

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Визначення електромеханічних параметрів асинхронного двигуна за
даними динамічних режимів роботи**

Виконав: студент групи ЕЕМ-21-2

Ярослав БАЩУК

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Рір 2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

БАЩУК Ярослав Артурович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Визначення електромеханічних параметрів асинхронного
двигуна за даними динамічних режимів роботи

1. Термін подання студентом роботи: 16 червня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є визначення
електромеханічних параметрів асинхронного двигуна. Завданням є
дослідження динамічних режимів роботи асинхронного двигуна.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Синтез алгоритму визначення електромагнітних параметрів; II. Дослідження
алгоритма визначення електромагнітних параметрів; III. Аналіз
обчислювальних похибок; IV. Порівняльний аналіз алгоритмів визначення
параметрів АД.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Синтез алгоритму визначення електромагнітних параметрів; II.
Схема алгоритму отримання електромагнітних параметрів; III. Зміни
активного опору роторного ланцюга; IV. Порівняльний аналіз алгоритмів
визначення параметрів АД.-

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор СІНЧУК		
II	Ігор СІНЧУК		
III	Ігор СІНЧУК		
IV	Ігор СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Синтез алгоритму визначення електромагнітних параметрів	15.05.25
2	Дослідження алгоритма визначення електромагнітних параметрів	21.05.25
3	Аналіз обчислювальних похибок	31.05.25
4	Порівняльний аналіз алгоритмів визначення параметрів АД	14.06.25

Дата видання завдання 12.05.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Ярослав БАЩУК
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Визначення електромеханічних параметрів асинхронного двигуна за даними динамічних режимів роботи»

43 с., 13 рис., 10 літературних джерел

Дана робота присвячена вирішенню актуальної задачі підвищення ефективності експлуатації асинхронних електродвигунів (АД) з короткозамкненим ротором, які широко застосовуються у гірничій промисловості. Особливості роботи гірничих машин із електроприводами вимагають точного знання параметрів електродвигунів, що безпосередньо впливають на їхню енергоефективність, стабільність та надійність роботи. Зокрема, параметри такі як ККД, пусковий момент, пусковий струм та інші, є критичними для синхронної роботи двигунів у складі скребкових конвеєрів, прохідницьких та очисних комбайнів.

Незважаючи на важливість контролю технічного стану АД, на практиці оцінка їхніх електромагнітних параметрів при виробництві, ремонті чи експлуатації практично не здійснюється. Це обумовлено відсутністю прямих методів вимірювання параметрів, високою собівартістю традиційних випробувань, тривалістю процедур та впливом людського чинника.

У зв'язку з цим у роботі досліджується підхід до визначення електромагнітних параметрів асинхронного двигуна за даними його динамічних режимів роботи. Такий підхід дозволяє оцінювати якість і технічний стан АД без необхідності проведення тривалих і дорогих експериментів. Розробка ефективних методів і алгоритмів обробки даних динаміки двигуна відкриває можливості для автоматизованої діагностики та

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимізації режимів експлуатації, що є вкрай важливим для підвищення продуктивності гірничих підприємств.

Об'єкт дослідження – електромагнітні характеристики асинхронного електродвигуна в динамічних режимах роботи.

Мета роботи – розробка високопродуктивного комплексу визначення електромагнітних параметрів асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором за даними динамічних режимів роботи.

Практичне значення полягає у розробці високопродуктивної системи визначення електромагнітних параметрів асинхронного двигуна за даними динамічних режимів роботи, що дозволяє підвищити продуктивність приймально-здавальних випробувань АТ, скоротити собівартість проведення випробувань, підвищити достовірність інформації, що отримується.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, пов'язану з необхідністю підвищення ефективності роботи асинхронних електродвигунів у гірничій промисловості. Розглядаються технічні вимоги до параметрів двигунів, їхній вплив на надійність та енергоефективність гірничих машин. Зазначено проблеми існуючих методів випробувань, зокрема їх високу тривалість, вартість і обмежену інформативність, що підкреслює доцільність розробки нових підходів до визначення електромагнітних параметрів двигуна за динамічними режимами роботи.

У **першому розділі** здійснено формалізацію процесу визначення електромагнітних параметрів асинхронного двигуна на основі динамічних режимів його роботи. Побудовано математичну модель у координатній системі (α, β) , визначено необхідні вхідні дані (струми, напруги), розроблено дискретні форми рівнянь для чисельного обчислення параметрів. Визначено алгоритм покрокового обчислення потокозчеплень, струмів ротора та індуктивностей, що забезпечує можливість ідентифікації характеристик двигуна без зупинки технологічного процесу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У другому розділі проведено верифікацію запропонованого алгоритму на прикладі пускового режиму асинхронного двигуна типу АІМ160М6. Реалізовано обчислювальний експеримент, в якому визначено зміну параметрів у часі. Проаналізовано точність розрахунків, співставлено отримані результати з еталонними залежностями. Показано, що алгоритм дозволяє ефективно відслідковувати зміну параметрів ротора у режимі пуску.

У третьому розділі розглядаються джерела похибок, що виникають під час реалізації алгоритму: апроксимація похідних, вплив малих струмів у початкові моменти часу, чутливість до точності вхідних даних. Показано, що найбільші похибки виникають при обчисленні похідних струмів ротора та намагнічування. Для їх зменшення запропоновано перехід до похідних струмів статора та використання координатних перетворень у систему (u, v) , що обертається разом із полем.

У четвертому розділі порівнюються два алгоритми: традиційний у системі (α, β) та вдосконалений у координатах (u, v) . Проведено аналіз точності, чутливості до шумів і стійкості обчислень. Показано, що алгоритм на основі системи, що обертається з частотою мережі, забезпечує менші похибки та більш надійні результати в усьому діапазоні швидкостей ротора. Обґрунтовано доцільність використання саме цього підходу для практичного визначення параметрів АД у складних умовах експлуатації.

Ключові слова: АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПАРАМЕТРИ, ДИНАМІЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ, ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ, ГІРНИЧА ПРОМИСЛОВІСТЬ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Синтез алгоритму визначення електромагнітних параметрів	10
Розділ 2. Дослідження алгоритма визначення електромагнітних параметрів	20
Розділ 3. Аналіз обчислювальних похибок	25
Розділ 4. Порівняльний аналіз алгоритмів визначення параметрів АД	35
Висновки	41
Список використаних джерел	42

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Ефективна робота гірничих підприємств значною мірою визначається техніко-економічними показниками застосовуваних гірничих машин. Специфіка експлуатації гірничих машин з електроприводами, які використовують асинхронний електродвигун (АД) із короткозамкненим ротором, висуває особливі вимоги до показників якості електродвигунів, таких як, наприклад, ККД, коефіцієнт потужності, максимальний момент, початковий пусковий момент, початковий пусковий струм. Ці показники впливають на ефективність роботи скребкових конвеєрів, для яких особливо важливо забезпечити ідентичність характеристик усіх АД. У приводах прохідницьких і очисних комбайнів необхідний контроль параметрів електродвигунів, оскільки саме вони визначають величину навантажень у трансмісіях гірничих машин.

Таким чином, при експлуатації АД у конкретних приводах гірничих машин інформація про показники якості є необхідною, наприклад, для визначення умов оптимального використання АД; для оцінки стану АД у період експлуатації з метою можливої корекції технологічного процесу; при застосуванні АД у системах керованих електроприводів; для визначення моменту припинення експлуатації АД тощо.

Ці вимоги диктують необхідність знання показників якості електродвигуна та його експлуатаційних характеристик, основою для отримання яких є або досвід, або інформація про значення параметрів АД.

Асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором є одним із найбільш масових і важливих видів електромеханічних перетворювачів енергії у гірничій промисловості. Водночас виробництво та ремонт АД на гірничих підприємствах не супроводжується оцінкою якості кожного

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випущеного (відремонтованого) двигуна. Оцінка показників якості роботи конкретних АД у гірничій промисловості практично не проводиться.

Причини цієї ситуації добре відомі. По-перше, це відсутність можливості безпосереднього вимірювання електромагнітних параметрів двигуна, таких як активний і реактивний опір ротора, індуктивний опір кола намагнічування. По-друге, значна залежність параметрів асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, що використовується в гірничій промисловості, від режиму його роботи.

На сьогодні всі процедури випробувань електричних машин регламентовані відповідними стандартами. Варто зазначити, що алгоритми обробки зареєстрованої інформації під час цих випробувань є досить простими. Однак на практиці вони мають ряд недоліків, зокрема:

- Низька продуктивність, пов'язана з великою тривалістю випробувань; Наприклад, середні норми часу для проведення приймально-здавальних випробувань одного електродвигуна середньої потужності складають від 3 до 35 годин, залежно від їхньої глибини.
- Висока собівартість випробувань. Наприклад, для визначення залежності крутного моменту від кутової швидкості обертання ротора електродвигуна за чинними стандартами потрібне дороговартісне силове обладнання;
- Неповнота отриманої інформації, що потребує додаткової обробки;
- Вплив суб'єктивного фактора на достовірність результатів.

Таким чином, можна стверджувати, що вирішення проблеми якості виробництва, ремонту та експлуатації АД у гірничій промисловості стримується відсутністю ефективних методів оцінки цих процесів. З цієї точки зору дана проблема набуває особливої важливості, що підкреслює її актуальність та необхідність вирішення.

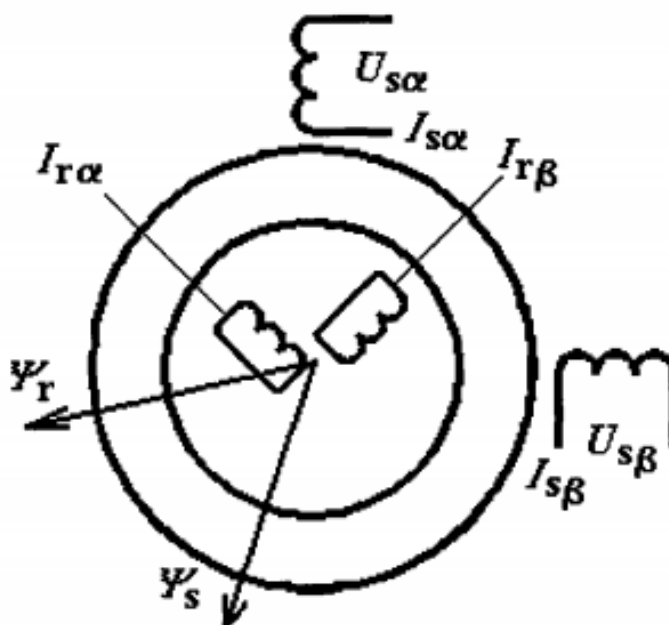
					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Синтез алгоритму визначення електромагнітних параметрів

При виборі режиму роботи АД під час його випробувань необхідно керуватися вимогами, що висуваються до проведення експрес-випробувань АД. Цим вимогам відповідає режим пуску двигуна способом прямого вмикання в мережу без навантаження.

Для синтезу алгоритму визначення електромагнітних параметрів АД із динамічних режимів скористаємося математичною моделлю.

Рівняння цієї моделі в координатній системі (α, β) мають вигляд:



					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив	Бащук Я.А.				Розділ 1			Лім.	Лист	Листів	
Перевірів	Сінчук І.О.									10	10
Реценз.								КНУ ЕЕМ-21-2			
Н. Контр.	Сінчук І.О.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

$$\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}, \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - R_s I_{s\beta}, \quad (1.1)$$

$$\Psi_{s\alpha} = L_s I_{s\alpha} + L_m I_{m\alpha}, \Psi_{s\beta} = L_s I_{s\beta} + L_m I_{m\beta}, \quad (1.2)$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = -R_r I_{r\alpha} - \rho\omega\Psi_{r\beta}, \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = -R_r I_{r\beta} + \rho\omega\Psi_{r\alpha}, \quad (1.3)$$

$$\Psi_{r\alpha} = L_r I_{r\alpha} + L_m I_{m\alpha}, \Psi_{r\beta} = L_r I_{r\beta} + L_m I_{m\beta}, \quad (1.4)$$

$$I_{m\alpha} = I_{s\alpha} + I_{r\alpha}, I_{m\beta} = I_{s\beta} + I_{r\beta}, \quad (1.5)$$

$$L_m = \frac{A \cdot B}{1 + B^2 \cdot I_m^2}, \quad (1.6)$$

$$I_m^2 = I_{m\alpha}^2 + I_{m\beta}^2, \quad (1.7)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M - M_c}{J}, M_c = k_c \cdot \omega, \quad (1.8)$$

$$M = 1.5\rho(\Psi_{s\alpha} I_{s\beta} - \Psi_{s\beta} I_{s\alpha}), \quad (1.9)$$

де $\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$, $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ – складові за осями α і β миттєвих значень потокозчеплень статора і ротора; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ – складові за осями α і β миттєвих значень напруги, підведеної до статора двигуна; $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$, $I_{r\alpha}$, $I_{r\beta}$ – складові за осями α і β миттєвих значень струмів статора і ротора; R_s , R_r – активні опори статора і ротора; L_s , L_r – індуктивності розсіювання кіл статора і ротора; L_m – індуктивність кола намагнічування; $I_{m\alpha}$, $I_{m\beta}$ – складові за осями α і β миттєвих значень струму намагнічування; I_m – амплітудне миттєве значення струму намагнічування; ρ – число пар полюсів; ω – кутова швидкість обертання ротора; J – момент інерції ротора; M_c – момент опору на валу ротора; k_c – коефіцієнт моменту опору; A , B – параметри, що характеризують форму кривої намагнічування.

Вважаємо, що $R_s, L_s, J, k_c, A, B, \rho$ є відомими. Величини $U_{s\alpha}, U_{s\beta}, I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ – вимірюються. Крім того, врахуємо, що в момент пуску двигуна ($t=0$) складові потокозчеплення статора $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ і ротора $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ мають нульові значення.

Для знаходження складових потокозчеплення статора $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ при різних значеннях t скористаємося системою рівнянь (1.1) із початковими умовами $\Psi_{s\alpha}=0, \Psi_{s\beta}=0$ при $t=0$.

Оскільки праві частини рівнянь визначаються дискретними значеннями напруги U_s і струму статора I_s при $t=k\Delta t$ ($k \approx 0, 1, 2, \dots$), необхідно застосувати скінченно-різницеву апроксимацію.

Скористаємося чотириточковою схемою з вузлами $t_k=t_0+k\Delta t$, $k=0, 1, 2, 3$.

$$X_1 = X_0 + \frac{\Delta t}{24} (9\dot{X}_0 + 19\dot{X}_1 - 5\dot{X}_2 + \dot{X}_3), \quad (1.10)$$

де $\dot{X}_k$ – значення похідної величини X у k -й точці.

Розрахункові формули для обчислення $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ при $t_k=t_0+\Delta t$ з урахуванням (1.10) набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} \Psi_{s\alpha 1} &= \Psi_{s\alpha 0} + \frac{\Delta t}{24} (9\dot{\Psi}_{s\alpha 0} + 19\dot{\Psi}_{s\alpha 1} - 5\dot{\Psi}_{s\alpha 2} + \dot{\Psi}_{s\alpha 3}), \\ \Psi_{s\beta 1} &= \Psi_{s\beta 0} + \frac{\Delta t}{24} (9\dot{\Psi}_{s\beta 0} + 19\dot{\Psi}_{s\beta 1} - 5\dot{\Psi}_{s\beta 2} + \dot{\Psi}_{s\beta 3}), \end{aligned} \quad (1.11)$$

де $\dot{\Psi}_{s\alpha}, \dot{\Psi}_{s\beta}$ визначаються за правими частинами (1.1).

Після знаходження для чергового значення t величин $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ згідно з (1.11) приступимо до пошуку $I_{r\alpha}, I_{r\beta}, L_m$.

З (1.2) отримуємо:

$$\begin{aligned} I_{m\alpha} &= \frac{\Psi_{s\alpha} - L_s I_{s\alpha}}{L_m}, \\ I_{m\beta} &= \frac{\Psi_{s\beta} - L_s I_{s\beta}}{L_m}, \end{aligned} \quad (1.12)$$

Тоді вираз для визначення квадрата струму намагнічування набуде вигляду:

$$I_m^2 = \frac{(\Psi_{s\alpha} - L_s I_{s\alpha})^2 + (\Psi_{s\beta} - L_s I_{s\beta})^2}{L_m^2}, \quad (1.13)$$

Якщо позначити

$$C^2 = (\Psi_{s\alpha} - L_s I_{s\alpha})^2 + (\Psi_{s\beta} - L_s I_{s\beta})^2, \quad (1.14)$$

і підставити (1.13) у (1.6), то отримуємо рівняння відносно індуктивності кола намагнічування L_m (після скорочення на L_m^2):

$$I_m^2 - A \cdot B \cdot I_m + \frac{B^2 C^2}{2} = 0,$$

рішення якого має вигляд

$$L_m = \frac{B}{2} \left(A + \sqrt{A^2 + 2 \cdot C^2} \right). \quad (1.15)$$

Вирішуючи спільно (1.12) та (1.5) отримаємо:

$$\begin{aligned} I_{r\alpha} &= \frac{\Psi_{s\alpha} - L_s I_{s\alpha}}{L_m} - I_{s\alpha}, \\ I_{r\beta} &= \frac{\Psi_{s\beta} - L_s I_{s\beta}}{L_m} - I_{s\beta}, \end{aligned} \quad (1.16)$$

Для знаходження значень ω при різних значеннях t скористаємося системою рівнянь (1.8) із початковими умовами $\omega=0$ при $t=0$. Оскільки права

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частина рівняння визначається лише дискретними значеннями M при $t=k_{\Delta}t$ ($k \approx 0, 1, 2, \dots$), то, застосовуючи скінченно-різницеву апроксимацію, аналогічно апроксимації для поточкозчеплень $\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$ (1.10, 1.11), отримуємо:

$$\omega_1 = \omega_0 + \frac{\Delta t}{24} (9\dot{\omega}_0 + 19\dot{\omega}_1 - 5\dot{\omega}_2 + \dot{\omega}_3). \quad (1.17)$$

За умови припущення про сталість значень L_r і L_m у певній околиці $t=t_0+\Delta t$, з (1.4) отримуємо:

$$\begin{aligned} \Psi_{r\alpha} &= L_r \dot{I}_{r\alpha} + L_m \dot{I}_{m\alpha}, \\ \Psi_{r\beta} &= L_r \dot{I}_{r\beta} + L_m \dot{I}_{m\beta} \end{aligned} \quad (1.18)$$

і підставляючи в (3.3), отримуємо систему рівнянь відносно L_r і R_r :

$$\begin{cases} -R_r I_{r\alpha} - \rho\omega \cdot (L_r I_{r\beta} + L_m I_{m\beta}) = L_r \dot{I}_{r\alpha} + L_m \dot{I}_{m\alpha} \\ -R_r I_{r\beta} - \rho\omega \cdot (L_r I_{r\alpha} + L_m I_{m\alpha}) = L_r \dot{I}_{r\beta} + L_m \dot{I}_{m\beta} \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} -R_r I_{r\alpha} - L_r \cdot (\dot{I}_{r\alpha} + \rho\omega \cdot I_{r\beta}) = L_m (\dot{I}_{m\alpha} + \rho\omega \cdot I_{m\beta}) \\ -R_r I_{r\beta} - L_r \cdot (\dot{I}_{r\beta} + \rho\omega \cdot I_{r\alpha}) = L_m (\dot{I}_{m\beta} + \rho\omega \cdot I_{m\alpha}) \end{cases} \quad (1.19)$$

Для розв'язання цієї системи рівнянь очевидно виникає необхідність пошуку апроксимації похідних $I_{m\alpha}$, $I_{m\beta}$, $I_{r\alpha}$, $I_{r\beta}$.

Для знаходження похідних скористаємося 5-точковою схемою з вузлами.

$$t_k = t_0 + k_{\Delta}t \quad (k = 0, 1, 2, 3, 4),$$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{12_{\Delta}t} (-3 \cdot I_0 - 10 \cdot I_1 + 18 \cdot I_2 - 6 \cdot I_3 + I_4) \quad (1.20)$$

і тоді маємо:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{r\alpha 1} &= \frac{1}{12_{\Delta t}} (-3 \cdot I_{r\alpha 0} - 10 \cdot I_{r\alpha 1} + 18 \cdot I_{r\alpha 2} - 6 \cdot I_{r\alpha 3} + I_{r\alpha 4}), \\ \dot{I}_{r\beta 1} &= \frac{1}{12_{\Delta t}} (-3 \cdot I_{r\beta 0} - 10 \cdot I_{r\beta 1} + 18 \cdot I_{r\beta 2} - 6 \cdot I_{r\beta 3} + I_{r\beta 4}), \end{aligned} \quad (1.21)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{m\alpha 1} &= \frac{1}{12_{\Delta t}} (-3 \cdot I_{m\alpha 0} - 10 \cdot I_{m\alpha 1} + 18 \cdot I_{m\alpha 2} - 6 \cdot I_{m\alpha 3} + I_{m\alpha 4}), \\ \dot{I}_{m\beta 1} &= \frac{1}{12_{\Delta t}} (-3 \cdot I_{m\beta 0} - 10 \cdot I_{m\beta 1} + 18 \cdot I_{m\beta 2} - 6 \cdot I_{m\beta 3} + I_{m\beta 4}), \end{aligned} \quad (1.22)$$

Визначення індуктивності розсіювання та активного опору роторного кола в усьому діапазоні зміни швидкості обертання ротора з режиму пуску двигуна шляхом прямого підключення до мережі без навантаження пояснюється схемою алгоритму, зображеною на рис. 1.1.

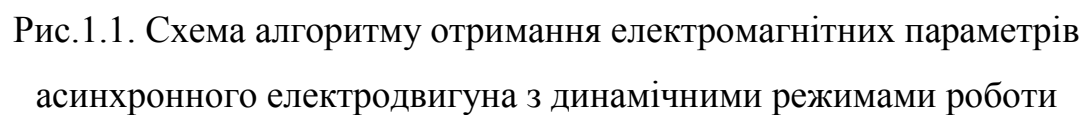
Функціональне призначення блоків, зображених на рис. 1.1:

Блоки 1, 2 – Датчики струмів у фазах А і В.

Блоки 3, 4 – Датчики лінійних напруг U_{AB} та U_{BC} .

Блок 5 – Координатний перетворювач струму статора I_s з трифазної системи координат (А, В, С) у двофазну (α , β).

$$I_{s\alpha} = \frac{2 \cdot I_B + I_A}{3}, I_{s\beta} = \frac{I_A}{\sqrt{3}}.$$



Блок 6. Координатний перетворювач напруги, статора U_s з трифазної системи координат (A,B,C) двофазну (α, β):

$$U_{s\alpha} = U_{BC}, U_{s\beta} = \frac{2 \cdot U_{AB} + U_{BC}}{\sqrt{3}},$$

Блок 7. Обчислювач потокозчеплення статора:

$$\Psi_{s\alpha} = \int_0^t (U_{s\alpha} - R_{s\alpha} I_{s\alpha}) dt, \Psi_{s\beta} = \int_0^t (U_{s\beta} - R_{s\beta} I_{s\beta}) dt,$$

При дискретних значеннях U_s, I_s для визначення Ψ_s , можна скористатися формулами:

$$\Psi_{s\alpha} = \Psi_{s\alpha 0} + \frac{\Delta t}{24} (9\Psi_{s\alpha 0} + 19\Psi_{s\alpha 1} - 5\Psi_{s\alpha 2} + \Psi_{s\alpha 3}),$$

$$\Psi_{s\beta} = \Psi_{s\beta 0} + \frac{\Delta t}{24} (9\Psi_{s\beta 0} + 19\Psi_{s\beta 1} - 5\Psi_{s\beta 2} + \Psi_{s\beta 3}),$$

де

$$\dot{\Psi}_{s\alpha(i)} = U_{s\alpha(i)} - R_s I_{s\alpha(i)}, \dot{\Psi}_{s\beta(i)} = U_{s\beta(i)} - R_s I_{s\beta(i)}.$$

Блок 8. Обчислювач електромагнітного моменту на валу двигуна

$$M = 1.5 \cdot p \cdot (\Psi_{s\alpha} I_{s\beta} - \Psi_{s\beta} I_{s\alpha}).$$

Блок 9. Обчислювач індуктивності ланцюга намагнічування:

$$C^2 = (\Psi_{s\alpha} - L_s I_{s\alpha})^2 + (\Psi_{s\beta} - L_s I_{s\beta})^2,$$

$$L_m = \frac{B}{2} \left(1 + \sqrt{1^2 + 2 \cdot C^2} \right).$$

Блок 10. Обчислювач кутової швидкості обертання ротора двигуна:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

$$\omega = \frac{1}{J} \int_0^t (M - M_c) dt + \omega_0.$$

При дискретних значеннях електромагнітного моменту M можна скористатися апроксимацією:

$$\omega_1 = \omega_0 + \frac{\Delta t}{24} (9\dot{\omega}_0 + 19\dot{\omega}_1 - 5\dot{\omega}_2 + \dot{\omega}_3),$$

де

$$\dot{\omega}_{(i)} = M_{(i)} - M_{c(i)}.$$

Блок 11. Обчислювач струму ланцюга намагнічування:

$$I_{m\alpha} = \frac{\Psi_{s\alpha} - L_s I_{s\alpha}}{L_m}, I_{m\beta} = \frac{\Psi_{s\beta} - L_s I_{s\beta}}{L_m}.$$

Блок 12. Обчислювач моменту опору на валу двигуни:

$$M_c = K_c \cdot \omega.$$

Блок 13. Обчислювач струму ротора:

$$I_{r\alpha} = I_{m\alpha} - I_{s\alpha}, I_{r\beta} = I_{m\beta} - I_{s\beta}.$$

Блок 14. Обчислювач швидкості зміни струму ротора у часі:

$$\dot{I}_{r\alpha} = \frac{dI_{r\alpha}}{dt}, \dot{I}_{r\beta} = \frac{dI_{r\beta}}{dt}.$$

При дискретних значеннях $I_{r\alpha}$, $I_{r\beta}$ можна скористатися апроксимацією:

$$\dot{I}_{r\alpha 1} = \frac{1}{12_{\Delta}t} (-3 \cdot I_{r\alpha 0} - 10 \cdot I_{r\alpha 1} + 18 \cdot I_{r\alpha 2} - 6 \cdot I_{r\alpha 3} + I_{r\alpha 4}),$$

$$\dot{I}_{r\beta 1} = \frac{1}{12_{\Delta}t} (-3 \cdot I_{r\beta 0} - 10 \cdot I_{r\beta 1} + 18 \cdot I_{r\beta 2} - 6 \cdot I_{r\beta 3} + I_{r\beta 4}).$$

Блок 15. Обчислювач швидкості зміни струму ланцюга намагнічування у часі:

$$\dot{I}_{m\alpha} = \frac{dI_{m\alpha}}{dt}, \dot{I}_{m\beta} = \frac{dI_{m\beta}}{dt}.$$

При дискретних значеннях $I_{m\alpha}$, $I_{m\beta}$ можна скористатися апроксимацією:

$$\dot{I}_{m\alpha 1} = \frac{1}{12_{\Delta}t} (-3 \cdot I_{m\alpha 0} - 10 \cdot I_{m\alpha 1} + 18 \cdot I_{m\alpha 2} - 6 \cdot I_{m\alpha 3} + I_{m\alpha 4}),$$

$$\dot{I}_{m\beta 1} = \frac{1}{12_{\Delta}t} (-3 \cdot I_{m\beta 0} - 10 \cdot I_{m\beta 1} + 18 \cdot I_{m\beta 2} - 6 \cdot I_{m\beta 3} + I_{m\beta 4}).$$

Блок 16. Обчислювач активного опору та індуктивності розсіювання кола ротора (шукані величини отримують шляхом розв'язання системи рівнянь відносно невідомих R_r , L_r).

$$\begin{cases} -R_r I_{r\alpha} - L_r (\dot{I}_{r\alpha} + \rho\omega \cdot I_{r\beta}) = L_m (\dot{I}_{m\alpha} + \rho\omega \cdot I_{m\beta}) \\ -R_r I_{r\beta} - L_r (\dot{I}_{r\beta} + \rho\omega \cdot I_{r\alpha}) = L_m (\dot{I}_{m\beta} + \rho\omega \cdot I_{m\alpha}) \end{cases}$$

Розділ 2. Дослідження алгоритма визначення електромагнітних параметрів

З метою перевірки працездатності алгоритму визначення електромагнітних параметрів АД, представленого у вигляді схеми на рис. 1.1, було проведено обчислювальний експеримент на прикладі електродвигуна А1М160 М6.

Параметри статорних і роторних кіл цього двигуна (активні опори та індуктивності кіл статора і ротора, індуктивність кола намагнічування) були отримані за результатами статичних випробувань АД на випробувальному стенді і наведені в табл. 2.1 та на рис. 2.1–2.2.

Значення активного опору та індуктивності розсіювання кола ротора задавалися залежностями: $R_r=f(\omega)$, $L_r=f(\omega)$, які показані на рис. 2.1 і рис. 2.2 відповідно. Час пуску $t=0.2$ с. Крок дискретизації вимірювання вхідних даних становить $\Delta t=0.001$ с.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив	Башук Я.А.				Розділ 2	Літ.	Лист
Перевірів	Сінчук І.О.						20
Реценз.							5
Н. Контр.	Сінчук І.О.					КНУ ЕЕМ-21-2	
Затвердив	Пересунько І.І.						

Таблиця 2.1.

Найменування показника	Од. виміру	Умовне позначенн я	Величина
Тип двигуна			A1M160 Mб
Номер двигуна		№	1128
Номінальна потужність, кВт	кВт	P_n	15,5
Число пар полюсів		ρ	3
З'єднання обмоток статора			Δ трикутник
Активний опір статора	Ом	R_s	0,806
Індуктивність розсіювання статора	Гн	L_s	0,0053317
Параметр кривої намагнічування		A	2,5
Параметр кривої намагнічування		B	0,075
Момент інерції ротора	кг·м ²	J	0,3571

Обчислювальний експеримент проводився у два етапи:

1. Моделювання на ЕОМ пуску АД способом прямого підключення до мережі без навантаження.
2. Моделювання здійснювалося шляхом розв'язання диференціальних рівнянь і співвідношень (1.1–1.9), що описують поведінку АД, з реєстрацією (запам'ятовуванням) миттєвих значень напруг (U_{sa} , $U_{s\beta}$) і струмів (I_{sa} , $I_{s\beta}$) статора.
3. Визначення електромагнітних параметрів ротора АД $\{R_r=f(\omega), L_r=f(\omega)\}$ за алгоритмом (рис. 1.1), використовуючи як вхідні дані результати моделювання пуску АД.

Результати обчислювального експерименту представлені на рис. 2.3-2.4.

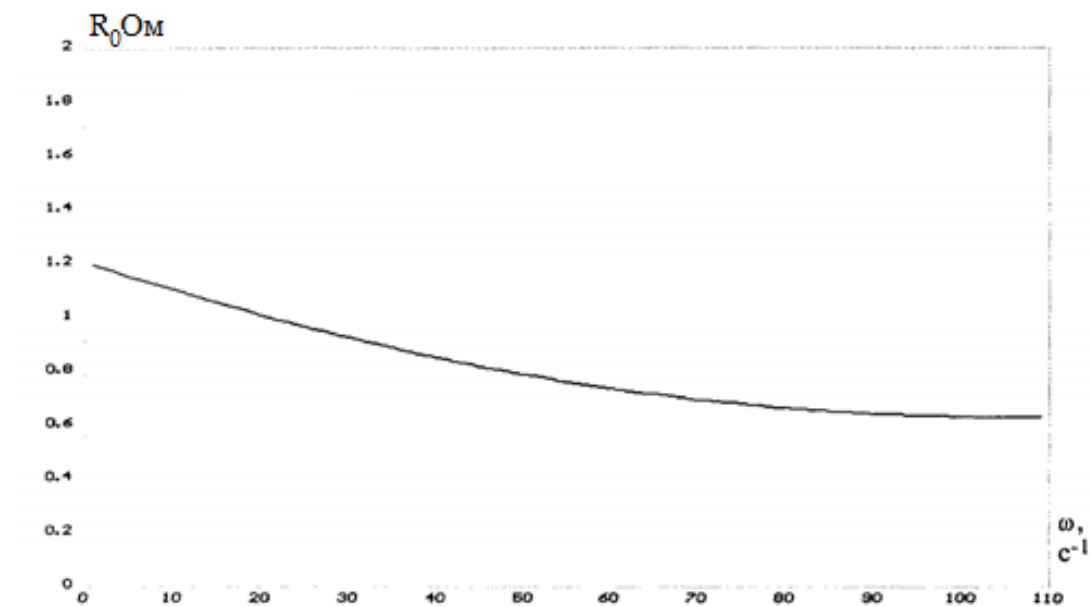


Рис.2.1. Залежна зміна активного опору роторного ланцюга від швидкості обертання

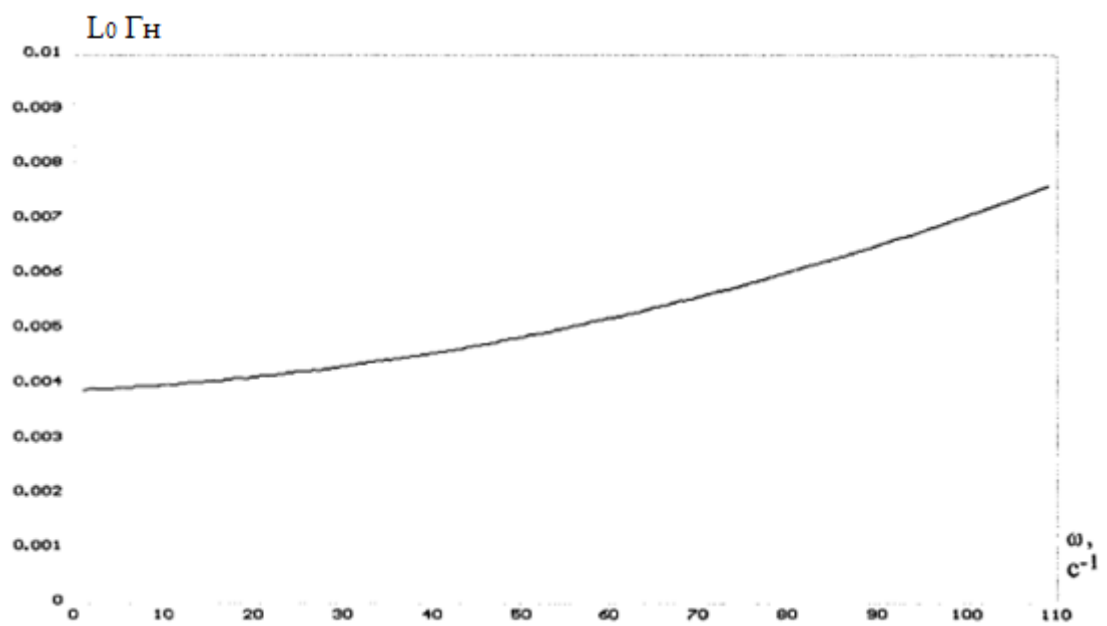


Рис.2.2. Залежна зміна індуктивності роторного ланцюга від швидкості обертання ротора.

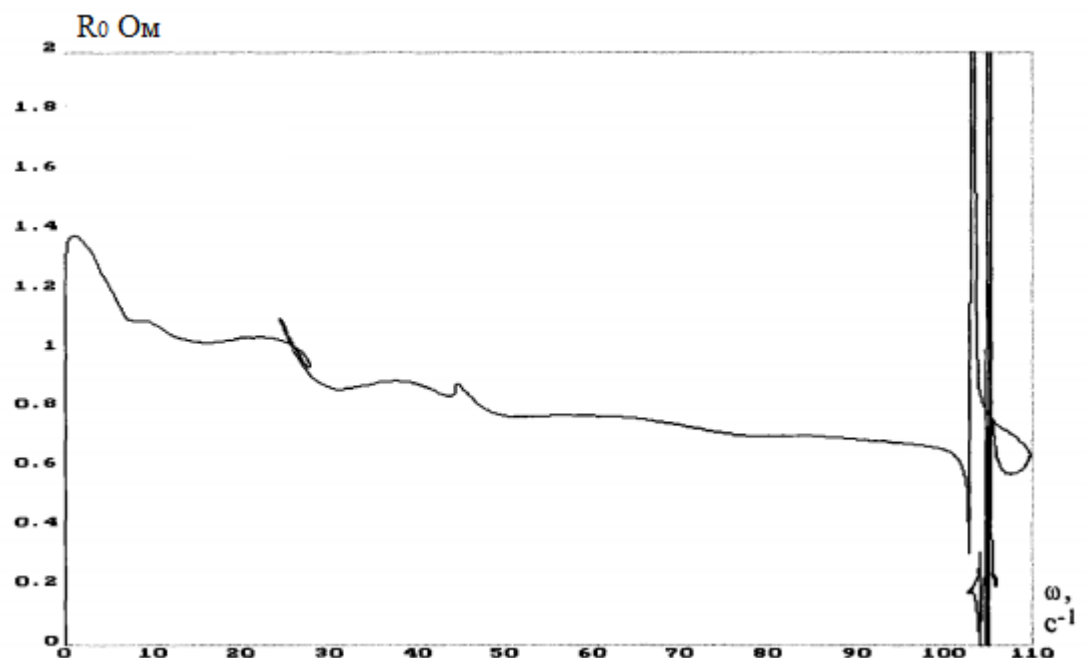


Рис.2.3. Зміни активного опору роторного ланцюга від швидкості обертання ротора за результатами обчислювального експерименту

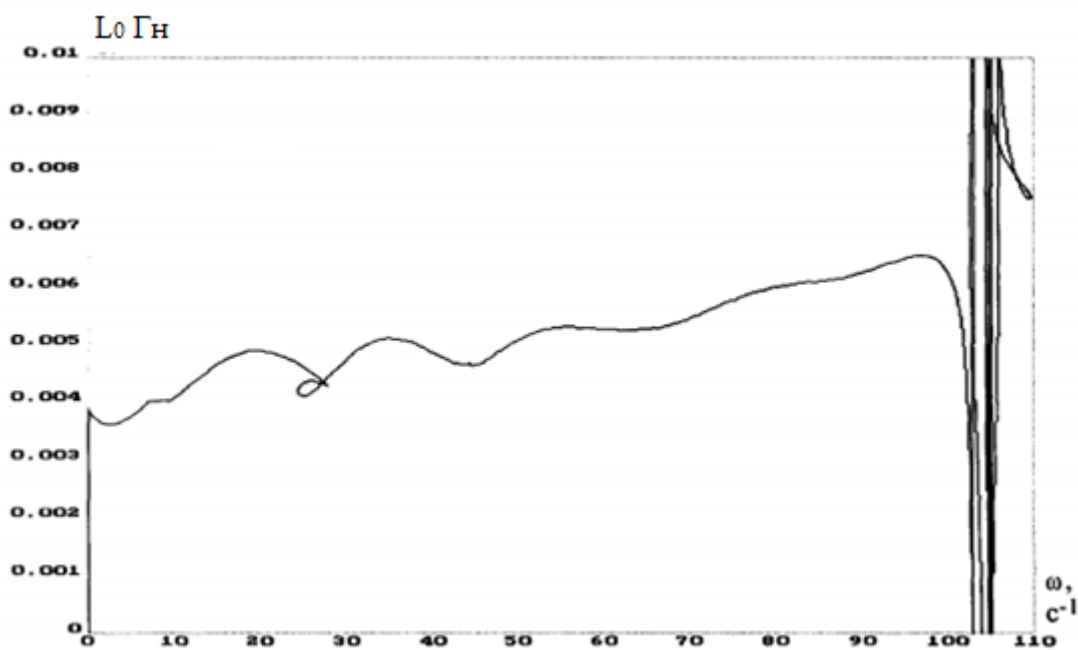


Рис.2.4. Зміни індуктивності роторного ланцюга від швидкості обертання ротора за результатами обчислювального

Порівнюючи параметри роторного ланцюга (рис.2.1-2.2) і отримані з обчислювального експерименту (рис.2.3-2.4) можна говорити про наявність обчислювальних похибок, властивих алгоритму за рис.1.1.

Розділ 3. Аналіз обчислювальних похибок

Під час обчислення роторних параметрів асинхронного електродвигуна можуть виникати обчислювальні похибки, пов'язані з визначенням похідних $\dot{I}_{m\alpha}, \dot{I}_{m\beta}, \dot{I}_{r\alpha}, \dot{I}_{r\beta}$.

З метою зменшення обчислювальних похибок позбудемося необхідності обчислення похідних $\dot{I}_{m\alpha}, \dot{I}_{m\beta}, \dot{I}_{r\alpha}, \dot{I}_{r\beta}$, замінивши їх на обчислення похідних $\dot{I}_{s\alpha}, \dot{I}_{s\beta}$.

Для цього перепишемо рівняння (1.19) з урахуванням (1.12) і (1.16).

$$\begin{aligned} R_r I_{r\alpha} + L_r \left(-\dot{I}_{s\alpha} + \frac{\Psi_{s\alpha} - L_s \dot{I}_{s\alpha}}{L_m} + \rho\omega \cdot I_{r\beta} \right) = \\ = -L_m \left(\frac{\dot{\Psi}_{s\alpha} - L_s \dot{I}_{s\alpha}}{L_m} + \rho\omega \cdot I_{m\beta} \right), \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} R_r I_{r\beta} + L_r \left(-\dot{I}_{s\beta} + \frac{\Psi_{s\beta} - L_s \dot{I}_{s\beta}}{L_m} - \rho\omega \cdot I_{r\alpha} \right) = \\ = -L_m \left(\frac{\dot{\Psi}_{s\beta} - L_s \dot{I}_{s\beta}}{L_m} - \rho\omega \cdot I_{m\alpha} \right), \end{aligned} \quad (3.2)$$

де $\dot{I}_{s\alpha}, \dot{I}_{s\beta}$ з урахуванням (1.20) перепишемо виразами:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{s\alpha 1} &= \frac{1}{12_{\Delta} t} (-3 \cdot I_{s\alpha 0} - 10 \cdot I_{s\alpha 1} + 18 \cdot I_{s\alpha 2} - 6 \cdot I_{s\alpha 3} + I_{s\alpha 4}), \\ \dot{I}_{s\beta 1} &= \frac{1}{12_{\Delta} t} (-3 \cdot I_{s\beta 0} - 10 \cdot I_{s\beta 1} + 18 \cdot I_{s\beta 2} - 6 \cdot I_{s\beta 3} + I_{s\beta 4}). \end{aligned} \quad (3.3)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03								
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат									
Розробив	Бащук Я.А.				Розділ 3				Лім.	Лист	Листів		
Перевірів	Сінчук І.О.										25	10	
Реценз.									КНУ ЕЕМ-21-2				
Н. Контр.	Сінчук І.О.												
Затвердив	Пересунько І.І.												

Прагнення зменшити обчислювальну похибку розв'язку системи (3.1, 3.2), яка визначається похибкою апроксимації $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ (3.3), зумовлює доцільність переходу з системи нерухомих координат (α, β) у систему координат (u, v) , що обертається з частотою мережі ω_H .

Це можна здійснити за допомогою декартових перетворень:

$$\begin{aligned} f_{\alpha} &= f_u \cdot \cos(\gamma) - f_v \cdot \sin(\gamma), \\ f_{\beta} &= f_v \cdot \cos(\gamma) + f_u \cdot \sin(\gamma), \end{aligned} \quad (3.4)$$

або

$$\begin{aligned} f_u &= f_{\alpha} \cdot \cos(\gamma) + f_{\beta} \cdot \sin(\gamma), \\ f_v &= f_{\beta} \cdot \cos(\gamma) - f_{\alpha} \cdot \sin(\gamma), \end{aligned} \quad (3.5)$$

де

$$\cos(\gamma) = \frac{U_{s\alpha}}{U_s}, \sin(\gamma) = \frac{U_{s\beta}}{U_s}, U_s = \sqrt{U_{s\alpha}^2 + U_{s\beta}^2} \quad (3.6)$$

Враховуючи, що $\dot{\gamma} = \omega_H$ (де ω_H - кутова частота мережі), отримуємо еквівалентну систему:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_{su} &= U_{su} - R_s I_{su} + \omega_H \Psi_{sv}, \\ \dot{\Psi}_{sv} &= U_{sv} - R_s I_{sv} + \omega_H \Psi_{su}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{su} &= L_s I_{su} + L_m I_{mu}, \\ \Psi_{sv} &= L_s I_{sv} + L_m I_{mv}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_{ru} &= -R_r I_{ru} - (\omega_H - \rho\omega) \cdot \Psi_{rv}, \\ \dot{\Psi}_{rv} &= -R_r I_{rv} + (\omega_H - \rho\omega) \cdot \Psi_{ru}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{ru} &= L_r I_{ru} + L_m I_{mu}, \\ \Psi_{rv} &= L_r I_{rv} + L_m I_{mv}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} I_{mu} &= I_{su} + I_{ru}, \\ I_{mv} &= I_{sv} + I_{rv}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

З огляду на більшу складність (3.7) у порівнянні з (1.1), ми визначаємо Ψ_{su} , Ψ_{sv} на основі (1.11), L_m за допомогою (1.15), а $I_{r\alpha}$, $I_{r\beta}$ — за допомогою (1.16).

На цій основі можуть бути знайдені:

$$\begin{aligned}\Psi_{su} &= \Psi_{s\alpha} \cdot \cos(\gamma) + \Psi_{s\beta} \cdot \sin(\gamma), \\ \Psi_{sv} &= \Psi_{s\beta} \cdot \cos(\gamma) - \Psi_{s\alpha} \cdot \sin(\gamma),\end{aligned}\quad (3.12)$$

$$\begin{aligned}I_{ru} &= I_{r\alpha} \cdot \cos(\gamma) + I_{r\beta} \cdot \sin(\gamma), \\ I_{rv} &= I_{r\beta} \cdot \cos(\gamma) - I_{r\alpha} \cdot \sin(\gamma),\end{aligned}\quad (3.13)$$

$$\begin{aligned}\dot{\Psi}_{su} &= \Psi_{s\alpha} \cdot \cos(\gamma) + \Psi_{s\beta} \cdot \sin(\gamma) + \omega_H \Psi_{sv}, \\ \dot{\Psi}_{sv} &= \Psi_{s\beta} \cdot \cos(\gamma) - \Psi_{s\alpha} \cdot \sin(\gamma) - \omega_H \Psi_{su}.\end{aligned}\quad (3.14)$$

За допомогою перетворень вихідних даних

$$\begin{aligned}I_{su} &= I_{s\alpha} \cdot \cos(\gamma) + I_{s\beta} \cdot \sin(\gamma), \\ I_{sv} &= I_{s\beta} \cdot \cos(\gamma) - I_{s\alpha} \cdot \sin(\gamma),\end{aligned}\quad (3.15)$$

ми отримуємо можливість використання (3.3) для знаходження

$$\begin{aligned}\dot{I}_{su1} &= \frac{1}{12_{\Delta}t} (-3 \cdot I_{su0} - 10 \cdot I_{su1} + 18 \cdot I_{su2} - 6 \cdot I_{su3} + I_{su4}), \\ \dot{I}_{sv1} &= \frac{1}{12_{\Delta}t} (-3 \cdot I_{sv0} - 10 \cdot I_{sv1} + 18 \cdot I_{sv2} - 6 \cdot I_{sv3} + I_{sv4}).\end{aligned}\quad (3.16)$$

При висловлених вище припущеннях про сталість значень L_r і L_m у певній околиці $t=t_0+\Delta t$, з (1.10) отримуємо:

$$\begin{aligned}\dot{\Psi}_{ru} &= L_r \dot{I}_{ru} + L_m \dot{I}_{mu}, \\ \dot{\Psi}_{rv} &= L_r \dot{I}_{rv} + L_m \dot{I}_{mv}.\end{aligned}\quad (3.17)$$

Так як

$$\begin{aligned}I_{ru} &= \frac{\Psi_{su} - (L_s + L_m) \cdot I_{su}}{L_m}, \\ I_{rv} &= \frac{\Psi_{sv} - (L_s + L_m) \cdot I_{sv}}{L_m},\end{aligned}\quad (3.18)$$

то

$$\begin{aligned}\dot{\Psi}_{ru} &= L_r \frac{\dot{\Psi}_{su} - (L_s + L_m) \cdot \dot{I}_{su}}{L_m} + (\dot{\Psi}_{su} - L_s \cdot \dot{I}_{su}), \\ \dot{\Psi}_{rv} &= L_r \frac{\dot{\Psi}_{sv} - (L_s + L_m) \cdot \dot{I}_{sv}}{L_m} + (\dot{\Psi}_{sv} - L_s \cdot \dot{I}_{sv}).\end{aligned}\quad (3.19)$$

Підставляючи (3.19) в (3.10) отримуємо:

$$\begin{aligned}R_r I_{ru} - L_r \frac{\dot{\Psi}_{su} - (L_s + L_m) \cdot \dot{I}_{su}}{L_m} + (\dot{\Psi}_{su} - L_s \cdot \dot{I}_{su}) &= (\omega_H - \rho\omega)(L_r \dot{I}_{rv} + L_m \dot{I}_{mv}), \\ R_r I_{rv} - L_r \frac{\dot{\Psi}_{sv} - (L_s + L_m) \cdot \dot{I}_{sv}}{L_m} + (\dot{\Psi}_{sv} - L_s \cdot \dot{I}_{sv}) &= -(\omega_H - \rho\omega)(L_r \dot{I}_{ru} + L_m \dot{I}_{mu})\end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned}R_r I_{ru} - L_r \frac{\dot{\Psi}_{su} - (L_s + L_m) \cdot \dot{I}_{su} - (\omega_H - \rho\omega)L_m \dot{I}_{rv}}{L_m} = \\ -(\dot{\Psi}_{su} - L_s \cdot \dot{I}_{su}) + (\omega_H - \rho\omega)(\Psi_{sv} - L_s \cdot I_{sv}),\end{aligned}\quad (3.20)$$

$$\begin{aligned}R_r I_{rv} - L_r \frac{\dot{\Psi}_{sv} - (L_s + L_m) \cdot \dot{I}_{sv} - (\omega_H - \rho\omega)L_m \dot{I}_{ru}}{L_m} = \\ -(\dot{\Psi}_{sv} - L_s \cdot \dot{I}_{sv}) - (\omega_H - \rho\omega)(\Psi_{su} - L_s \cdot I_{su}),\end{aligned}\quad (3.21)$$

Розв'язуючи систему (3.20, 3.21) відносно невідомих, знаходимо R_r і L_r .

З урахуванням сказаного, алгоритм визначення параметрів АД, що дозволяє уникнути розглянуті вище обчислювальні похибки, можна представити у вигляді схеми, показаної на рис. 3.1.

Функціональне призначення блоків, зображених на рис. 3.1:

Блоки 1, 2 – датчики струмів у фазах А і В.

Блоки 3, 4 – датчики лінійних напруг U_{AB} і U_{BC} .

Блок 5. Координатний перетворювач струму статора I_s з трифазної системи координат (А,В,С) у двофазну (α, β):

$$I_{s\alpha} = \frac{2 \cdot I_B + I_A}{3}, I_{s\beta} = \frac{I_A}{\sqrt{3}}.$$

Блок 6. Координатний перетворювач напруги, статора U_s з трифазної системи координат (А,В,С) двофазну (α, β):

$$U_{s\alpha} = U_{BC}, U_{s\beta} = \frac{2 \cdot U_{AB} + U_{BC}}{\sqrt{3}},$$

Блок 7. Обчислювач потокозчеплення статора:

$$\Psi_{s\alpha} = \int_0^t (U_{s\alpha} - R_{s\alpha} I_{s\alpha}) dt, \Psi_{s\beta} = \int_0^t (U_{s\beta} - R_{s\beta} I_{s\beta}) dt,$$

При дискретних значеннях U_s , I_s для визначення Ψ_s , можна скористатися формулами:

$$\Psi_{s\alpha 1} = \Psi_{s\alpha 0} + \frac{\Delta t}{24} (9\Psi_{s\alpha 0} + 19\dot{\Psi}_{s\alpha 1} - 5\dot{\Psi}_{s\alpha 2} + \dot{\Psi}_{s\alpha 3}),$$

$$\Psi_{s\beta 1} = \Psi_{s\beta 0} + \frac{\Delta t}{24} (9\Psi_{s\beta 0} + 19\dot{\Psi}_{s\beta 1} - 5\dot{\Psi}_{s\beta 2} + \dot{\Psi}_{s\beta 3}),$$

де

$$\dot{\Psi}_{s\alpha(i)} = U_{s\alpha(i)} - R_s I_{s\alpha(i)}, \dot{\Psi}_{s\beta(i)} = U_{s\beta(i)} - R_s I_{s\beta(i)}.$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

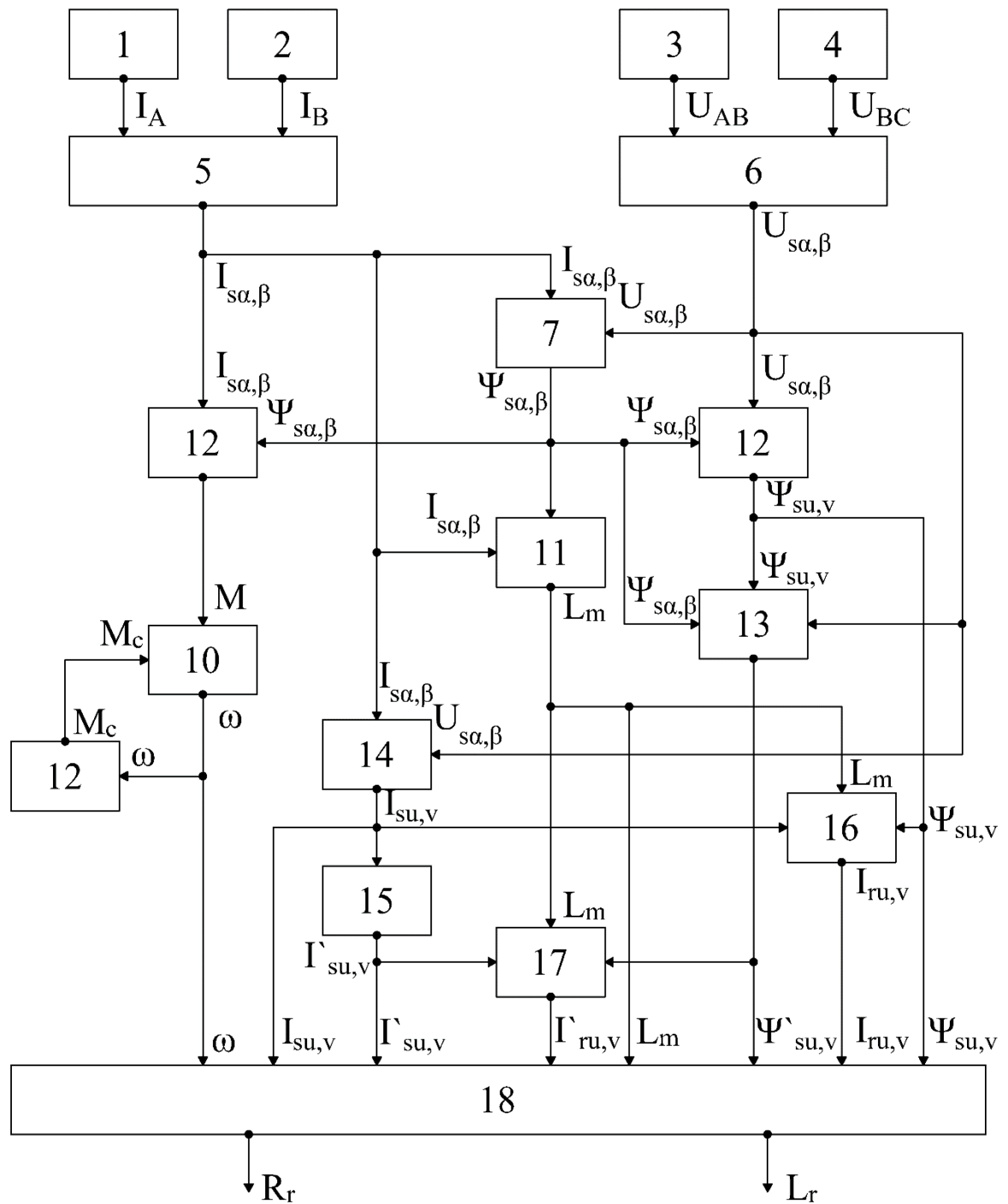


Рис.3.1. Схема алгоритму отримання електромагнітних параметрів асинхронного електродвигуна з динамічних режимів роботи

Блок 8. Обчислювач електромагнітного моменту на валу двигуна:

$$M = 1.5 \cdot p \cdot (\Psi_{s\alpha} I_{s\beta} - \Psi_{s\beta} I_{s\alpha}).$$

Блок 9. Обчислювач кутової швидкості обертання ротора двигуна:

$$\omega = \frac{1}{J} \int_0^t (M - M_c) dt + \omega_0.$$

При дискретних значеннях електромагнітного моменту M можна скористатися апроксимацією:

$$\omega_1 = \omega_0 + \frac{\Delta t}{24} (9\omega_0 + 19\omega_1 - 5\omega_2 + \omega_3),$$

де

$$\dot{\omega}_{(i)} = M_{(i)} - M_{c(i)}.$$

Блок 10. Обчислювач моменту опору на валу двигуна:

$$M_c = K_c \cdot \omega.$$

Блок 11. Обчислювач індуктивності ланцюга намагнічування:

$$C^2 = (\Psi_{s\alpha} - L_s I_{s\alpha})^2 + (\Psi_{s\beta} - L_s I_{s\beta})^2,$$

$$L_m = \frac{B}{2} \left(\Lambda + \sqrt{\Lambda^2 + 2 \cdot C^2} \right).$$

Блок 12. Координатний перетворювач потокозчеплення статора:

$$\cos(\gamma) = \frac{U_{s\alpha}}{U_s}, \sin(\gamma) = \frac{U_{s\beta}}{U_s}, U_s = \sqrt{U_{s\alpha}^2 + U_{s\beta}^2}$$

$$\Psi_{su} = \Psi_{s\alpha} \cdot \cos(\gamma) + \Psi_{s\beta} \cdot \sin(\gamma),$$

$$\Psi_{sv} = \Psi_{s\beta} \cdot \cos(\gamma) - \Psi_{s\alpha} \cdot \sin(\gamma).$$

Блок 13. Координатний перетворювач швидкості зміни потокозчеплення статора:

$$\cos(\gamma) = \frac{U_{s\alpha}}{U_s}, \sin(\gamma) = \frac{U_{s\beta}}{U_s}, U_s = \sqrt{U_{s\alpha}^2 + U_{s\beta}^2}$$

$$\dot{\Psi}_{su} = \Psi_{s\alpha} \cdot \cos(\gamma) + \Psi_{s\beta} \cdot \sin(\gamma) + \omega_H \Psi_{sv},$$

$$\dot{\Psi}_{sv} = \Psi_{s\beta} \cdot \cos(\gamma) - \Psi_{s\alpha} \cdot \sin(\gamma) - \omega_H \Psi_{su}.$$

Блок 14. Координатний перетворювач струму статора:

$$\cos(\gamma) = \frac{I_{s\alpha}}{I_s}, \sin(\gamma) = \frac{I_{s\beta}}{I_s}, I_s = \sqrt{I_{s\alpha}^2 + I_{s\beta}^2}$$

$$I_{su} = I_{s\alpha} \cdot \cos(\gamma) + I_{s\beta} \cdot \sin(\gamma),$$

$$I_{sv} = I_{s\beta} \cdot \cos(\gamma) - I_{s\alpha} \cdot \sin(\gamma),$$

Блок 15. Обчислювач швидкості зміни струму статора у часі:

$$\dot{I}_{su} = \frac{dI_{su}}{dt}, \dot{I}_{sv} = \frac{dI_{sv}}{dt}.$$

При дискретних значеннях I_{su} , I_{sv} можна скористатися апроксимацією:

$$\dot{I}_{su1} = \frac{1}{12_{\Delta t}} (-3 \cdot I_{su0} - 10 \cdot I_{su1} + 18 \cdot I_{su2} - 6 \cdot I_{su3} + I_{su4}),$$

$$\dot{I}_{sv1} = \frac{1}{12_{\Delta t}} (-3 \cdot I_{sv0} - 10 \cdot I_{sv1} + 18 \cdot I_{sv2} - 6 \cdot I_{sv3} + I_{sv4}).$$

Блок 16. Обчислювач струму ротора:

$$I_{ru} = \frac{\Psi_{su} - (L_s + L_m) \cdot I_{su}}{L_m},$$

$$I_{rv} = \frac{\Psi_{sv} - (L_s + L_m) \cdot I_{sv}}{L_m}.$$

Блок 17. Обчислювач швидкості зміни струму ротора:

$$\dot{I}_{ru} = \frac{\Psi_{su} - (L_s + L_m) \cdot \dot{I}_{su}}{L_m},$$

$$\dot{I}_{rv} = \frac{\Psi_{sv} - (L_s + L_m) \cdot \dot{I}_{sv}}{L_m}$$

Блок 18. Обчислювач активного опору та індуктивності розсіювання роторної цепі (шукані величини отримують шляхом розв'язання системи рівнянь відносно невідомих R_r , L_r):

$$R_r I_{ru} - L_r \frac{\Psi_{su} - (L_s + L_m) \cdot \dot{I}_{su} - (\omega_H - \rho\omega) L_m \dot{I}_{rv}}{L_m} =$$

$$-(\Psi_{su} - L_s \cdot \dot{I}_{su}) + (\omega_H - \rho\omega)(\Psi_{sv} - L_s \cdot \dot{I}_{sv}),$$

$$R_r I_{rv} - L_r \frac{\Psi_{sv} - (L_s + L_m) \cdot \dot{I}_{sv} - (\omega_H - \rho\omega) L_m \dot{I}_{ru}}{L_m} =$$

$$-(\Psi_{sv} - L_s \cdot \dot{I}_{sv}) - (\omega_H - \rho\omega)(\Psi_{su} - L_s \cdot \dot{I}_{su}),$$

З метою перевірки алгоритму визначення електромагнітних параметрів АД, представленого у вигляді схеми на рис. 3.1, було проведено обчислювальний експеримент аналогічно описаному в р. 2.

Отримані електромагнітні параметри ротора АД (R_r і L_r) за алгоритмом (рис. 3.1), використовуючи як вхідні дані результати моделювання пуску АД, описані в р. 2, наведені на рис. 3.2 і рис. 3.3.

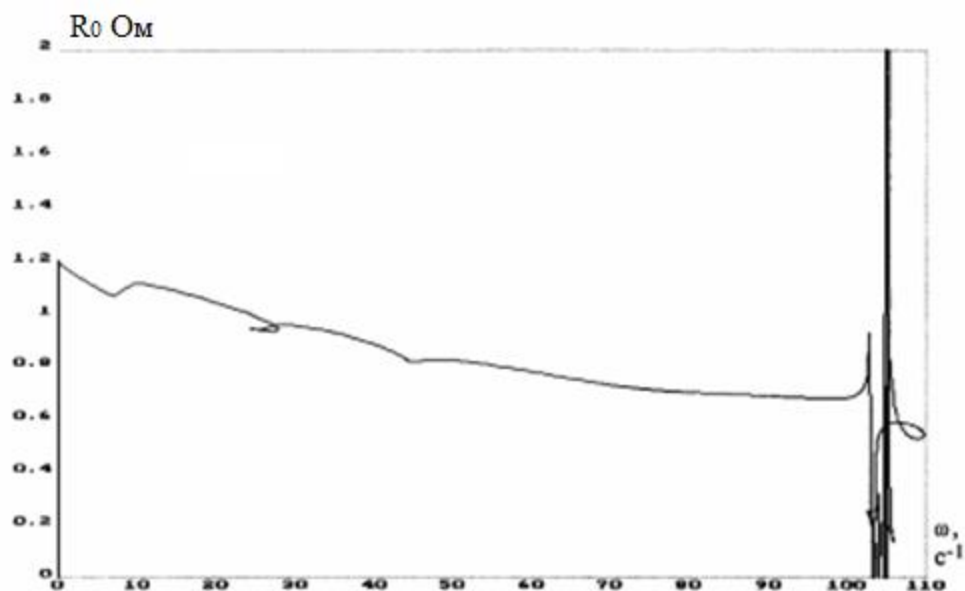


Рис.3.2. Зміни активного опору роторного ланцюга від швидкості обертання ротора за результатами обчислювального експеримента

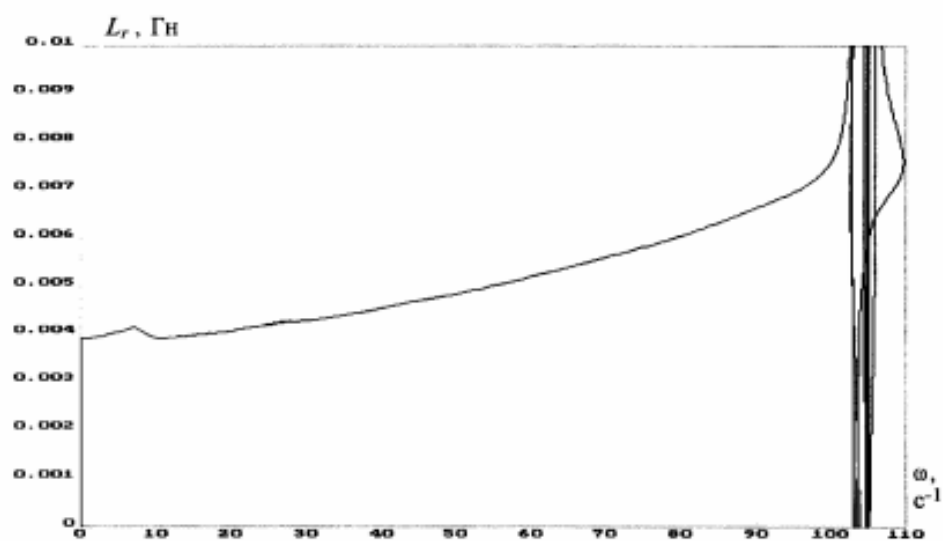


Рис.3.3 Зміни індуктивності роторного ланцюга від швидкості обертання ротора за результатами обчислювального експеримента

Розділ 4. Порівняльний аналіз алгоритмів визначення параметрів АД

Порівняємо результати обчислювальних експериментів для алгоритму по рис.1.1 і алгоритму по рис.3.1 з вихідними значеннями параметрів ротора (див. рис.4.1, 4.2).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.249-03			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив	Башук Я.А.				Розділ 4	Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Сінчук І.О.						35	4
Реценз.								
Н. Контр.	Сінчук І.О.							
Затвердив	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-21-2		

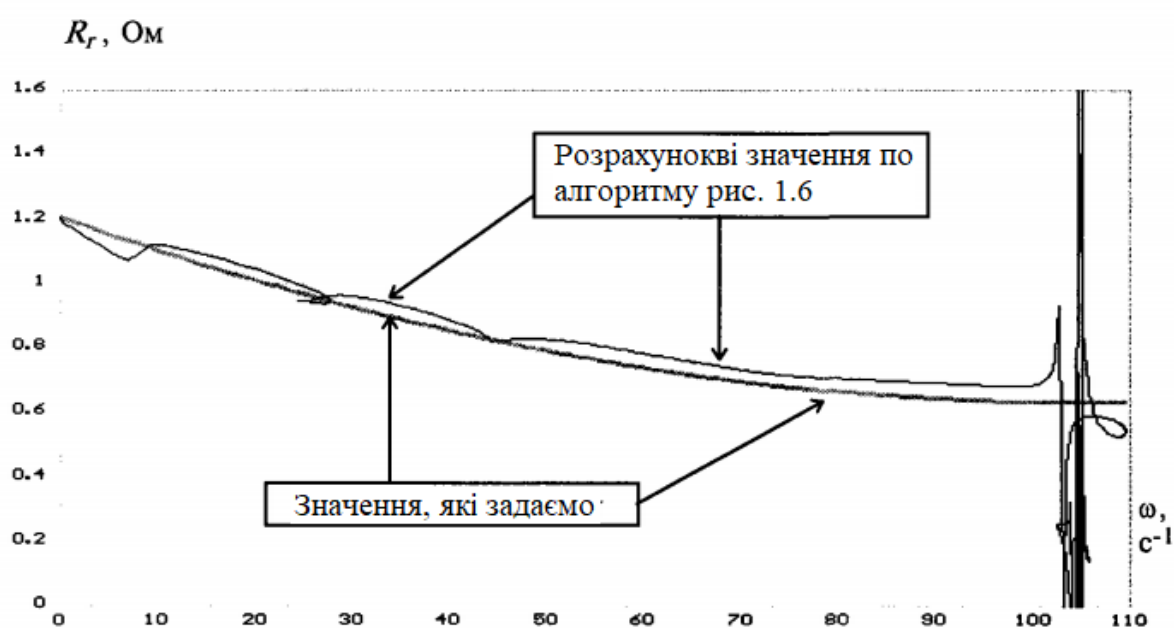
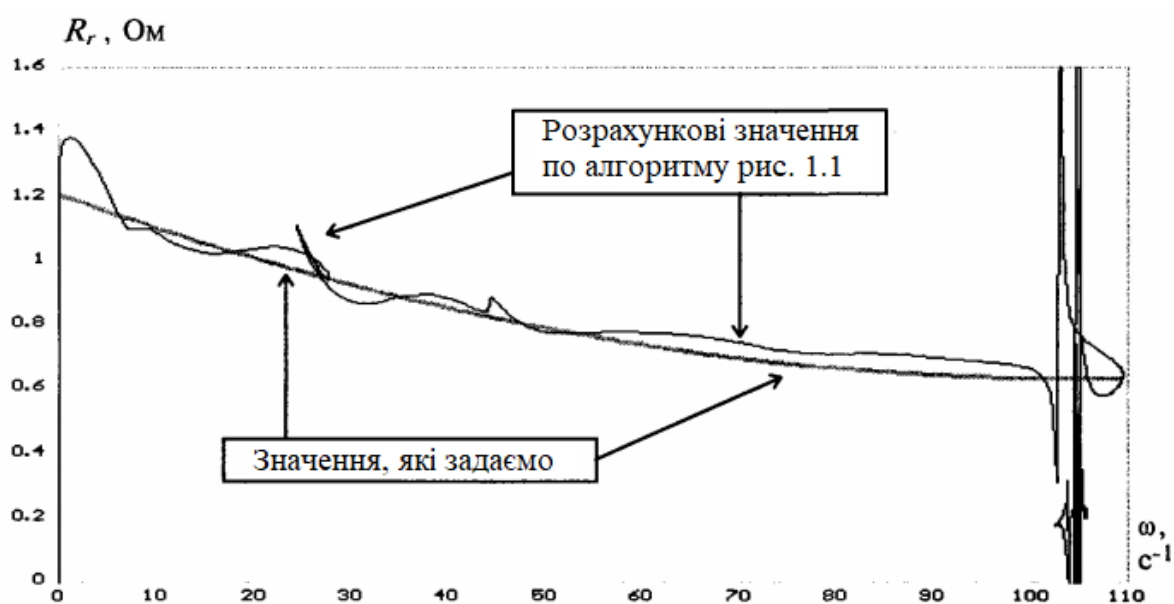


Рис.4.1. Порівняльний аналіз залежностей зміни активного опору роторного ланцюга від швидкості обертання ротора

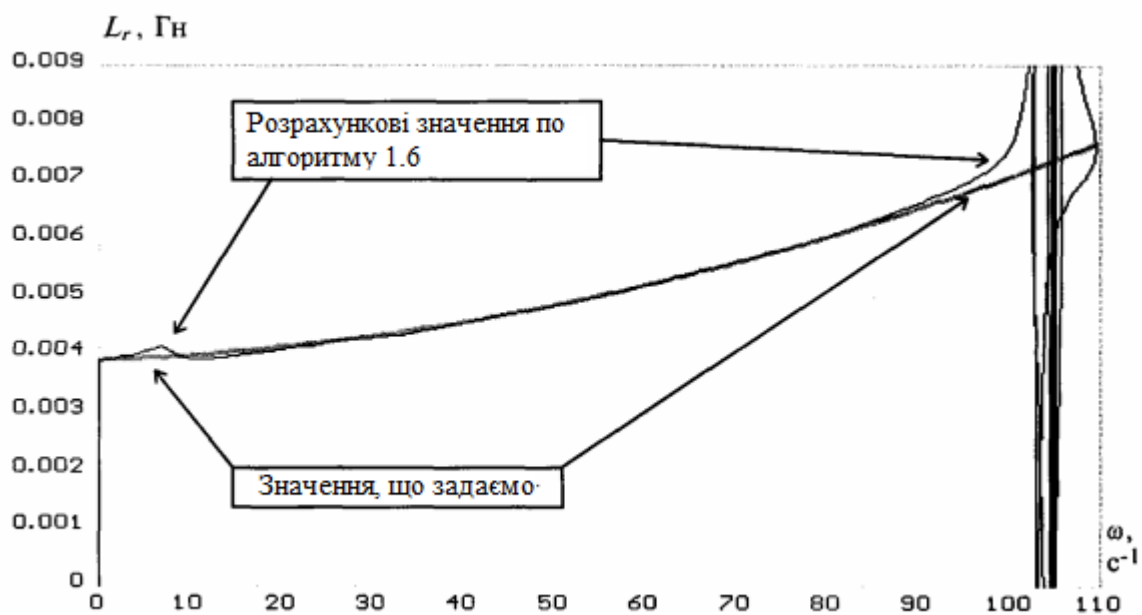
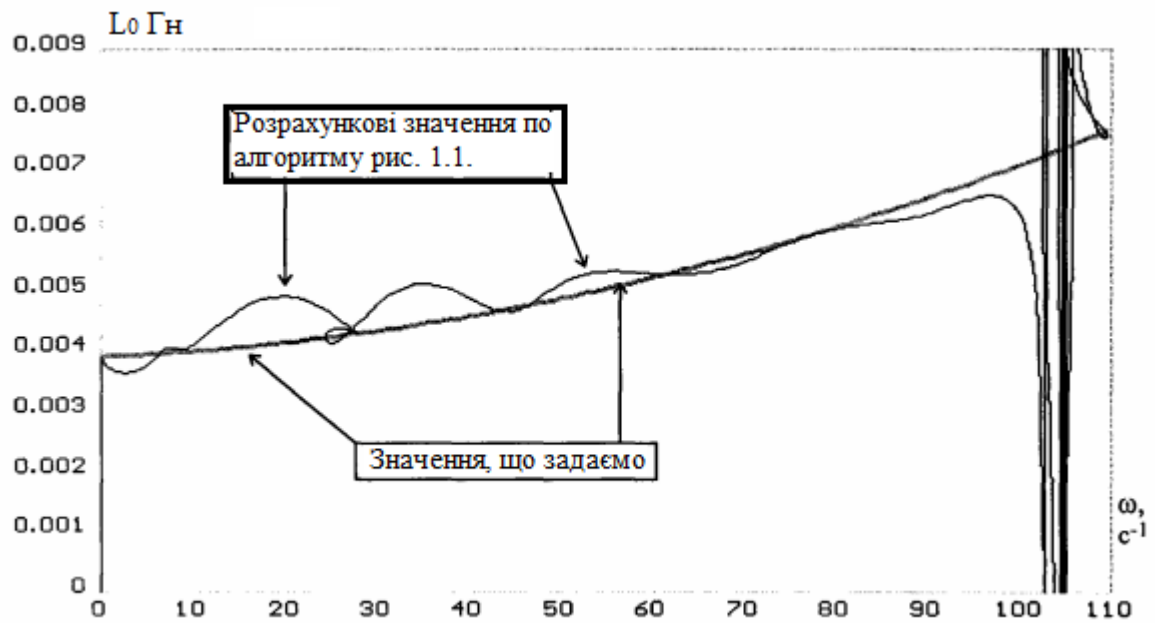


Рис.4.2. Порівняльний аналіз залежностей зміни індуктивності роторного ланцюга від швидкості обертання ротора

Як критерій оцінки приймемо середньоквадратичне відхилення між результатами обчислювального експерименту і заданими значеннями. Беручи до уваги, що в області швидкостей обертання ротора, близькій до номінальної, різко зростає обчислювальна похибка, у розрахунках будемо

приймати ті значення, у яких відповідна їм швидкість обертання ротора потрапляє в діапазон $0-0.9\omega_H$.

Результати оцінки наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Функціональна залежність	Середньоквадратичне відхилення по алгоритму рис.1.1.	Середньоквадратичне відхилення по алгоритму рис.1.6.
$R_r=f(\omega)$	$6.18 \cdot 10^{-3}$	$2.25 \cdot 10^{-3}$
$L_r=f(\omega)$	$26.4 \cdot 10^{-5}$	$3.35 \cdot 10^{-5}$

Таким чином, алгоритм на рис. 3.1 має менші обчислювальні похибки порівняно з алгоритмом на рис. 1.1.

Під час розв'язання системи рівнянь (3.20, 3.21) слід звернути увагу на визначник цієї системи. Маємо:

$$\det = I_{ru} [\dot{\Psi}_{sv} - (L_s + L_m) \cdot \dot{i}_{sv} + (\omega_H - \rho\omega)L_m I_{ru}] - \\ - I_{rv} [\dot{\Psi}_{su} - (L_s + L_m) \cdot \dot{i}_{su} + (\omega_H - \rho\omega)L_m I_{rv}].$$

Після перетворення отримуємо:

$$\det = L_m [(I_{ru} \dot{i}_{rv} - I_{rv} \dot{i}_{ru}) + (\omega_H - \rho\omega)(I_{ru}^2 + I_{rv}^2)]. \quad (4.1)$$

У моменти початку пуску АД, а також при досягненні швидкості обертання ротора, значення електричної швидкості обертання поля статора та значення складових струмів ротора I_{ru} і I_v близькі до нуля, що призводить до появи значної обчислювальної похибки (див. рис. 1.11 і 1.12).

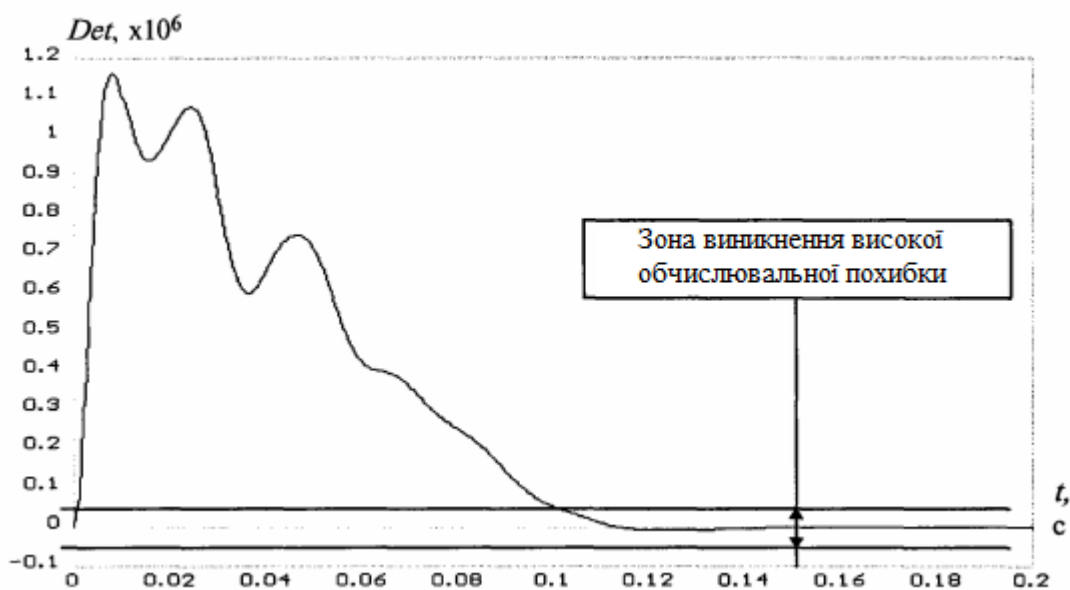


Рис.4.3. Зміни визначника системи рівнянь (1.42-1.43) у часі за результатами обчислювального експеримента

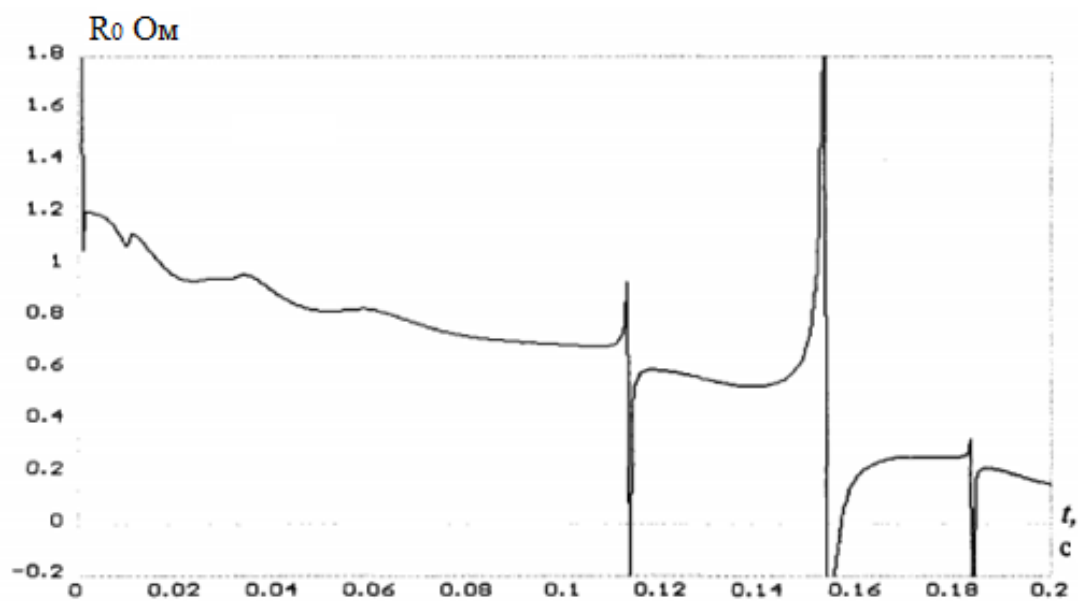


Рис.4.4. Зміни активного опору ротора у часі за результатами обчислювального експеримента

Таким чином, можна стверджувати, що при визначенні параметрів роторного контуру необхідний контроль за зміною визначника системи рівнянь (3.20-3.21) та виключення з розрахунку тих значень параметрів, які відповідають малим значенням визначника.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Результати обчислювального експерименту, з виключеннями з розрахунку значеннями, що мають високу обчислювальну похибку, представлені на рис. 4.5.

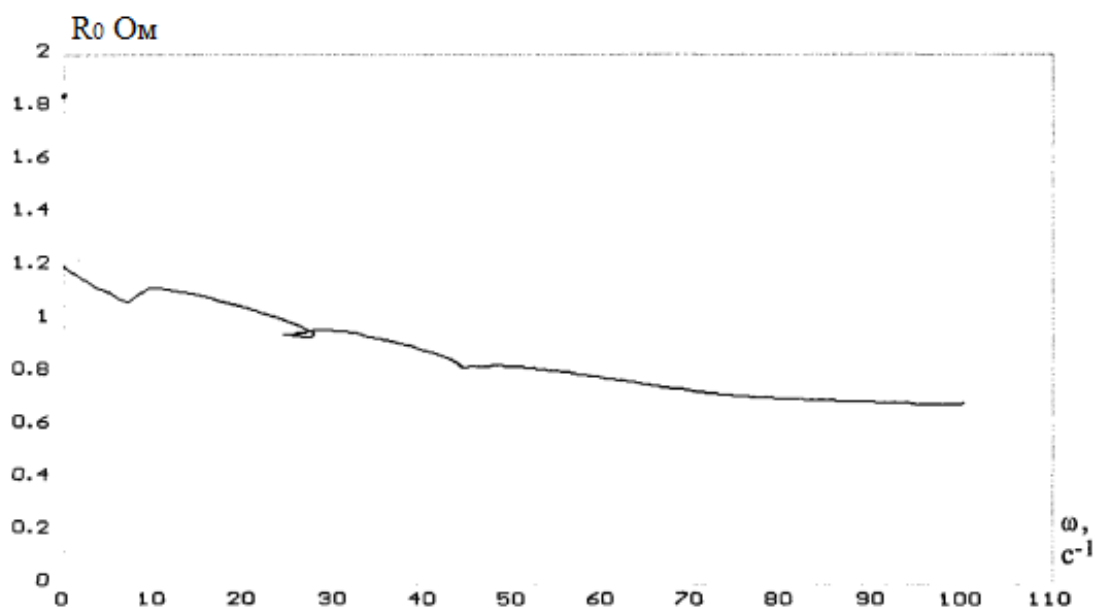


Рис.4.5. Зміни активного опору роторного ланцюга від швидкості обертання ротора за результатами обчислювального експерименту з винятком значень із високою обчислювальною похибкою

Висновки

1. Встановлено закономірності, що визначають етапи перетворення інформації, яка міститься в миттєвих значеннях струму та напруги статора.
2. Показано можливість отримання електромагнітних параметрів ротора асинхронного двигуна (АД) з динамічних режимів його роботи.
3. Встановлено, що для отримання електромагнітних параметрів з динамічних режимів роботи достатньо під час випробувань здійснювати вимірювання напруг і струмів статора.
4. Розроблено алгоритм отримання електромагнітних параметрів ротора з режиму пуску АД шляхом прямого вмикання в мережу без навантаження.
5. Встановлено, що обчислювальні процедури, засновані на отриманні електромагнітних параметрів ротора в системі координат (u, v) , що обертається з частотою мережі, мають менші похибки порівняно з обчислювальними процедурами, які працюють у системі нерухомих координат (α, β) .
6. Показано можливість контролю появи точок із високою обчислювальною похибкою під час визначення електромагнітних параметрів ротора з динамічних режимів роботи.

Список використаних джерел

1. Tytiuk V. K., Baranovskaya M. L., Chornyi O. P., Burdilnaya E. V., Kuznetsov V. V., Bogatyriov K. N. (2020) Online-Identification of Electromagnetic Parameters of an Induction Motor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (5), 423–440. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-423-440>.
2. Huang L, Hu N, Yang Y, Chen L, Wen J, Shen G. Study on Electromagnetic–Dynamic Coupled Modeling Method—Detection by Stator Current of the Induction Motors with Bearing Faults. *Machines*. 2022; 10(8):682. <https://doi.org/10.3390/machines10080682>.
3. IEEE 12–1996 – IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. Available at: <https://standards.ieee.org/standard/112-1996.html>.
4. Buchholz O., Boeker J. (2018) Online-Identification of the Machine Parameters of an Induction Motor Drive. 2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 860–867. <https://doi.org/10.1109/isie.2018.8433852>.
5. Košťál T. (2017) Induction Machine Parameters Identification Method Suitable for SelfCommissioning. 2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET). Sozopol, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ET.2017.8124357>.
6. Lee S., Yoo A., Lee H. J., Yoon Y. D., Han B. M. (2017) Identification of Induction Motor Parameters at Standstill Based on Integral Calculation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53 (3), 2130–2139. <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2650141>.

7. Peresada S., Kovbasa S., Prystupa D., Lyshevski S. E. (2013) Identification of Induction Motor Parameters Adaptively Controlling Stator Currents. IECON 2013 – 39 th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, 8476–8481. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700555>.
8. Zagirnyak M. A., Bisikalo O., Chorna O., Chorny O. (2018) Model of the Assessment of an Induction Motor Condition and Operation Life, Based on the Measurement of the External Magnetic Field. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 316–321. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559564>.
9. Chorna O., Chorny O., Tytiuk V. (2019) Identification of Changes in the Parameters of Induction Motors during Monitoring by Measuring the Induction of a Magnetic Field on the Stator Surface. Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019, 150–153. <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896554>.
10. Guimaraes, Joao & Jr, José & Hermeto, Antonio & Bortoni, Edson. (2014). Parameter Determination of Asynchronous Machines From Manufacturer Data Sheet. Energy Conversion, IEEE Transactions on. 29. 689-697. 10.1109/TEC.2014.2317525.