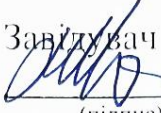


Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними та економічними процесами»

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТЕМ

(підпис) /Андрій МУХА/

Дата 30.12.24

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Структурно-математичне моделювання механічної, електромеханічної та робочих характеристик асинхронного двигуна»

за освітньою програмою: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»

зі спеціальності: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Виконав: студент
групи «ЕЕ2321»


(підпис студента)


/Олексій БАЙНОВСЬКИЙ/
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:


(підпис)

/доц. Дмитро УСТИМЕНКО/
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:


(підпис)

/доц. Оксана КАРЗОВА/
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

(назва розділу)

(підпис)

//

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(назва розділу)

(підпис)

//

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(назва розділу)

(підпис)

//

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(назва розділу)

(підпис)

//

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент


(підпис)

Дніпро – 2024 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Faculty «Management of energy and economic processes»

Department «Electrical engineering and electromechanics»

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: «Structural and mathematical modeling of mechanical, electromechanical and operational characteristics of an asynchronous motor»

according to educational curriculum «Energy and electromechanical systems in transport»

in the Speciality: «141 Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics»

Done by the student of the group EE2321: Bauef /Oleksii BAIANOVSKYI/

Scientific Supervisor: [Signature] /Dmytro USTYMENKO/

Normative controller: [Signature] /Oksana KARZOVA/

Supervisors

(Chapter title heading)

// _____
(position, name, surname)

(Chapter title heading)

// _____
(position, name, surname)

(Chapter title heading)

// _____
(position, name, surname)

(Chapter title heading)

// _____
(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Факультет «Управління енергетичними та економічними процесами»
Кафедра: «Електротехніка та електромеханіка»
Рівень вищої освіти: магістр
Освітня програма: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»
Спеціальність: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра
студенту Баяновський Олексій Анатолійович

1. Тема роботи: «Структурно-математичне моделювання механічної, електромеханічної та робочих характеристик асинхронного двигуна»

Керівник роботи: Устименко Дмитро Володимирович, доцент
затверджені наказом № 247 ст від 01.04.2024 р.

2. Строк подання студентом роботи: 05.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Паспортні дані асинхронного двигуна АОЛ2-31-4.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: Вступ. Аналіз літературних джерел та нормативної документації зі вказаного питання. Методи отримання електромеханічних, механічних та робочих характеристик асинхронного двигуна (АД). Застосування ПЕОМ та спеціалізованих програм для розрахунку основних характеристик АД.

4.2 Основна частина: Розрахунок та побудова електромеханічних, механічних та робочих характеристик асинхронного двигуна АОЛ2-31-4 за даними експерименту з безпосереднім його навантаженням та порівняння аналогічних характеристик, отриманих в результаті структурно-математичного моделювання з застосуванням спеціалізованих програм. Оцінка отриманих результатів та порівняння двох підходів до отримання характеристик.

4.3 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях: Захисні заходи від ураження електричним струмом.

4.4 Економічна частина: –

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Загальна характеристика відомих методів та підходів по отриманню основних характеристик АД; 2. Електромеханічні, механічні та робочі характеристики АОЛ2-31-4 отримані методом безпосереднього навантаження; 3. Структурно-математична модель АД та електромеханічні, механічні та робочі характеристики отримані за її допомогою; 4. Порівняльний аналіз двох підходів до отримання характеристик АД та оцінка отриманих результатів.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ.	11.11.2024 – 17.11.2024	10%
2	Методи отримання електромеханічних, механічних та робочих характеристик асинхронного двигуна (АД). Застосування ПЕОМ та спеціалізованих програм для розрахунку основних характеристик АД.	18.11.2024 – 24.11.2024	15%
3	Розрахунок та побудова електромеханічних, механічних та робочих характеристик асинхронного двигуна АОЛ2-31-4 за даними експерименту з безпосереднім його навантаженням та порівняння аналогічних характеристик, отриманих в результаті структурно-математичного моделювання з застосуванням спеціалізованих програм.	25.11.2024 – 08.12.2024	30%
4	Оцінка отриманих результатів та порівняння двох підходів до отримання характеристик.	09.12.2024 – 22.12.2024	30%
5	Захисні заходи від ураження електричним струмом.	23.12.2024 – 29.12.2024	10%
6	Висновки та рекомендації	30.12.2024 – 05.01.2025	5%
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри		-
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	06.01.2025 – 26.01.2025	-

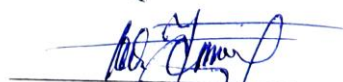
Студент


(підпис)

Олексій БАЯНОВСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи


(підпис)

доц. Дмитро УСТИМЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

№ рядка	Формат	Позначення	Назва	Кільк. арк.	№ екз.	Прим
1			<u>Документація загальна</u>			
2			Заново розроблена			
3	A4	7.141.230748.ПЗ	Пояснювальна записка	59		
4			Запозичена			
5			<u>Графічна частина</u>			
6			Заново розроблена			
7	A4	7.141.230748.01	Аналіз методів та підходів	1		
8			по отриманню основних			
9			характеристик АД			
10	A4	7.141.230748.02	Механічна та робочі хар. АД	1		
11			типу АОЛ2-31-4 отримані			
12			методом безпосереднього			
13			навантаження			
14	A4	7.141.230748.03	Структурно-математична та	1		
15			основні характеристики АД			
16			типу АОЛ2-31-4 отримані			
17			з її допомогою			
18	A4	7.141.230748.04	Порівняльний аналіз двох	1		
19			підходів до отримання			
20			характеристик АД			
21			типу АОЛ2-31-4			
22						
23			Запозичена			
24			<u>Електронна частина</u>			

7.141.230748.ПЗ

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розробив		Бянонєжкнї О.А.	<i>Бянонєжкнї</i>	30.12
Осн. керів.		Устименко Д.В.	<i>Устименко</i>	30.12
Консуьт.				
Н. контр.		Карзова О.О.	<i>Карзова</i>	30.12
Зав. кафед.		Муха А.М.	<i>Муха</i>	30.12

Відомість
кваліфікаційної роботи

Стад.	Аркуш	Аркушів
	5	59

МОН України, УДУНТ
Кафедра «ЕТЕМ»
Група ЕЕ2321

РЕФЕРАТ

Дипломна магістерська робота на тему «Структурно-математичне моделювання механічної, електромеханічної та робочих характеристик асинхронного двигуна» складається з 5 розділів та містить: 59 сторінок основного тексту, 3 таблиці, 27 рисунків, 15 літературних джерел, 1 додаток.

Мета роботи – розрахунок та побудова механічних та робочих характеристик асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4 за даними експерименту з безпосереднім його навантаженням та порівняння аналогічних характеристик, отриманих в результаті структурно-математичного моделювання.

У розділі 1 проведено аналіз якісного виду та методів отримання основних характеристик (механічної та робочих) асинхронного двигуна.

Розділ 2 присвячений дослідженню основних характеристик асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4 методом безпосереднього навантаження. Надано опис та схема лабораторної установки, наведені механічна та робочі характеристики.

У розділі 3 наведено аналіз засобів дослідження характеристик електромеханічних перетворювачів на основі їх математичних моделей. Розкриті основні можливості програмного комплексу MATLAB/Simulink в рамках структурно-математичного моделювання асинхронних двигунів. Запропонована SPS-модель для обчислення та побудови основних характеристик асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4, на основі якої отримані його механічна та робочі характеристики.

В розділі 4 проведено порівняльний аналіз механічних характеристик асинхронного двигуна отриманих різними методами. Отриманий результат дозволяє рекомендувати математичне комп'ютерне моделювання з застосуванням SPS-моделі в MATLAB/Simulink для розрахунку основних характеристик АД.

Розділ 5 містить інформацію про захисні заходи від ураження електричним струмом при експлуатації електрообладнання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, МЕХАНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА, РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС

					7.141.230748.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ, МЕХАНІЧНИХ ТА РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	10
1.1 Електромеханічні та механічні характеристики асинхронного двигуна.....	10
1.2 Робочі характеристики асинхронного двигуна	15
1.3 Методи отримання основних характеристик асинхронного двигуна.....	17
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТИПУ АОЛ2-31-4 МЕТОДОМ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ	21
2.1. Паспортні дані досліджуваного асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4.....	21
2.2. Лабораторний стенд для випробування асинхронних двигунів методом безпосереднього навантаження	22
2.3. Побудова експериментальних механічної та робочих характеристик асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4.....	23
РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРНО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТИПУ АОЛ2-31-4.....	28
3.1 Засоби дослідження характеристик електромеханічних перетворювачів на основі їх математичних моделей	28
3.2 Програмний комплекс MATLAB/Simulink	30
3.3 SPS-модель асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4	37
РОЗДІЛ 4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА АОЛ2-31-4 ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ	47
РОЗДІЛ 5 ЗАХИСНІ ЗАХОДИ ВІД УРАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ.....	50
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	58
СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ.....	60
ДОДАТОК А.....	61

					Пояснювальна записка			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Структурно-математичне моделювання механічної, електромеханічної та робочих характеристик асинхронного двигуна	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив		Баяновський О.А.	<i>Баян</i>	30.12.	7.141.230748.ПЗ	Арк. 7		Аркушів 59
Перевірив		Устименко Д.В.	<i>Устименко</i>	30.12.		Український державний університет науки і технологій, група ББ2321		
Т. контр.								
Реценз								
Н. контр.		Карцова О.О.	<i>Карцова</i>	2012				
Затвердив		Муха А.М.	<i>Муха</i>	2012				

ВСТУП

Для того аби перевірити придатність електричних машин виконувати роботу на яку вони призначені виробником проводять їх випробування. Критерієм придатності є задоволення ряду вимог, які пред'являються до машин технічними документами, що визначають її проектування, виготовлення та експлуатацію.

Частина дослідів, що входять до програми випробувань машин усіх видів, має своєю задачею тільки перевірку здатності машини витримувати без руйнування дію певних факторів, кількісні значення яких перевищують відповідні нормальній експлуатації. Однак більшість дослідів має більш складну задачу – визначення співвідношень між величинами, що характеризують певний режим роботи чи встановлення окремих значень величин, які зберігають постійність в певних умовах і важливі для опису роботи в цих умовах. Залежності, що встановлюють такі співвідношення називають характеристиками електричних машин, а величини – параметрами електричних машин.

Асинхронні трифазні двигуни широко використовуються в сучасних електричних установках та є найпоширенішим видом безколекторних електричних машин змінного струму [1]. Асинхронні трифазні двигуни з короткозамкненим та фазним ротором промислової частоти складають основу сучасного електроприводу. Так асинхронні двигуни складають близько 90% від усього парку машин і приблизно 55% від встановленої потужності [2].

Оцінити енергоефективність асинхронного електродвигуна та його можливість виконувати конкретні приводні задачі можна маючи механічну, електромеханічну та робочі характеристики асинхронного двигуна [3]. Механічна характеристика асинхронного двигуна це залежність кутової частоти обертання валу від моменту, що розвивається на його валу $\omega = f(M_2)$, електромеханічна характеристика – це залежність кутової частоти обертання валу від приведенного значення струму ротора $\omega = f(I'_2)$ [4]. Під робочими характеристиками асинхронних двигунів (АД) розуміють залежності кутової частоти обертання ω (або ковзання s), моменту на його валу M_2 , струму статора I_1 , потужності, що споживається P_1 , коефіцієнта

					7.141.230748.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

корисної дії η , коефіцієнта потужності $\cos \varphi_1$, від величини корисної потужності P_2 при роботі двигуна з номінальними значеннями напруги живлення та частоти ($U_1 = const, f_1 = const$) [1, 5].

Вище означені характеристики АД можуть бути отримані експериментально одним з двох методів або аналітичним шляхом.

Перший експериментальний метод є опосередкованим методом визначення характеристик в основі якого лежать дані отримані при проведенні дослідів неробочого ходу (НХ) та короткого замикання (КЗ). За цими даними отримують параметри схеми заміщення АД та будують колову діаграму. Характеристики отримані у такий спосіб мають низьку точність, а сам спосіб потребує графічної роботи.

Другий експериментальний метод є методом безпосереднього навантаження АД і може бути реалізованим: шляхом взаємного навантаження; навантаженням без віддачі енергії в мережу та з віддачою енергії в мережу. Дозволяє отримати робочі характеристики в досить вузькому діапазоні навантажень (від холостого ходу до незначного перевантаження ($1,25 \cdot I_{ном}$)).

Аналітичний метод передбачає відповідну кількість математичних розрахунків, які з використанням комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення суттєво спрощують дану задачу.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ, МЕХАНІЧНИХ ТА РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

1.1 Електромеханічні та механічні характеристики асинхронного двигуна

Формально для асинхронного двигуна існує дві електромеханічні характеристики:

- залежність кутової швидкості обертання валу машини від величини приведенного струму ротора $\omega = f(I'_2)$;
- залежність кутової швидкості обертання валу машини від величини струму статора $\omega = f(I_1)$.

З практичної точки зору зручнішою є друга залежність.

Механічною характеристикою АД є залежність кутової швидкості обертання валу від електромагнітного моменту $\omega = f(M)$ але часто її представляють як залежність моменту від ковзання $M = f(s)$.

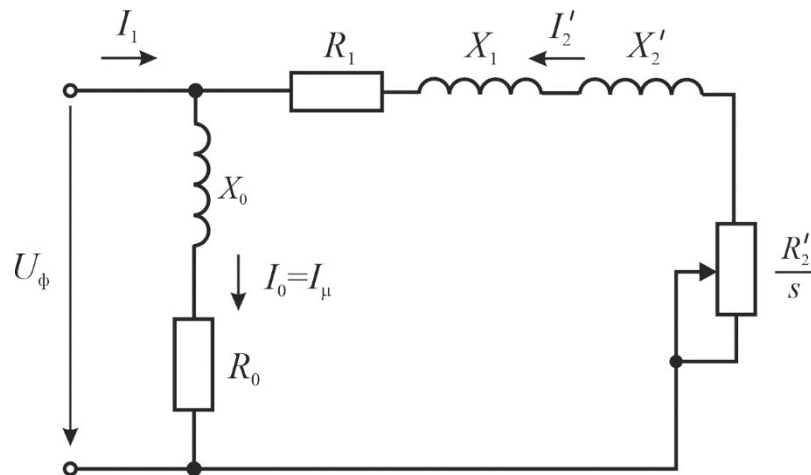


Рисунок 1 – Г-подібна схема заміщення фази асинхронного електродвигуна

Рівняння, що описують електромеханічну і механічну характеристики АД отримують на основі спрощеної схеми заміщення фази двигуна (рис. 1). В цьому випадку мають місце наступні спрощення та допущення [1, 2]:

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- вважають, що насичення магнітної системи АД не впливає на величини індуктивних опорів обмоток статора і ротора;
- активний опір обмотки ротора не залежить від частоти струму в ньому;
- провідність контуру намагнічування не залежить від навантаження, а лише від прикладеної напруги;
- додаткові втрати енергії не враховуються;
- моменти, що створюються магніторушійними силами вищих гармонічних складових не враховуються.

Електромеханічну характеристику у вигляді залежності $\omega = f(I_1)$ отримують через параметри схеми заміщення:

$$I_1 = U_\phi \left[\frac{1}{R_0 + jX_0} + \frac{1}{R_1 + \frac{R'_2}{s} + jX_k} \right] \quad (1)$$

або

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + (-I'_2)^2}, \quad (2)$$

де U_ϕ – діюче значення фазної напруги, В;

R_0, X_0 – відповідно значення активного та індуктивного опорів контуру намагнічування, Ом;

R_1 – активний опір обмотки статора, Ом;

R'_2 – приведений активний опір обмотки ротора, Ом;

X_k – індуктивний опір двигуна при короткому замиканні, Ом;

s – ковзання АД, в.о.;

$I_\mu = I_0$ – струм намагнічування – струм холостого ходу АД, А.

Рівняння (1) застосовують для аналізу роботи АД в різних енергетичних режимах роботи, а рівняння (2) дозволяє визначати струм статора та будувати електромеханічну характеристику двигуна за струмом статора.

Струм намагнічування АД:

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{1\text{НОМ}}^2 + (-I'_{2\text{НОМ}})^2} = \sqrt{\left(\frac{P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}}\right)^2 + \left(\frac{-U_{\text{фНОМ}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_{\text{НОМ}}}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}\right)^2}, \quad (3)$$

де X_1 – індуктивний опір обмотки статора, Ом;

X'_2 – приведений індуктивний опір обмотки ротора, Ом;

$P_{\text{НОМ}}$ – номінальна потужність АД, Вт;

$U_{\text{НОМ}}$ – номінальна лінійна напруга, Ом;

$\cos \varphi_{\text{НОМ}}, \eta_{\text{НОМ}}$ – відповідно номінальні значення коефіцієнта потужності та ККД асинхронного електродвигуна, в.о.

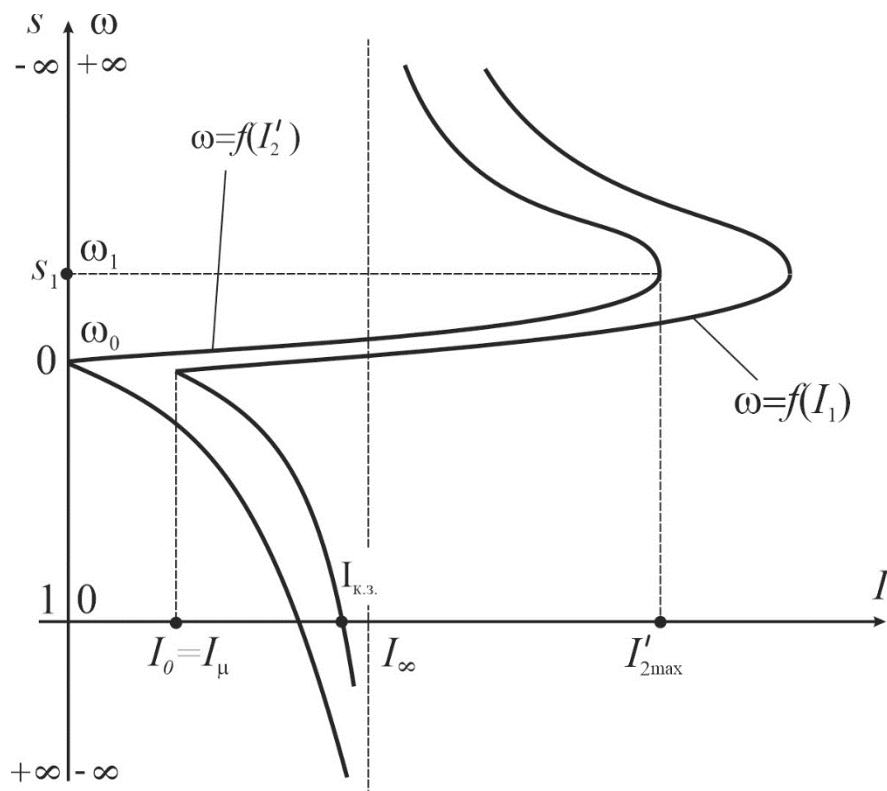


Рисунок 2 – Електромеханічні характеристики АД за струмом ротора $\omega = f(I'_2)$ та статора $\omega = f(I_1)$

Часто електромеханічну характеристику АД представляють у вигляді залежності струму від ковзання. На рис. 2 наведено якісний вигляд

електромеханічної характеристики $\omega = f(I_1)$, $\omega = f(I_2')$, де по осі ординат відкладені кутова швидкість і ковзання, які пов'язані між собою співвідношенням:

$$\omega = \omega_0(1 - s), \quad (4)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість обертання АД, с^{-1} .

На електромеханічній характеристиці відмічають наступні характерні точки:

- ідеального холостого ходу, коли $s = 0$, $\omega = \omega_0$, $I_2' = 0$, $I_1 = I_\mu$;
- короткого замикання (пуску), коли $s = 1$, $\omega = 0$, $I_1 = I_{\text{к.з.}}$;
- максимального значення струму в області від'ємних ковзань, коли

$$s_1 = \frac{-R_2'}{R_1}, \quad \omega_1 = \omega_0(1 - s_1), \quad I_2' = I_{2\text{max}}' = \frac{U_\phi}{X_k};$$

- асимптотичне значення струму ротора при необмеженому збільшенні ковзання і швидкості, коли

Рівняння механічної характеристики АД отримують з рівняння балансу потужності в колі ротора.

Момент, що розвивається АД [1]:

$$M = \frac{3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s} = \frac{3 \cdot U_\phi^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{ном}}} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}. \quad (5)$$

Крива $M = f(s)$ має два максимуми: один відповідає генераторному режиму, а інший – режиму двигуна. Максимум досягається за критичного ковзання [1]:

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (6)$$

Значення максимального (критичного) моменту [1]:

$$M_{\text{max}} = \frac{3 \cdot U_\phi^2}{2 \cdot \omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (7)$$

						Лист
					7.141.230748.ПЗ	13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

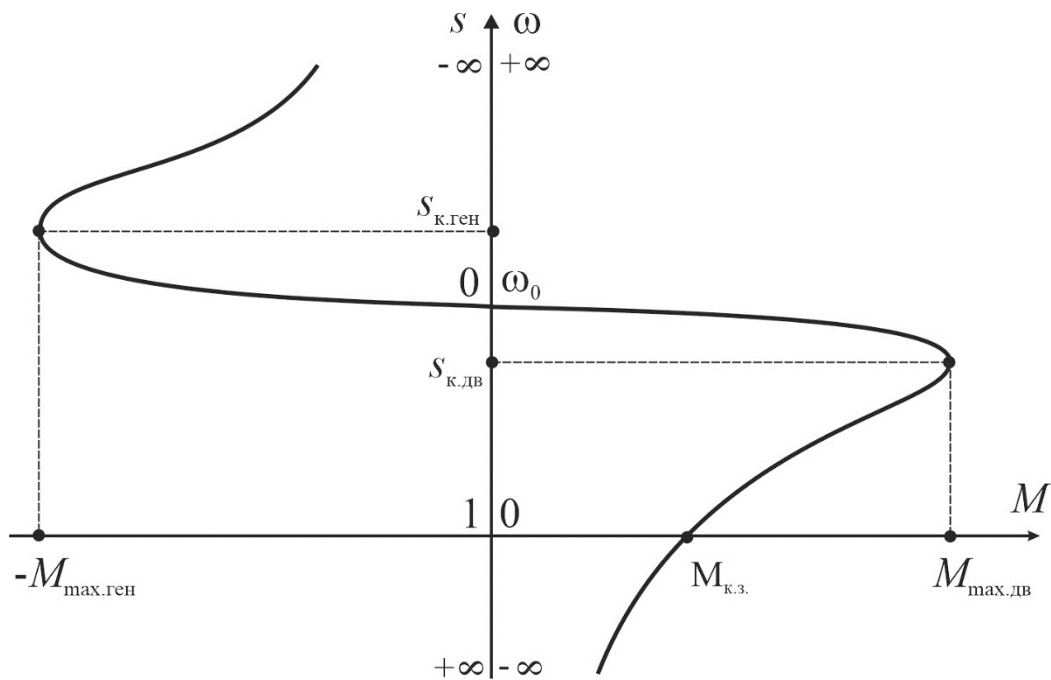


Рисунок 3 – Механічна характеристика АД

Якщо вираз (5) розділити на (7) і провести нескладні математичні перетворення отримують вираз для механічної характеристики АД, яку часто називають формулою Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max} \cdot (1 - a \cdot s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot a \cdot s_k}, \quad (8)$$

де $a = \frac{R_1}{R'_2}$ – коефіцієнт.

На рис. 3 наведено якісний вигляд механічної характеристики АД та її характерні точки:

- ідеального холостого ходу, коли $s = 0$, $\omega = \omega_0$, $M = 0$;
- короткого замикання (пуску), коли $s = 1$, $\omega = 0$, $M = M_{\text{к.з.}} = M_{\text{пуск}}$;
- точки максимальних моментів (режими генератора і двигуна), коли $s = s_{\text{к.дв.}}$, $\omega = \omega_{\text{к.дв.}}$, $M = M_{\text{маx.дв.}}$; $s = -s_{\text{к.ген.}}$, $\omega = \omega_{\text{к.ген.}}$, $M = -M_{\text{маx.ген.}}$;
- номінального режиму, коли $s = s_{\text{ном.}}$, $\omega = \omega_{\text{ном.}}$, $M = M_{\text{ном.}}$;
- асимптота механічної характеристики (вісь швидкості), коли $s \rightarrow \pm\infty$, $\omega \rightarrow \pm\infty$, $M \rightarrow 0$.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

1.2 Робочі характеристики асинхронного двигуна

Робочі характеристики АД (s, ω або $n, M_2, I_1, \cos \varphi_1, \eta, P_1 = f(P_2)$) при $U_1 = const, f_1 = const$) дозволяють віднаходити всі основні величини, що визначають режим роботи електродвигуна за різного за значенням навантаження. Якісний вигляд робочих характеристик наведено на рис. 4.

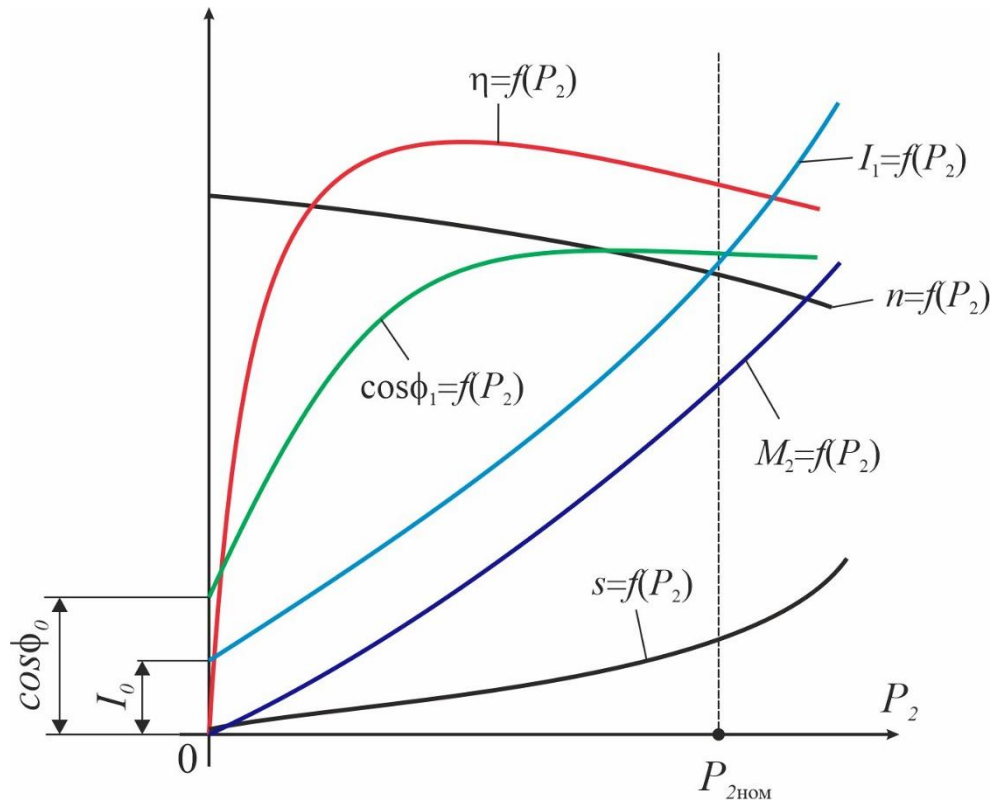


Рисунок 4 – Робочі характеристики АД

Характеристика швидкості $n = f(P_2)$ або $s = f(P_2)$. В режимі холостого ходу (х. х.), коли $P_2 = 0$, ротор АД має швидкість $n \approx n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$ (f_1 – частота струму в роторі; p – число пар полюсів).

При збільшенні навантаження на двигун швидкість n зменшується, а величина ковзання зростає у відповідності до співвідношення $s = \frac{P_{ел.2}}{P_{ем}}$ ($P_{ел.2}$ – втрати потужності в обмотці ротора; $P_{ем}$ – електромагнітна потужність АД). Зазвичай коли $P_2 = P_{ном}$ величина ковзання знаходиться в межах $s = 1,5...5\%$. В зв'язку з цим залежність $n = f(P_2)$ представляє собою лінію з незначним ухилом до осі абсцис.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Характеристика струму статора $I_1 = f(P_2)$. Струм статора має дві складові: постійну та змінну. Перша складова є струмом намагнічування і співпадає по фазі з магнітним потоком, а змінна складова є активною і визначається величиною навантаження на двигун. В режимі х. х. струм статора дорівнює струму холостого ходу, який може сягати до 40% від номінального значення. При збільшенні потужності P_2 збільшується змінна (активна) складова струму, а разом з нею зростає і струм статора.

Характеристика обертового моменту $M_2 = f(P_2)$. До номінального навантаження і включно $n \approx const$, то залежність моменту від корисної потужності має практично такий же якісний вид, як і характеристика $I_1 = f(P_2)$.

Залежність $\cos \varphi_1 = f(P_2)$. Відомо, що АД споживає з мережі значний струм холостого ходу, який практично не залежить від навантаження P_2 при зміні цього навантаження в межах від P_0 до $P_2 = P_{ном}$ [2]. Для х. х. коефіцієнт потужності не перевищує значення $\cos \varphi_1 \leq 0,2$, але при збільшенні навантаження він досить інтенсивно зростає і досягає максимального значення при $P_2 \approx P_{ном}$. При подальшому збільшенні навантаження, коли $P_2 > P_{ном}$, суттєво зростають магнітні потоки розсіювання, внаслідок чого зростає реактивна складова струму, а разом з цим зростає кут φ_1 , тобто $\cos \varphi_1$ зменшується.

Залежність $\eta = f(P_2)$. Ця характеристика для АД має якісний вигляд аналогічний як і для машин інших типів та трансформаторів. За незначних навантажень (близько до режиму х. х.) сильний вплив на значення ККД мають постійні втрати, тому значення ККД низькі. З ростом навантаження зростають змінні втрати, які пропорційні квадрату струму (постійні залишаються незмінними), і при досягненні рівності між постійними та змінними втратами значення ККД виходить на свій максимум (в межах 80...96%). АД конструюють таким чином, що би максимум ККД досягався за потужності P_2 дещо меншої від номінального значення.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Методи отримання основних характеристик асинхронного двигуна

Електромеханічні, механічні та робочі характеристики асинхронного електричного двигуна можна отримати експериментально або аналітичним шляхом [6]. На сьогодні в рамках експериментального дослідження характеристик електричних машин виділяють два основних методи:

- опосередкований метод в основі якого лежать дані отримані при проведенні дослідів неробочого ходу (н. х.) та короткого замикання (к. з.);
- метод безпосереднього навантаження.

У випадку використання опосередкованого методу експериментального визначення характеристик АД їх розраховують та будують за допомогою колової діаграми [1, 6]. Для того аби отримати колову діаграму необхідно мати параметри схеми зміщення АД, які в свою чергу визначають в результаті проведення дослідів неробочого ходу та короткого замикання.

Дослід неробочого ходу або холостого ходу передбачає роботу АД без навантаження на валу, тобто момент статичного навантаження на валу двигуна $M_c = 0$ і корисна потужність $P_2 = 0$. Для виконання цього дослідів в складі лабораторної установки необхідно мати регульоване джерело живлення з можливістю регулювання напруги ($U_1 = (0,5...1,2) \cdot U_{1ном}$). В процесі вимірюють потужність холостого ходу P_0 , струм холостого ходу I_0 та напругу U_1 , за отриманими даними отримують точку ідеального холостого ходу колової діаграми.

Під час проведення **дослідів короткого замикання** ротор АД гальмується ($n = 0$), а його обмотка замикається накоротко. При цьому, аби уникнути перегріву обмоток, дослід проводять на зниженій напрузі, щоб виконувалась умова $I_{1к.з.} \leq 1,2 \cdot I_{1ном}$. В процесі дослідів к. з. вимірюють потужність короткого замикання $P_{1к.з.}$, струм короткого замикання $I_{1к.з.}$ та напругу короткого замикання $U_{1к.з.}$. В результаті отримують точку короткого замикання колової діаграми.

Таким чином, отримані точки н. х. та к. з. за результатами відповідних дослідів дозволяють побудувати колову діаграму АД.

Характеристики отримані у такий спосіб мають низьку точність, а сам спосіб потребує графічної роботи.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Другий експериментальний метод є методом безпосереднього навантаження АД і може бути реалізованим:

- навантаженням без віддачі енергії в мережу;
- навантаженням з віддачою енергії в мережу;
- шляхом взаємного навантаження.

Засобом для навантаження електричних машин усіх типів та видів без повернення енергії в мережу є гальмівні пристрої робота яких заснована на різних принципах (фрикційні, гідравлічні гальма; електромагнітні гальма).

Фрикційні гальмівні пристрої в своїй конструкції мають пару тертя яка складається з металевого диску, що обертається та колодки чи стрічки з шаром фрикційного матеріалу які притискаються з певним зусиллям до диску. Недоліками такого способу є складність і низька точність регулювання моменту опору та певні проблеми з відводом тепла з зони тертя.

Гідравлічні гальма працюють на проточній воді, яка виносить тепло, що виділяється. Плюсом такого рішення є регульованість процесу та робота з великими значеннями потужності. Основним недоліком можна вважати складність конструкції та маса установки.

Електромагнітні гальмівні пристрої засновані на дії вихрових струмів в металевих масах. Легко регулюються але момент опору, що ними створюється зменшується із зменшенням частоти обертання і майже дорівнює нулю в стані спокою. У випадку незначної потужності двигуна (приблизно до 2 кВт) диск може розміщуватись безпосередньо на валу машини, якщо ж потужність значна, то гальму потрібні власні підшипники. Також у випадку великих частот обертання гальмо створює відчутні втрати об повітря, які ні яким чином не враховуються.

Областю використання гальмівних пристроїв є випробування двигунів настільки малої потужності, що схеми з поверненням не дають економії енергії, а також якщо це продиктовано властивостями машини, що навантажуються.

Для навантаження з поглинанням енергії в реостатах підходять генератори постійного струму, набагато рідше використовуються синхронні генератори, а асинхронні генератори для таких цілей взагалі непридатні.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Принцип дії схем **навантаження з віддачою енергії** (взаємне навантаження також, як їх окремий випадок) заснований на послідовному перетворенні електричної енергії в механічну і потім знову в електричну. Подібні схеми мають в складі декілька електричних машин. Електричне коло установки починається з двигуна, який отримує живлення від первинного джерела, і закінчується генератором, який повертає джерелу частину затраченої енергії. Схеми навантаження з віддачою енергії енергетично зворотні, а тому це дає можливість навантажувати випробуваний двигун в обох режимах роботи без зміни схеми, тільки зміною напрямку енергії в ній.

Під **взаємним навантаженням** розуміють роботу двох електричних машин, що з'єднані електрично і механічно так, що одна з них працює генератором і віддає енергію іншій машині, яка в даний момент працює двигуном. Притік енергії зовні потрібен лише для компенсації втрат. Цей метод дозволяє випробувати електричні машини значної потужності в умовах обмеження по потужності з боку джерела живлення.

Способи з безпосереднім навантаженням дозволяють отримати робочі характеристики в досить вузькому діапазоні навантажень (від холостого ходу до незначного перевантаження ($1,25 \cdot I_{ном}$)).

Аналітичний метод передбачає відповідну кількість математичних розрахунків, які з використанням комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення суттєво спрощують дану задачу.

Математична модель системи займає центральне місце в процесі математичного дослідження і від її адекватності цілком залежить отриманий результат [7]. Розвиток електронно-обчислювальних машин та спеціалізованих прикладних комп'ютерних програм дозволило підняти рівень математичного моделювання електромеханічних систем на якісно новий рівень. Найбільш наближеними до реальності методами дослідження електромеханічних систем є методи, засновані на дослідженні тривимірних електромагнітних та теплових полів, які використовують диференціальні рівняння у часткових похідних.

Одним з найпоширеніших програмних комплексів є пакет MATLAB, розроблений фірмою MathWorks. До інструментів пакету MATLAB входить

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

програма структурного математичного моделювання Simulink, основною особливістю якої є необхідність створення на базі математичного опису досліджуваного об'єкта його структурної схеми. За допомогою бібліотеки SimPowerSystems надається можливість складання схем з віртуальних аналогів реальних електротехнічних виробів: електродвигунів різних типів, напівпровідникових силових елементів: тиристорів, транзисторів, силових трансформаторів та інше [7].

Аналітичні методи розрахунку характеристик АД потребують в якості вихідних даних його каталожні дані; результати дослідів х. х., к. з.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТИПУ АОЛ2-31-4 МЕТОДОМ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

2.1. Паспортні дані досліджуваного асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4

В лабораторіях кафедри «Електротехніка та електромеханіка» Українського державного університету науки і технологій в навчальному процесі використовуються асинхронні електричні двигуни з короткозамкненим ротором типу АОЛ2-31-4.

Технічні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу АОЛ2-31-4 наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Паспорт асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4

Тип двигуна	Паспортні дані							Розрахункові дані	
	$P_{\text{НОМ}}$	$U_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{НОМ}}$	$n_{\text{НОМ}}$	$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$	$\eta_{\text{НОМ}}$	J	p	$M_{\text{НОМ}}$
	кВт	В	А	об/хв	-	%	кг·м ²	-	Н·м
АОЛ2-31-4	2,2	220/380	7,8/4,5	1380	0,83	82,5	$5,6 \cdot 10^{-3}$	2	15,2

Асинхронні двигуни загального призначення серій А2, АО2, АОЛ2 розроблялись в 1959 році і мали дев'ять габаритів з висотами осі обертання 90...280 мм. В машинах цих серій застосовувалась обмотка з ізоляцією у вигляді тонких шарів з новітніми на той час ізоляційними матеріалами. Ряд потужностей мав 19 ступеней від 0,6 Вт до 100 кВт.

Станом на 2024 рік машини цих серій не випускаються але велика їх кількість знаходиться в експлуатації.

В довідниковій літературі дуже обмежений об'єм інформації щодо двигунів цих серій. Актуальність роботи по визначенню характеристик даного асинхронного двигуна пояснюється також необхідністю мати реальні характеристики, оскільки після ремонту вони як правило, відрізняються від розрахункових.

2.2. Лабораторний стенд для випробування асинхронних двигунів методом безпосереднього навантаження

Схема лабораторного стенду для дослідження характеристик АД методом безпосереднього навантаження наведена на рис. 5.

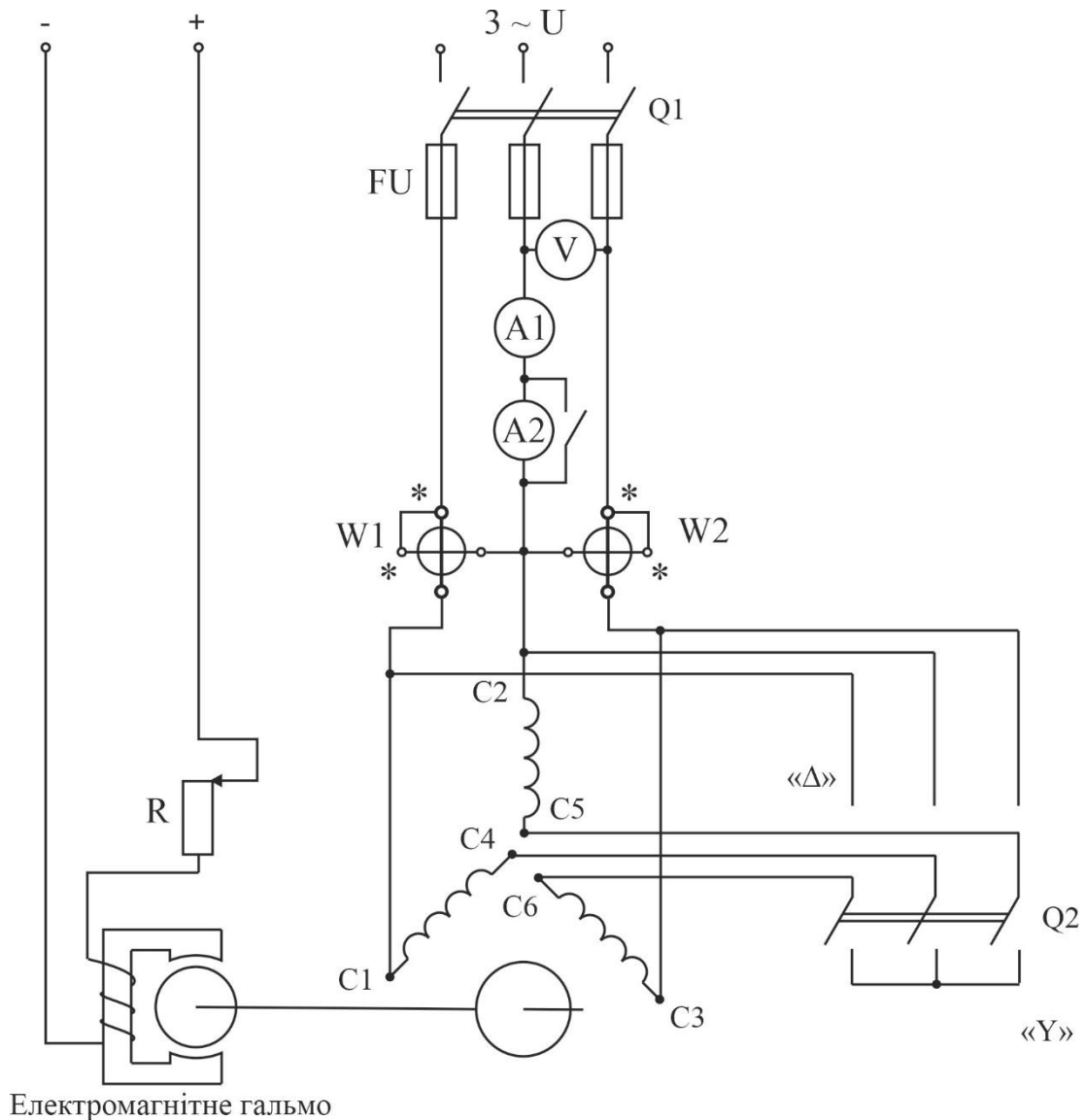


Рисунок 5 – Схема лабораторного стенду

Навантаження на валу досліджуваного АД створює електромагнітне гальмо, конструкція якого представляє собою металевий диск, що жорстко з'єднаний з валом АД та обертається в магнітному полі створеному котушками, які в свою чергу живляться від джерела постійного струму. В електромагнітному гальмі гальмівний момент виникає внаслідок взаємодії вихрових струмів, що наводяться в сталевому диску під час його обертання, із магнітним полем, яке утворене

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

котушками. Регулюванням величини струму, що протікає по котушкам змінюють величину моменту опору на валу АД.

Запуск асинхронного двигуна відбувається за схеми з'єднання обмоток статора у зірку «Y» (пускова схема). Після розгону та виходу на сталу швидкість обертання, перемикачем Q2, АД переводять на робочу схему з'єднання обмоток статора – трикутник «Δ».

Перша точка знімається, коли коло живлення електромагнітного гальма знеструмлене (реальний холостий хід).

2.3. Побудова експериментальних механічної та робочих характеристик асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4

Навантаження АД змінюється від струму холостого ходу до $(1,1 \dots 1,15) \cdot I_{\text{ном}}$. Дані вимірювань та розрахунків занесено до таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати вимірювань та розрахунків характеристик АОЛ2-31-4

Схема з'єднання			«Δ»				
Результати вимірювань	U_1	В	220	220	219	218	218
	I_1	А	5,6	6,9	8,3	9,7	10,5
	α_1	под.	-3	14	29	45	52
	α_2	под.	42	58	75	97	106
	n	об/хв	1480	1450	1430	1390	1360
	ω	с ⁻¹	154,98	151,8	149,7	145,6	142,4
	M_2	Н·м	3,8	7,6	11,4	15,2	17
Розрахункові дані	P_1	Вт	780	1440	2080	2840	3160
	S_1	ВА	2134	2629	3148	3663	3965
	$\cos \varphi_1$	-	0,37	0,55	0,66	0,78	0,79
	P_2	Вт	589	1154	1707	2212	2433
	η	-	0,76	0,8	0,82	0,78	0,77
	s	%	1,33	3,3	4,7	7,3	9,3

Табл. 2 має дві частини, одна – результати вимірювань, а інша – розрахункові величини:

- активна потужність, що підводиться до АД, Вт:

$$P_1 = C_w \cdot (\alpha_1 + \alpha_2), \quad (9)$$

де α_1, α_2 – показання першого та другого ватметрів, под.;

$C_w = 20$ Вт/под. – постійна ватметру.

- повна потужність, що підводиться до АД, ВА:

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \quad (10)$$

- коефіцієнт потужності АД:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (11)$$

- корисна потужність на валу АД, Вт:

$$P_2 = \frac{M_2 \cdot n}{9,55} \quad (12)$$

- коефіцієнт корисної дії АД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (13)$$

- величина ковзання, %:

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1} \cdot 100\% = \frac{(\omega_1 - n)}{\omega_1} \cdot 100\% \quad (14)$$

За даними табл. 2 будуються графіки робочих характеристик (рис. 6, 7, 8 та 9) та механічна характеристика (рис. 10) асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу АОЛ2-31-4. Для побудови характеристик використано пакет прикладних програм для аналізу даних і побудови графіків OriginLab2025.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

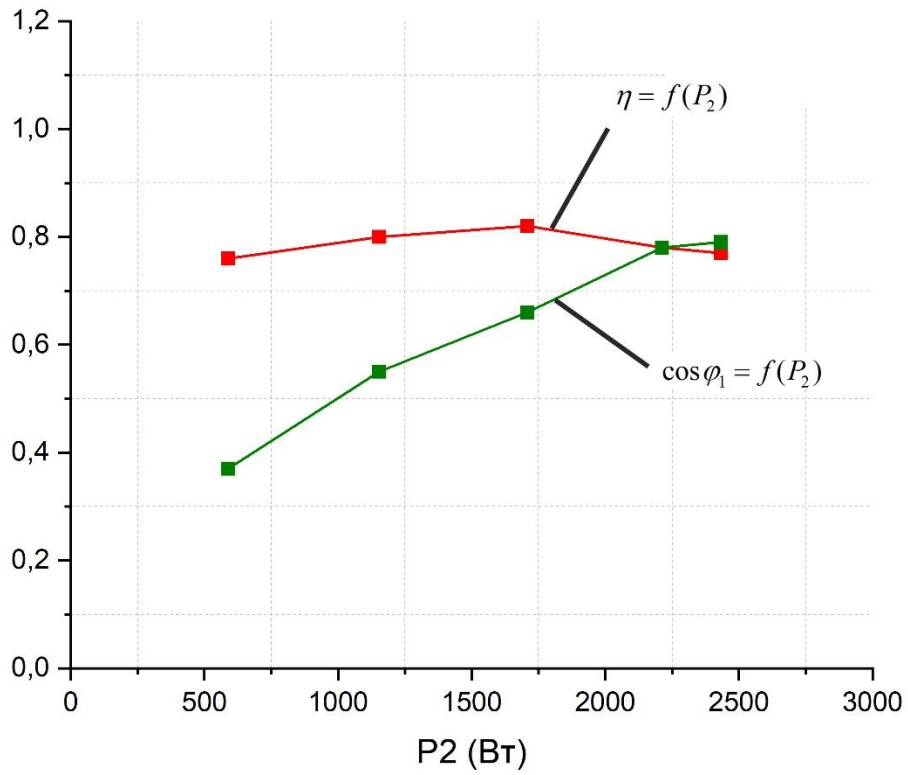


Рисунок 6 – Графік залежностей $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ (зелена крива), $\eta = f(P_2)$ (червона крива) для АД типу АОЛ2-31-4

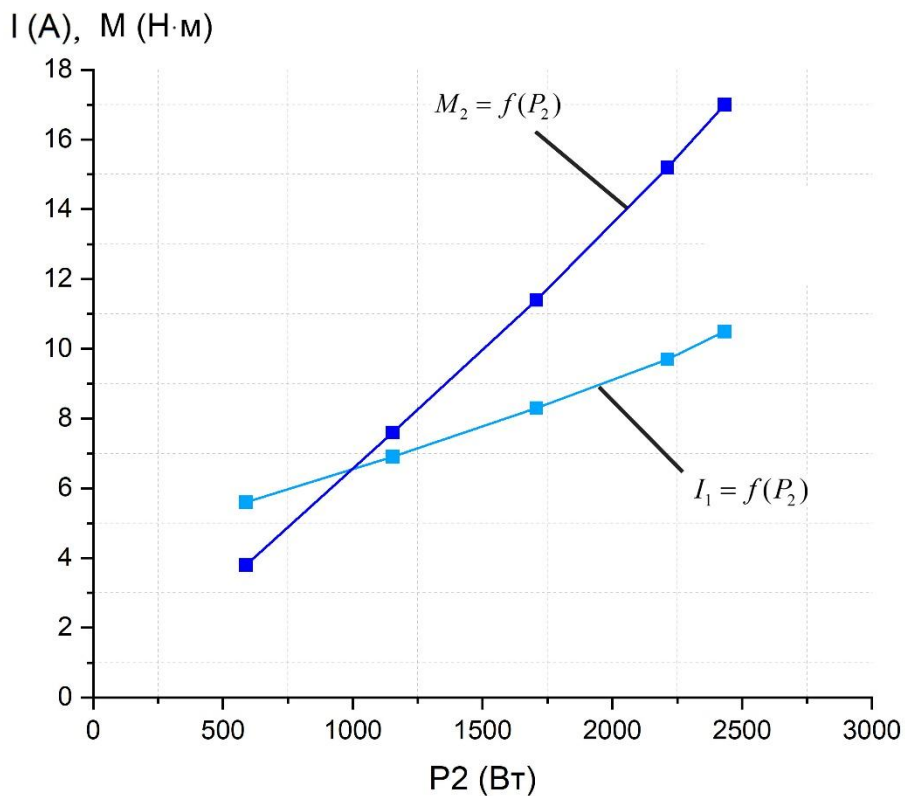


Рисунок 7 – Графік залежностей $I_1 = f(P_2)$ (блакитна крива), $M_2 = f(P_2)$ (синя крива) для АД типу АОЛ2-31-4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

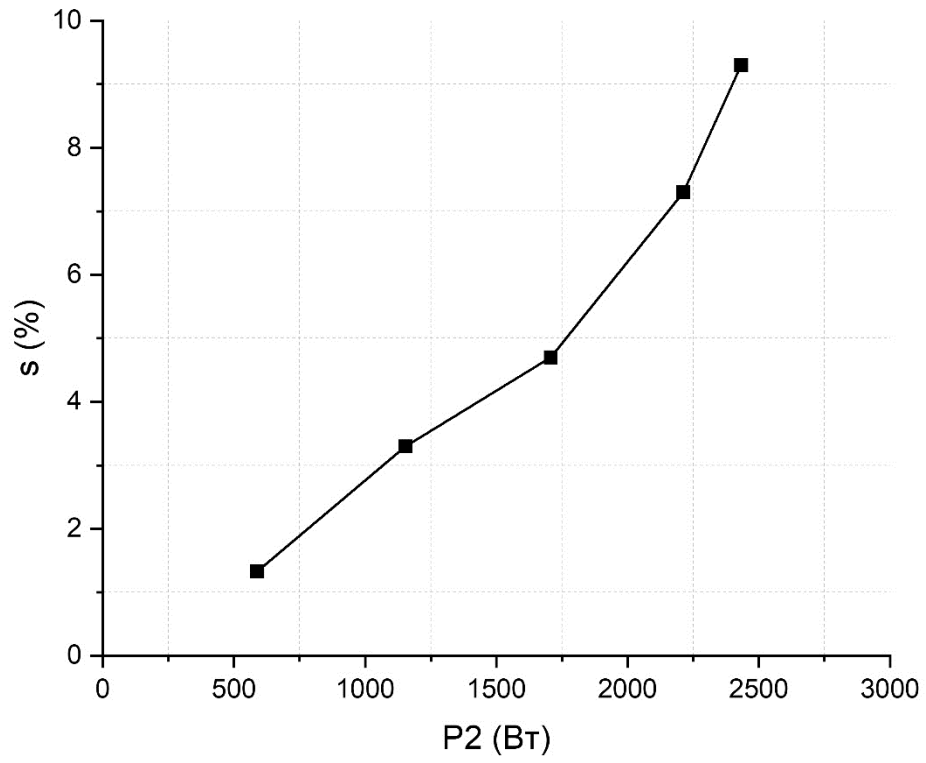


Рисунок 8 – Графік залежності $s = f(P_2)$ для АД типу АОЛ2-31-4

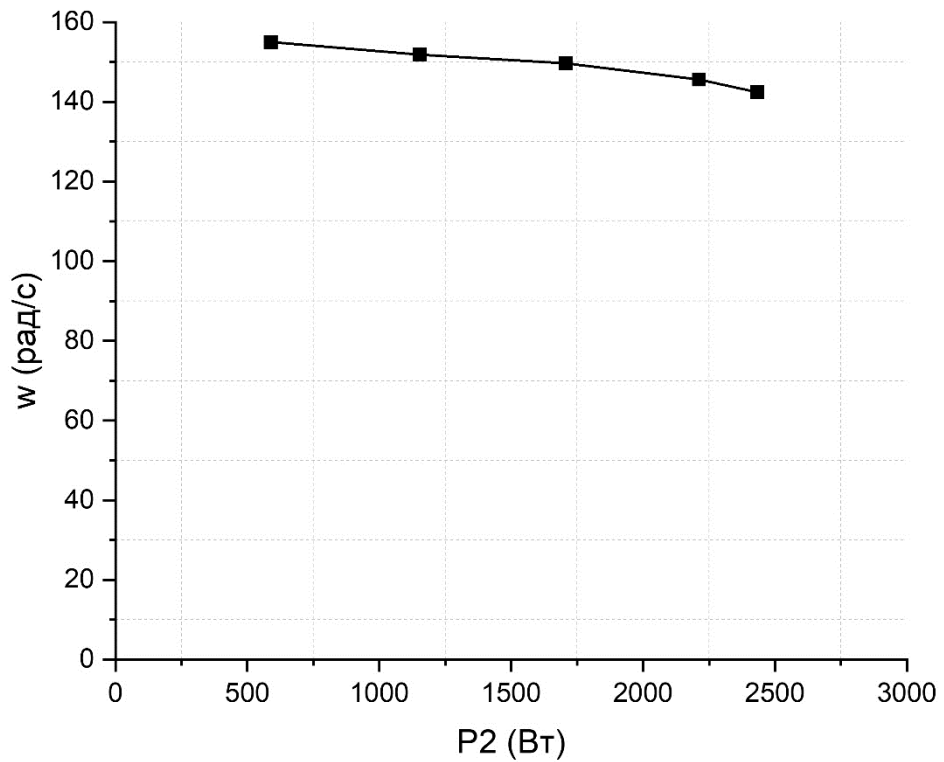


Рисунок 9 – Графік залежності $\omega = f(P_2)$ для АД типу АОЛ2-31-4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Графік експериментально отриманої механічної характеристики досліджуваного АД (рис. 10) представлено, як залежність $\omega = f(M_2)$ в першому квадранті для робочого діапазону зміни навантаження (режим роботи двигун).

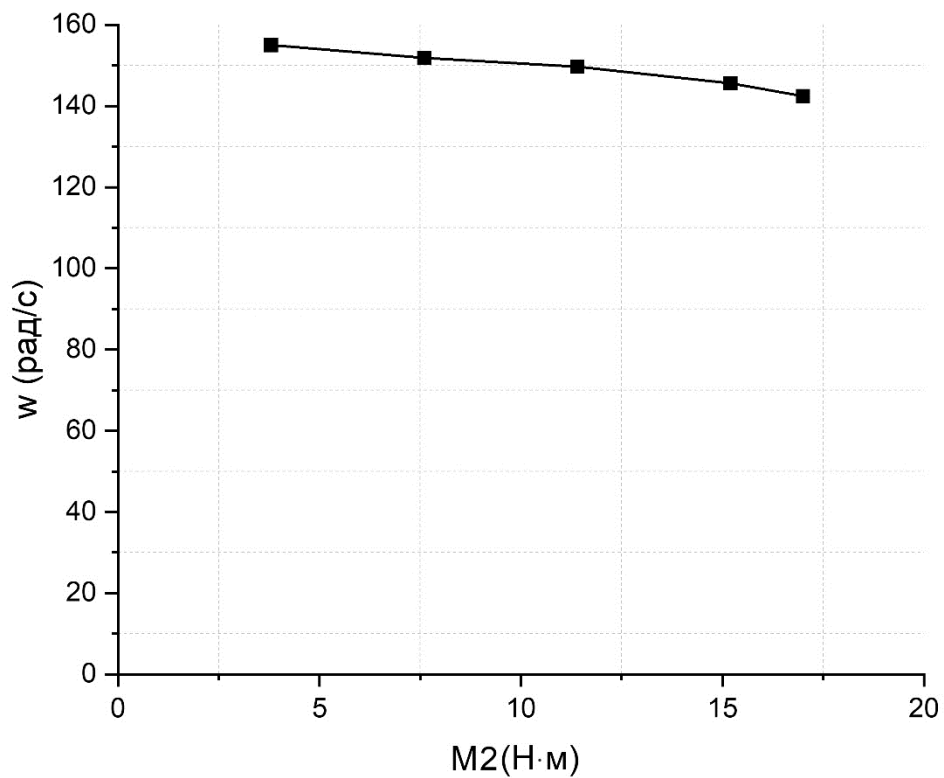


Рисунок 10 – Графік механічної характеристики АД типу АОЛ2-31-4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

7.141.230748.ПЗ

Лист

27

РОЗДІЛ 3

СТРУКТУРНО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТИПУ АОЛ2-31-4

3.1 Засоби дослідження характеристик електромеханічних перетворювачів на основі їх математичних моделей

Потужним засобом дослідження процесів функціонування, характеристик та властивостей електромеханічних перетворювачів, до яких відносяться і асинхронні електричні машини, є дослідження на основі математичних моделей – комп'ютерне моделювання [7]. В процесі дослідження, як правило, виконується певна ідеалізація елементів та блоків, що до неї входять. Це дозволяє спростити модель і підвищити ефективність експерименту, сфокусувати увагу на явищах, що досліджуються, або факторах, вплив яких досліджується. З іншого боку, надмірна ідеалізація може привести до спрощення чи спотворення отриманих результатів. В загальному випадку постановка модельного експерименту вимагає виконання наступних етапів [7]:

- формулювання мети та задачі дослідження;
- обґрунтування рівня ідеалізації об'єкту досліджень (спрощення, припущення і інше);
- створення або модифікація вже існуючої математичної моделі об'єкта;
- вибір або самостійна розробка чисельного методу розв'язання рівнянь математичної моделі;
- програмна реалізація чисельного методу;
- тестування і налагодження математичної моделі;
- аналіз отриманих результатів моделювання (оцінка адекватності та корегування моделі за необхідності).

Дослідження електромеханічних перетворювачів в сучасних умовах виконується різними методами, які ділять на теоретичні та експериментальні. Теоретичні методи базуються на використанні рівнянь балансу: енергії, маси, імпульсу, моменту та інше. Такий підхід є ефективним при дослідженні відносно простих і добре вивчених систем. Математична модель системи займає основне

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

MapleSim, Dynast, Multisim, Dymola, PSIM, SamSim, SimApp, SimulationX, Simplorer, VisSim, SystemModeler.

У світі програмних математичних пакетів зі вбудованими в них засобами математичного моделювання безперечним лідером натеper є пакет MATLAB з додатком структурного моделювання Simulink та додатками імітаційного моделювання SimPowerSystems і SimMechanics [7]. Пакет MATLAB, розроблений фірмою MathWorks. До інструментів пакета MATLAB входить програма структурного математичного моделювання Simulink, основною особливістю якої є необхідність створення на базі математичного опису досліджуваного об'єкта його структурної схеми.

3.2 Програмний комплекс MATLAB/Simulink

Програмний комплекс MATLAB/Simulink складається з наступних компонентів:

- MATLAB – ядро комплексу, реалізує широкий спектр математичних методів, засобів візуалізації даних і допоміжних засобів;
- Simulink – професійний інструмент (toolbox), призначений для структурного моделювання систем різного роду та складності. Працює Simulink під керуванням MATLAB і використовує для моделювання весь спектр його можливостей.

В складі інструменту Simulink є бібліотека SpecializedPowerSystems (SPS) яка дає можливість скласти схеми з віртуальних аналогів реальних електротехнічних виробів: електродвигунів різних типів (постійного струму з різними системами збудження, змінного струму асинхронні та синхронні, крокові, із збудженням від постійних магнітів та ін.), напівпровідникових силових елементів (тиристори, транзистори), силових трансформаторів та інше.

Також в наборі інструментарію Simulink є графічний інтерфейс користувача (GUI) для створення моделі як структурної схеми за допомогою миші (рис. 12). Simulink включає повний комплект бібліотек блоків, необхідних для створення моделі: пристрій відображення й генератори сигналів, дискретні, лінійні та нелінійні компоненти, блоки з'єднань.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- SPS- та Simulink-блоки (S-блоки) не можуть з'єднуватися один з іншим безпосередньо. Сигнал від S-блоків можна передати до SPS-блоків тільки через керовані джерела енергії SPS-бібліотеки ElectricalSources, а навпаки – через блоки бібліотек засобів вимірювання (Measurements);
- в моделі, яка отримує в собі SPS-блоки, має бути присутнім хоча б один з вимірювальних SPS-пристроїв, що пов'язано з особливостями перетворення SPS-моделі в еквівалентну розрахункову S-модель;
- в SPS-модель необхідно встановлювати блок Powergui.

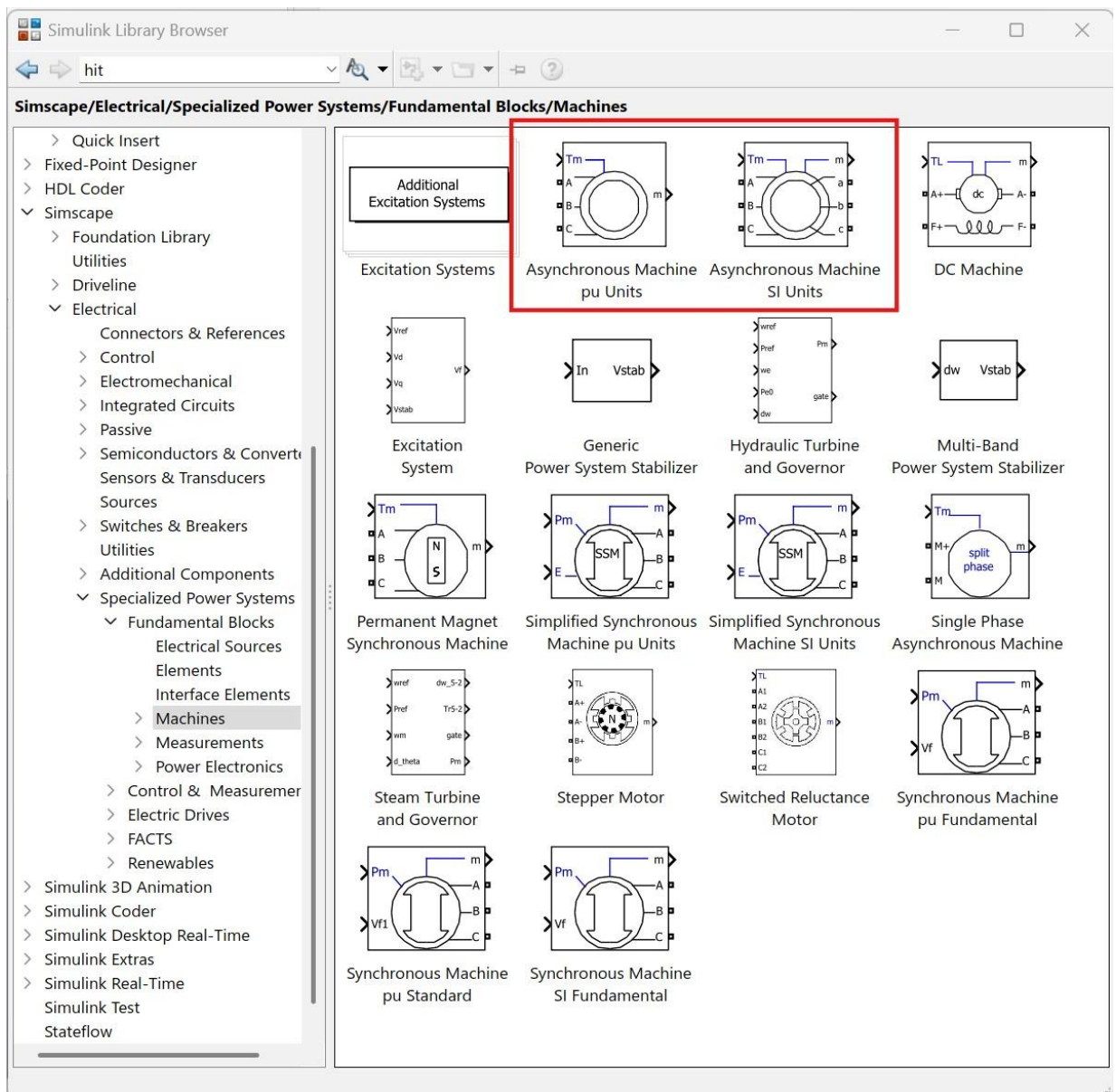


Рисунок 13 – SPS-блоки електричних машин

В розділі Machines бібліотеки SpecializedPowerSystems представлені два блоки трифазної асинхронної машини (виділені червоним прямокутником, рис. 13) [9]:

- Asynchronous Machine SI Units (асинхронна машина в абсолютних одиницях системи СИ);
- Asynchronous Machine pu Units (асинхронна машина у відносних одиницях).

Вказані блоки мають порти A, B, C та a, b, c які відповідають «електричним» затискачам статора і ротора відповідно. Крім цього моделі мають один «механічний» вхід та векторний «інформаційний» вихід m (від англійського measurements) за допомогою якого відбувається вивід та подальша обробка/фіксація сигналів засобами стандартних блоків Simulink.

Зовнішній вигляд блоків Asynchronous Machine (рис. 13) визначається типом ротора та механічного входу, які встановлюються за допомогою параметру Rotor type і Mechanical input вкладки Configuration (рис. 14) [7].

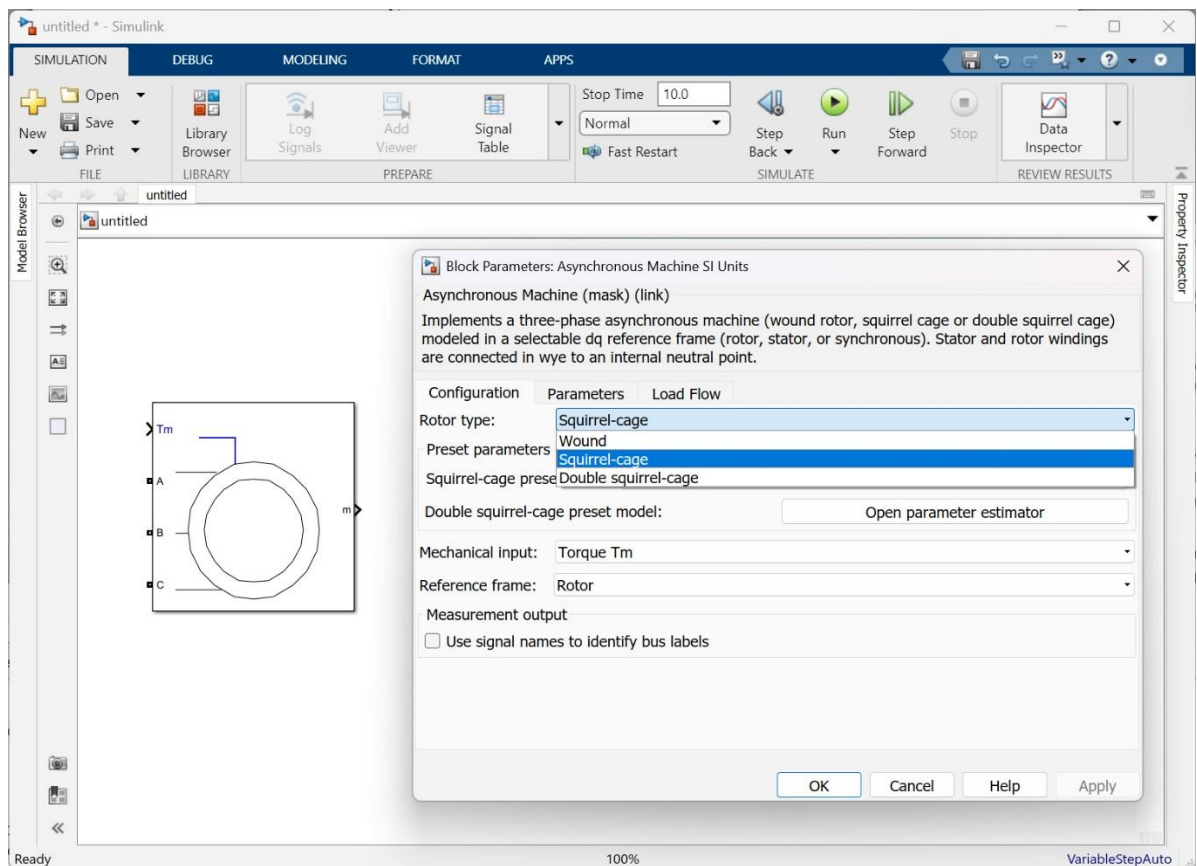


Рисунок 14 – Вкладка Configuration діалогового вікна встановлення параметрів SPS-блоку Asynchronous Machine SI Units

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Механічний Simscare-порт призначений для створення механічних навантажень за допомогою інших блоків бібліотеки Simscare, що мають механічні обертові порти.

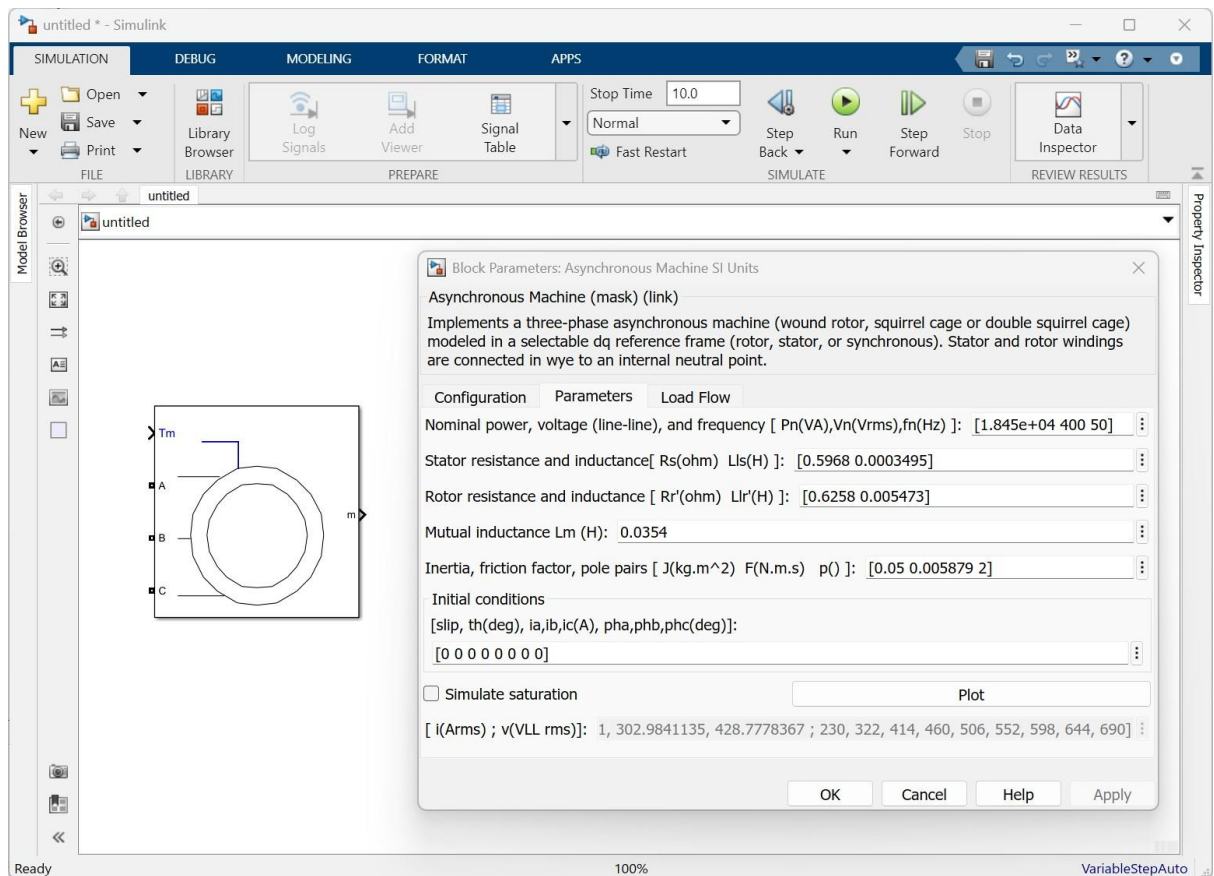


Рисунок 15 – Вкладка Parameters діалогового вікна встановлення параметрів SPS-блоку Asynchronous Machine SI Units

Вкладка Parameters (рис. 15) діалогового вікна установки/вибору параметрів SPS-блоку дозволяє встановити значення наступних параметрів асинхронного двигуна [7]:

- Nominal power – номінальна потужність двигуна, В·А;
- Voltage (line-line) – діюче (ефективне), або середньоквадратичне значення номінальної лінійної напруги статора, В;
- Frequency – номінальна частота напруги живлення (Гц);
- Stator resistance – активний опір фази обмотки статора, Ом;
- Stator inductance – індуктивність розсіяння фази обмотки статора, Гн;
- Rotor resistance – активний опір фази обмотки ротора, що приведений до статора, Ом;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- Rotor inductance – індуктивність розсіяння фази обмотки ротора, що приведена до статора, Гн;
- Mutual inductance – головна взаємна індуктивність, Гн;
- Inertia – момент інерції ротора, кг м²;
- Pole pairs – кількість пар полюсів АД;
- Friction factor – коефіцієнт в'язкого тертя, Н·м/с⁻¹;
- Initial conditions – початкові умови за координатами: ковзання, кутове положення ротора, амплітуди та фазові кути струмів фаз статора та (якщо треба) ротора;
- Simulate saturation – при наявності в полі цього параметру прапорця буде враховуватись ефект насичення магнітного кола за табличними даними кривої намагнічування. Вводиться у вигляді дворядкової матриці параметру Saturation Parameters (перший стовбець цієї матриці отримує координати тієї точки кривої намагнічування, з якої починає проявлятися ефект насичення, тобто він повинен бути ненульовим).

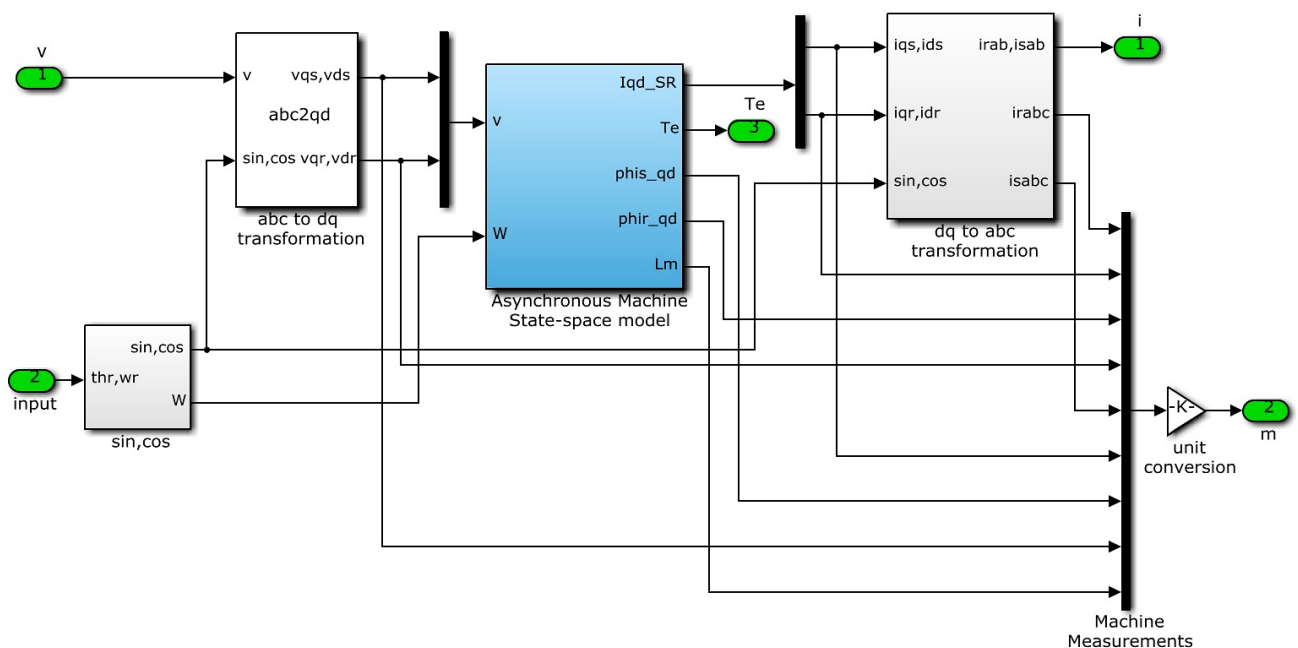


Рисунок 16 – Еквівалентна Simulink-модель, що лежить в основі моделей асинхронної машини в бібліотеці SpecializedPowerSystems

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.3 SPS-модель асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4

Для дослідження характеристик асинхронного двигуна методом математичного моделювання необхідно мати інформацію про параметри машини. Особливо важливими є електромагнітні параметри бо вони в більшій мірі визначають статичні та динамічні характеристики АД.

В роботі в якості основних електромагнітних параметрів асинхронного двигуна з урахуванням традиційної ідеалізації процесів у ньому прийняті параметри Г-подібної схеми заміщення АД (рис. 1): активні опори обмоток статора і ротора; індуктивний опір кола намагнічування; індуктивні опори розсіяння статора і ротора.

На сучасні електричні машини загальнопромислового виконання їх електромагнітні параметри є доступними на сайтах виробників або в довідниковій літературі.

На асинхронний двигун типу АОЛ2-31-4 в літературі надаються його паспортні дані, а електромагнітні параметри відсутні, тому для їх визначення в роботі використано інженерну методику [10, 11], яка дає добрі результати.

Додатково до паспортних даних АОЛ2-31-4 (табл. 1) з каталогу виписані його:

- $k_{M_{\max}} = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = 2,2$ – кратність максимального (критичного) моменту;
- $k_{M_{\text{п}}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}} = 1,8$ – кратність пускового моменту;
- $k_{I_{\text{п}}} = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}} = 7$ – кратність пускового струму.

Величина опору обмотки статора [7]:

$$R_1 \approx \frac{U_{\text{ном.л}}^2 \cdot (1 - s_{\text{ном}})}{2 \cdot b \cdot \left(1 + \frac{b}{s_k}\right) \cdot k_{M_{\max}} \cdot (P_{\text{ном}} + \Delta p_{\text{мех}})}, \quad (15)$$

$$\text{де } b = 1 + s_{\text{НОМ}} = 1 + \left(1 - \frac{n_{\text{НОМ}}}{n_0}\right) = 1 + \left(1 - \frac{n_{\text{НОМ}}}{60 \cdot f_1} \cdot \frac{p}{2}\right) = 1 + \left(1 - \frac{1380}{60 \cdot 50}\right) = 1,08;$$

s_k – критичне ковзання;

$U_{\text{НОМ.Л}}$ – лінійне значення номінальної напруги статора АД;

$\Delta p_{\text{мех}} \approx (0,01 \dots 0,05) \cdot P_{\text{НОМ}} = 0,035 \cdot 2200 = 77$ Вт – механічні втрати в асинхронному двигуні типу АОЛ2-31-4.

Значення критичного ковзання АД типу АОЛ2-31-4 [7]:

$$s_k \approx \frac{k_{M \max} + \sqrt{k_{M \max}^2 + 2 \cdot s_{\text{НОМ}} \cdot (k_{M \max} - 1) - 1}}{1 - 2 \cdot s_{\text{НОМ}} \cdot (k_{M \max} - 1)} \cdot s_{\text{НОМ}}, \quad (16)$$

після підстановки числових даних у формулу (16) отримуємо:

$$\begin{aligned} s_k &\approx \frac{k_{M \max} + \sqrt{k_{M \max}^2 + 2 \cdot s_{\text{НОМ}} \cdot (k_{M \max} - 1) - 1}}{1 - 2 \cdot s_{\text{НОМ}} \cdot (k_{M \max} - 1)} \cdot s_{\text{НОМ}} = \\ &= \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot (2,2 - 1) - 1}}{1 - 2 \cdot 0,8 \cdot (2,2 - 1)} \cdot 0,08 = 0,42 \end{aligned}$$

Номінальне значення напруги та ковзання, розраховані коефіцієнт b , механічні втрати $\Delta p_{\text{мех}}$ та критичне ковзання s_k підставляються у вираз (15):

$$R_1 \approx \frac{U_{\text{НОМ}}^2 \cdot (1 - s_{\text{НОМ}})}{2 \cdot b \cdot \left(1 + \frac{b}{s_k}\right) \cdot k_{M \max} \cdot (P_{\text{НОМ}} + \Delta p_{\text{мех}})} = \frac{380^2 \cdot (1 - 0,08)}{2 \cdot 1,08 \cdot \left(1 + \frac{1,08}{0,42}\right) \cdot 2,2 \cdot (2200 + 77)} = 3,44 \text{ Ом.}$$

Приведене значення еквівалентного активного опору обмотки ротора [7]:

$$R'_2 \approx \frac{P_{\text{НОМ}} + \Delta p_{\text{мех}}}{3 \cdot (1 - s_{\text{НОМ}}) \cdot k_{M \max}^2 \cdot I_{\text{НОМ}}^2}. \quad (17)$$

Підставивши дані в вираз (17) отримаємо:

									Лист
									38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$R'_2 \approx \frac{P_{\text{НОМ}} + \Delta p_{\text{мех}}}{3 \cdot (1 - s_{\text{НОМ}}) \cdot k_{\text{МП}}^2 \cdot I_{\text{НОМ}}^2} = \frac{2200 + 77}{3 \cdot (1 - 0,08) \cdot 7^2 \cdot 7,8^2} = 1,94 \text{ Ом.}$$

Значення сумарного індуктивного опору статорного кола і кола намагнічування визначається виразом:

$$X_{10} = X_0 + X_{1\sigma} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot I_0}\right)^2 - R_1^2}, \quad (18)$$

де $X_{1\sigma}$ – індуктивний опір розсіювання статора, Ом.

Значення струму статора в режимі холостого ходу (ефективне значення) можна наближено визначити за наступною формулою [7]:

$$I_0 \approx I_{\text{НОМ}} \cdot \left(\sin \varphi_{\text{НОМ}} - \frac{s_{\text{НОМ}}}{s_k} \cos \varphi_{\text{НОМ}} \right) \quad (19)$$

результат розрахунку наведено нижче

$$I_0 \approx I_{\text{НОМ}} \cdot \left(\sin \varphi_{\text{НОМ}} - \frac{s_{\text{НОМ}}}{s_k} \cos \varphi_{\text{НОМ}} \right) = 7,8 \cdot \left(0,493 - \frac{0,08}{0,42} \cdot 0,87 \right) = 2,6 \text{ А.}$$

Тоді після підстановки даних у формулу (18) отримаємо значення сумарного індуктивного опору статорного кола і кола намагнічування:

$$X_{10} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot I_0}\right)^2 - R_1^2} = \sqrt{\left(\frac{220}{\sqrt{3} \cdot 2,6}\right)^2 - 3,44^2} = 48,8 \text{ Ом.}$$

Сумарний індуктивний опір розсіювання визначається з виразу для критичного ковзання [7]:

$$X_{\text{кз}} = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = \sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_k}\right)^2 - R_1^2}, \quad (20)$$

де $X'_{2\sigma}$ – приведені значення індуктивного опору розсіювання ротора, Ом.

									Лист
									39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	7.141.230748.ПЗ				

Окремі індуктивні опори розсіювання складно розділити, тому в першому наближенні дозволяється прийняти [7]:

$$X_{1\sigma} \approx X'_{2\sigma} \approx \frac{X_{кз}}{2}, \quad (21)$$

після чого можна з урахуванням виразу (18) обрахувати значення індуктивного опору контуру намагнічування X_0 .

Результати обрахунків індуктивних опорів наведено нижче:

$$X_{кз} = \sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_k}\right)^2 - R_1^2} = \sqrt{\left(\frac{1,94}{0,42}\right)^2 - 3,44^2} = 3,09 \text{ Ом};$$

$$X_{1\sigma} \approx X'_{2\sigma} \approx \frac{X_{кз}}{2} = \frac{3,09}{2} = 1,545 \text{ Ом};$$

$$X_0 = X_{10} - X_{1\sigma} = 48,8 - 1,545 = 47,255 \text{ Ом}.$$

Як було зазначено вище, SPS-модель АД в якості параметрів потребує індуктивностей розсіювання обмоток статора і ротора АД для усталеного номінального режиму роботи, а також індуктивності кола намагнічування АД в номінальному режимі.

Індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора АД для усталеного номінального режиму роботи можуть бути визначені за відомими відповідним індуктивними опорами:

$$L_{\sigma s} = L'_{\sigma r} = \frac{X_{\sigma 1}}{2\pi \cdot f_n} = \frac{X'_{\sigma 2}}{2\pi \cdot f_n} = \frac{1,545}{2\pi \cdot 50} = 0,00492 \text{ Гн}. \quad (22)$$

Індуктивність кола намагнічування асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4 в номінальному режимі:

$$L_m = \frac{X_0}{2\pi \cdot f_n} = \frac{47,255}{2\pi \cdot 50} = 0,153 \text{ Гн}. \quad (23)$$

Вираз для обчислення коефіцієнт в'язкого тертя:

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\left(\frac{2\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{60}\right)^2}. \quad (24)$$

Розрахунок значення коефіцієнт в'язкого тертя за формулою (24):

$$F = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\left(\frac{2\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{60}\right)^2} = \frac{77}{\left(\frac{2\pi \cdot 1380}{60}\right)^2} = 0,0037 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}.$$

В основу моделі, що призначається для аналізу основних характеристик асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4 покладено SPS-модель АД Asynchronous Machine SI Units (асинхронна машина в абсолютних одиницях системи СІ). Параметри асинхронного двигуна розраховані вище та внесені у відповідне діалогове вікно налаштувань (рис. 18).

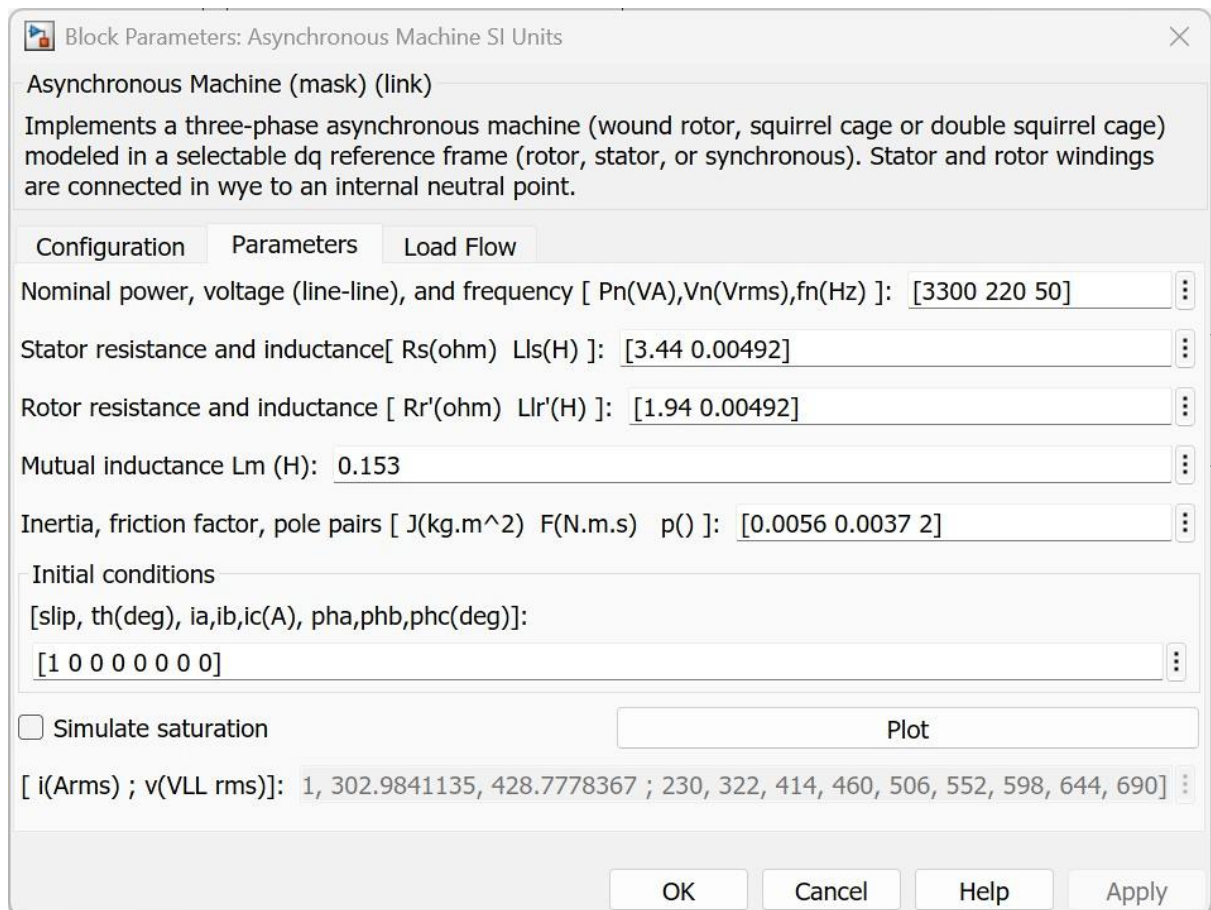


Рисунок 18 – Вкладка діалогового вікна встановлення параметрів блоку Asynchronous Machine SI Units для АД типу АОЛ2-31-4

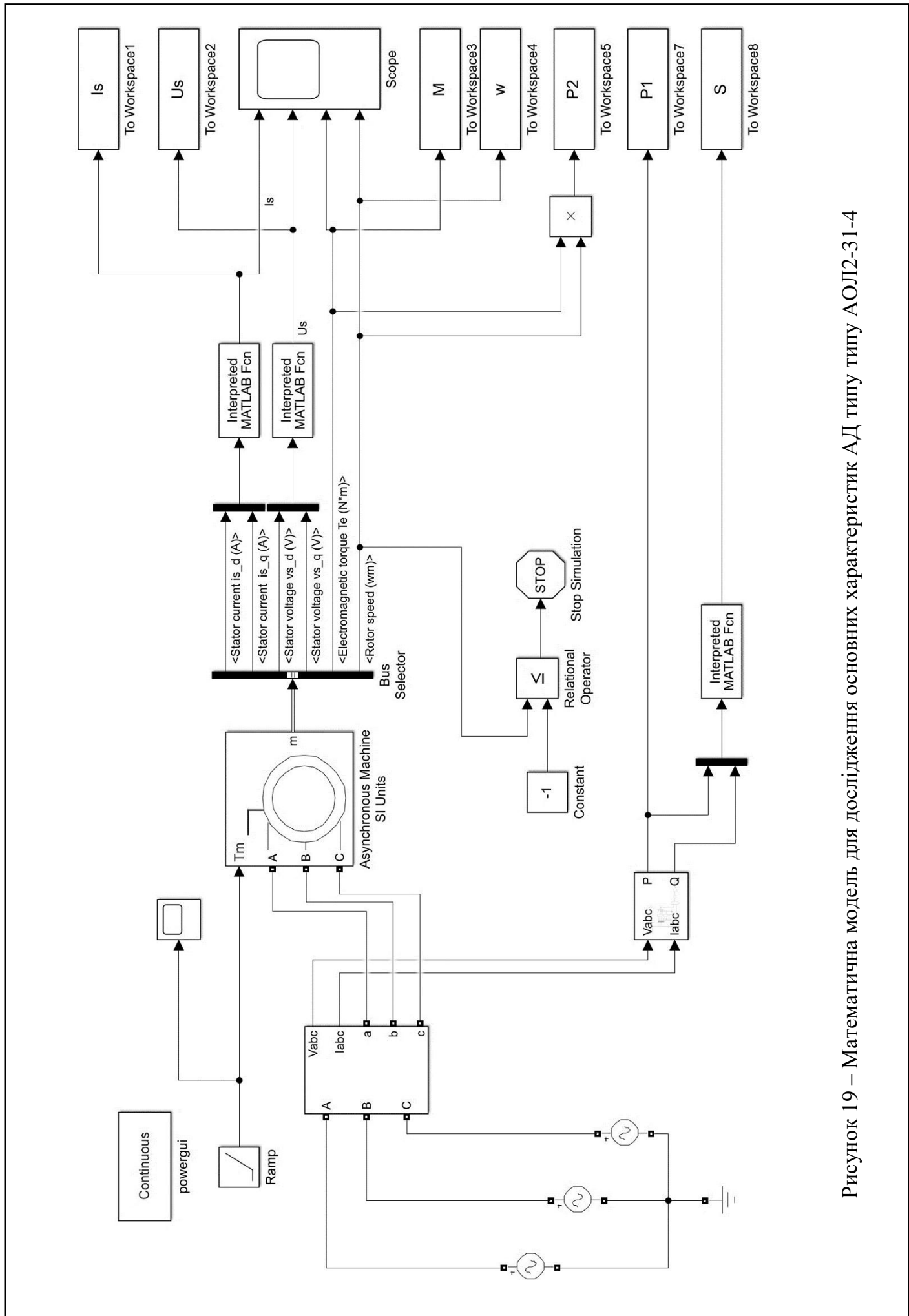


Рисунок 19 – Математична модель для дослідження основних характеристик АД типу АОЛ2-31-4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

В математичній моделі АД (рис. 19) організовано реєстрацію (блоки To Workspace) наступних поточних значень величин в функції часу:

- електромагнітного моменту;
- діючих значень струму і напруги статора;
- моменту;
- кутової швидкості валу;
- активних потужностей P_1 (потужність, що споживається АД) та P_2 (корисна потужність на валу АД);
- повної потужності, що споживається АД.

Поточні значення коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта потужності та ковзання обраховуються на основі даних отриманих від моделі за формулами відповідно (13), (11) та (14).

Ідеальне джерело напруги, від якого живиться статор АД, в моделі представлене трьома блоками AC Voltage Source, які задають симетричну трифазну систему фазних напруг з амплітудою і частотою, що відповідають номінальним параметрам АД.

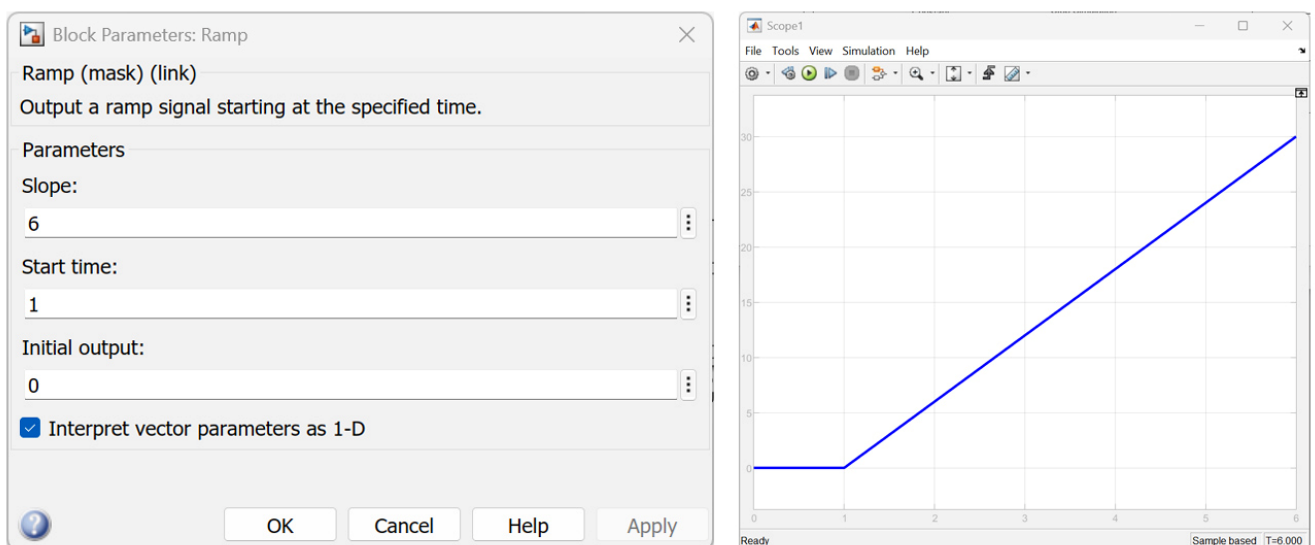


Рисунок 20 – Налаштування блоку Ramp моделі

Запропонована математична модель виконує обчислення вищеназаних величин в функції часу на основі яких будуються основні характеристики АД (механічна та робочі) через імітацію процесу навантаження досліджуваного електродвигуна. Так, спочатку, після підключення до ідеальної трифазної мережі,

двигун розганяється до усталеної швидкості без навантаження. Після цього здійснюється повільна зміна моменту статичного навантаження (блок Ramp) від нуля до деякого значення, при якому АД перекинеться. Налаштування блоку Ramp показані на рис. 20.

В результаті проведення модельного експерименту будуються робочі (рис. 21, 22, 23 та 24) та механічна (рис. 25) характеристики асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4. Для побудови графіків використано пакет прикладних програм для аналізу даних і побудови графіків OriginLab2025.

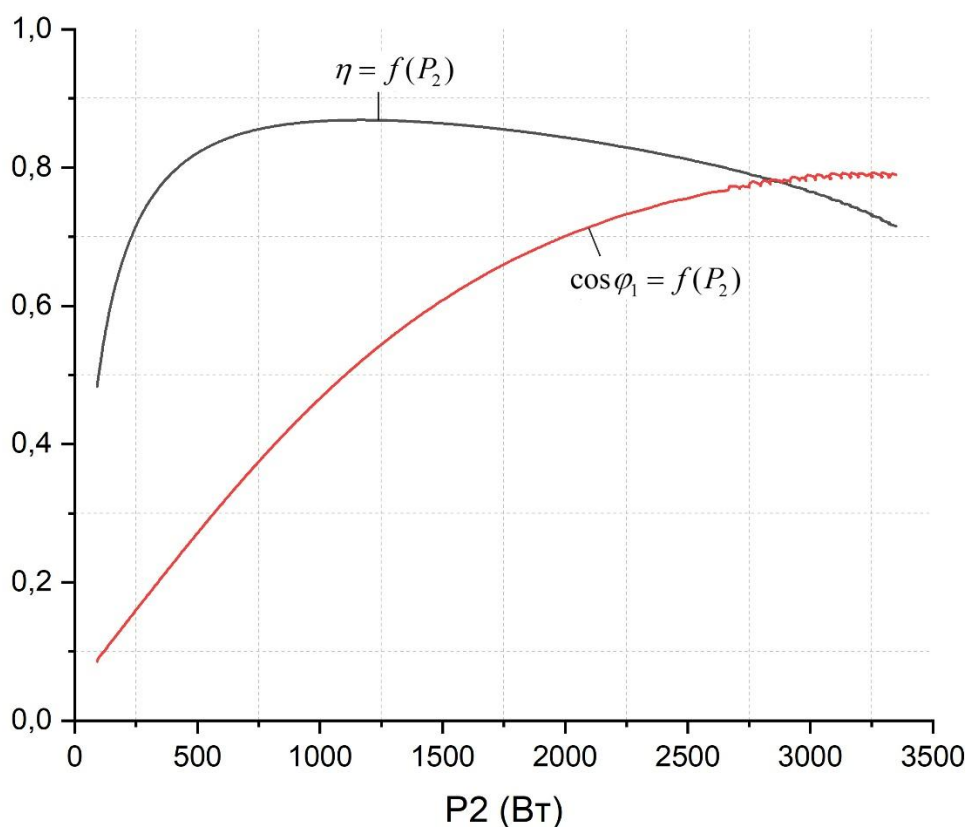


Рисунок 21 – Графік залежностей $\cos \varphi_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ за результатами моделювання

При комп'ютерному моделюванні характеристик асинхронного двигуна немає обмежень з точки зору величини навантаження, на відміну від реального лабораторного експерименту. Виходячи з поставленої задачі діапазон зміни моменту навантаження в моделі обмежено перевантажувальною здатністю двигуна

за моментом $k_{M_{\max}} = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = 2,2$.

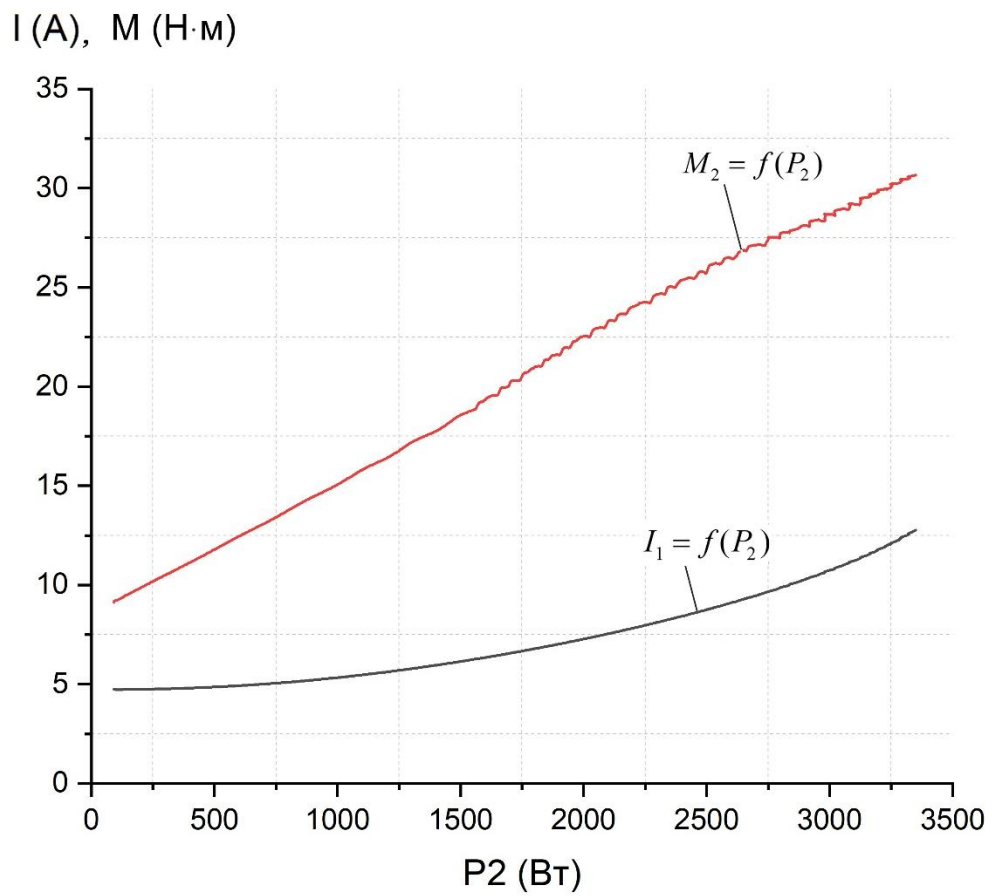


Рисунок 22 – Графік залежностей $I_1 = f(P_2)$, $M_2 = f(P_2)$ за результатами моделювання

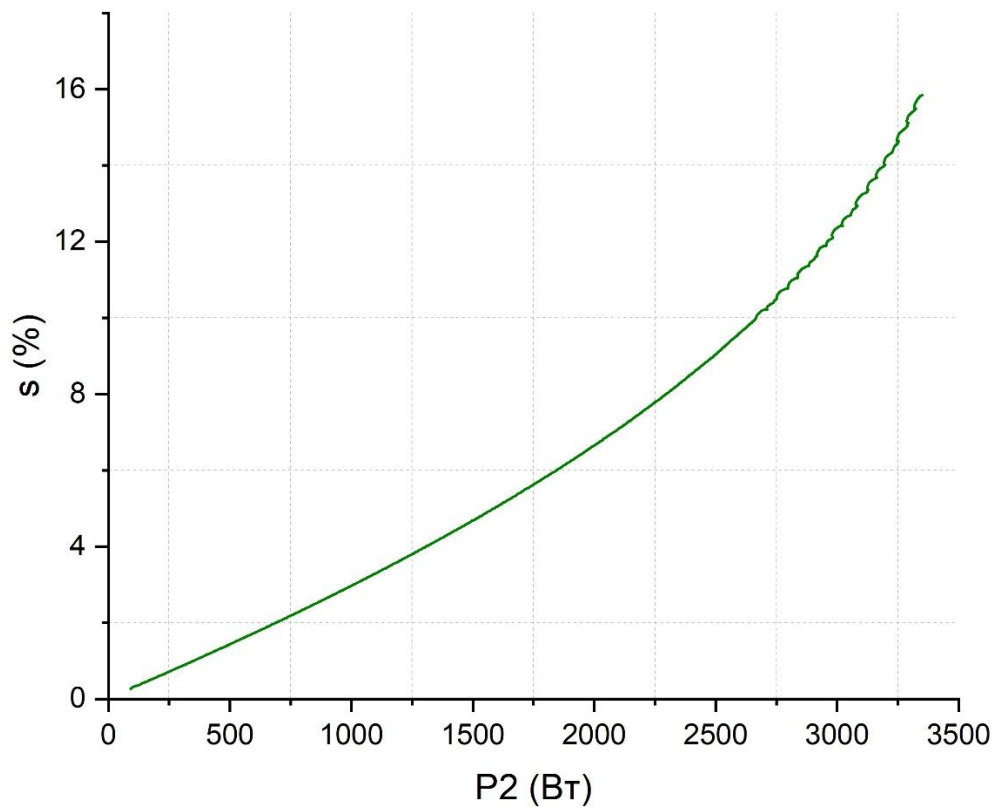


Рисунок 23 – Графік залежності $s = f(P_2)$ за результатами моделювання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

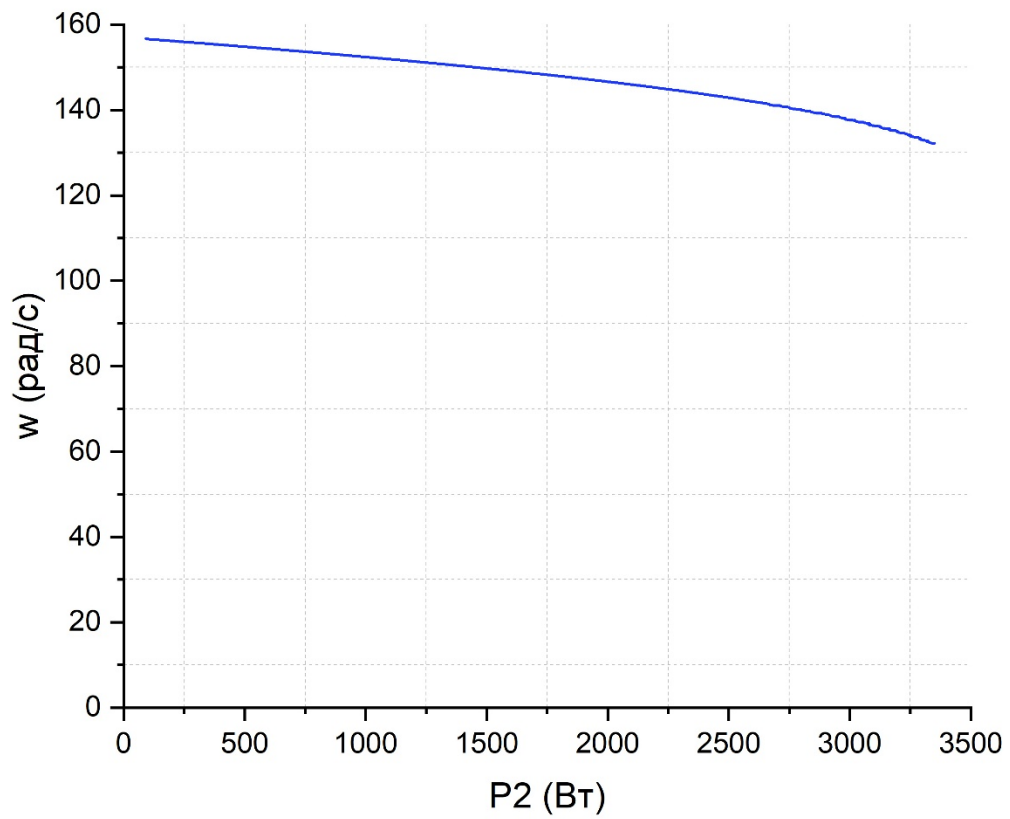


Рисунок 24 – Графік залежності $\omega = f(P_2)$ за результатами моделювання

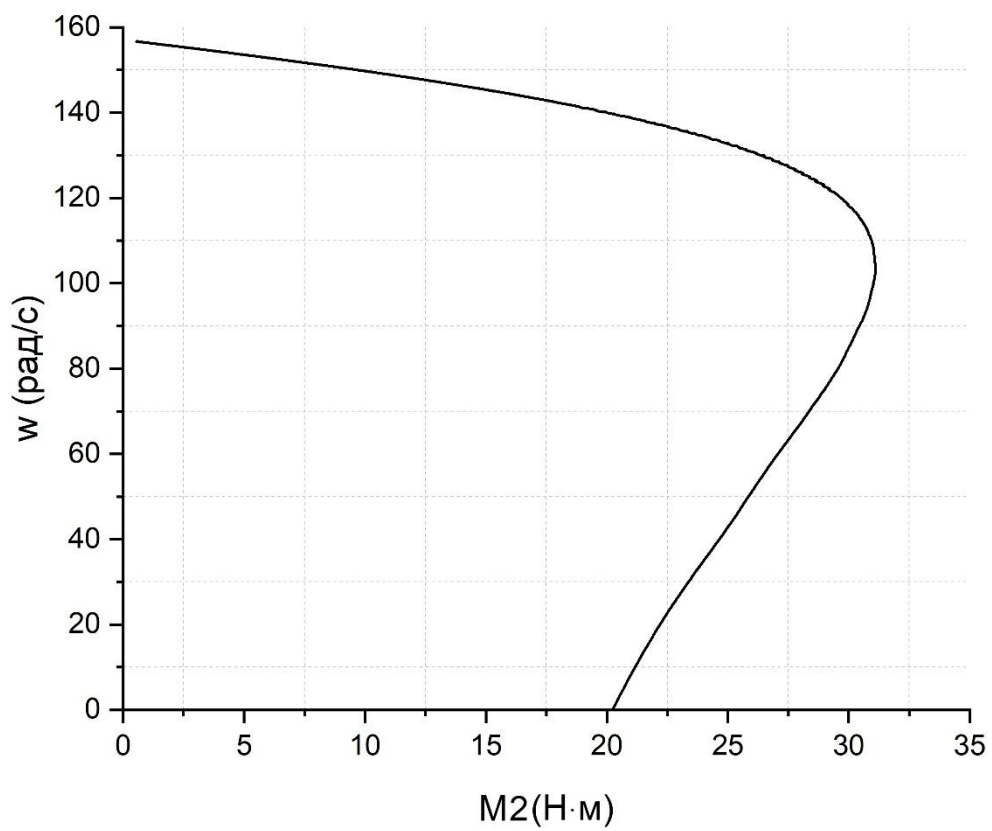


Рисунок 25 – Результат моделювання механічної характеристики АД типу АОЛ2-31-4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

РОЗДІЛ 4

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА АОЛ2-31-4 ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ

Порівняння механічних характеристик, отриманих методом безпосереднього навантаження двигуна та аналітичним методом з використанням математичної моделі в роботі виконано шляхом оцінки відхилення величини кутової швидкості $\omega_{\text{лаб}}$ за заданого моменту M_2 отриманої в ході лабораторного експерименту від величини кутової швидкості $\omega_{\text{мод}}$ розрахованої в результаті моделювання для того ж значення моменту. Тобто, фактично обраховується відносна похибка, яка визначається відношенням абсолютної похибки до «істинного» значення величини [12]:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} = \frac{|x - \bar{x}|}{x}, \quad (25)$$

де x – «істинне» значення величини;

$\Delta x = |x - \bar{x}|$ – абсолютна похибка;

\bar{x} – виміряна величина.

Таким чином, для механічних характеристик отриманих у різний спосіб, відносна похибка у відсотках буде визначатись наступним виразом:

$$\delta \omega = \frac{\Delta \omega}{\omega_{\text{мод}}} \cdot 100\% = \frac{|\omega_{\text{лаб}} - \omega_{\text{мод}}|}{\omega_{\text{мод}}} \cdot 100\%, \quad (26)$$

де $\omega_{\text{лаб}}$ – значення кутової швидкості отримане в ході лабораторного експерименту для заданого значення статичного моменту опору M_2 на валу асинхронного двигуна;

$\omega_{\text{мод}}$ – значення кутової швидкості отримане в результаті математичного моделювання для заданого значення статичного моменту опору M_2 на валу асинхронного двигуна.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

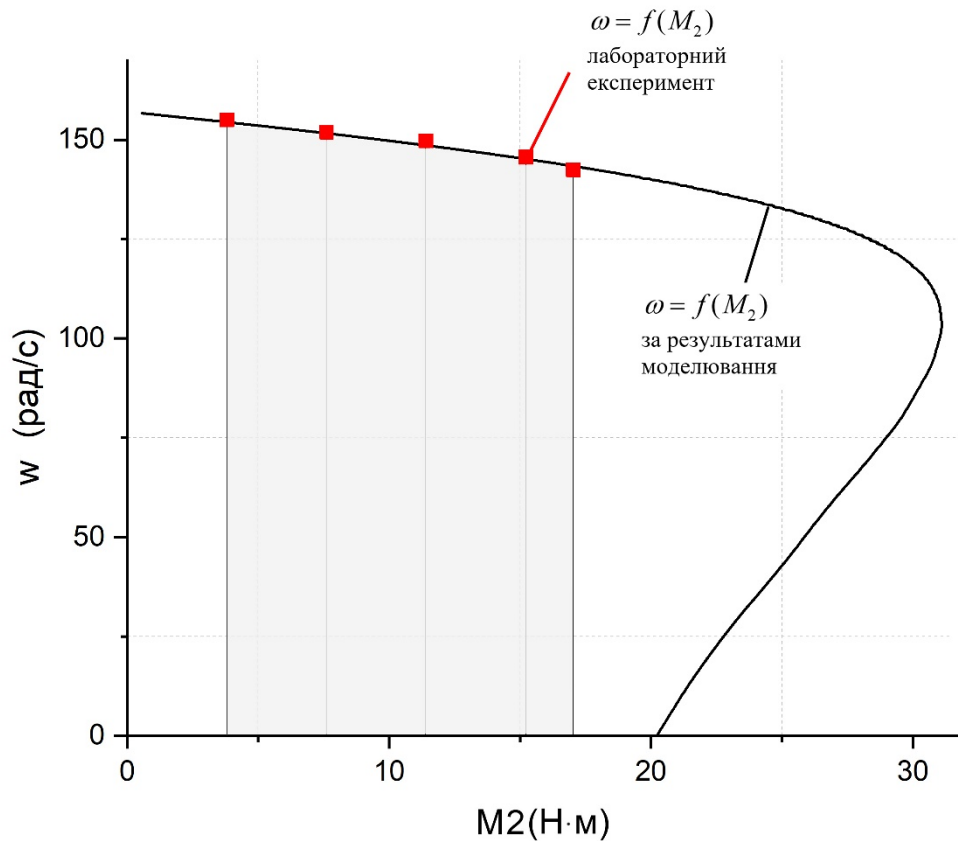


Рисунок 26 – Графіки механічних характеристик АД типу АОЛ2-31-4 отримані в різний спосіб: чорна крива – за результатами моделювання; червона – за результатами лабораторного експерименту

На рис. 26 в одній координатній площині показані механічні характеристики двигуна отримані в різний спосіб. Видно, що в результаті лабораторного експерименту доступна тільки частина характеристики, що відповідає робочим значенням моменту АД (від точки реального холостого ходу до незначного перевантаження, приблизно $1,12M_{ном}$), на рис. 26 її точки позначені червоним кольором. В той же час аналітичний спосіб заснований на комп'ютерному математичному моделюванні дозволяє отримати повну механічну характеристику АД (режим двигуна – перший квадрант). Тому для визначення відносної похибки між цими характеристиками доводиться працювати з даними з діапазону навантажень, що визначається характеристикою отриманою за результатами лабораторного експерименту, що ілюструє рис. 27.

Використовуючи залежність (26) визначається відносна похибка для усіх точок вибраного діапазону, а результати розрахунків заносяться до табл. 3.

Таблиця 3 – Відносне відхилення кутової швидкості між механічними характеристиками АД типу АОЛ2-31-4, що отримані в різний спосіб

$\omega_{\text{лаб}}, \text{ рад/с}$	154,98	151,8	149,7	145,6	142,4
$\omega_{\text{мод}}, \text{ рад/с}$	154,42	151,63	148,6	145,15	143,4
$ \omega_{\text{лаб}} - \omega_{\text{мод}} , \text{ рад/с}$	0,65	0,17	1,1	0,45	1
$\delta\omega, \%$	0,36	0,11	0,74	0,31	0,69

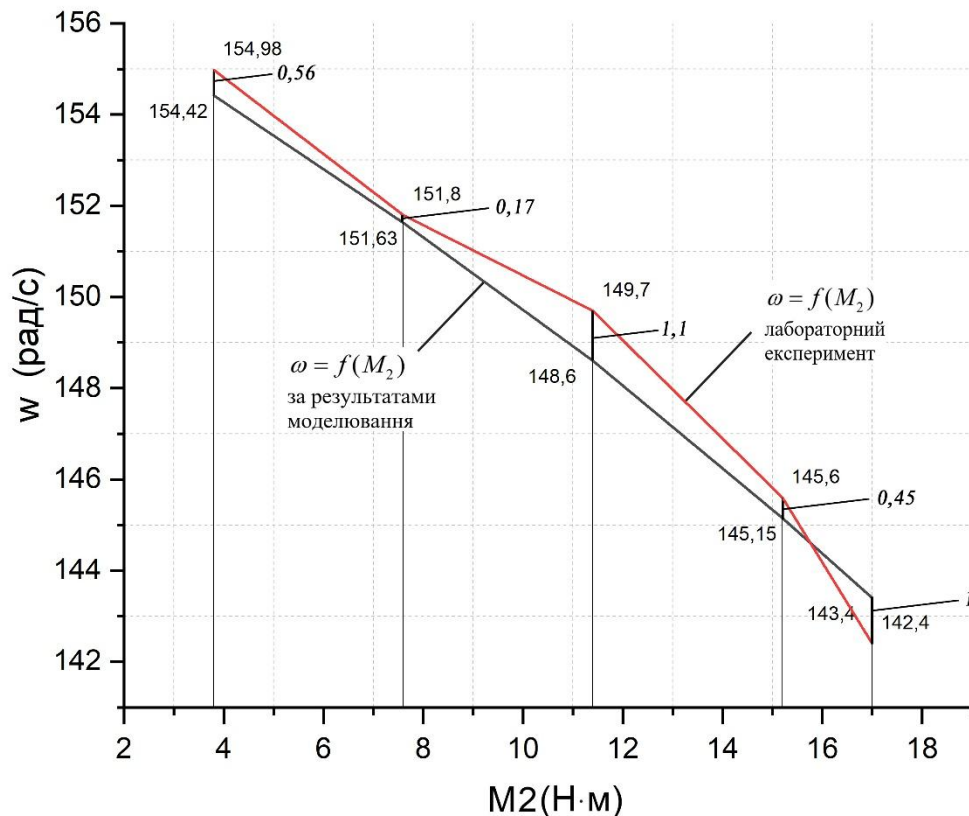


Рисунок 27 – До визначення відносної похибки між механічними характеристиками отриманими у різний спосіб

Аналіз даних табл.3 показує, що значення відносної похибки за швидкістю не перевищує 1% для діапазону зміни статичного моменту навантаження від точки реального холостого ходу до незначного перевантаження, приблизно $1,12M_{\text{ном}}$. Отриманий результат свідчить про те, що запропонований спосіб моделювання характеристик асинхронного двигуна з використанням SPS-моделі в MATLAB/Simulink дає незначне відхилення в порівнянні з аналогічними результатами отриманими в ході лабораторного експерименту.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

РОЗДІЛ 5

ЗАХИСНІ ЗАХОДИ ВІД УРАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ

Досвід використання електричного струму свідчить, що там де він використовується має місце ураження людей. Більше того, здебільшого ураження електричним струмом є несподіваним для потерпілого видом виробничого травматизму. Це пояснюється тим, що електричний струм не виявляється за зовнішніми ознаками (ні за звуком, ні за запахом). Ураження струмом виникає з такою швидкістю, що людина не здатна зреагувати та самостійно звільнити себе від дії електричного струму, тобто має місце невідповідність швидкодії впливу та швидкості рефлексів людини [13].

Умови за яких людина, що не ізольована від землі може бути уражена електричним струмом:

- дотикання до однієї або декількох фаз електроустановки, що знаходиться під напругою;
- наближення на небезпечну відстань до неізольованих струмоведучих частин електроустановки, що знаходиться під напругою;
- дотикання до металевих (струмопровідних) корпусів електрообладнання, що перебувають під напругою внаслідок пошкодження електричної ізоляції (аварія);
- потрапляння під крокову напругу, що виникає в місцях розтікання струму в землі та ін.

Відомо, що дія електричного струму на організм людини має різносторонній характер і різносторонні прояви – від слабких подразнень до смертельних наслідків [13, 14]. Так, електричний струм, що проходить через тіло людини, може спричинити термічну, хімічну, світлову, механічну та біологічну дію. Наслідки можуть бути присутніми як в повному наборі, так і в деякому поєднанні.

Електричне ураження людського організму класифікують на місцеве (електричні опіки, електричні знаки, металізація шкіри, механічні ураження та електрофтальмія) та загальне (електричний удар) коли уражається весь організм.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Електричний удар – це збудження живих тканин організму електричним струмом, що супроводжується судомним скороченням м'язів. Це найнебезпечніший вид ураження, при якому порушується функціонування серцевої, дихальної і мозкової системи людини навіть без жодних зовнішніх ознак, що бувають при електротравмах [13].

Електричні удари класифікують, в залежності від наслідків, на чотири ступеня:

- I. – скорочення м'язів без втрати свідомості;
- II. скорочення м'язів з втратою свідомості але при цьому зберігається дихання і робота серцево-судинної системи;
- III. втрата свідомості з порушенням дихання та/чи роботи серця;
- IV. клінічна смерть (відсутність дихання і кровообігу).

Наслідки (їх сила та набір) ураження електричним струмом людини залежать від фізичних параметрів електричного кола та ряду фізіологічних чинників, що притаманні живим організмам.

Ступінь негативної дії електричного струму на організм збільшується пропорційно до збільшення сили струму, що через нього протікає. Розрізняють три ступеня дії сили струму на організм:

- відчутний (0,1 мА на змінному; 5...7 мА на постійному струму);
- невідпускання (10...20 мА на змінному; 50...80 мА на постійному струму);
- фібриляційний (100 мА на змінному; 300 мА на постійному струму).

Шлях по якому протікає струм в тілі людини також відіграє суттєву роль в наслідках ураження. Шлях по якому протікає електричний струм визначається місцем прикладання струмоведучих частин обладнання до тіла людини. Найнебезпечнішою ситуацією є та коли струм протікає верхньою половиною тіла (на його шляху знаходяться важливі органи – серце, легені, головний мозок).

Найменш небезпечним є шлях від однієї ноги до іншої, так звана «крокова» петля, виникає під дією крокової напруги. Кроковою напругою називається напруга між двома точками електричного поля на відстані кроку (близько 80...100 см.), на яких одночасно стоїть людина.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Згідно з правилами улаштування електроустановок (ПУЕ) в електроустановках застосовують наступні системи засобів і заходів безпечної експлуатації електрообладнання [14, 15]:

- захисне заземлення;
- занулення;
- ізоляція струмопровідних частин;
- захисне вимикання;
- малі рівні напруг;
- недоступність неізольованих провідників.

Окремий засіб чи захист не є універсальним (самодостатнім), тому для створення безпечних умов необхідно застосувати не один, а декілька засобів одночасно.

Захисне заземлення представляє собою навмисне електричне з'єднання з землею металевих не струмопровідних частин електрообладнання, які в результаті аварії можуть опинитись під напругою. Використовують захисне заземлення з метою захисту людини від ураження електричним струмом у випадку коли вона доторкнулась до металевих конструкцій електрообладнання, що зазнало аварійного руйнування ізоляції.

Захисна функція полягає в тому, що сила струму через тіло людини буде безпечної величини, оскільки опір заземлення значно менший від опору тіла людини. Ця умова накладає жорстке обмеження на максимальний опір контуру заземлення. Відповідно до ПУЕ допустимий опір пристроїв заземлення не має перевищувати 4 Ом [14].

Захисне заземлення обов'язково влаштовують у електроустановках з напругою [15]:

- 380 В і більше (змінного струму);
- 440 В і більше (постійного струму);
- 42 В (змінного струму), 110 В (постійного струму) в зовнішніх установках, особливо небезпечних та в умовах з підвищеною небезпекою;
- незалежно від значення напруги у всіх вибухонебезпечних приміщеннях.

									Лист
									52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	7.141.230748.ПЗ				

Для влаштування заземлення використовують пристрої заземлення, які бувають виносними, контурними, природними і штучними.

Штучні пристрої заземлення виготовляють із сталевих труб діаметром від 3 см до 5 см з товщиною стінок 3...5 мм і довжиною від 2,5 м до 3 м; сталевих стержнів діаметром 10...12 мм і довжиною до 10 м або куткову сталь 40×40 мм довжиною від 2,5 м до 5 м. На кожний пристрій заземлення складається паспорт.

В процесі експлуатації пристрій заземлення оглядається та визначається його технічний стан. Технічний стан пристрою визначається величиною його омичного опору (не повинен перевищувати допустиме значення).

Занулення. Небезпеку ураження електричним струмом можна ліквідувати забезпечивши можливість швидкого відключення пошкодженої електроустановки [13].

Занулення представляє собою навмисне приєднання металевих (струмопровідних) частин електроустановки, які в експлуатаційних режимах не перебувають під напругою з нульовим провідником. Цей спосіб захисту персоналу від ураження електричним струмом є основним в електроустановках напругою до 1000 В.

Функція захисту полягає у тому, що при аварійному руйнуванні ізоляції в електроустановці виникає коротке замикання, яке швидко вимикається захисним обладнанням (максимально струмовим захистом).

Ізоляція струмопровідних частин. Головною умовою безпечної експлуатації електрообладнання є надійна ізоляція струмопровідних частин. Опір ізоляції згідно ПУЕ нормується і має бути не нижчим 0,5 МОм [14]. Також матеріал ізоляції має відповідати умовам середовища в якому експлуатується електрообладнання (бути стійким до агресивних середовищ, вологи, механічного впливу, а також старіння). Стан електроізоляційних покриттів відповідно до ПУЕ визначається шляхом періодичних оглядів та вимірюванням електричного опору.

Безпека персоналу при експлуатації електроустаткування забезпечується також шляхом застосування стаціонарного огороження, блокування та сигналізації.

Малі рівні напруг. Для зменшення імовірності ураження електричним струмом застосовують малі рівні напруг для живлення електроустаткування (коли

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

це можливо), що не перевищує 42 В. Рівень напруги живлення у 42 В використовується у приміщеннях I і II категорії небезпеки для живлення ручного інструменту, переносних ламп і ін.

Захисне вимикання. Захисне заземлення і занулення не гарантує безпеку персоналу від ураження електричним струмом. Тому часто разом з заземленням чи зануленням використовують захисне вимикання.

Захисне вимикання є швидкодіючим захистом, який забезпечує автоматичне відключення електроустановки при виникненні в ній небезпеки ураження людини струмом. Швидкість спрацювання, як правило, знаходиться в межах 0,1...0,05 с, а занулення 0,2 с та більше. Зважаючи на малу тривалість дії струму, небезпечним може бути і струм 500...650 мА.

Захисне вимикання окремо чи разом з іншими засобами захисту забезпечує наступні функції [13, 14]:

- захист при замиканні на землю або корпус електроустановки;
- захист при появі небезпечних струмів витікання;
- автоматичний контроль електричного кола захисного заземлення чи занулення;
- захист при переході вищої напруги на сторону нижчої.

Для захисту персоналу, що задіяний при обслуговуванні електрообладнання, використовують спеціальні захисні засоби. Їх можна класифікувати на наступні:

- ізолюючі захисні засоби (бувають основні і допоміжні);
- захисні огорожі;
- захисні засоби для запобігання ураження.

До основних спеціальних захисних засобів належать:

- в електроустановках до 1000 В – діелектричні штанги, діелектричні рукавиці, електровимірювальні кліщі, монтажний інструмент та покажчики напруги;
- в електроустановках понад 1000 В – ізолюючі штанги, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги, а також засоби для виконання ремонтних робіт під напругою вище 1000 В.

Усі засоби мають зберігатись належним чином.

									Лист
									54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Для обслуговування електроустановок і мереж допускаються особи, не молодше 18 років, що пройшли медичний огляд та отримали кваліфікаційну групу з техніки безпеки. Для установок понад 1000 В – IV групу, а для установок до 1000 В III кваліфікаційну групу [13].

					7.141.230748.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Основні характеристики асинхронного двигуна можна отримати в декілька способів – експериментально одним з двох методів або аналітичним шляхом.

Експериментальний метод в основі якого лежать дані отримані при проведенні дослідів неробочого ходу та короткого замикання є опосередкованим і потребує подальшої обробки цих даних графоаналітичним методом через побудову колової діаграми. Характеризується низькою точністю отриманих результатів.

Експериментальний метод з безпосереднім навантаженням асинхронного двигуна має декілька можливих реалізацій і дозволяє отримати прийнятні за точністю результати але в обмеженому діапазоні зміни навантаження, як правило, від моменту реального холостого ходу до перевантаження $1,2M_{ном}$.

Аналітичний метод отримання основних характеристик асинхронного двигуна передбачає певний об'єм обчислень, що проводяться у відповідності з обраною математичною моделлю машини. Добре автоматизується при використанні комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення та немає обмежень діапазону моделювання навантажень двигуна.

В якості експериментального методу в роботі застосовано метод з безпосереднім навантаженням асинхронного двигуна без віддачі енергії в мережу, оскільки досліджувана машина має незначну потужність. Діапазон навантажень, що створювався на валу двигуна коливався від режиму реального холостого ходу до перевантаження $1,12M_{ном}$.

Для реалізації аналітичного способу отримання основних характеристик асинхронного двигуна обрано його структурно-математичне моделювання з використанням SPS-моделі машини в програмному середовищі MATLAB/Simulink. Запропонована математична модель виконує обчислення основних величин в функції часу на основі яких будуються характеристики асинхронного двигуна (механічна та робочі) через імітацію процесу його навантаження. Так, на початку моделювання, після підключення до ідеальної трифазної мережі, двигун розганяється до усталеної швидкості без навантаження.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Після цього здійснюється повільна зміна моменту статичного навантаження від нуля до деякого значення, при якому АД перекинеться.

Порівняльний аналіз механічних характеристик отриманих обома методами показує, що значення відносної похибки за швидкістю не перевищує 1% для діапазону зміни статичного моменту навантаження від точки реального холостого ходу до $1,12M_{ном}$.

Отриманий результат свідчить про те, що запропонований спосіб моделювання характеристик асинхронного двигуна з використанням SPS-моделі в MATLAB/Simulink дає незначне відхилення в порівнянні з аналогічними результатами отриманими в ході лабораторного експерименту. Це дозволяє рекомендувати математичне комп'ютерне моделювання з застосуванням SPS-моделі в MATLAB/Simulink для розрахунку основних характеристик (механічних та робочих) асинхронного двигуна.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини: навчальний посібник [текст] / Л.В. Дубинець, О.І. Момот, О.Л. Маренич. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 208 с.
2. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. –Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.
3. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
4. Теорія електропривода: Підручник / М. Г. Попович, М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилюк та ін.; За ред. М. Г. Поповича. – К.: Вища шк., 1993. – 494 с.
5. Тягові електричні машини електрорухомого складу: Навчальний посібник [текст] / В.М. Безрученко, В.К. Варченко, В.В. Чумак. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
6. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини: навчальний посібник [текст] / В.В. Грабко, М.П. Разводюк, С.М. Левицький, М.О. Казак. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 197 с.
7. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія / О. П. Чорний, О. І. Толочко, В. К. Титюк, Д. Й. Родькін, Г.С. Чекавський. – Кременчук: ПП Щербатих О. В, 2016. – 302 с.
8. Методичні вказівки до виконання комп'ютерних практикумів з дисципліни «Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії» для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка»/ Уклад.: Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 84 с.
9. Лазарев Ю. Ф. Довідник з MATLAB / Електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 132 с.
10. Мощинський Ю. А., Беспалов В. Я., Кірякін А. А. Визначення параметрів схеми заміщення АМ по каталожним даним // Електрика № 4, 1998. – С. 38-42

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Armstrong B., de Wit C.C. Friction Modeling and Compensation. The Control Handbook. – CRC Press, 1995.
12. Основи теорії похибок фізичних величин. Методичні матеріали для загального фізичного практикуму [текст] / Т.М. Демків, О.І. Конопельник, Я.І Шопя. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка. 2008. – 20 с.
13. Москальова В.М. Охорона праці. Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення. Рівне. НУВГП, 2009
14. Правила улаштування електроустановок. Зміни та доповнення [текст]. – Х.: Видавництво «Форт», 2016. – 252 с.
15. НПАОП 40.1-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [текст]. – Х.: Видавництво «Форт», 2008. – 192 с.

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ

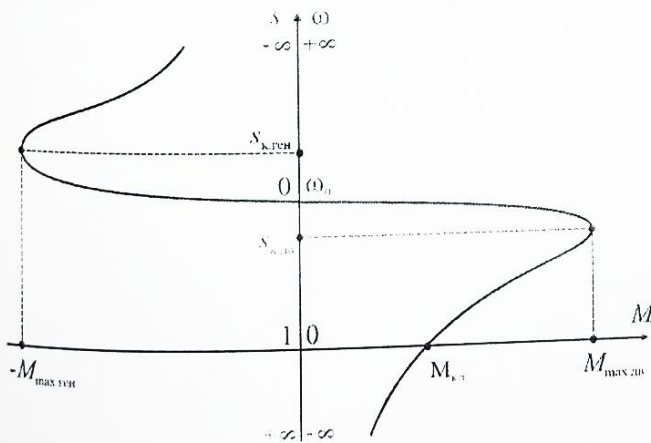
- 1) Аналіз методів та підходів по отриманню основних характеристик АД;
- 2) Механічна та робочі характеристики АД типу АОЛ2-31-4 отримані методом безпосереднього навантаження;
- 3) Структурно-математична модель та основні характеристики АД типу АОЛ2-31-4 отримані з її допомогою;
- 4) Порівняльний аналіз двох підходів до отримання характеристик АД типу АОЛ2-31-4

					7.141.230748.ПЗ	Лист
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

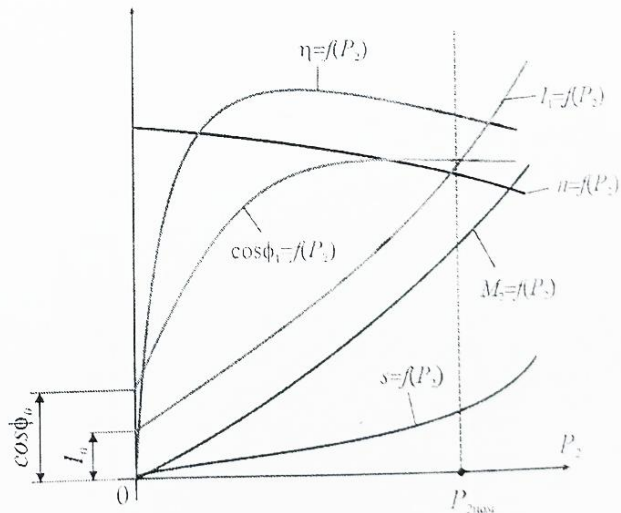
ДОДАТОК А
Графічні роботи

					7.141.230748.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Експериментальні методи	Опосередкований метод в основі якого лежать дані отримані при проведенні дослідів неробочого ходу (н. х./х. х.) та короткого замикання (к. з.)	Характеристики АД розраховують і будують за допомогою колової діаграми. Для того аби отримати колову діаграму необхідно мати параметри схеми зміщення АД, які в свою чергу визначають в результаті проведення дослідів неробочого ходу та короткого замикання.
	Метод безпосереднього навантаження	Даний метод може бути реалізованим: <ul style="list-style-type: none"> - навантаженням без віддачі енергії в мережу; - навантаженням з віддачею енергії в мережу; - шляхом взаємного навантаження. Метод дозволяє отримати основні характеристики АД в досить вузькому діапазоні навантажень (від холостого ходу до незначного перевантаження ($1,25 \cdot M_{2ном}$)).
Аналітичні методи	Метод математичного моделювання	Передбачає певну кількість математичних розрахунків. Вихідними даними до математичного моделювання є каталожні дані АД та/або результати дослідів х. х., к. з. Використання комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення суттєво спрощують задачу математичного моделювання.



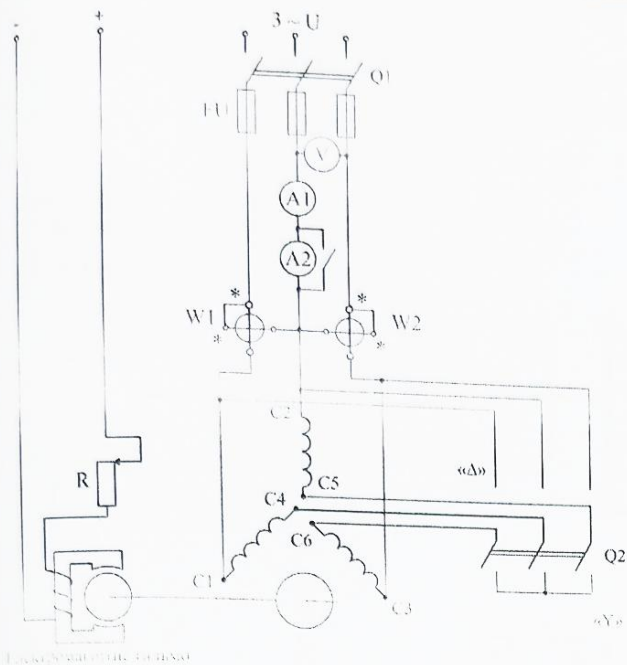
Якісний вигляд механічних характеристик АД



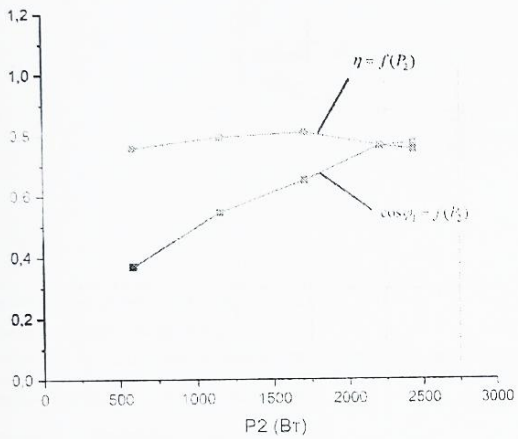
Робочі характеристики АД
(s, ω або $n, M_2, I_1, \cos \varphi_1, \eta, P_1 = f(P_2)$)

Аналіз методів та підходів по отриманню основних характеристик АД					Стад.	Аркуш	Аркушів
Змі.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62	63
Зав. кафедр.		Муха А.М.	<i>[Signature]</i>	30.12.	Український державний університет науки і технологій, група ББ2321		
Н. контр.		Карзова О.О.	<i>[Signature]</i>	30.12.			
Осн. керів.		Устименко Д.В.	<i>[Signature]</i>	30.12.			
Розробив		Баяновський О.А.	<i>[Signature]</i>	30.12.			

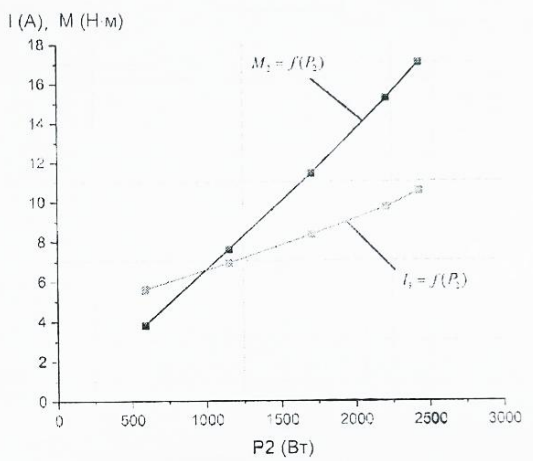
Додаток А
7.141.230748.01



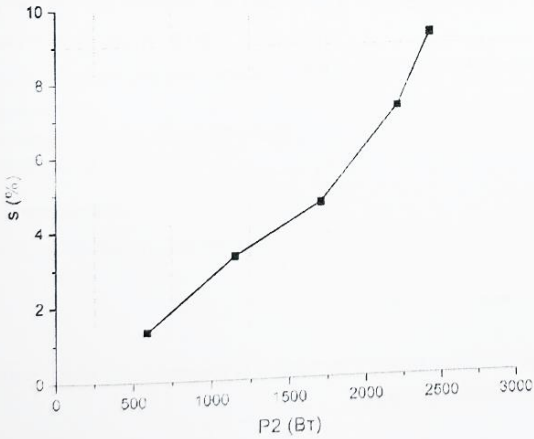
Результати вимірювань		U ₁	В	220	220	219	218	218
I ₁	А	5,6	6,9	8,3	9,7	10,5		
α ₁	под.	-3	14	29	45	52		
α ₂	под.	42	58	75	97	106		
n	об/хв	1480	1450	1430	1390	1360		
ω	с ⁻¹	154,98	151,8	149,7	145,6	142,4		
M ₂	Н·м	3,8	7,6	11,4	15,2	17		
P ₁	Вт	780	1440	2080	2840	3160		
S ₁	ВА	2134	2629	3148	3663	3965		
cos φ ₁	-	0,37	0,55	0,66	0,78	0,79		
P ₂	Вт	589	1154	1707	2212	2433		
η	-	0,76	0,8	0,82	0,78	0,77		
s	%	1,33	3,3	4,7	7,3	9,3		



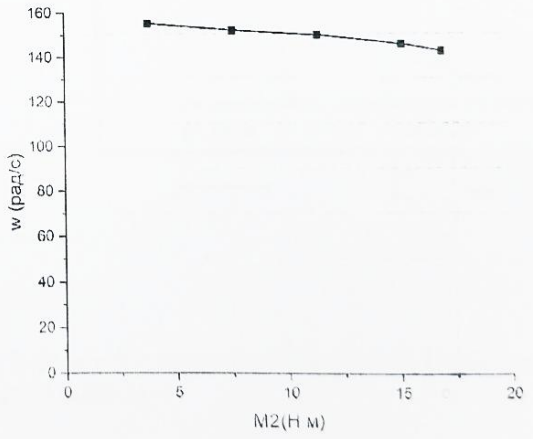
Графік залежностей $\cos \varphi_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$



Графік залежностей $I_1 = f(P_2)$, $M_2 = f(P_2)$



Графік залежності $s = f(P_2)$



Графік механічної характеристики АД (експер.)

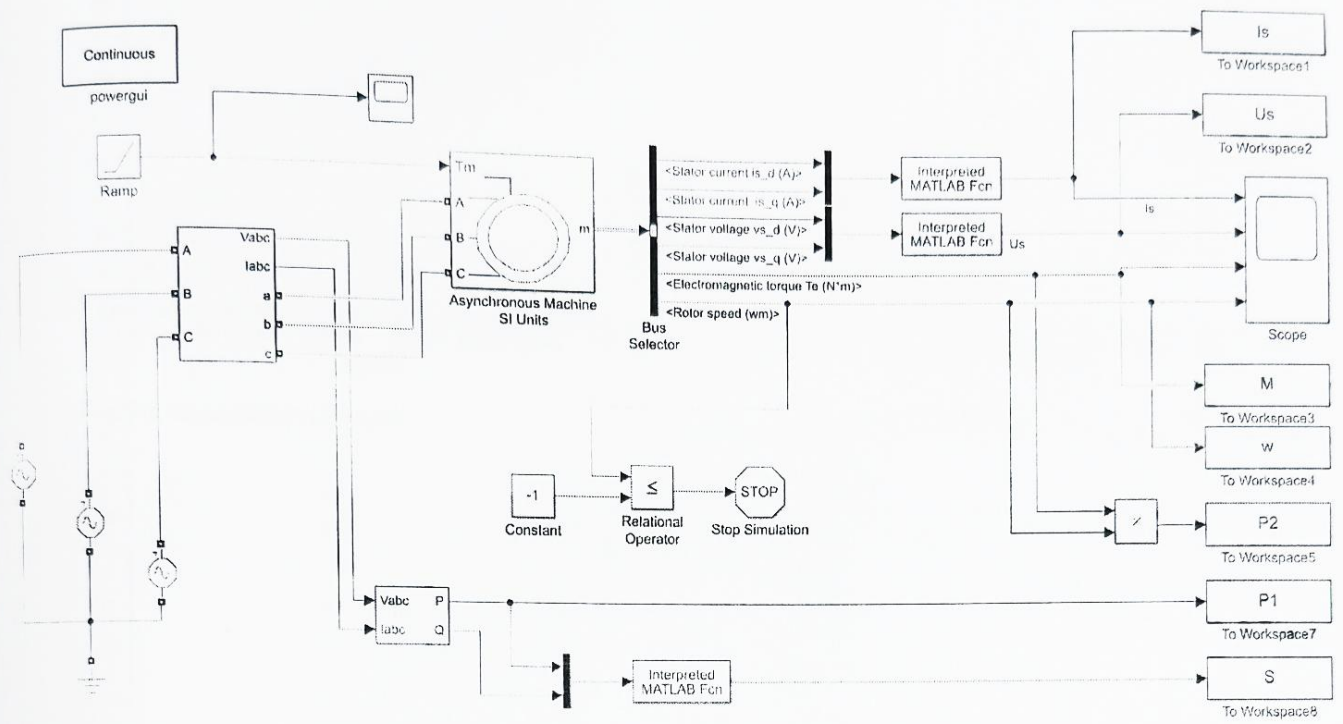
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Зав. кафедр.	Муха А.М.			
Н. контр.	Карзова О.О.			
Осн. керів.	Устименко Д.В.			30.12.
Розробив	Бірюковський О.А.			30.12.

Механічна та робочі характеристики АД типу АОЛ2-31-4 отримані методом безносереднього навантаження

Додаток А
7.141.230748.02

Стад.	Аркуш	Аркушів
	63	65
Український державний університет науки і технологій, група EE2321		

Математична модель в середовищі MATLAB/Simulink для дослідження основних характеристик АД типу АОЛ2-31-4



Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]: [3300 220 50]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]: [3.44 0.00492]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]: [1.94 0.00492]

Mutual inductance Lm (H): 0.153

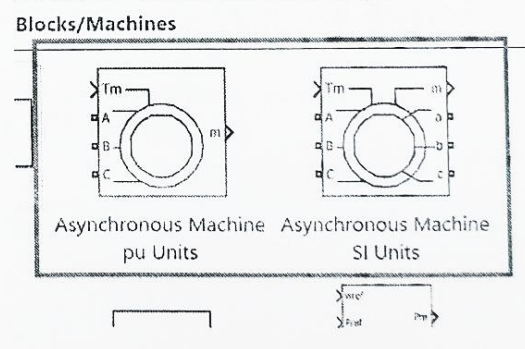
Inertia friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]: [0.0056 0.0037 2]

Initial conditions [slip, th(deg), ia, ib, ic(A), pha, phb, phc(deg)]: [1 0 0 0 0 0 0]

Simulate saturation

Plot [I(Arms) ; v(VLL rms)]: 1, 302.9841135, 428.7778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]

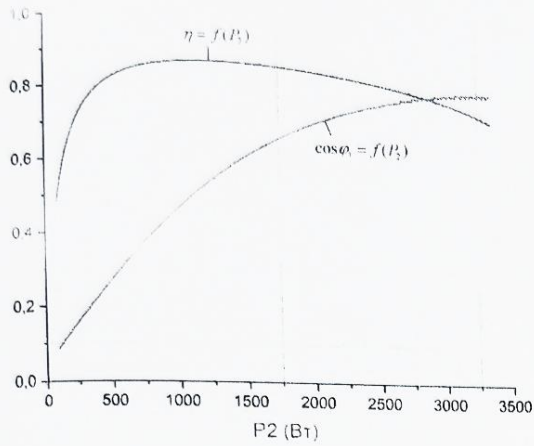
OK Cancel Help Apply



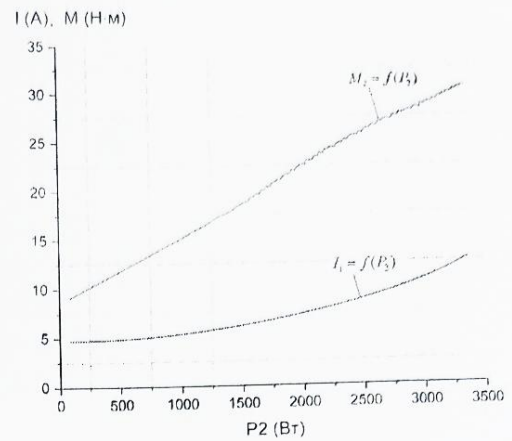
Вкладка діалогового вікна встановлення параметрів SPS-блоку Asynchronous Machine SI Units для асинхронного двигуна типу АОЛ2-31-4

Структурно-математична модель та основні характеристики АД типу АОЛ2-31-4 отримані з її допомогою					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	
Зав. кафед.	Муха А.М.		<i>[Signature]</i>	30.12	
Н. контр.	Карзова О.О.		<i>[Signature]</i>	30.12	
Осн. керів.	Устименко Д.В.		<i>[Signature]</i>	30.12	
Розробив	Баяновський О.А.		<i>[Signature]</i>	30.12	
Додаток А 7.141.230748.03			Стад.	Аркуш	Аркушів
				64	65
			Український державний університет науки і технологій, група ББ2321		

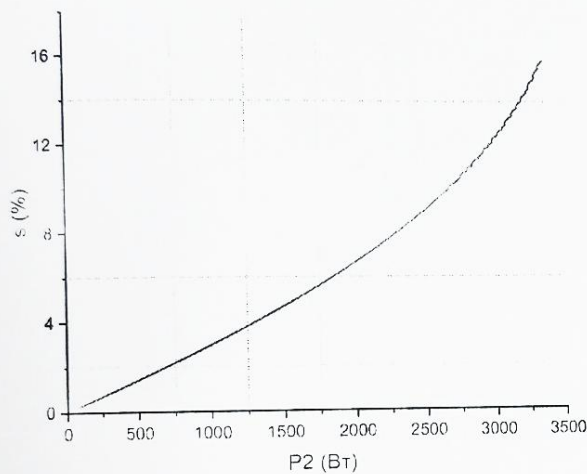
Основні характеристики АД типу АОЛ2-31-4 отримані в результаті структурно-математичного моделювання в програмному середовищі MATLAB/Simulink



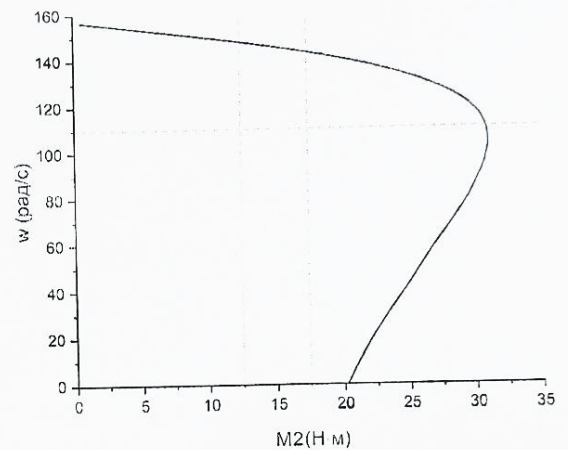
Графік залежностей $\cos \varphi_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$



Графік залежностей $I_1 = f(P_2)$, $M_2 = f(P_2)$



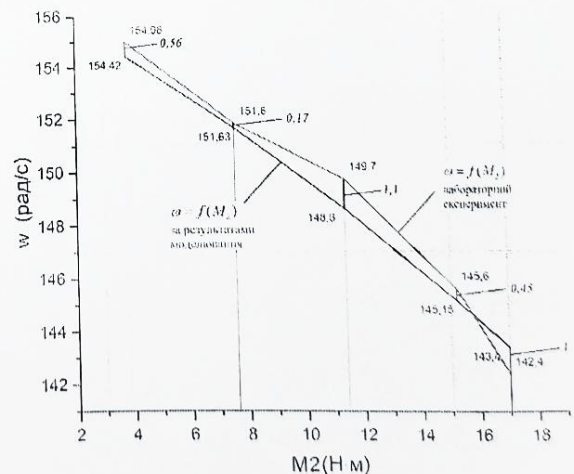
Графік залежності $s = f(P_2)$



Графік механічної характеристики АД (експер.)

Відносне відхилення кутової швидкості між механічними характеристиками АД типу АОЛ2-31-4, що отримані в різній спосіб

$\omega_{\text{теор}}, \text{рад/с}$	154,98	151,8	149,7	145,6	142,4
$\omega_{\text{мод}}, \text{рад/с}$	154,42	151,63	148,6	145,15	143,4
$ \omega_{\text{теор}} - \omega_{\text{мод}} , \text{рад/с}$	0,65	0,17	1,1	0,45	1
$\delta\omega, \%$	0,36	0,11	0,74	0,31	0,69



Порівняльний аналіз двох підходів до отримання характеристик АД типу АОЛ2-31-4							
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Стад.	Аркуш	Аркушів
						65	65
Зав. кафедр.		Муха А.М.	<i>[Signature]</i>	21.12	Додаток А 7.141.230748.04 Український державний університет науки і технологій, група ВЕ2321		
Н. контр.		Карзова О.О.	<i>[Signature]</i>	21.12			
Осн. керів.		Устименко Д.В.	<i>[Signature]</i>	30.12.			
Розробив		Іванюк О.А.	<i>[Signature]</i>	30.12.			