

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В ПАКЕТНОМУ РЕЖИМІ

**Вступ.** Задачі ідентифікації параметрів електромеханічних систем набувають все більшої актуальності серед вітчизняних вчених. Це пов'язано з тим, що впровадження будь-яких законів керування електроприводами, організація спостерігачів, систем моніторингу та інших не має сенсу, якщо параметри електромеханічної системи невідомі. Ефективна діагностика, енергозбереження та інші пріоритетні напрямки досліджень в області електропривода можливі тільки за наявності даних про динамічні та енергетичні параметри електричного двигуна, перетворювача та механічної системи.

Асинхронний двигун (АД) є складним електромеханічним об'єктом, який характеризується наявністю перехресних зв'язків і, у випадку короткозамкненого двигуна, неможливістю вимірювання параметрів і координат ротора. Відомі класичні методи визначення параметрів схеми заміщення АД. Вони, зазвичай, основані на іспитах короткого замикання та холостого ходу. Вченими доведена недостатня точність таких підходів.

В останній час дослідниками пропонуються методи ідентифікації параметрів схеми заміщення АД. Однак, складність асинхронного двигуна як об'єкту дослідження зумовлює те, що запропоновані методи не дозволяють визначати усі параметри схеми заміщення двигуна. Або вони приймаються із певними припущеннями, що теж негативно впливає на якість ідентифікації.

Отже, метою даної роботи є аналіз методів ідентифікації параметрів асинхронних електроприводів в пакетному режимі (off-line). Ці дані можуть потім використовувати організації спостерігачів швидкості та потокозчеплень.

**Матеріали досліджень.** Характеристика основних методів ідентифікації параметрів асинхронних короткозамкнених двигунів в пакетних режимах наведена в табл. 1.

Таблиця 1 - Методи ідентифікації параметрів короткозамкнених АД в пакетних режимах

№	Метод	Суть	Параметри, які дозволяє визначити метод
1	Прямий вимір	Вимірювання активних опорів обмоток статора методом амперметра-вольтметра на постійному струмі.	$R_1$
2	Короткого замикання [5]	Ротор двигуна гальмується механічно. Вимірюється фазний струм при напрузі 10-15% номінальної.	$R_2, X_1+X_2'$
3	Холостого ходу [5]	Двигун обертається без навантаження. Вимірюється фазний струм.	$R_1, X_{12}$
4	Вимірювання повного опору трьох послідовно з'єднаних обмоток статора [7]	Три обмотки статора вмикаються послідовно, узгоджено (рис. 1). Подається змінна напруга і вимірюється струм.	$R_1, X_{1\sigma}$
5	Аналіз ступінчатого перехідного процесу в двох послідовно з'єднаних обмотках статора [2]	Дві обмотки статора вмикаються послідовно, зустрічно (рис. 2). Подається постійна напруга, зчитується масив струму.	$R_1, R_2, L_{1\sigma}, L_{2\sigma}, L_{12}$
6	Аналіз поверхні відгуку за середньоквадратичним критерієм якості при пуску двигуна [3]	Двигун запускається без навантаження. Зчитуються фазні напруги, струми, швидкість. Ведеться пошук параметрів, при яких перехідні процеси, отримані моделюванням, співпадають із знятими експериментально.	$R_1, R_2, L_{1\sigma}, L_{2\sigma}, L_{12}, J_m$

Прийняті позначення:

$R_1, R_2$  - активні опори статора і ротора АД відповідно;  $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$  - індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора;  $L_{12}$  - головна взаємна індуктивність;  $X_{1\sigma}, X_{2\sigma}$  - індуктивні опори розсіювання;  $J_m$  - момент інерції механічної частини.

Надамо коротку характеристику кожному з методів.

Метод №1. Активний опір статора – єдиний параметр короткозамкненого двигуна, доступний для прямого вимірювання. Вимірювання можна проводити за мостовою схемою (у випадку потужних двигунів, у яких  $R_1$  складає долі ома) або методом амперметра-вольтметра на постійній напрузі. Результати цього вимірювання, на наш погляд, слід взяти за основу при подальших розрахунках.

Метод №2. Метод короткого замикання проводиться при зниженій напрузі статора і загальмованому роторі. Комплексний опір фази статора залежить від параметрів схеми заміщення [5, 6]:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2},$$

$$\text{де } R_k = R_1 + \frac{R_2}{C_2}; C_2 \approx \left| 1 + \frac{X_2}{X_{12}} \right|; X_{12} = \omega_0 L_{12}; X_k = X_1 + \frac{X_2}{C_2}; X_1 = \omega_0 L_1, X_2 = \omega_0 L_2.$$

Для двигунів із потужністю більше 1 кВт можна прийняти  $C_2 \approx 1$ .

Цей метод має невисоку точність, оскільки в режимі КЗ, незважаючи на знижену напругу статора, проявляються ефекти витіснення струму та насичення зубців.

Метод №3. Метод холостого ходу дозволяє приблизно оцінити індуктивність гілки намагнічування. Цей метод також має невисоку точність, оскільки нехтує струмом, що протікає в обмотці ротора.

Метод №4. Метод був запропонований в [7]. Схема підключення обмоток для його реалізації представлена на рис. 1.

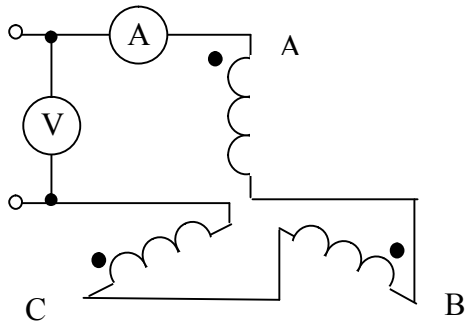


Рис. 1. Схема підключення обмоток статора для реалізації метода №4

(15-25% номінальної). Але на короткий час можна подати і номінальну напругу. Для збільшення точності визначення параметрів слід проводити декілька вимірювань.

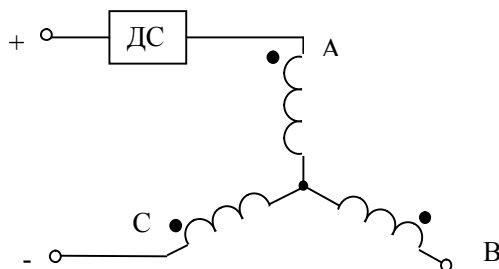


Рис. 2. Схема підключення обмоток статора для реалізації метода №5

Якщо невідомі всі параметри схеми заміщення, слід проводити пошук параметрів за середньоквадратичним критерієм якості. Пошук може бути здійснений шляхом повного аналізу поверхні відгуку або одним з градієнтних методів [1, 8]. Моделюванням встановлено, що поверхня відгуку при аналізі такого перехідного процесу має єдиний мінімум. Перевагами цього метода є можливість визначення електромагнітних параметрів АД із точністю до 5% та відносна простота, недоліками є необхідність у швидкодіючому датчику струму та великий час розрахунку.

Метод №6 вважається одним з самих достовірних для ідентифікації усіх параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Суть його полягає у знятті масивів струмів, напруг та швидкості двигуна під час пуску. Потім ведеться моделювання пуску двигуна і пошук таких його параметрів, при яких перехідні процеси, зняті експериментально і отримані моделюванням, співпадають. Головним недоліком цього методу є великий час розрахунків. При кожній зміні параметрів необхідно проводити моделювання пуску, що займає багато часу. Але в пакетному режимі час не є обмеженням.

Для дослідження характеру поверхні відгуку був розрахований середньоквадратичний критерій якості при усіх можливих сполученнях параметрів АД в широкому діапазоні.

Суть метода полягає у тому, що при такому підключенні обмоток статора сумарний вектор потокозчеплення, що обумовлений взаємною індукцією між обмотками, дорівнює нулю. Таким чином, вхідний імпеданс кола визначається тільки індуктивністю розсіювання. Авторами запропоновано для ідентифікації сталої часу використовувати дискретну модель цього R-L кола. На наш погляд, в даному випадку можна обійтись методом амперметра-вольтметра на змінному струмі. Імпеданс кола дорівнює

$$Z = \sqrt{(3R_1)^2 + (3\omega L_{1\sigma})^2},$$

звідки легко можна знайти індуктивність розсіювання  $L_{1\sigma}$ .

Якщо є можливість, слід прикладати пониженої напругу

Якщо є можливість, слід прикладати пониженої напругу

Метод №5 описаний в [2]. Схема для реалізації методу представлена на рис. 2. До двох обмоток, з'єднаних назустріч, прикладається постійна напруга, рівень якої залежить від активного опору статора.

При такій схемі з'єднання ЕРС індукції в обмотці «В» не збуджується. Еквівалентна індуктивність кола складним чином залежить від параметрів схеми заміщення. Струм в операторній формі виражається наступним чином:

$$I_1(s) = \frac{\frac{I_{st}}{s} + I_{st}(T_2 + T_{2\sigma})}{(T_1 T_{2\sigma} + T_2 T_{1\sigma} + T_{1\sigma} T_{2\sigma})s^2 + (T_1 + T_2 + T_{1\sigma} + T_{2\sigma})s + 1},$$

$$\text{де } T_1 = \frac{L_1}{R_1}, T_2 = \frac{L_2}{R_2}, T_{1\sigma} = \frac{L_{1\sigma}}{R_1}, T_{2\sigma} = \frac{L_{2\sigma}}{R_2}.$$

Нижче наведені результати експериментального визначення параметрів АД на прикладі двигуна АД80А6У3 (0,75 кВт; 220/380 В; 3,9/2,5 А; КПД 71%,  $\cos \phi$  0,71). Після попереднього визначення параметрів за методами 1-6 був проведений пошук параметрів схеми заміщення і моменту інерції за середньоквадратичним критерієм якості. Графіки перехідних процесів струму та швидкості, знятих експериментально та отриманих моделюванням за результатами ідентифікації, представлені на рис.3 та 4.

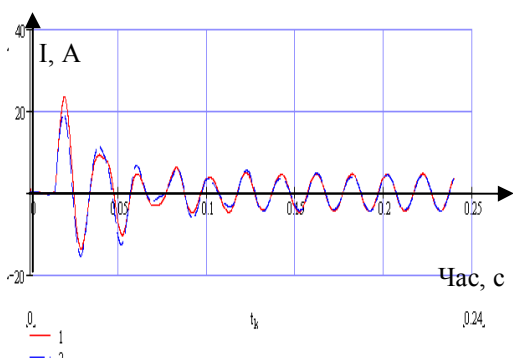


Рис. 3. Перехідні процеси струму при пуску асинхронного двигуна: 1) експериментальний; 2) отриманий моделюванням

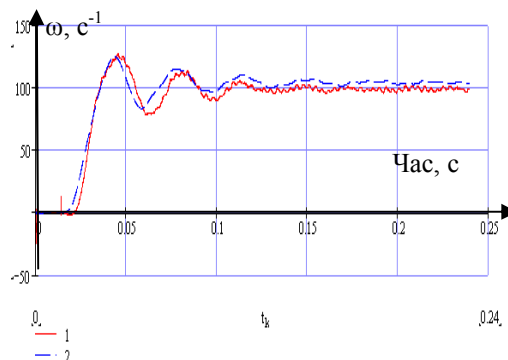


Рис. 4. Перехідні процеси швидкості при пуску асинхронного двигуна: 1) експериментальний; 2) отриманий моделюванням

При моделюванні не вдалося знайти такі параметри АД, щоб криві перехідних процесів співпали повністю. Процеси, представлені на рис.3 та рис.4, відповідають мінімуму середньоквадратичного критерію якості.

Дослідниками не дається однозначної відповіді щодо того, яку координату АД використовувати для розрахунку критерію якості – струм статора чи швидкість. Нами було проведено дослідження властивостей середньоквадратичного критерію за обома цими координатами. Відповідні поверхні представлені на рис.5.

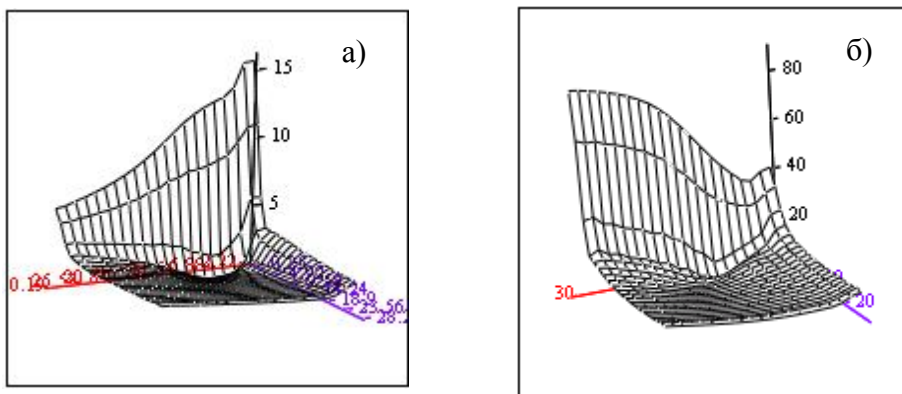


Рис. 5. Поверхня відгуку середньоквадратичного критерію в координатах  $R_1$ - $R_2$  а) «за струмом», б) «за швидкістю»

Аналіз поверхонь дозволяє зробити цікаві висновки. Обидві мають мінімум в області одного сполучення активних опорів ( $R_1=11,2$  Ом,  $R_2=4,2$  Ом), але у критерію «за швидкістю» він більш виражений. Моделюванням встановлено, що це властиво тільки двигунам із малим моментом інерції, з потужністю до 10 кВт. Отже, в практичних випадках доцільно застосовувати масив струму статора.

Мінімум поверхні «за струмом» дещо витягнутий вздовж осі  $R_1$ , тобто цей метод не такий чутливий до зміни опору статора, ніж до опору ротора. Це співпадає і з властивостями розробленого метода на основі дискретної моделі, похибка ідентифікації  $R_1$  завжди вища, ніж похибка ідентифікації  $R_2$ .

Характер критерію до зміни решти параметрів співпав з тим, що був досліджений моделюванням. Зміна індуктивності намагнічування в широкому діапазоні слабо впливає на критерій якості.

Момент інерції суттєво впливає на динаміку розгону і перехідний процес струму. Він є важливим параметром при налагодженні керованого електропривода.

Результати ідентифікації параметрів двигуна АД80А6У3 за описаними методиками наведені в табл. 2.

Таблиця 2 - Параметри двигуна АД80А6У3

Параметр	Паспорт	Метод №1		Метод №2		Метод №3		Метод №4		Метод №5		Метод №6		
		Нат.од.	ε,%	Нат.од.	ε,%	Нат.од.	ε,%	Нат.од.	ε,%	Нат.од.	ε,%	Нат.од.	ε,%	
1	R <sub>1</sub> , Ом	10	11,1	11	9	10	8,5	15	11,1	11	11,0	11	11,1	11
2	L <sub>1σ</sub> , мГн	5,92	-	-	10,2	41,6	-	-	7,0	15,4	7,0	15,4	7,05	16
3	R <sub>2</sub> , Ом	4,0	-	-	9	55	-	-	-	-	-	-	4,2	4,7
4	L <sub>2σ</sub> , мГн	18,5	-	-	10,2	44,8	-	-	-	-	-	-	21,4	15,6
5	L <sub>12</sub> , мГн	190	-	-	-	-	220,5	16,1	-	-	-	-	191,7	0,8
6	J, кг×м <sup>2</sup>	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0022	0

Примітка: нат. од. – значення в натуральних одиницях, ε – відхилення відносно паспортного значення.

Аналіз даних свідчить про розбіг параметрів, отриманих різними методами, а також про їх відмінність від паспортних. Найближче значення практично усіх параметрів спостерігається при використанні методу найменших квадратів (повному аналізу поверхні відгуку). Але і тут деякі параметри, наприклад, L<sub>1σ</sub>, L<sub>2σ</sub> відрізняються від паспортних на 16%.

Слід зауважити, що паспортні параметри – це проектні величини опорів та індуктивностей. Вони також можуть відрізнятися від дійсних. В нашому випадку досліджувався новий двигун, який не був в експлуатації. Параметри ж відремонтованого двигуна можуть відрізнятися майже на 20% від реальних. Тому, на наш погляд, найбільш правильно порівнювати результат ідентифікації з параметрами, отриманими за методом №6, оскільки при них спостерігається найбільший збіг перехідних процесів.

Непогані результати дає також метод №4, але суттєвим його недоліком є можливість визначення тільки одного параметра (L<sub>1σ</sub>), який недосяжний для прямого вимірювання. Методи холостого ходу та короткого замикання дають значну похибку (10-50%), що пояснюється припущеннями для їх розрахунку.

Метод №5 дає похибку 10%, що може бути достатньо для інженерних розрахунків або налагодження привода. Але його реалізація не дуже зручна, не завжди є джерело низької постійної напруги (10-20 В для малопотужних двигунів).

Спостерігається непогана кореляція між результатами ідентифікації за методами №4,5,6.

**Висновки.** Отже, раціональна послідовність пакетної ідентифікації може мати наступний вигляд.

По-перше, аналізуються паспортні дані двигуна (якщо вони доступні). По-друге, проводиться прямий вимір активного опору статора. Потім проводяться випробування холостого ходу та короткого замикання. При можливості роз'єднання обмоток проводиться експеримент за методом №4 (визначення L<sub>1σ</sub>).

Якщо у дослідника є в наявності вимірювально-діагностичний комплекс, проводиться пуск двигуна, в ході якого зчитуються масиви фазних струмів, напруги та швидкості. Потім виконується пошук параметрів схеми заміщення. Параметри, отримані за попередніми методами, слід використати як початкові значення.

Аналіз розтинів поверхні відгуку і за струмом, і за швидкістю свідчить про те, що в області дійсних параметрів вони мають єдиний мінімум. Тому для його пошуку може бути використаний будь-який з відомих пошукових алгоритмів [1, 8]. Поверхні відгуку за струмом і швидкістю мають мінімуми в єдиній точці (при одному сполученні параметрів), тому можна використовувати будь-яку. Але цей факт потребує додаткових досліджень для потужних двигунів.

#### Література.

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976.
2. Бешта А.С., Куваев Ю.В., Желдак Т.А., Макуха Ю.Н., Балахонцев А.В. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по переходному процессу в обмотке статора //Научные труды КрГПИ «Проблемы создания новых машин и технологий». Кременчуг. - 2000. - №1(8). - С. 157 – 161.
3. Бешта О.С., Воробйов О.А., Балахонцев О.В., Худолій С.С. Дослідження поверхні відгуку квадратичного критерію якості для процесу пуску асинхронного двигуна. //Матеріали конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Харків: Основа, 2001. – С.132 – 135.
4. Борцов Ю.А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. М.: Наука, 1967. – 325 с.
5. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Государственное энергетическое издательство. – 1959. – 504 с.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. - М.: Энергия, 1980.
7. Колб А.А. Идентификация индуктивности рассеивания обмотки статора асинхронного двигателя // Вісник НТУ «ХПІ» Збірник наукових праць «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2000. - №113. - С. 85-86.
8. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. - М.: Наука, 1984. – 345с.