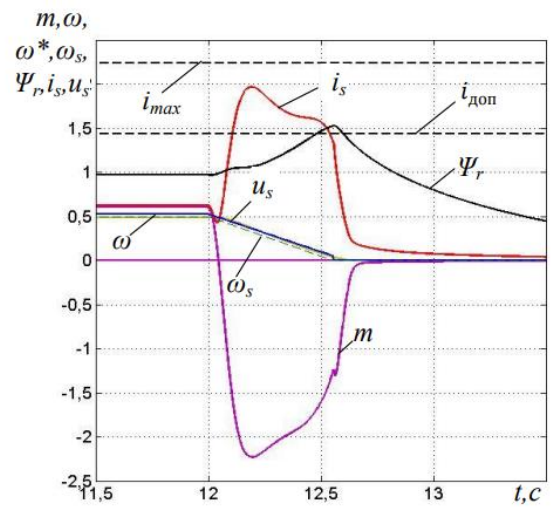


Рисунок 4.11 – Моделювання процесів пуску в модернізованій (а) та типовій (б) скалярній системі в першій зоні швидкостей

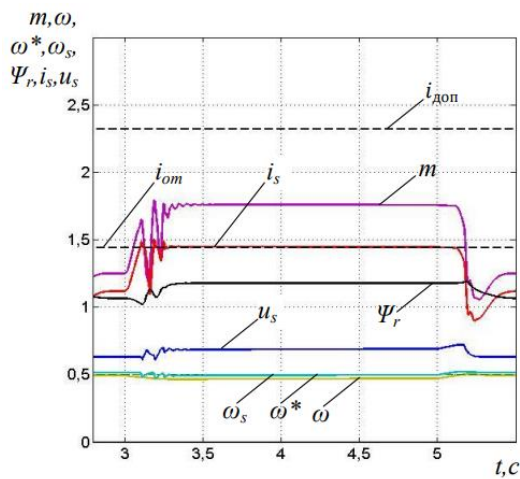


а)

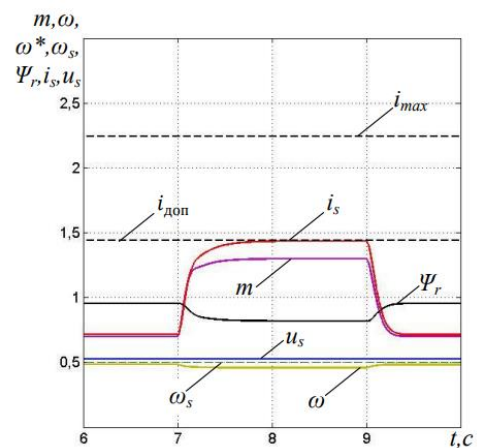


б)

Рисунок 4.12 – Моделювання процесів гальмування в модернізованій (а) та типовій (б) скалярній системі в першій зоні швидкостей



а)



б)

Рисунок 4.13 – Моделювання процесів при наборі навантаження в модернізованій (а) та типовій (б) скалярній системі в першій зоні швидкостей

### 3.2.3 Тестування з різними видами навантаження

Нижче наведено результати математичного моделювання пуско-гальмівних режимів роботи електроприводу та процесів накидання навантаження з активним та реактивним моментами.

#### Робота з реактивним моментом навантаження

На рис. 3.14 показано запуск електроприводу до першої робочої швидкості. Система струмообмеження набуває чинності. На момент часу 3,2 с. розгін завершується та відбувається перехід на статичний закон регулювання.

На рис. 3.15 показано гальмування електроприводу з першої робочої швидкості. Система струмообмеження не набирає чинності. На момент часу 15 с. починається гальмування та відбувається перехід зі статичного закону регулювання на граничний, у генераторному режимі.

На рис. 3.16 показаний начерк навантаження під час роботи електроприводу першої робочої швидкості. Система струмообмеження набуває чинності. На момент часу 9 с. відбувається перехід із статичного закону регулювання на граничний.

На рис. 3.17 показано запуск електроприводу до другої робочої швидкості. Система струмообмеження набуває чинності. На момент часу 2 с. відбувається перехід у другу зону швидкостей. На момент часу 3,2 с. контур струмообмеження розмикається, унаслідок чого відбувається перехід на статичний закон регулювання.

На рис. 3.18 показано гальмування електроприводу з другої робочої швидкості. Система струмообмеження не набирає чинності. На момент часу 15 с. починається гальмування та відбувається перехід зі статичного закону регулювання на граничний, у генераторному режимі.

На рис. 3.19 показаний начерк навантаження під час роботи електроприводу на другій робочій швидкості. Система струмообмеження набуває чинності. На момент часу 9 с. відбувається перехід із статичного закону регулювання на граничний. На момент часу 11 с. навантаження скидається, контур струмообмеження розмикається, система перетворюється на статичний закон.

На рис. 3.20 показано запуск електроприводу до третьої робочої швидкості. Система струмообмеження набуває чинності. На момент часу 1,6 с. відбувається перехід у другу зону швидкостей. На момент часу 2,5 с. відбувається перехід у третю зону швидкостей. На момент часу 5,8 с. контур струмообмеження

розмикається, унаслідок чого відбувається перехід на статичний закон регулювання.

На рис. 3.21 показано гальмування електроприводу з третьої робочої швидкості. Система струмообмеження не набирає чинності. На момент часу 15 с. починається гальмування та відбувається перехід зі статичного закону регулювання на граничний, у генераторному режимі.

На рис. 3.22 показаний начерк навантаження під час роботи електроприводу на другій робочій швидкості. Система струмообмеження набуває чинності. На момент часу 9 с. відбувається перехід із статичного закону регулювання на граничний. На момент часу 11 с. навантаження скидається, контур струмообмеження розмикається, на момент часу 14,3 с. система перетворюється на статичний закон. Зауважимо, що третя робоча швидкість призначена для переміщення механізму на горизонтальній поверхні без вантажу.

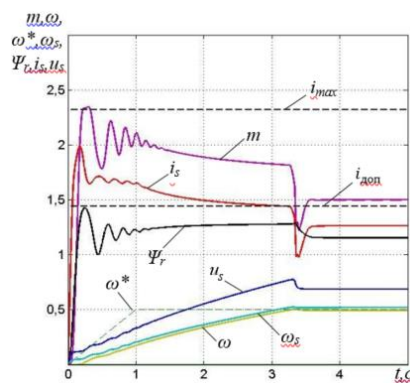


Рисунок 3.14 - Моделювання процесів пуску в модернізованій скалярній системі у першій зоні швидкостей:  $m_c = 1,25$ ;  $J_Z = J_{гр.}$ ;  $A = 0,5$

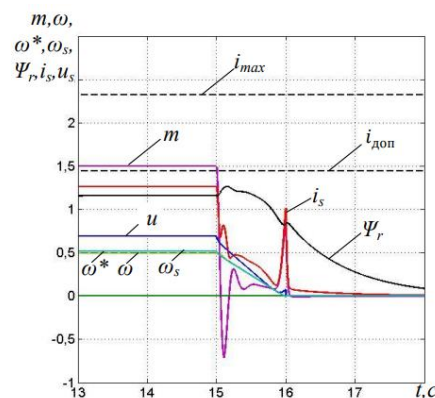


Рисунок 3.15 - Моделювання процесів гальмування в модернізованій скалярній системі у першій зоні швидкостей:  $m_c = 1,25$ ;  $J_Z = J_{гр.}$ ;  $A = 0,5$

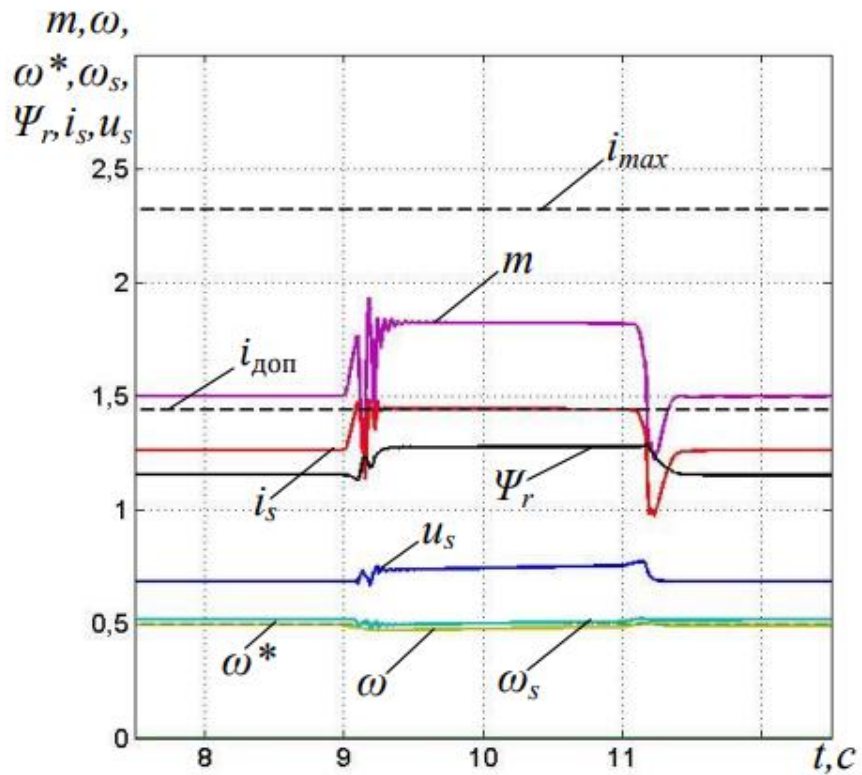


Рисунок 3.16 - Моделювання процесів при наборі реактивного навантаження в модернізованій скалярній системі у першій зоні швидкостей:  $m_c = 1,25$ ;  $m_{набр} = 0,5$ ;  $J_Z = J_{гр.}$ ;  $A = 0,5$

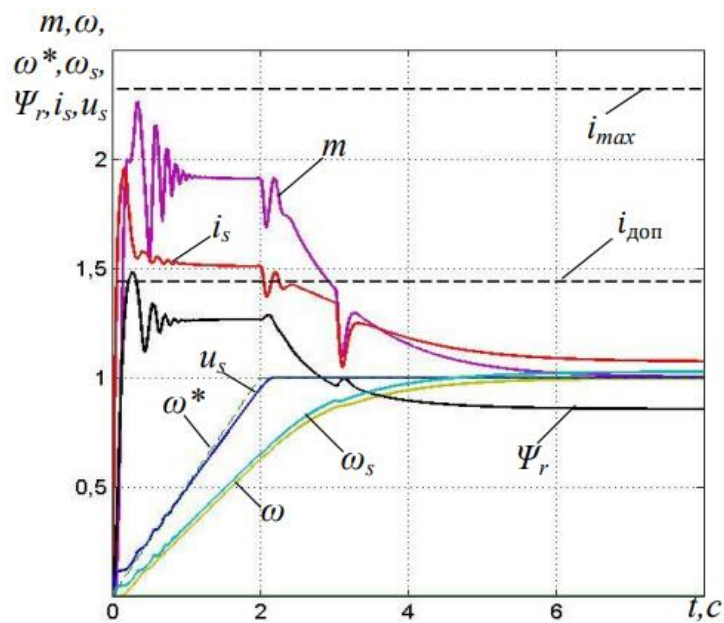


Рисунок 3.17 - Моделювання процесів пуску в модернізованій скалярній системі у другій зоні швидкостей:  $m_c = 1,25$ ;  $J_Z = J_{гр.}$ ;  $A = 0,5$

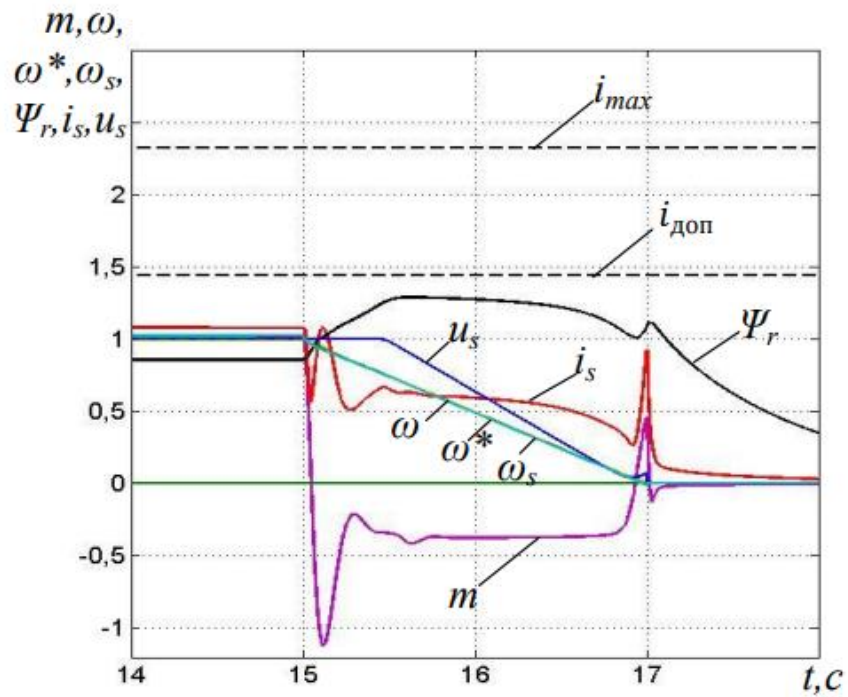


Рисунок 3.18 - Моделювання процесів гальмування в модернізованій скалярній системі у другій зоні швидкостей:  $m_c = 1,25$ ;  $J_Z = J_{гр.}$ ;  $A = 0,5$

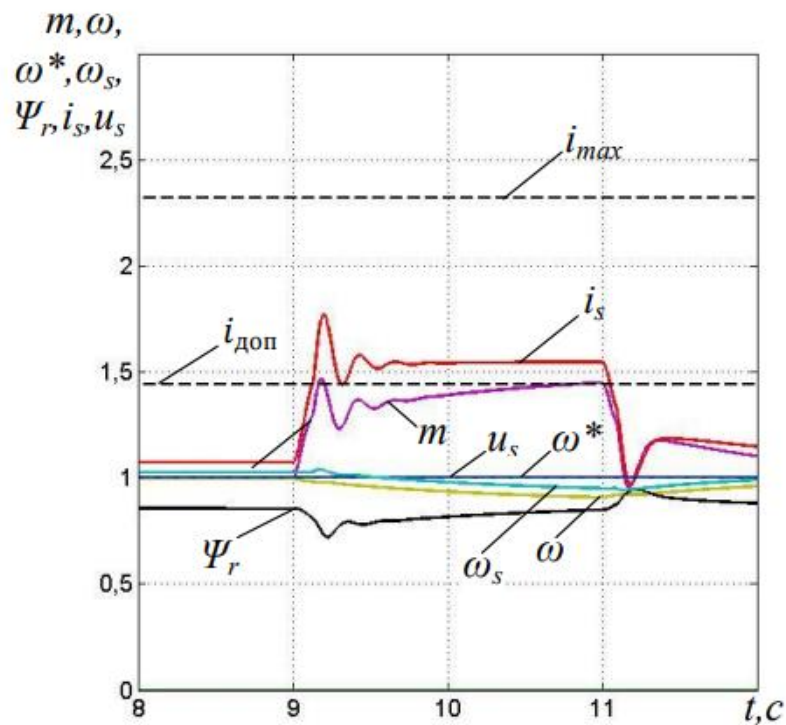


Рисунок 3.19 - Моделювання процесів при наборі реактивного навантаження в модернізованій скалярній системі у першій зоні швидкостей:  $m_c = 1,25$ ;  $m_{набр} = 0,5$ ;  $J_Z = J_{гр.}$ ;  $A = 0,5$

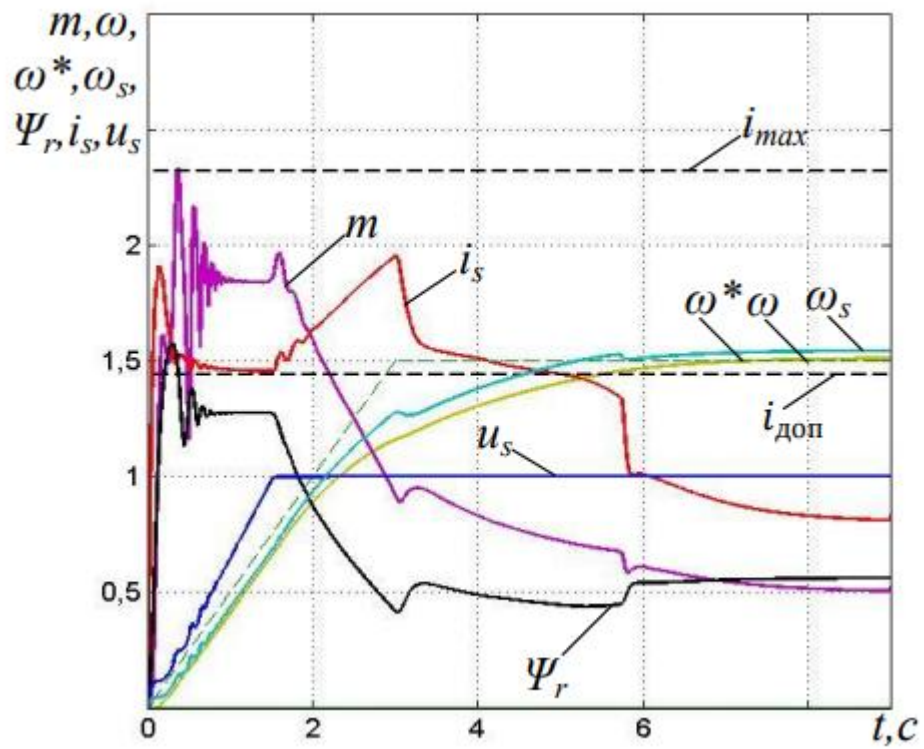


Рисунок 3.20 - Моделювання процесів пуску в модернізованій скалярній системі у третій зоні швидкостей:  $m_c = 1,25$ ;  $J_Z = J_{гр.}$ ;  $A = 0,5$

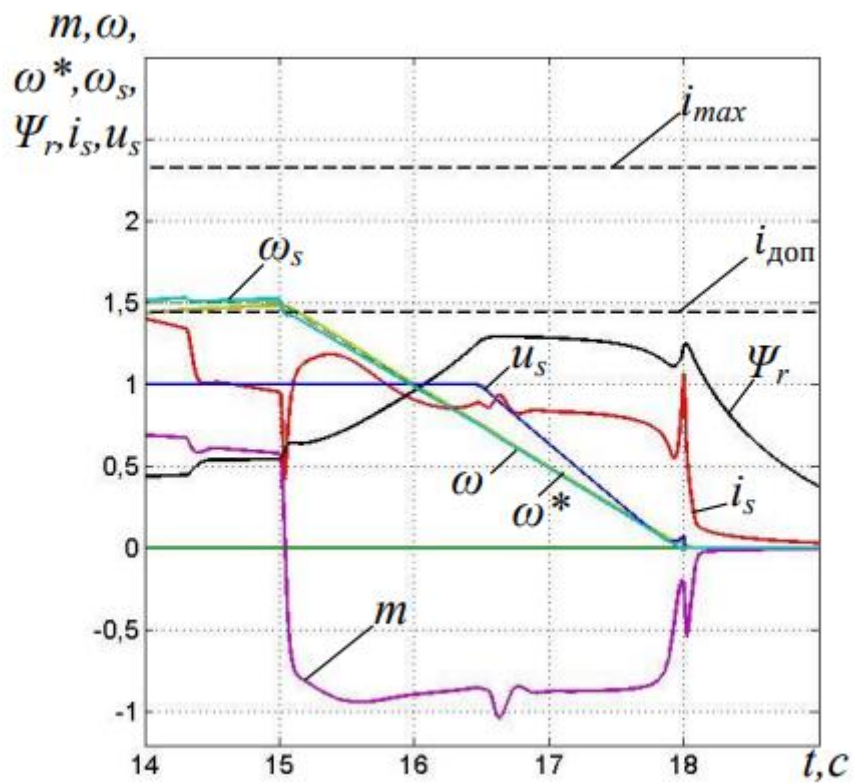


Рисунок 3.18 - Моделювання процесів гальмування в модернізованій скалярній системі у третій зоні швидкостей:  $m_c = 1,25$ ;  $J_Z = J_{гр.}$ ;  $A = 0,5$

### **Висновки до розділу 3**

1. Розроблено систему обмеження струму статора АД. Її особливістю є нелінійна поведінка ПІ-регулятора струму відключення.

2. Запропоновано варіант реалізації скалярно-змінної структури СК системою струмообмеження.

3. Проведено чисельне моделювання роботи модернізованої колірної системи в граничному режимі. Результати моделювання порівнюються з процесом звичайної скалярної системи з пропорційним законом керування частотою з додаванням. Показано, що при однаковому струмі статора модернізована система забезпечує в 1,25 рази більший крутний момент у першій робочій зоні, ніж звичайна скалярна система в електроприводі.

4. Проведено чисельне моделювання роботи системи з граничними реактивними та ефективними моментами. Підтверджено ефективність системи для всіх заданих типів навантажень і всіх зон регулювання, причому в першій швидкісній зоні зберігається висока перевантажувальна здатність.

## 4 СТАРТАП-ПРОЄКТУ ТЕХНОЛОГІЇ СИТСЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИВОДУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Стартап (походить від англійського слова "startup" (запускати)) - представляє собою новий проект, що розвивається в умовах невизначеності. Його мета полягає у виявленні оптимальних бізнес-ідей, здобутті фінансування та реалізації інноваційних товарів чи послуг, а також розробці технологій для їх виробництва.

Перспективи стартапів у сфері електротранспорту обіцяють багатоцільовий розвиток та внесення значного вкладу в трансформацію транспортної індустрії. Зростання попиту на сталість та екологічність транспортних рішень відкриває широкі можливості для інновацій та новаторських підходів у цій галузі.

Стартапи можуть зосереджуватися на різних аспектах електротранспорту, таких як розробка нових типів акумуляторів з високою ємністю, вдосконалення систем зарядки, розробка ефективних та стійких до зносу електромоторів, а також інтеграція інтелектуальних систем управління для підвищення безпеки та автоматизації транспортних засобів.

З урахуванням росту свідомості щодо екологічних питань та підтримки соціальних ініціатив, стартапи в електротранспорті можуть відзначитися високою популярністю серед споживачів та інвесторів. Запровадження новітніх технологій у цій галузі також сприятиме зменшенню залежності від традиційних видів пального та зниженню викидів CO<sub>2</sub>, сприяючи сталій мобільності в майбутньому.

Реалізація стартап-проекту у сфері тягового електротранспорту включає кілька ключових етапів:

1. Аналіз ринку і концепція: Вивчення та аналіз попиту на тяговий електротранспорт, визначення конкурентів і потреб споживачів. Визначення основних ідей та інновацій, які ви збираєтеся впроваджувати у свій проект.

2. Розробка бізнес-плану: Розрахунок витрат, прогноз доходів, визначення потрібного фінансування. Розробка плану маркетингу, включаючи підходи до просування та залучення клієнтів. Аналіз можливих ризиків та розробка стратегій їх управління.
3. Прототипування і тестування: Створення та тестування прототипів електротранспортних засобів. Проведення випробувань та отримання фідбеку від споживачів.
4. Технічна реалізація: Проектування та розробка технічних компонентів, включаючи електродвигуни, акумулятори та системи управління. Запуск виробництва та виробничих процесів.
5. Впровадження на ринок: Збільшення обсягів виробництва для введення продукції на ринок. Запуск кампаній з маркетингу та продажу для привертання клієнтів.
6. Підтримка та розвиток: Створення системи технічної підтримки та обслуговування. Постійне вдосконалення продукції та введення нових технологій.

#### **4.1 Обґрунтування актуальності та новизни інноваційної ідеї стартап-проекту**

**Новизна інноваційної ідеї:** синтез адаптивної системи керування частотнорегульованого тягового асинхронного приводу електротранспорту з інтелектуальним блоком вибору оптимального режиму роботи двигуна, що забезпечує максимальну енергоефективність роботи та забезпечує достатнє значення тяги. Також використання даної системи дозволяє збільшити ресурс акумуляторних батарей транспорту, якщо такі застосовуються і експлуатаційний ресурс асинхронних двигунів.

**Актуальність** систем керування частотно-регульованими асинхронними приводами у електротранспорті зумовлена зростанням інтересу до розвитку стійкої та ефективної технології для транспортних засобів. Проте, існують певні проблематики, які потребують уваги та розв'язання. Зокрема, важливо

вдосконалити ефективність енергоспоживання, забезпечити оптимальну роботу систем в умовах різного навантаження та швидкості, а також розвинути алгоритми динамічного керування для стабільної роботи приводів у різних умовах експлуатації. Надійність систем може бути покращена завдяки розробці систем виявлення та автоматичного усунення несправностей. Додатково, важливо розглянути можливість використання асинхронних приводів в екстремальних температурних умовах та оптимізувати системи заряджання для забезпечення практичного використання електротранспорту. Зниження витрат та підвищення доступності систем керування також визначаються як важливі аспекти для успішного розвитку цієї технології. Сумісність з інфраструктурою, такою як зарядні станції та мережі енергопостачання, також є ключовим фактором для забезпечення зручності та надійності у використанні електротранспорту.

**Проблематика:** Промисловий електротранспорт включає в себе різноманітні технічні вирішення, включаючи системи керування тяговим електроприводом. Проте, існують проблеми та недоліки, які можуть впливати на ефективність та надійність цих систем. Великі навантаження, з якими зазвичай стикається промисловий електротранспорт, можуть підвищувати ризик виникнення несправностей та поломок. Робочі умови в промислових об'єктах, такі як вплив пилу, вологи та екстремальні температури, можуть збільшувати витрати на обслуговування та скорочувати тривалість служби систем. Низька енергоефективність великих тягових машин та неоптимальна робота систем керування під різними умовами навантаження також можуть ускладнювати ефективне використання енергії. Складність інтеграції електроприводу з іншими системами та високий рівень вимог до безпеки великих та швидких машин також є технічними труднощами. Для успішного впровадження промислового електротранспорту важлива масштабованість та готовність систем керування до варіабельності вимог виробництва та сумісність з різними типами обладнання.

**Сфера застосування технології:** громадські і вантажні перевезення залізничних колій, кар'єри та шахти в гірничовидобувній галузі, важка та

металургійна промисловість. Технологію доцільно застосувати де є мережа змінного струму і важкі технологічні умови роботи приводу. Оскільки в системі метрополітену та швидкісних трамваїв м. Києва застосовується мережа живлення

Результати обґрунтування актуальності та новизни ідеї стартап-проекту зведені у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Прикладне застосування інноваційної ідеї

Ідея	Напрямок застосування	Переваги для споживача
Застосування адаптивної системи керування частотнорегульованого тягового асинхронного двигуна	Залізничний транспорт та перевезення вантажів електровозами	Зменшення кількості спожитої електроенергії, плавність пуску і гальмування
	Кар'єри та шахти	Надійне транспортування вантажу при різних умовах експлуатації, забезпеченість максимальним пусковим моментом. Збільшення експлуатаційного терміну обладнання, та ресурсу акумуляторних батарей
	Важка промисловість, металургія	Гнучка можливість керування швидкістю транспорту при максимізації енергоефективності

## 4.2 Аналіз конкурентного середовища та SWOT – аналіз

Системи керування електромеханічним комплексами розробляє ряд світових провідних компаній, проте сфера доволі спеціалізована і кожне рішення унікальне. Основними конкурентами на міжнародній платформі є Siemens Mobility, АВВ постачає рішення для електромобільності та автоматизації, компанія Alstom спеціалізується на розробці інтегрованих систем транспорту, Bombardier також є гравцем у виробництві транспортних систем, Schneider Electric: Компанія спеціалізується на розробці автоматизованих систем управління енергозабезпеченням. Проте в основі проекту лежить програмне рішення, яке може бути адаптоване під обладнання від різних виробників, в тому числі й вітчизняних. Тому слід розглядати виробників конкурентної продукції як потенційних партнерів для просування спільних інтересів в сфері

енергозбереження засобами приводу в електротранспорті.

Слід врахувати також і середовище споживача і існуючі технологічні рішення: значна частина обладнання є застарілими і використовує реостатне регулювання для двигунів постійного чи змінного струмів, проте таке рішення призводить до великих теплових втрат при пуску та гальмуванні. Вартість ремонту застарілого обладнання є відносно дорогим, а й часто неможливим, тому споживачі мають певні типові вибори щодо нового енергоефективного обладнання – асинхронні двигуни з перетворювачем частоти і вентильні двигуни. Вентильні двигуни хоч і є енергоефективними і мають крім показники коефіцієнта потужності, але вимагають застосування синхронних двигунів спеціального виконання, що робить їх використання обмеженим. Перша ж система набула значно більшого поширення, так як асинхронні двигуни є доступнішими.

SWOT-аналіз (аналіз Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) - це інструмент стратегічного аналізу, який дозволяє оцінити внутрішні та зовнішні аспекти стартап-проекту. SWOT-аналіз є популярним інструментом для стратегічного аналізу, і його ефективність може варіюватися в залежності від конкретного стартапу та контексту. Оцінка ефективності SWOT-аналізу для стартапів включає розгляд сильних і слабких сторін, можливостей та загроз, а також розуміння того, як ці фактори впливають на стратегію розвитку.

Переваги SWOT-аналізу для стартапів:

1. Комплексність аналізу: SWOT враховує як внутрішні, так і зовнішні фактори, дозволяючи отримати повніший образ ситуації.
2. Спрощення прийняття рішень: Стартапи можуть використовувати SWOT для здійснення обґрунтованих стратегічних виборів на основі внутрішніх сильних сторін та можливостей.
3. Проведення SWOT-аналізу може бути ефективним інструментом для залучення всієї команди стартапу до процесу визначення стратегічних напрямків.
4. Дозволяє стартапам концентруватися на конкретних аспектах, таких як

ринкова позиція, технічні можливості чи фінансова стійкість.

Недоліки SWOT-аналізу для стартапів:

1. Статичність: надає статичний зоровий кут на даний момент і може не враховувати динамічно змінюючийся стартап-ландшафт.
2. Суб'єктивність: Оцінка можливостей і загроз може бути суб'єктивною та залежати від оцінки того, як кожна сторона бачить ситуацію.
3. Неврахування емоцій: може не враховувати емоційні аспекти та внутрішні конфлікти, що також можуть впливати на розвиток стартапу.
4. Не вирішує проблеми: SWOT сам по собі не пропонує конкретних рішень або стратегій, це лише інструмент для збору інформації.

Таблиця 4.2 – Матриця аналізу SWOT

<b>S – сильні сторони</b>	<b>W – слабкі сторони</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оптимальне відношення ціни і енергоефективності технології.</li> <li>2. Використання сучасних автоматизованих інтелектуальних систем</li> <li>3. Висока надійність обладнання при різних режимах роботи</li> <li>4. Гнучкість налаштування під потреби споживача</li> <li>5. Можливість встановлення дистанційного керування, інтеграція з іншими процесами і технологіями</li> <li>6. Підвищення експлуатаційного терміну обладнання: двигуни, перетворювачі та акумуляторні батареї.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Необхідна відносно велика сума інвестицій в проект</li> <li>2. Застосування переважно імпортного і дорогого обладнання</li> <li>3. Складність налаштування і обслуговування технології.</li> <li>4. Перед введенням в експлуатацію, необхідне проведення експериментальних досліджень</li> </ol>
	<b>T – загрози</b>
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Нестабільність економічної ситуації в державі зменшує інвестиційну привабливість</li> <li>2. Небажання керівництва підприємств виділяти ресурс на модернізацію</li> <li>3. Підвищення ймовірності знищення/пошкодження об'єктів внаслідок ворожих обстрілів</li> <li>4. Можливі проблеми з імпортуванням частини обладнання та пристроїв</li> </ol>
<b>O – можливості</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Перехід ряду підприємств на енергоефективні та екологічні технології</li> <li>2. Модернізація широкого ряду електротранспорту</li> <li>3. Необхідність у збільшенні ступені автоматизації процесу</li> <li>4. Закінчення експлуатаційного терміну та неремонтнопридатність базового обладнання для ряду цільових галузей</li> </ol>	

### **4.3 Фінансове обґрунтування стартап-проекту та капіталовкладення**

Собівартість надання послуги /продукту включає в себе різноманітні економічні елементи, які враховуються при розрахунках вартості продукту чи послуги. Основні елементи собівартості включають:

1. Сировинні матеріали: Вартість матеріалів, що використовуються для створення продукту чи надання послуги.
2. Пряма праця: Витрати на оплату праці працівників, які безпосередньо зайняті у виробництві чи наданні послуг.
3. Загальновиробничі витрати: Включають в себе витрати на управління та утримання виробництва, які не можна прямо призначити конкретному продуктові чи послугі.
4. Амортизація обладнання: Розподіл витрат на придбане обладнання або активи протягом їхнього корисного терміну служби.
5. Витрати на транспортування та логістику: Вартість перевезення сировинних матеріалів, готової продукції та послуг до місця надання чи збуту.
6. Витрати на маркетинг та рекламу: Витрати на просування продукту чи послуги на ринку, включаючи рекламні кампанії, участь у виставках, інтернет-маркетинг тощо.
7. Фінансові витрати: Вартість кредитів, відсотки, комісії банків та інші фінансові витрати.
8. Витрати на обслуговування клієнтів: Витрати на підтримку клієнтів, обслуговування та гарантійні витрати.
9. Податки та обов'язкові внески: Різні податки та обов'язкові внески, які підприємство зобов'язане сплачувати.

Для початкової стадії стартапу необхідно провести технологічні дослідження технології. Це потрібно для того, аби уникнути майбутніх несправностей внаслідок недоліку алгоритму керування чи інших аспектів, тобто так зване бета тестування.

Тому варто створити лабораторний експериментальний стенд, що складається з перетворювача частоти, асинхронного двигуна, навантажувальної машини постійного струму з незалежним збудженням, що жорстко з'єднані з валом асинхронного двигуна, промислове джерело живлення для машини постійного струму, датчик швидкості, комплект з вимірювальних приборів і обладнання.

Структурна схема стенду наведена на рисунку 4.1

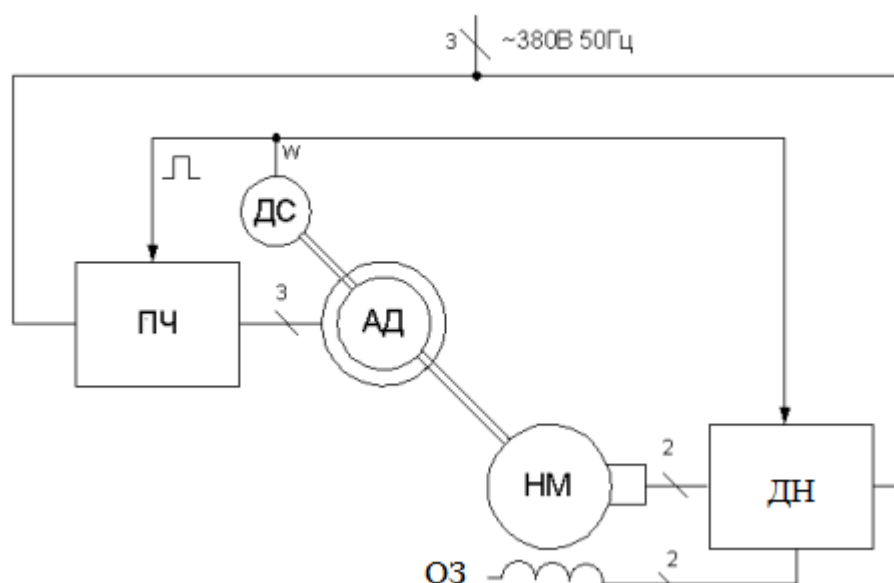


Рисунок 4.1 – Структурна схема експериментальної установки

Для розвитку стартапу інвестору необхідно забезпечити всім необхідним обладнанням, крім цього дане обладнання буде використовуватись у подальшому розвитку проект для дослідження нових рішень і усуненні недоліків поточного стану. Також необхідне відповідне приміщення з трифазним джерелом живлення для розміщення стенду. Відповідне обладнання буде амортизовано і інвестор зможе повернути кошти уже за 2,5 роки шляхом амортизаційних відрахувань, і крім цього будуть щорічно виплачуватись дивіденди відповідно до колективної угоди. Детальний перелік і вартість складових наведені в табл.4.3

Таблиця 4.3 – Капіталовкладення (інвестиції) для реалізації проєкту

Перелік обладнання та послуг	Кількість	Сумарна Вартість, грн
Набір комп'ютерного обладнання з програмним забезпеченням для обробки експериментального дослідження	2	112000
Розробка сайту для роботи з клієнтами та просування технології	1	15 000
Асинхронний двигун спеціального виконання, 4кВт, АДМ100М4	1	6560
Навантажувальна машина - двигун постійного струму, 4 кВт	1	7410
Перетворювач частоти з скалярним і векторним керуванням, 4кВт, Siemens SINAMICS	1	36755
Додаткові логічні модулі	2	4360
Датчик швидкості (енкодер)	2	6400
Датчик струму (ефект Холла)	5	2100
Датчик напруги	3	930
Мультиметр	2	4300
Комутаційне і захисне обладнання( шафа, рубильник , вимикачі, контактори)	1	3450
Вартість оплати праці, щодо експериментальних досліджень. (3 місяці)	3	150000
Блок живлення SIMOREG DC-converte, 400 В, 25А	1	18000
Пристрої діагностування електротехнічних параметрів	1	26000
Сумарно капіталовкладень, грн		393265

В сфері інженерії інноваційна ідея може включати різноманітні ключові види діяльності для успішної реалізації та впровадження. Нижче подано перелік можливих ключових видів діяльності:

Дослідження та розробка: вивчення нових технологій та методів у сфері інженерії для створення інноваційних рішень. Проектування та розробка прототипів: створення дизайну та розробка прототипів для перевірки ефективності та можливостей ідеї. Оптимізація технічних процесів: розробка та вдосконалення технічних процесів для забезпечення ефективності та якості виробництва. Впровадження технологічних інновацій: введення новітніх технологій та методів у виробництво чи інші інженерні процеси. Тестування та валідація: проведення тестів для підтвердження працездатності та валідації розроблених інженерних рішень. Стандартизація та забезпечення якості: впровадження стандартів якості та процедур забезпечення якості для

виробництва чи виконання інженерних послуг. Безпека та відповідність: забезпечення дотримання стандартів безпеки та відповідності нормативним вимогам. Оптимізація вартості та бюджету: мінімізація витрат та оптимізація вартості виробництва чи реалізації інженерних рішень. Управління проектами: систематичне управління проектом для забезпечення вчасного та ефективного впровадження інновації. Реклама та продажі: розробка стратегій маркетингу та просування інноваційних інженерних рішень на ринку. Освіта та навчання: проведення навчання та інформування персоналу про нові технології та інженерні підходи. Партнерства та колаборації: встановлення партнерств з іншими компаніями, дослідницькими організаціями чи університетами для спільної реалізації інновацій. Детальний опис видів діяльності наведений у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Ключові види діяльності

Назва діяльності	Опис діяльності	Результат діяльності
Проектування та розробка прототипів	Відповідно до технологічних умов створення моделі пристрою, наведення його параметрів і синтез алгоритму керування та програмного забезпечення	Програмний код, креслення, специфікації, модель-макет прототипу
Тестування продукції	Розроблений макет і алгоритм керування вимагає перевірки на працездатність, завдяки вимірювальному обладнанню проводиться аналіз параметрів розробленої установки і встановлюється відповідність до заявлених технологічних характеристик	Готовий до монтажу і експлуатації адаптивний пристрій, можливість внесення змін до макету клієнтом відповідно під час проведення тестування
Діагностування	Визначення основних технічних параметрів електроприводу тягового електротранспорту, його випробування і перевірка на запас експлуатаційної міцності	Клієнт отримує інформацію про поточний стан обладнання та рекомендації щодо усунення основних несправностей
Партнерство	Проведення досліджень і випробувань спільно з НДІ та технічними університетами	Створення нових ідей і стартів, виконання кваліфікаційних робіт на базі стенду.
Сервіс	Підтримка зворотного зв'язку з клієнтами і їх консультація	Якісне і надійне надання послуг
Монтаж	Налаштування і встановлення обладнання	Безперервна і ефективна робота установки

#### 4.4 Визначення собівартості продукту стартапу

Прямі матеріальні витрати на реалізацію іноваційної технології включають у себе реальні фінансові витрати, пов'язані з процесом впровадження новацій. Ось деякі основні елементи, які можуть призвести до прямих матеріальних витрат: Витрати на проведення досліджень, розробку та створення прототипів нової технології. Придбання та встановлення необхідного обладнання для виробництва чи реалізації іноваційної технології. Витрати на придбання ліцензій або отримання патентних прав на інтелектуальну власність. Витрати на підготовку персоналу для роботи з новою технологією. Витрати на випробування та експериментальні дослідження для підтвердження функціональності та безпеки технології. Закупівля необхідних матеріалів та компонентів для виробництва та реалізації продукту. Витрати на створення маркетингової стратегії, рекламу та просування нової технології. Витрати на встановлення партнерських відносин або отримання ліцензій від інших компаній. Розробка та впровадження необхідних інформаційних технологій та комунікаційних систем. Витрати на страхування та юридичну підтримку для захисту від можливих ризиків та правових питань

Таблиця 4.5 - Прямі матеріальні витрати на виробництво типової технології

Витрати на продукцію в рік	Кількість продукції	Вартість одиниці, грн	Сума, тис .грн
Перетворювач частоти з векторним керуванням, 55 кВт	22	75 350	1657,7
Вартість повної діагностики об'єкту	38	11 470	435,86
Енкодер	38	8 140	309,32
Блок керування	38	6140	233,32
Дисплей	38	4 100	155,8
Сума, тисяч грн			2792
Орієнтовна кількість реалізованої технології			38

Для організації діяльності стартапу необхідно забезпечення відповідних трудових умов – оренда офісу, приміщення для досліджень, автомобіль і пальне

до нього, оплата таргентованої реклами.

Таблиця 4.6 – Інші прямі витрати

Витрати на оренду та платежі	Вартість, грн	тип	Вартість послуг на рік, тис грн
Транспорт і паливо	8100	Місяць	97,2
Оренда приміщення для експериментального стенду	6000	Місяць	72
Оренда офісного приміщення	10000	місяць	120
Послуги з підтримки сайту	1000	місяць	12
Сплата Комунальних платежів, сумарно	5110	місяць	61,3
Маркетинг та реклама, партнерські зустрічі, участь в форумах	8000	місяць	96
Оплата послуг фінансового введення (бухгалтерія)	4000	місяць	48
МНМА	5000	рік	5
Сума, тис. грн в рік			511,5

#### 4.5 Витрати на оплату праці

Заробітна плата та фонд оплати праці формуються на основі ряду факторів і визначаються комплексною системою правил і політики внутрішнього управління компанії. Основні складові цих концепцій включають:

1. Оплата за годину або оклад.
2. Кваліфікація та Досвід.
3. Рівень Відповідальності.
4. Бонуси та Премії.
5. Додаткові Вигоди: Важливим елементом може бути надання додаткових вигод, таких як медичне страхування, пенсійні внески, відпустки тощо.
6. Законодавчі Вимоги:
7. Ринкові Умови:

Рівень оплати праці також може залежати від ринкових умов і конкуренції на ринку праці. Фонд оплати праці формується як сума всіх витрат на заробітну плату для всього персоналу компанії. Це включає зарплату, податки на заробітну плату, страхові внески, соціальні виплати тощо. Важливо враховувати, що формування заробітної плати та фонду оплати праці є стратегічним завданням

для компанії, оскільки це впливає на мотивацію працівників, їхню продуктивність та відносини в колективі.

$$\text{ФОП} = \text{Заробітна плата} + \text{Нарахування до Пенсійного фонду, грн} \quad (4.2)$$

Нарахування до Пенсійного фонду відповідно до Податкового кодексу України [19] становить 22%.

Таблиця 4.7 - Структура персоналу та ФОП

Адміністративно технічний персонал	Форма оплати	заробітна плата		
		за місяць	за квартал	за рік
Начальник відділу (робота з партнерами)	ставка	28000	84000	336000
Інженер-проектувальник (розробка програмного забезпечення, створення специфікацій)	ставка	26500	79500	318000
Інженер-дослідник (адаптація розробленої технології і її вдосконалення)	ставка	23000	69000	276000
Менеджер-консультант (підтримка зворотного зв'язку з клієнтами)	ставка	23000	69000	276000
всього		100500	301500	1206000
Соціальні відрахування до Пенсійного фонду (22 %)		22110	66330	265320
ФОП		122,61	367,83	1471,32
<b>Виробничий персонал</b>				
Інженер-наладчик (монтаж)	ставка	20000	60000	240000
Інженер-наладчик (діагностика)	ставка	19500	58500	234000
всього		39500	118500	474000
Соціальні відрахування до Пенсійного фонду (22 %)		8690	26070	104280
ФОП, тис грн		48,19	144,57	578,28

#### 4.6 Амортизаційні відрахування

Амортизаційні відрахування представляють собою систематичний процес розподілу вартості матеріальних активів або нематеріальних активів протягом їхнього придатного до використання терміну служби. Це фінансова практика, яка

враховує факт, що актив втрачає свою вартість через зношування та застаріння з часом. Основні аспекти амортизації:

Матеріальні та нематеріальні активи, такі як обладнання, транспортні засоби, будівлі, програмне забезпечення, патенти і торгові марки, можуть бути піддані амортизації.

Методи амортизації: Існують різні методи розподілу вартості активів: прямолінійний метод, метод відрахувань за зменшенням залишкової вартості, метод подвійних відсотків тощо.

Придатний до використання термін служби: Це період, протягом якого актив може приносити користь компанії. Після завершення цього терміну актив вважається за списаний. Ставки амортизації: Встановлені внутрішньою політикою компанії або визначаються відповідно до податкових вимог.

Бухгалтерська облікова політика: Компанії повинні визначити свою бухгалтерську політику відносно амортизації, яка може впливати на фінансовий звіт та оподаткування [20].

Формула для розрахунку прямолінійної амортизації:

$$H_a = \frac{100\%}{T_{cl}}, \quad (4.3)$$

де  $H_a$  – норма амортизації;  $T_{cl}$  – термін експлуатації об'єкта основних засобів.

Таблиця 4.8 – Обґрунтування вартості амортизаційних відрахувань основних фондів підприємства

Назва об'єкта основних фондів	Вартість на початок року, грн.	Річна норма амортизації, %	Амортизаційні відрахування в поточному році, грн.		
			I квартал	IV квартал	За рік
Набір комп'ютерного обладнання з програмним забезпеченням	112000	50	14000	14000	56000
Пристрої діагностування електротехнічних параметрів	26000	25	1625	1625	6500
Експериментальний стенд	90 265	40	9027	9027	36106
Всього, грн	228265		24652	24652	98606

#### 4.7 Обґрунтування собівартості інноваційної ідеї стартап-проекту

Норма річного випуску послуг/пристроїв – 38 одиниць. Оскільки підприємство орієнтоване виключно на одну сферу діяльності і розробку одного пристрою, то 90% умовно постійних витрат йде на реалізацію продукції.

Таблиця 4.9 - Обґрунтування собівартості технології, тис. грн.

Статті витрат	Витрати, грн			
	на одиницю	на місяць	На квартал	на рік
Умовно-змінні витрати	88,7	280,9	842,6	3370,3
Умовно-постійні витрати (90%)	32,9	104,1	312,2	1248,9
Собівартість технології	121,6	384,9	1154,8	4619,1

Рентабельність продукції інноваційної ідеї визначається як співвідношення прибутку від реалізації цієї ідеї до витрат на її розробку, виробництво та продаж. Для розрахунку рентабельності можна використовувати наступну формулу:

$$N_{\text{пр.}} = \frac{П}{ВВ} \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

де П – прибуток підприємства, ВВ – валові витрати.

Рентабельність можна розглядати як ключовий показник фінансової ефективності та успішності проекту. Цей показник дозволяє визначити, наскільки іноваційна ідея є фінансово вигідною та чи може призвести до отримання прибутку.

Важливо враховувати, що рентабельність повинна враховувати не лише вартість виробництва, але і потенційний ринковий попит, конкурентні умови, а також ризики, пов'язані з реалізацією інноваційної ідеї. Проведення детального аналізу та оцінка всіх факторів допоможуть зробити більш об'єктивний висновок щодо рентабельності іноваційного продукту.

Дані для обґрунтування необхідного рівня прибутку інноваційної ідеї, для якої розраховується ціна, узагальнюємо в табл. 4.11.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування рівня рентабельності товару (послуги)

Статті витрат	Джерело даних	Од. вимір.	Значення показників.
1. Собівартість одиниці продукції	табл. 17	тис грн	4619,1
Обсяг виробництва в рік	Прогноз		38
2. Необхідний прибуток	пп.2,1+2,2+2,3+2,4+2,5+ 2,6+2,7	тис грн	857,05
2.1. Кредитні засоби та їх обслуговування	Кредитна угода	тис грн	210
2.2. Засоби ФРВ	Колективна угода	тис грн	216,00
2.3. Засоби ФСР	Колективна угода	тис грн	96,0
2.4. Засоби ПФ	Колективна угода	тис грн	48,0
2.5. Грошові виплати власникам підприємства	Колективна угода	тис грн	120
2.6. Фінансовий резерв	$(2.1+2.2+2.3+2.4+2.5)*0.05/0.95$	тис грн	36,32
2.7. Податок на прибуток	$(2.1+2.2+2.3+2.4+2.5)*0.18$	тис грн	130,74
3. Необхідний рівень рентабельності продукції	п.2 / п.1*100%	тис грн	<b>18,55</b>

ПДВ (податок на додану вартість) в Україні є одним із видів податків на споживчі витрати і фактично перетворює собівартість продукту в його ціну. Основні аспекти ПДВ в Україні включають: Ставка ПДВ: Загальна ставка ПДВ в Україні становить 20%. Також існує пільгова ставка 7% для окремих товарів та послуг. Об'єкти оподаткування: ПДВ обчислюється на вартість внутрішньодержавних товарів та послуг, а також на імпортовані товари. Суб'єкти підприємницької діяльності, які досягли певного обороту, повинні бути зареєстровані як платники ПДВ. Реєстрація ПДВ: Платниками ПДВ можуть бути юридичні та фізичні особи-підприємці, які досягли визначеного обороту за

попередні 12 місяців. Вони повинні реєструватися в органах Державної служби з питань податків та зборів. Податкові накладення: Платники ПДВ зобов'язані збирати ПДВ у своїх реалізаціях товарів чи послуг та подавати звіти та розрахунки до податкових органів. Податкові звіти: Платники ПДВ повинні подавати регулярні звіти до податкових органів. Звіти можуть включати інформацію про оборот, витрати та інші податкові обов'язки.

Обґрунтування беззбиткового обсягу виробництва є важливим етапом в бізнес-плануванні та стратегічному управлінні підприємством. Беззбитковий обсяг виробництва - це той обсяг продукції або надання послуг, при якому доходи в точності вирівнюються з усіма витратами. Це означає, що при цьому обсязі підприємство не втрачає гроші, але також не отримує прибутку.

Результати обґрунтування та визначення суми ПДВ та ціни послуги вказані в табл. 4.11.

Таблиця 4.11 - Обґрунтування вартості та ціни

Статті витрат	Одиниці вимірювання	Значення показників
1. Собівартість технології на рік	тис.грн.	4619,1
2. Норма рентабельності	%	18,6
3. «Нормальний» питомий прибуток	тис.грн./рік	857,1
4. Вартість виробництва технології	тис.грн./рік	5476,2
5. ПДВ	тис.грн./рік	1095,2
6. Відпускна ціна технології	тис.грн./рік	6571,4
7. Розрахункова ціна одиниці з ПДВ	Тис. грн	172,933
8. Ринкові ціни технологій-аналогів на ринку		
Мінімальна,	Тис. грн	115
Максимальна	Тис. грн	420
Середня	Тис. грн	245
3. Скоригована ціна реалізації	Тис. грн	180 (+4.1%)

## 4.8 Бізнес модель стартапу

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

Таблиця 4.12- Структура бізнес моделі інноваційної ідеї

<b>Ключові партнери:</b> АТ «Укрзалізниця»	<b>Ключові види діяльності</b> Проектування, діагностування, монтаж, дослідження	<b>Цінність пропозиції:</b> Підвищується надійність і енергоефективність завдяки використанню адаптивної і інтелектуальної системи керування	<b>Взаємовідно сини з клієнтами</b> Сайт та телеграм-бот зворотного зв'язку	<b>Споживчі сегменти</b> Електротранспорт, важка промисловість, гірничодобувна галузь
	<b>Ключові ресурси:</b> Експериментальний стенд, персонал, програмне забезпечення		<b>Канали збуту</b> Сайт, партнерські зустрічі, тематичні форуми і виставки	
<b>Структура собівартості</b> 1.Витрати разові (капітальні): 393 тис.грн 2.Витрати постійні 1248,9 тис.грн. 3. Витрати змінні: 3370,3 тис. грн 4. Собівартість одної технології: 180 тис.грн			<b>Потоки надходження доходу</b> Продаж пристроїв, монтаж і налаштування, ремонт і обслуговування, дослідження	

Період окупності проекту (враховуються одноразові вкладення в створення і подальше функціонування лабораторного стенду) до отриманих виплат інвесторами + амортизаційні відрахування):

$$T_{ок} = K/\Delta Pr = 393,3 \text{ тис. грн} / (120+98,6) \text{ грн} = 1.8 \text{ років}, \quad (4.5)$$

де  $T_{ок}$  – період, за який інвестиції окупаються за рахунок збільшення прибутку, або економії річних експлуатаційних витрат  $\Delta Pr$ .

Коефіцієнт ефективності  $E$  – це відношення приросту прибутку до капіталовкладень, які викликали цей приріст:

$$E = \frac{\Delta Pr}{K} = \frac{1}{T_{ок}} = 1/1,8 = 0.556 \quad (4.6)$$

Нормативне значення коефіцієнту економічної ефективності для даної галузі електротранспорту – 0.3, тому проект є доцільним для інвестування.

### Висновки з розділу

Можна визначити, що у просту є сильні сторони, такі як оптимальне відношення ціни і енергоефективності, використання сучасних технологій та висока надійність обладнання. Гнучкість налаштування і можливість інтеграції з іншими технологіями додають конкурентний переваги. Однак існують суттєві слабкі сторони, такі як великі інвестиції, застосування дорогого обладнання і складність налаштування. Загрози, такі як нестабільність економічної ситуації та можливість ворожих обстрілів, також потребують уваги. У контексті можливостей, проект може скористатися переходом підприємств на енергоефективні та екологічні технології, модернізацією електротранспорту та необхідністю у збільшенні автоматизації процесів. Однак успішний розвиток вимагатиме управлінських рішень для подолання слабкостей та збалансування загроз.

Загалом, для забезпечення успіху стартапу важливо вдосконалити стратегії управління витратами та залучення фінансування, а також активно використовувати можливості для розвитку у відповідь на поточні виклики та тенденції на ринку. Загальні результати зведені у таблицю 4.13

Таблиця 4.13 - Узагальнюючі економічні показники інноваційної ідеї

Показники	Значення
Річний випуск технології, од	38
Капіталовкладення, тис. грн	393,265
Собівартість технології, тис. грн/рік	2792
Ціна послуг, тис грн	5476,2
Прибуток, тис. грн	857,05
Рентабельність, %	18,55
Коефіцієнт економічної ефективності	0,556
Період повернення капіталовкладень, років	1,8

## ВИСНОВКИ

1. Здійснено аналіз та огляд джерел інформації щодо регулювання швидкості тягових асинхронних двигунів. Виявлено, що типові рішення щодо систем скалярного керування вирішують виключно технологічні параметри забезпечення режиму роботи двигуна, часто без можливої рекуперації енергії під час гальвання, і не є оптимальними за критерієм енергоефективності. Запропоновано оригінальне формулювання комплексної електромеханічної задачі оптимізації при використанні електромеханічного показника.

2. Здійснено розрахунок параметрів і характеристики обраного типу тягового електротранспорту. Визначено структурну схему адаптивного інтелектуальної пристрою системи керування та розглянуто закони скалярного керування системою ПЧ-АД.

Розроблено скалярну систему керування частотним асинхронним електроприводом змінної структури, що забезпечує максимум електромагнітного моменту при обмеженні струму перетворювача у всіх режимах роботи. Дана система відрізняється використанням у своїй структурі двох законів частотного управління, один з яких розрахований на оптимальне функціонування системи при виході на обмеження струму і напруги статора АД, другий - на оптимальне функціонування в режимах роботи, що встановилися. Перемикання між законами здійснюється за умовою максимуму електромеханічного показника функції модуля струму статора АД.

Система керування електроприводом виконана як багатозонна система автоматичного регулювання, де в першій зоні вплив на двигун здійснюється шляхом пов'язаного визначеним законом зміни амплітуди та частоти напруги статора, а в другій зоні – шляхом зміни лише частоти, а амплітуда напруги залишається незмінною відповідно до граничних можливостями перетворювача частоти.

3. Проведено аналіз механічних та електромеханічних характеристик різних законів скалярного керування системою в середовищі MathCAD Prime.

Обґрунтовано вибір граничного і статичного керування, що є складовими адаптивної системи регулювання змінної структури. Розроблено чисельну математичну модель електроприводу, що розглядається, зі скалярною системою управління змінної структури, що дозволило дослідити динамічні характеристики електроприводу в різних режимах.

4. Синтезовано контур стурмообмеження, обраховано параметри ПІ-регулятора скалярної системи. Виконано чисельне моделювання адаптивної скалярної системи в середовищі MATLAB Simulink в статичних і граничних режимах роботи і порівняно результати моделювання в порівнянні з традиційним скалярним законом пропорційного частотного керування. Показано працездатність системи під час роботи з різними навантаженнями електроприводу: реактивним моментом опору, активним руховим та активним генераторним моментами.

5. У розділі «Стартап-проект» було обґрунтовано актуальність інноваційної ідеї, собівартість кінцевої технології, складових капіталовкладень. Наведено сильні і слабкі сторони проекту, його можливості і загрози. Розраховано рентабельність технології та термін окупності вкладень. Рентабельність проекту складає 18.55%, а термін окупності інвестицій.

Запропоновано оригінальний алгоритм розрахунку оптимальних законів управління, який відрізняється автоматичним визначенням меж зон роботи електроприводу. Застосовані в алгоритмі динамічна та статична математичні моделі асинхронного двигуна орієнтовані на розрахунок оптимальних законів управління та враховують ефект насичення головного магнітного ланцюга та ефект витіснення струму ротора.

Рекомендації: Доповнити розроблену систему керування змінної структури алгоритмом ідентифікації, що визначає параметри об'єкта керування системи струмообмеження.

Перспективи подальшої розробки теми: Створення універсального алгоритму реалізації екстремальних законів управління асинхронним двигуном, застосовуваного як скалярних, і векторних систем управління.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Filushov, Yu. P. Management of a multichannel object /Electrical engineering. Energy mechanical engineering. International scientific conference of young scientists. In 3 sections, section1/ Filushov Yu. P., Simakov G. M.// EEM December 2 - 6, 2014. 2. - pp. 190 - 198.
2. Simakov ,G. M. Combined Control of an Asynchronous Machine with Squirrel - Cage Rotor //Yu. P. Filushov, G. M. Simakov, V. Yu. Filushov/2016 13th International Scientific-Technical Conference APEIE - 39281 / pp. 175 – 179
3. IMOVERT MASTERDRIVES / Compendium Vector Control 6SE7087-6QX60 / Siemens AG 2001
4. MICROMASTER 440 / Parameter List Issue 08/02 / User Documentation 6SE6400-5BB00-0BP0 / Siemens AG200
5. Watanade H., and Dettloff. Reconfigurable fuzzy logic processor: A full custom digital VLCI, in Inf. Workshop on Fuzzy Systems Applications, Iiruka, Japan, Aug. 1988, pp. 49 – 50.
6. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die Transvector – Regelung von Drohfeldmaschinen. – Siemens. 1971. 45, № 1. 757 – 760
7. КУЛАГІН, Дмитро Олександрович. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітних кіл. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 2014, 6: 103-110.
8. Калінов, А.П., Дослідження режимів роботи асинхронних двигунів з пошкодженнями обмоток статора і ротора та з неякісним кріпленням до основи [Текст] / А.П. Калінов, Д.Г. Мамчур, О.В. Браташ, Ж.І. Ухань // Вісник Кременчуцького держав. політехн. універ. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Вип. 3 (56),Ч.2. - С. 91-94.
9. СІНЧУК, О. М., et al. ВИПРОБУВАННЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТ-РОПРИВОДА РУДНИКОВОГО КОНТАКТНО-АКУМУЛЯТОРНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2011, 49-52.

10. ПЕТРЕНКО, О. М. Вибір оптимальних режимів роботи напівпровідникового перетворювача для живлення тягового асинхронного двигуна. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2016, 3: 33-37.
11. ПРУТЯН, Я. О.; ЄГОРОВ, А. В. Визначення шляхів модернізації тягових асинхронних двигунів. *Інтернет–конференції ХНУМГ ім. ОМ Бекетова*, 2023, 1.52: 77-79.
12. Автоматизований електропривод машин та установок: конспект лекцій [Електронний ресурс] : / О. В. Чермалих, О. В. Данілін, А. В. Босак. Л. В. Торопова ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,17 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 60 с.
13. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник / О. В. Чермалих, О. В. Данілін, А. В. Босак. Л. В. Торопова ; КПІ ім. Ігоря Сікорського.– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 77 с.
14. ДАНИЛІН, Олександр Валерійович, et al. Комп'ютерне моделювання процесів у електротехнічних системах. Дослідження математичних моделей електротехнічних систем з пружними ланками. Рекомендації до виконання розрахункової роботи. 2023.
15. ХВОРОСТ, М. В.; ВОРОНОВ, Р. В. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ СКАЛЯРНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМИ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ, ЩО ЖИВЛЯТЬСЯ ВІД ОДНОГО ІНВЕРТОРА. *Комунальне господарство міст*, 154: 33-40.
16. Петренко О.М. Визначення ефективності електрорухомого складу. Основні положення та підходи/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційнокеруючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – № 6. – С. 8-13
17. Мигаль В.Д., Аргун Щ.В. Вибір методу оцінки якості асинхронних тягових електродвигунів для електробусів // *Автомобіль І Електроніка Сучасні Технології*. 2019. Вип. 15. С. 105–113.
18. Карплюк Л. Ф. Вибір системи регулювання для електроприводів

транспортних механізмів / Л. Ф. Карплюк // Вісник НУ «Львівська політехніка», «Електроенергетичні та електромеханічні системи». — 1997. — № 334. — С. 57—59

19. Наукова стаття «Indirect field-oriented torque control of induction motors with maximum torque per ampere ratio». Автори: Пересада С. М., 79 Ковбаса С. М., Димко С. С. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38455> (дата звернення 07.12.23).
20. S. Bozhko, S. Dymko, S. Kovbasa and S. M. Peresada, "Maximum Torque-per-Amp Control for Traction IM Drives: Theory and Experimental Results," in *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 181-193, Jan.- Feb. 2017.
21. ДАНИЛІН, О. В.; КОБЗАР, О. В. АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ. *HI ТЕХНОЛ*, 81.
22. КОШИЛЬ, Віталій Ігорович. Підвищення ефективності використання електричної енергії машинами важконавантажених електроприводів. 2022.
23. Закон України «Про внесення змін до Податкового кодексу України щодо покращення інвестиційного клімату в Україні» від 21.12.2017 р. № 1797-VIII (дата звернення 03.01.2024).
24. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
25. Магістерська дисертація: виконання, оформлення та захист [Електронний ресурс] : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Бойченко С. В., Зайченко С. В., Сліденко В. М., Босак А. В., Кулаковський Л. Я., Торопов А. В., Поліщук В. О. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 47 с.
26. MIGAL, Vasiliy, et al. Підвищення якості тягових електродвигунів для електротранспорту. *Vehicle and electronics. Innovative technologies*, 2023, 23: 6-14.