

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 електричних параметрів асинхронних електродвигунів у
процесі післяремонтних випробувань**

Виконав: студент групи ЕЕМ-23ск

Олександр СІБЄКІН

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 Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

СІБСКИН Олександр Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Визначення електричних параметрів асинхронних
електродвигунів у процесі післяремонтних випробувань

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є визначення електричних параметрів асинхронних електродвигунів у процесі післяремонтних випробувань
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Методи визначення активного опору статора; II. Способи визначення параметрів кривої намагнічування.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Залежність амплітуди похибки; II. Зміна швидкості обертання ротора; III. Значення коефіцієнтів (A) і (B) для низки двигунів; IV. Залежність значень (A) і (B) від вибору кінцевої точки.

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Ітераційний метод визначення активного опору статора	24.05.26
2	Інтегруючий метод визначення активного опору статора	31.05.26
3	Статичний спосіб визначення параметрів кривої намагнічування	07.06.26
4	Динамічний спосіб визначення параметрів кривої намагнічування	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Олександр СІБЄКІН
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Визначення електричних параметрів асинхронних електродвигунів у процесі післяремонтних випробувань»

42 с., 35 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення якості ремонту та забезпечення енергоефективної експлуатації асинхронних електродвигунів шляхом удосконалення методик та апаратно-програмних засобів точного визначення їхніх електричних параметрів під час післяремонтних випробувань, а також експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів шляхом удосконалення методик та алгоритмів експериментального визначення їхніх електричних параметрів під час післяремонтних випробувань, що дозволяє гарантувати відповідність відновленої машини номінальним енергетичним характеристикам.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Проаналізувати чинні стандарти (ДСТУ, ІЕС, ІЕЕЕ) щодо методів випробувань обертових електричних машин після капітального ремонту (перемотування, заміна підшипників, відновлення активної сталі).

Проаналізувати вплив технологічних операцій ремонту (зокрема, переобмотування статора та випалювання старої ізоляції) на зміну активних та індуктивних опорів, а також на магнітні властивості осердя.

Дослідити вплив технологічних процесів ремонту (наприклад, термічного випалювання старої обмотки) на зміну магнітних властивостей осердя та геометрії пазів статора.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

Дослідити класичні та сучасні інструментальні методики проведення досліду неробочого ходу та досліду короткого замикання (загальмованого ротора) для асинхронних машин різної потужності.

Розробити математичні алгоритми ідентифікації параметрів Т-подібної та Г-подібної схем заміщення асинхронного двигуна на основі даних дослідів холостого ходу та загальмованого ротора.

Розробити методику ідентифікації параметрів Т-подібної та Г-подібної схем заміщення асинхронного двигуна на основі даних, отриманих під час стандартних післяремонтних тестувань.

Обґрунтувати структуру автоматизованого випробувального стенду, що мінімізує вплив людського фактору на точність фіксації електричних величин.

Оцінити вплив температурного фактора на похибку визначення активного опору обмоток та обґрунтувати методи приведення вимірних значень до розрахункових робочих температур.

Оцінити можливості сучасних методів бездатчикової ідентифікації параметрів (інверторного тестування) для верифікації даних перед введенням двигуна в експлуатацію.

Сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження автоматизованих стендів для післяремонтних випробувань, які дозволяють знизити людський фактор та підвищити точність вимірювань.

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ПІСЛЯРЕМОНТНІ ВИПРОБУВАННЯ,
СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ, ДОСЛІД ХОЛОСТОГО ХОДУ, ДОСЛІД
КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ, АКТИВНА СТАЛЬ, ІДЕНТИФІКАЦІЯ
ПАРАМЕТРІВ, АВТОМАТИЗОВАНИЙ СТЕНД

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Методи визначення активного опору статора.....	14
1.1. Ітераційний метод визначення активного опору статора	14
1.2. Інтегруючий метод визначення активного опору статора.....	18
1.3. Висновки до розділу 1	21
Розділ 2. Способи визначення параметрів кривої намагнічування.....	22
2.1. Статичний спосіб визначення параметрів кривої намагнічування	22
2.2. Динамічний спосіб визначення параметрів кривої намагнічування	25
2.3. Висновки по розділу 2	34
Висновки	35
Список використаних джерел	37
Додаток А.....	41
Додаток Б	42

Вступ

Масштаб використання асинхронних двигунів та роль їхнього ремонту

Асинхронні короткозамкнені електродвигуни є основою сучасного промислового електроприводу.

Вони споживають понад половину всієї електроенергії, що виробляється у світі, та використовуються у найважливіших технологічних процесах: від приводу насосів та вентиляторів до складних металообробних верстатів та конвеєрних ліній.

Завдяки простій конструкції та низькій вартості ці машини мають високу експлуатаційну стійкість.

Проте, важкі умови роботи, перевантаження, нестабільність напруги живлення та природний знос призводять до виходу електродвигунів з ладу.

Повна заміна пошкодженого двигуна на новий не завжди є економічно виправданою, особливо коли йдеться про машини середньої та великої потужності або спеціальне виконання.

Тому капітальний ремонт (включаючи повне або часткове переобмотування) залишається панівною практикою відновлення працездатності парку електричних машин.

Технологічні ризики при ремонті та їхній вплив на параметри

Актуальність точного визначення електричних параметрів після ремонту зумовлена тим, що капітальний ремонт неминує змінює внутрішню структуру та фізичні властивості елементів двигуна.

Наприклад, процес термічного руйнування старої ізоляції (випалювання обмотки у печі) за недотримання температурного регламенту

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може призвести до погіршення властивостей міжлистової ізоляції активної сталі статора.

Це викликає різке зростання втрат у сталі від вихрових струмів.

Крім того, при намотуванні нової обмотки можливе використання дроту з дещо іншим поперечним перерізом (через відсутність точного номіналу на складі), зміна довжини лобових частин або використання інших ізоляційних матеріалів.

Такі чинники безпосередньо впливають на:

- Активний опір обмотки статора.
- Індуктивні опори розсіювання статора і ротора.
- Опір контуру намагнічування.

Як наслідок, відремонтований двигун може суттєво відрізнитися за своїми характеристиками від оригінального паспортного виробу.

Він може мати знижений коефіцієнт корисної дії, підвищений струм неробочого ходу або недостатній пусковий момент, що призведе до його повторного виходу з ладу вже в перші місяці експлуатації.

Проблема взаємодії відремонтованих двигунів із частотними перетворювачами

У сучасній промисловості асинхронні двигуни все частіше працюють у зв'язці з частотними перетворювачами.

Системи векторного керування або прямого керування моментом, що закладені в сучасні інвертори, вимагають введення в пам'ять точних математичних параметрів схеми заміщення двигуна (опорів обмоток, індуктивностей розсіювання та взаємоіндукції).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Якщо після капітального ремонту параметри двигуна змінилися, а в налаштуваннях частотного перетворювача залишилися старі паспортні дані, привід працюватиме некоректно.

Це виявляється в нестабільній роботі на низьких частотах, перегріві двигуна, помилках позиціонування та частих аварійних зупинках системи.

Автоматичне тестування (Auto-tuning), яке виконує сам частотник, не завжди здатне точно визначити всі параметри на місці експлуатації.

Тому точне стендове визначення параметрів на ремонтній базі є критично важливим.

Недоліки застарілих підходів до післяремонтних випробувань

Більшість вітчизняних ремонтних підприємств досі використовують спрощені методи післяремонтного контролю, які обмежуються вимірюванням опору ізоляції та перевіркою струму неробочого ходу під номінальною напругою.

Такий підхід не дозволяє отримати повної картини стану відновленої машини.

Вони не дають змоги розділити втрати, визначити параметри кола намагнічування або оцінити стан короткозамкненої клітки ротора, де після ремонту можуть виникнути приховані дефекти (наприклад, тріщини в стержнях або порушення цілісності замикаючих кілець).

Наукова та практична цінність

Дослідження та впровадження досконалих методів визначення електричних параметрів у процесі післяремонтних випробувань дозволяє вирішити цю проблему.

Використання точних вимірювань у поєднанні з сучасними методами обробки даних (наприклад, методом найменших квадратів або генетичними

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алгоритмами для ідентифікації параметрів схем заміщення) дає можливість з високою точністю реконструювати характеристики двигуна.

Практична значущість роботи полягає у створенні чітких, інженерно доступних методик, які дозволяють безпосередньо в умовах ремонтного цеху за допомогою стандартних випробувань (неробочий хід і коротке замикання) отримувати повний набір електричних параметрів.

Це забезпечує надійний вихідний контроль якості, знижує ризик рекламаций для ремонтних підприємств та гарантує тривалу та енергоефективну експлуатацію електродвигунів у кінцевих споживачів.

Проблема верифікації параметрів після ремонту

Асинхронні електродвигуни (АД) становлять основу промислового електроприводу.

Під час капітального ремонту, пов'язаного з повним або частковим перемотуванням статора, геометричні та фізичні характеристики обмотки можуть зазнати змін порівняно з паспортними даними заводу-виробника.

Зміна марки обмотувального дроту, інша щільність укладки в пази, варіювання довжини лобових частин або деградація магнітних властивостей шихтованої сталі статора через перегрів під час випалювання старої ізоляції — все це безпосередньо впливає на активні та індуктивні опори машини.

Неточне знання електричних параметрів відремонтованого двигуна унеможлиблює його коректну інтеграцію в сучасні системи частотно-регульованого електроприводу.

Цифрові перетворювачі частоти з векторним керуванням (FOC) або прямим керуванням моментом (DTC) потребують введення точних значень опорів статора, ротора та індуктивностей взаємоіндукції для побудови динамічної моделі двигуна в реальному часі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Якщо параметри визначено невірно, привід працюватиме з низьким ККД, перегріватиметься або взагалі йтиме в аварійний режим через перевантаження за струмом.

Математичний апарат класичної ідентифікації параметрів

Класичне визначення параметрів схеми заміщення базується на проведенні двох базових експериментів: досліді холостого ходу (ХХ) та досліді короткого замикання / загальмованого ротора (КЗ).

Під час досліді ХХ на двигун подається номінальна лінійна напруга U за номінальної частоти f . Вимірюються струм ХХ I та споживана потужність P . Визначається повний опір кола ХХ Z .

Активний опір кола ХХ R , що враховує втрати в міді статора та втрати в сталі, розраховується через активну потужність.

Знаходиться еквівалентний індуктивний опір взаємоіндукції X (з урахуванням індуктивності розсіяння статора).

Під час досліді КЗ (ротор заблоковано), на статор подається знижена напруга, за якої струм досягає номінального значення.

Вимірюється потужність P .

Проводиться розрахунок параметрів короткого замикання.

Розділення загальних опорів R та X на складові статора та приведенного ротора виконується з урахуванням попереднього вимірювання активного опору обмотки статора постійному струму за допомогою мікроомметра.

Порівняльний аналіз методів післяремонтних випробувань

Параметр порівняння	Традиційний метод (ручні прилади + стрілочні індикатори)	Автоматизований метод (цифрові стенди з АЦП)	Бездатчикова ідентифікація (Self-commissioning ПЧ)
Точність вимірювання	Низька (клас точності приладів 1.5–2.5, вплив суб'єктивного фактору).	Висока (клас точності до 0.2, автоматична температурна компенсація).	Середня (обмежена алгоритмами перетворювача частоти без механічного навантаження).
Час проведення тесту	Значний (2–3 години на збирання схем та фіксацію точок).	Мінімальний (10–15 хвилин, автоматичне перемикавання режимів).	Миттєвий (1–2 хвилини безпосередньо на об'єкті перед запуском).
Безпека персоналу	Знижена (наявність відкритих комутацій під високою напругою)	Висока (усі перемикавання відбуваються всередині закритого шафи)	Висока (керування з пульта ПЧ).

	напругою).	стенду).	
Обсяг звітності	Ручне заповнення журналів та протоколів випробувань.	Автомат ичне формування електронного паспорта двигуна та графіків.	Збереже ння параметрів у пам'яті контролера приводу.

Практична цінність досліджень

Розробка чітких алгоритмів автоматизованого визначення електричних параметрів дозволяє створити високоефективні випробувальні станції для ремонтних підприємств.

Це дає змогу оперативно виявляти дефекти збірки (наприклад, міжвиткові замикання, неправильне з'єднання фаз, дефекти клітки "біляча колісна") ще до моменту відвантаження двигуна замовнику.

Отриманий цифровий профіль (паспорт) відремонтованого АД дозволяє сервісним інженерам миттєво вносити реальні параметри схеми заміщення в пам'ять перетворювачів частоти, гарантуючи роботу електроприводу в оптимальних енергетичних режимах.

Розділ 1. Методи визначення активного опору статора

1.1. Ітераційний метод визначення активного опору статора

Згідно з даними розподілу впливає, що у випадку похибки завдання активного опору статора АД при визначенні складових поточкозчеплення статора в них з'являється гармонійна складова похибки з частотою мережі.

Для більш детального аналізу впливу похибки завдання активного опору статора АД на амплітуду гармонійної складової похибки в усталеному режимі роботи був здійснений обчислювальний експеримент на прикладі електродвигуна АІМ160М6.

Послідовність виконання обчислювального експерименту викладена в [11].

Відзначимо, що істинне значення активного опору статора даного двигуна $R_s=0.806$ Ом.

Результати експерименту представлені в таблиці 1.1

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1			Літ.	Лист	Листів	
Розробив	Сібекін О.Ю.										
Перевірив	Сінчук І.О.								14	8	
Реценз.								КНУ ЕЕМ-23ск			
Н. Контр.	Сінчук І.О.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

Таблиця 1.1. Результати експерименту

Rs, Ом	$\Psi_{su,Max}$	$\Psi_{su,Min}$	Au
0.00	1.7106	-1.7106	1.7106
0.10	1.5025	-1.4943	1.4984
0.20	1.2943	-1.2780	1.2862
0.30	1.0861	-1.0617	1.0739
0.40	0.8780	-0.8454	0.8617
0.50	0.6698	-0.6291	0.6495
0.60	0.4616	-0.4128	0.4372
0.70	0.2535	-0.1965	0.2250
0.80	0.0453	0.0198	0.0128
0.90	0.2361	-0.1628	0.1995
1.00	0.4524	-0.3710	0.4117
1.10	0.6687	-0.5790	0.6239
1.20	0.8850	-0.7873	0.8362
1.30	1.1013	-0.9955	1.0484
1.40	1.3175	-1.2037	1.2606
1.50	1.5339	-1.4118	1.4729

Табл.1.1. Зміна амплітуди гармонійної складової похибки визначення складової потокозчеплення статора по осі u від значення завдання активного опору статора/

Залежність амплітуди похибки A_u від R_s

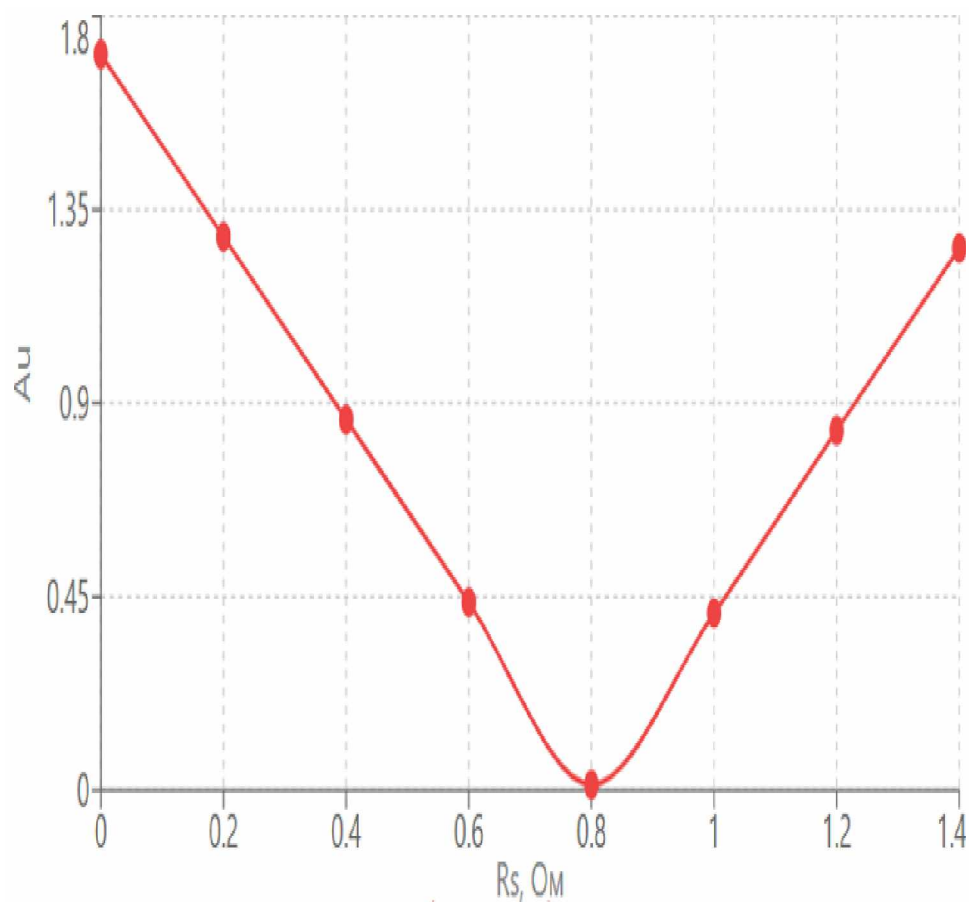


Рис.1.1. Залежність амплітуди похибки A_u від R_s .

Виходячи з цього, можна поставити задачу визначення активного опору статора шляхом знаходження мінімуму функції $A_u=f(R_s)$, де A_u - амплітуда гармонійної складової похибки визначення складової поточкозчеплення статора по осі u в усталеному режимі роботи АД.

До переваг цього методу можна віднести високу надійність і точність визначення активного опору статора.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.2. Інтегруючий метод визначення активного опору статора

Для усталеного режиму роботи АД справедлива система рівнянь:

$$d\Psi_{su}/dt + \omega_s \cdot \Psi_{s\beta} = 0, d\Psi_{s\beta}/dt - \omega_s \cdot \Psi_{su} = 0$$

де $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ - миттєві значення складових потокозчеплення по осях α, β ; ω_s - кутова частота мережі.

Вираз похідних потокозчеплення має вигляд:

$$d\Psi_{s\alpha}/dt = U_{s\alpha} - R_s \cdot I_{s\alpha}, d\Psi_{s\beta}/dt = U_{s\beta} - R_s \cdot I_{s\beta}$$

Після інтегрування рівнянь системи отримаємо:

$$\begin{aligned} \Psi_{s\alpha} &= \int U_{s\alpha} \cdot dt - R_s \cdot \int I_{s\alpha} \cdot dt + \Psi_{s\alpha 0}, \Psi_{s\beta} \\ &= \int U_{s\beta} \cdot dt - R_s \cdot \int I_{s\beta} \cdot dt + \Psi_{s\beta 0} \end{aligned}$$

де $\Psi_{s\alpha 0}, \Psi_{s\beta 0}$ - початкові значення складових потокозчеплень статора по осях α, β у момент часу $t=0$.

Підставляючи в систему рівнянь враховуючи, що в момент початку пуску АД, $t=0$, $\Psi_{s\alpha 0}=0$, $\Psi_{s\beta 0}=0$ і розв'язуючи отриману систему рівнянь відносно R_s отримаємо:

$$R_s = \left[\int U_{s\alpha} \cdot dt - \omega_s \cdot \int U_{s\beta} \cdot dt \right] / \left[\int I_{s\alpha} \cdot dt - \omega_s \cdot \int I_{s\beta} \cdot dt \right]$$

$$R_s = \left[\int U_{s\beta} \cdot dt + \omega_s \cdot \int U_{s\alpha} \cdot dt \right] / \left[\int I_{s\beta} \cdot dt + \omega_s \cdot \int I_{s\alpha} \cdot dt \right]$$

Істинне значення опору статора, що визначається за допомогою інтегруючого методу, відповідає усталеному режиму роботи АД.

Усталений режим роботи АД можна визначити спостерігаючи за швидкістю обертання ротора

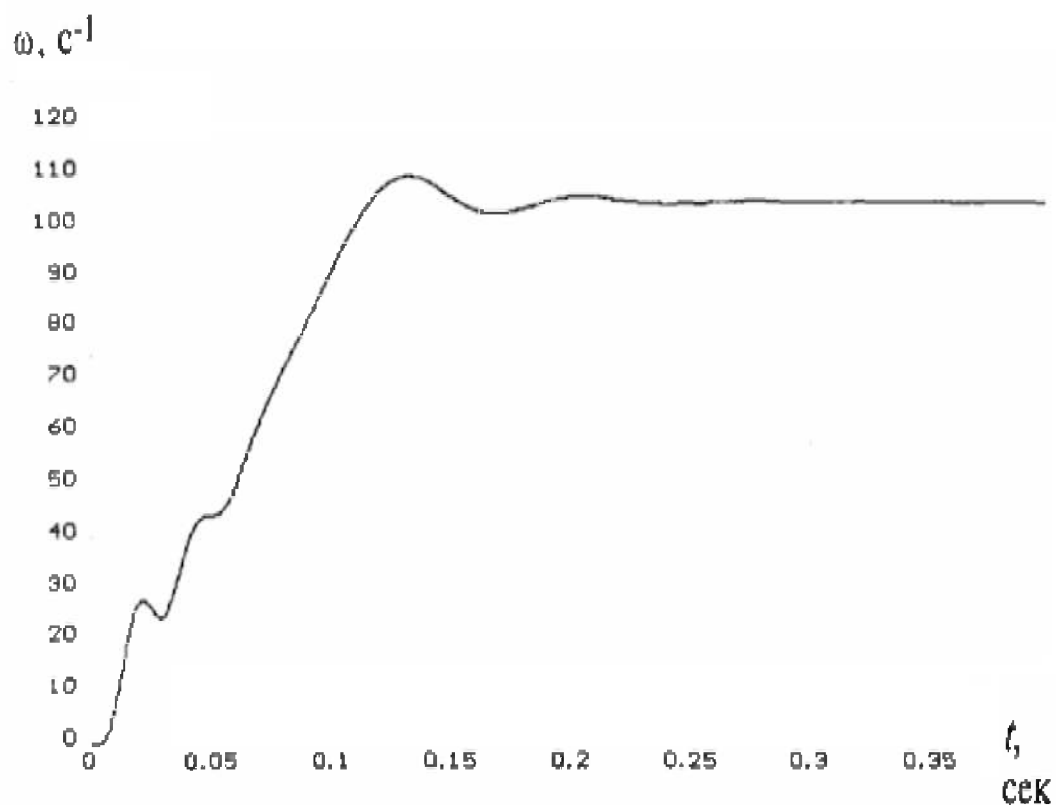


Рис.1.2. Зміна швидкості обертання ротора

Інтегрування здійснюється з моменту початку пуску АД, $t=0$, до усталеного режиму роботи АД, $t>t_{уст}$ ($t_{уст}$ - відповідає усталеному режиму роботи АД, коли кутова частота обертання ротора $\omega r \approx \text{const}$).

1.3. Висновки до розділу 1

Показано можливість визначення активного опору статора асинхронного двигуна (АД) за динамічними режимами його роботи.

Встановлено, що для визначення активного опору статора в динамічних режимах достатньо під час випробувань вимірювати напругу та струми статора.

Розроблено алгоритми визначення активного опору статора з режиму пуску АД прямим увімкненням у мережу без навантаження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Способи визначення параметрів кривої намагнічування

2.1. Статичний спосіб визначення параметрів кривої намагнічування

Для визначення постійних коефіцієнтів ((A, B)) на характеристиці приймаємо дві точки з досвіду холостого ходу:

- Точка при номінальній напрузі живлення ($U_2 = U_H$).
- Точка при зниженій напрузі живлення ($U_1 = kU_H$).

У точці холостого ходу при ($U_2 = U_H$) матимемо:

$$\left[L_m = \frac{U_2}{\omega_H \cdot I_2} = \frac{A \cdot B}{1 + B^2 \cdot I_2^2}, \right]$$

у точці холостого ходу при ($U_1 = kU_H$) відповідно записуємо:

$$\left[L_m = \frac{k \cdot U_2}{\omega_H \cdot I_1} = \frac{A \cdot B}{1 + B^2 \cdot I_1^2}, \right]$$

де (I_2, I_1) — струми статора в точках холостого ходу відповідно при номінальній і зниженій напрузі живлення мережі, (ω_H) — електрична швидкість обертання поля статора.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2			Лім.	Лист	Листів	
Розробив	Сібекін О.Ю.										
Перевірів	Сінчук І.О.									22	13
Реценз.								КНУ ЕЕМ-23ск			
Н. Контр.	Сінчук І.О.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

Поділивши рівняння, отримаємо:

$$\left[\frac{I_1}{k \cdot I_2} = \frac{1 + B^2 \cdot I_1^2}{1 + B^2 \cdot I_2^2} \right]$$

Розв'язуючи відносно (В), отримуємо:

$$\left[B = \sqrt{\frac{k \cdot I_2 - I_1}{(I_2 - k \cdot I_1) \cdot I_2 I_1}} \right]$$

Використовуючи знайдене значення (В), далі обчислюємо:

$$\left[A = \frac{U_2(1 + B^2 \cdot I_2^2)}{\omega_H \cdot I_2 \cdot B} \right]$$

Обчислені значення коефіцієнтів (А) і (В) для низки двигунів наведено в таблиці 2.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Таблиця 2.1 Значення коефіцієнтів (А) і (В) для низки двигунів

Тип двигуна	(I _x), А	(I _{0,5}), А	(А)	(В)
ВРП16054 №10422	10	3.75	2.664	0.064
ВПП18054 №20790	15	6.00	2.841	0.037
ВРП160 №83664	14	5.50	2.762	0.041

Отже, процедура отримання параметрів кривої намагнічування статичним способом зводиться до проведення двох дослідів холостого ходу при різних напругах живлення мережі та обчислення параметрів (А, В) за формулами.

До переваг цієї методики слід віднести простоту визначення параметрів кривої намагнічування, до недоліків — наявність двох джерел живлення і, як наслідок, ускладнення випробувального комплексу.

Цього недоліку позбавлений наступний спосіб визначення параметрів кривої намагнічування: динамічний.

2.2. Динамічний спосіб визначення параметрів кривої намагнічування

Для знаходження параметрів (А, В) кривої намагнічування продиференціюємо рівняння за (I_m).

Отримаємо:

$$\left[\frac{d\Phi_m}{dI_m} = \frac{A \cdot B}{1 + (B \cdot I_m)^2} \right]$$

або, вводючи явно час (t):

$$\left[\frac{\frac{d\Phi_m}{dt}}{\frac{dI_m}{dt}} = \frac{A \cdot B}{1 + (B \cdot I_m)^2} \right]$$

У цьому виразі швидкість зміни потоку намагнічування $\left(\frac{d\Phi_m}{dt}\right)$ пропорційна падінню напруги на контурі намагнічування, яке, виходячи зі схеми заміщення двигуна, можна записати (без урахування падіння напруги на індуктивності розсіювання статора та активному опорі контуру намагнічування):

$$\left[\frac{d\Phi_m}{dt} = U_s - R_s I_s \right]$$

Оскільки $(\Phi_m = \Phi(t) \cdot \sin(\omega_H \cdot t))$, то:

$$\left[\frac{d\Phi_m}{dt} = \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot \sin(\omega_H \cdot t) + \Phi(t) \cdot \omega_H \cdot \cos(\omega_H \cdot t), \right]$$

де $\left(\frac{d\Phi(t)}{dt} \right)$ — швидкість зміни величини амплітуди вектора потокозчеплення.

Для моментів часу:

$$\left[t = (2 \cdot n - 1) \cdot \frac{1.57}{\omega_H}, \quad \text{де } n = 1, 2, 3, \dots, \right]$$

$$\left[\frac{d\Phi_m}{dt} = \frac{d\Phi(t)}{dt} = U_s - R_s I_s(t), \right]$$

де $(I_s(t))$ — амплітудне значення струму.

У виразі при поданні напруги (($t=0$)) на двигун ($I_s(t) = 0$), а після завершення пуску усталеного струму ($I_s(t) = I_m$) — струму намагнічування.

З урахуванням цього для режиму подання напруги на двигун вираз запишеться:

$$\left[U_{sp} = \frac{dI_{sp}}{dt} \cdot A \cdot B, \quad \text{при } t = 0. \right]$$

Для усталеного режиму аналогічно запишемо для вказаних вище моментів часу (t):

$$\left[U_{sc} - R_s I_{sc} = \frac{dI_{sc}}{dt} \cdot \frac{A \cdot B}{1 + (B \cdot I_{sc})^2} \right]$$

Поділивши вирази отримаємо:

$$\left[\frac{U_{sc} - R_s I_{sc}}{U_{sp}} = \frac{\frac{dI_{sc}}{dt}}{\frac{dI_{sp}}{dt}} \cdot \frac{A \cdot B}{1 + (B \cdot I_{sc})^2} \right]$$

Розв'язуючи відносно параметра кривої намагнічування (В), матимемо:

$$B = \sqrt{\frac{U_{sp} \left(\frac{dI_{sc}}{dt} \right) - (U_{sc} - R_s I_{sc}) \cdot \left(\frac{dI_{sp}}{dt} \right)}{(U_{sc} - R_s I_{sc}) \cdot \left(\frac{dI_{sp}}{dt} \right) I_{sc}^2}},$$

де (р, с) — індекси, що відповідають моменту подання напруги на двигун ((р)) та усталеному режиму ((с)).

Обчислення значень похідних струму статора при поданні напруги ((t=0)) та в усталеному режимі можна проводити за семиточковою схемою з похибкою (h^6):

$$\left[\frac{dI}{dt} = \frac{1}{h} (I_{i+3} - 9 \cdot I_{i+2} + 45 \cdot I_{i+1} - 45 \cdot I_{i-1} + 9 \cdot I_{i-2} - I_{i-3}), \right]$$

де (I_i) — (i)-та амплітуда вектора струму.

Обчислення параметра (А) кривої намагнічування виконуємо так. З огляду на те, що $\left(\frac{d\Phi_m}{dI} = L_m\right)$ — індуктивність контуру намагнічування, яка на холостому ходу дорівнює:

$$\left[L_m = \frac{U_s}{314 \cdot I_s}, \right]$$

записуємо з (тут (Us, Is) — діючі значення напруги та струму статора):

$$\left[\frac{U_s}{314 \cdot I_s} = \frac{A \cdot B}{1 + (B \cdot I_s)^2}, \right]$$

звідки після перетворень отримаємо:

$$\left[A = \frac{U_s \cdot [1 + (B \cdot I_s)^2]}{314 \cdot I_s \cdot B}. \right]$$

Отже, процедура отримання значень параметрів кривої намагнічування послідовно має містити етапи:

1. Створення масиву даних напруг і струмів статора під час пуску електродвигуна.
2. Обчислення похідних амплітуди струму статора
3. Розрахунок значень коефіцієнтів (A) і (B) за формулами

Для випробуваного двигуна з ($R_s = 0.806$) Ом значення коефіцієнтів, знайдені при послідовному перемиканні АД з рівня напруги ($U_s = 380$) В до ($U_s = 220$) В:

$$[A = 2.436, \quad B = 0.074.]$$

Значення коефіцієнтів за запропонованою методикою:

$$[A = 2.565, \quad B = 0.079.]$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежність значень (А) і (В) від вибору кінцевої точки представлена в таблиці 2.2.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 Залежність значень (А) і (В) від вибору кінцевої точки

Номер точки	(В)	(А)	$\left(\frac{dI_s}{dt}\right)$	(Is), А
150	0.0353	2.5606	-373.75	28.5
165	0.0574	2.5558	-781.71	17.6
180	0.0722	2.5667	111.46	13.8
195	0.0721	2.5643	-83.37	13.9
210	0.0729	2.5660	55.66	13.7
225	0.0725	2.5644	-68.95	13.8
240	0.0799	2.5646	-58.52	12.5
255	0.0813	2.5654	11.91	12.3
270	0.0797	2.5655	17.31	12.5
285	0.0785	2.5654	5.76	12.7
300	0.0790	2.5651	-13.54	12.7
315	0.0801	2.5652	-6.41	12.5
330	0.0801	2.5653	3.77	12.5
345	0.0797	2.5653	4.47	12.6
360	0.0795	2.5653	-0.32	12.6

375	0.0797	2.5653	-2.66	12.6
390	0.0798	2.5653	-0.70	12.5

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

2.3. Висновки по розділу 2

Показано можливість отримання параметрів кривої намагнічування з динамічних режимів роботи.

Розроблено спосіб отримання параметрів кривої намагнічування з режиму пуску АД прямим увімкненням у мережу без навантаження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Проаналізувати чинні стандарти (ДСТУ, ІЕС, ІЕЕЕ) щодо методів випробувань обертових електричних машин після капітального ремонту (перемотування, заміна підшипників, відновлення активної сталі).

Проаналізувати вплив технологічних операцій ремонту (зокрема, переобмотування статора та випалювання старої ізоляції) на зміну активних та індуктивних опорів, а також на магнітні властивості осердя.

Дослідити вплив технологічних процесів ремонту (наприклад, термічного випалювання старої обмотки) на зміну магнітних властивостей осердя та геометрії пазів статора.

Дослідити класичні та сучасні інструментальні методики проведення досліду неробочого ходу та досліду короткого замикання (загальмованого ротора) для асинхронних машин різної потужності.

Розробити математичні алгоритми ідентифікації параметрів Т-подібної та G-подібної схем заміщення асинхронного двигуна на основі даних дослідів холостого ходу та загальмованого ротора.

Розробити методику ідентифікації параметрів Т-подібної та G-подібної схем заміщення асинхронного двигуна на основі даних, отриманих під час стандартних післяремонтних тестувань.

Обґрунтувати структуру автоматизованого випробувального стенду, що мінімізує вплив людського фактору на точність фіксації електричних величин.

Оцінити вплив температурного фактора на похибку визначення активного опору обмоток та обґрунтувати методи приведення вимірних значень до розрахункових робочих температур.

Оцінити можливості сучасних методів бездатчикової ідентифікації параметрів (інверторного тестування) для верифікації даних перед введенням двигуна в експлуатацію.

Сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження автоматизованих стендів для післяремонтних випробувань, які дозволяють знизити людський фактор та підвищити точність вимірювань.

Таким чином у роботі:

Показано можливість визначення активного опору статора асинхронного двигуна (АД) за динамічними режимами його роботи.

Встановлено, що для визначення активного опору статора в динамічних режимах достатньо під час випробувань вимірювати напругу та струми статора.

Розроблено алгоритми визначення активного опору статора з режиму пуску АД прямим увімкненням у мережу без навантаження.

Показано можливість отримання параметрів кривої намагнічування з динамічних режимів роботи.

Розроблено спосіб отримання параметрів кривої намагнічування з режиму пуску АД прямим увімкненням у мережу без навантаження.

Список використаних джерел

1. Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). Design of Rotating Electrical Machines (2nd ed.). John Wiley & Sons.
2. Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). The Induction Machine Handbook. CRC Press.
3. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). Electric Machinery (6th ed.). McGraw-Hill.
4. Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2013). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems (3rd ed.). Wiley-IEEE Press.
5. IEEE Std 112-2004. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Power and Energy Society.
6. IEC 60034-2-1:2014. Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests. International Electrotechnical Commission.
7. Vas, P. (1998). Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines. Oxford University Press.
8. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press.
9. Leonhard, W. (2001). Control of Electrical Drives (3rd ed.). Springer.
10. Sul, S. K. (2011). Control of Electric Machine Drive Systems. IEEE Press/Wiley.
11. Holtz, J. (2002). Sensorless control of induction motor drives. Proceedings of the IEEE, 90(8), 1359-1394.

12. Toliyat, H. A., Nandi, S., Choi, S., & Meshgin-Kelk, H. (2012). Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis. CRC Press.
13. Blasco, R., Mazahery, A., & Strangas, E. G. (2015). Automated parameter identification of induction machines after repair. IEEE Transactions on Industry Applications, 51(3), 2210-2218.
14. Staton, D. A., & Cavagnino, A. (2008). Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(10), 3509-3516. (Вплив нагріву на зміну опорів під час тестів).
15. Fiorijo, J., & Ribeiro, L. (2011). Influence of rewinding on the efficiency and parameters of induction motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 26(2), 415-422.
16. Cao, W., & Schofield, N. (2012). Evaluation of additional core losses in induction motors caused by repair processes. IET Electric Power Applications, 6(8), 512-519.
17. Mohan, N. (2012). Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling using MATLAB/Simulink. Wiley.
18. Agamloh, E. B., Anvari, B., & Toliyat, H. A. (2018). Guidelines for testing and parameter identification of induction motors in a repair shop environment. IEEE Industry Applications Magazine, 24(4), 54-63.
19. ДСТУ EN 60034-1:2019. Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні дані та робочі характеристики. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
20. Synchuk, O. M., & Parakhonnyi, V. V. (2017). Automation of routine and type tests of induction motors after overhaul. Electrical Engineering & Electromechanics, (5), 18-23.

21. Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2014). Design of Rotating Electrical Machines (2nd ed.). Wiley.
22. Toliyat, H. A., & Kliman, G. B. (2004). Handbook of Electric Motors (2nd ed.). CRC Press.
23. IEEE Std 112-2004. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Power and Energy Society.
24. IEC 60034-2-1:2014. Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles). International Electrotechnical Commission.
25. Boldea, I. (2010). The Induction Machine Handbook (2nd ed.). CRC Press.
26. Anibal de Almeida, T., Fong, J., & Brunner, C. U. (2014). Technical and economic considerations for the repair and rewinding of energy-efficient induction motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 50(2), 1422-1430.
27. Cao, W., & Schofield, N. (2006). Parameter identification of induction machines for post-repair evaluation. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 845-850.
28. Burt, R., & Buschart, R. (2002). The effect of rewind repair on the efficiency of motor systems. IEEE Electrical Insulation Magazine, 18(6), 24-31.
29. Monjo, L., Kojooyan-Jafari, H., Córcoles, F., & Pedra, J. (2015). Induction machine parameter identification based on standard no-load and locked-rotor tests. IEEE Transactions on Energy Conversion, 30(3), 914-923.
30. Wang, K., & Cho, S. (2011). Analysis of core loss changes in induction motors due to thermal stripping during repair processes. Journal of Electrical Engineering and Technology, 6(4), 512-519.

31. Stone, G. C. (2005). Advancements in stator winding testing and diagnostics following factory or field repair. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(4), 720-730.

32. Agamloh, E. B., & Anibal, C. (2018). Impact of stator rewind on the performance and efficiency of medium voltage induction motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 54(3), 2115-2122.

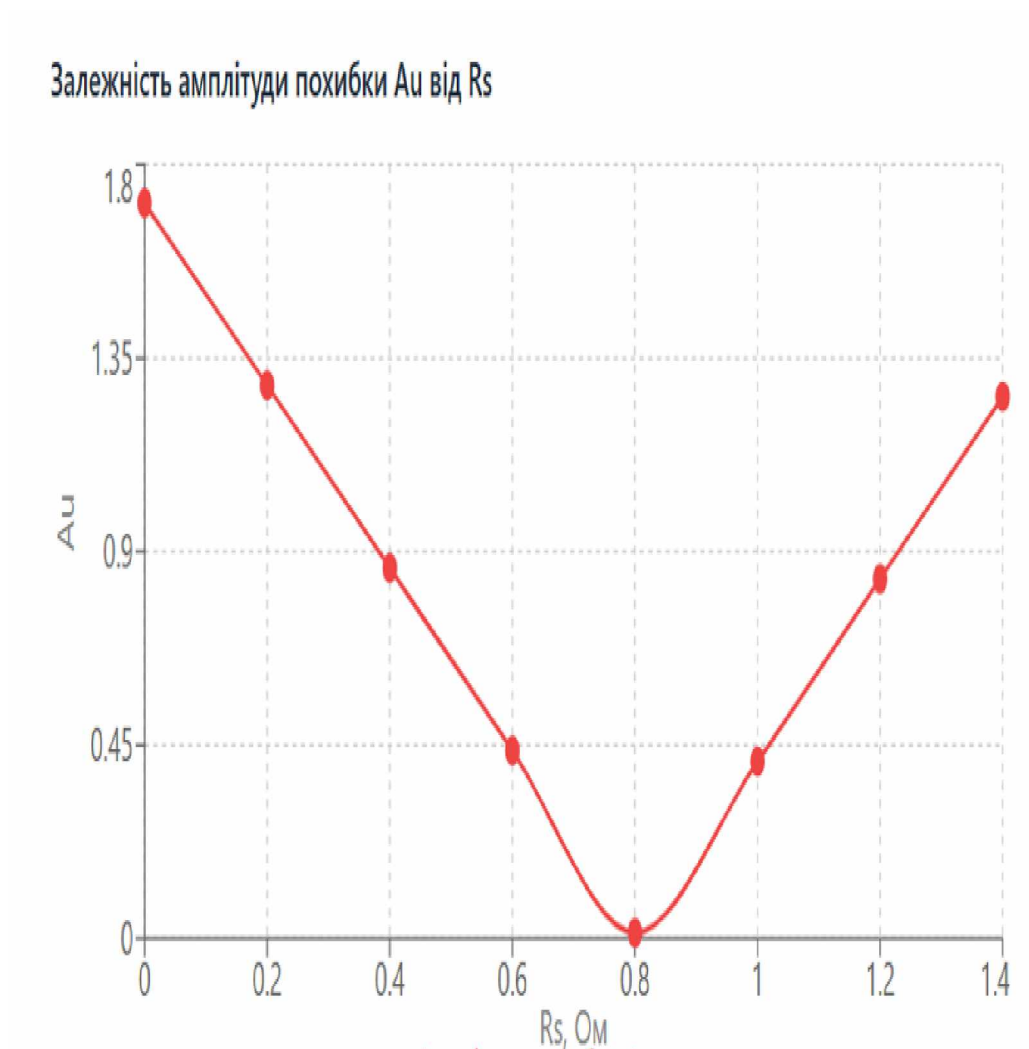
33. Hasni, M., Touhami, O., Ibtouen, R., & Fadel, M. (2012). Estimation of induction motor parameters using automated test benches at post-repair stages. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 42(1), 188-195.

34. Salomon, C. P., Ferreira, C., & da Silva, L. E. B. (2016). Induction motor efficiency evaluation after repair using non-intrusive parameter estimation methods. Energy Conversion and Management, 124, 345-354.

35. Culbert, I., & Rux, L. (2009). Evaluation of locked-rotor test methodologies for newly rewound industrial induction motors. IEEE Electrical Insulation Magazine, 25(2), 14-22.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-18	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежність амплітуди похибки A_u від R_s .



Зміна швидкості обертання ротора

