

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Передерій О.В., Старостін С.С.

Донецький національний технічний університет

starostin@mail8.dgtu.donetsk.ua

Вступ. Як відомо, значна частина вироблюваної в усьому світі електричної енергії перетворюється за допомогою електродвигунів у механічну. Найбільше поширення одержали асинхронні електродвигуни, завдяки низькій вартості виробництва, надійній конструкції, високому коефіцієнту корисної дії, можливості застосування у вибухонебезпечних середовищах і високому значенню щільності потужності щодо інших типів електродвигунів.

Зараз є поширеним управління асинхронним електроприводом, засноване на принципі векторного керування. Для досягнення якісного регулювання при векторному керуванні необхідно мати достатньо точну інформацію щодо значень параметрів асинхронного двигуна [1]. Але параметри асинхронного двигуна, що впливають на процес векторного керування, не вказуються в його паспортних даних, тому що можуть істотно відрізнятися навіть у двигунах одного й того ж типу. Отже, для реалізації якісного регулювання необхідним є експериментальне визначення параметрів.

Аналіз попередніх досліджень. Для визначення параметрів асинхронного двигуна вже запропоновано багато різноманітних методів, що знайшло своє відображення, наприклад, в публікаціях [2 - 7]. На основі виконаного аналізу звернуто увагу на можливість застосування тестових синусоїдальних сигналів напруги статора, які відповідають фізичним основам функціонування асинхронних двигунів.

Отже, метою досліджень є обґрунтування та апробація ідентифікації параметрів асинхронних двигунів за допомогою тестових частотних сигналів.

Матеріал і результати дослідження. У даній публікації представлено метод ідентифікації параметрів Г-схеми заміщення асинхронного двигуна [1], яку зображено на рис. 1, де позначено:

$$L_{\sigma} = \frac{\sigma}{1-\sigma} \cdot L_s ; R_{r\sigma} = (1+\sigma_s)^2 \cdot R_r , \quad (1)$$

де L_s – індуктивність статора; R_r – активний опір фази ротора; σ_s – коефіцієнт розсіювання статора; σ – загальний коефіцієнт розсіювання двигуна.

Крім того, на рис. 1 застосовано наступні позначення: U_s – напруга фази статора; I_s – струм статора; I_r – струм ротора; I_{ms} – струм намагнічування; R_s – активний опір фази статора.

Вимірюваними величинами є діючі значення для векторів \vec{U}_s та \vec{I}_s , а також фазовий кут φ поміж ними.

Частина схеми заміщення (рис.1) характеризує частотна передавальна функція відносно напруги U_{ms}

$$F(\omega) = \frac{I_s R_{r\sigma}}{U_{ms}} = \frac{j\omega \cdot \frac{L_s + L_{\sigma}}{R_{r\sigma}} + 1}{j\omega \cdot \frac{L_s}{R_{r\sigma}} \left(j\omega \frac{L_{\sigma}}{R_{r\sigma}} + 1 \right)} , \quad (2)$$

з урахуванням якої частотні амплітудна та фазова характеристики мають вигляд, наданий на рис. 2.

На частотних характеристиках можна визначити області переважного впливу індуктивностей L_s та L_{σ} , що є передумовою здійснення ідентифікації параметрів асинхронного двигуна. До частоти ω_m має перевагу індуктивність L_s , а після частоти ω_{σ} суттєвий внесок дає

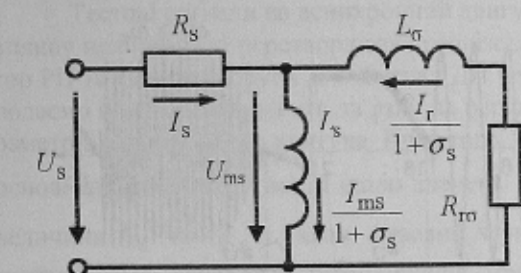


Рисунок 1 - Г-схема заміщення асинхронного двигуна

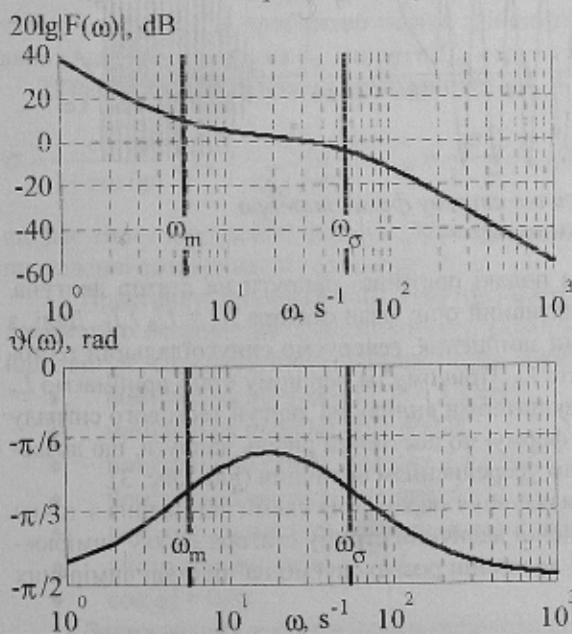


Рисунок 2 - Частотні характеристики для схеми заміщення асинхронного двигуна

індуктивність L_{σ} . Ці частоти визначають вирази:

$$\omega_m = \frac{R_{r\sigma}}{L_s + L_{\sigma}} ; \omega_{\sigma} = \frac{R_{r\sigma}}{L_{\sigma}} . \quad (3)$$

Ці обставини враховуються при формуванні тестових частотних сигналів, що розглядається далі. Повну провідність частини схеми заміщення, до якої прикладено напругу U_{ms} , визначає рівняння

$$S_m = \frac{1}{j\omega L_s} + \frac{1}{R_{r\sigma} + j\omega L_{\sigma}} = \frac{R_R}{R_{r\sigma}^2 + \omega^2 L_{\sigma}^2} - j \frac{R_{r\sigma}^2 + \omega^2 L_{\sigma} (L_{\sigma} + L_s)}{\omega L_s (R_{r\sigma}^2 + \omega^2 L_{\sigma}^2)} \quad (4)$$

З іншого боку, на підставі діючих значень для векторів \tilde{U}_m та \tilde{I}_s , а також кута φ_m поміж ними можна записати

$$S_m = \frac{I_s}{U_{ms}} \cdot \cos \varphi_m + j \cdot \frac{I_s}{U_{ms}} \cdot \sin \varphi_m = G_{\omega} - jB_{\omega} \quad (5)$$

Зіставляючи рівняння (4) та (5), отримуємо формули для розрахунків параметрів схеми заміщення, в яких враховано вплив на асинхронний двигун сигналів із двома суттєво різними кутовими частотами ω_1 та ω_2 :

$$L_{s[n]} = \frac{1}{\omega_1 B_{\omega_1} - \frac{\omega_1^2 L_{\sigma[n-1]}}{R_{r\sigma}^2 + \omega_1^2 L_{\sigma[n-1]}^2}}; \quad L_{\sigma[n]} = \frac{B_{\omega_2} - \frac{1}{\omega_2 L_{s[n]}}}{\omega_2 \cdot \left[G_{\omega_2}^2 + \left(\frac{1}{\omega_2 L_{s[n]}} - B_{\omega_2} \right)^2 \right]}; \quad R_{r\sigma[n]} = \frac{G_{\omega_2}}{G_{\omega_2}^2 + \left(\frac{1}{\omega_2 L_{s[n]}} - B_{\omega_2} \right)^2} \quad (6)$$

Слід звернути увагу, що формули (6) записано в рекурентному вигляді. Це обумовлено тим, що для підвищення точності результатів процес визначення параметрів відбувається ітеративно за декілька етапів експериментів при різних рівнях діючої напруги та струму статора. На кожному етапі сигнали напруги та струму статора мають вигляд, наданий на рис. 3.

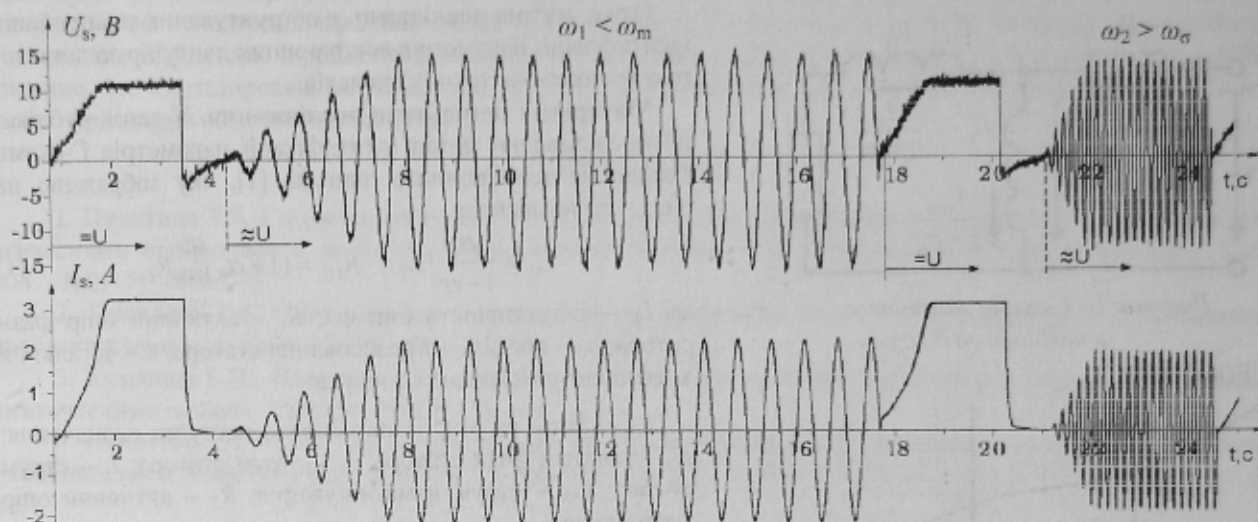


Рисунок 3 - Часові діаграми зміння напруги та струму фази статора при ідентифікації параметрів

Процес формування тестового сигналу розпочинається з подачі постійної напруги на статор двигуна. При цьому на основі виміряного струму статора визначається активний опір фази статора $R_s = U_s / I_s$. Далі, з урахуванням результатів аналізу частотної характеристики схеми заміщення, генеруємо синусоїдальний тестовий сигнал з частотою $\omega_1 < \omega_m$ (рис. 3) і визначаємо індуктивність L_s . Причому на першому етапі приймаємо $L_{\sigma} = 0$. Визначення індуктивності L_{σ} та опору $R_{r\sigma}$ здійснюємо за результатами впливу на двигун тестового сигналу з частотою $\omega_2 > \omega_{\sigma}$. Між двома частотними сигналами повторно формуємо постійний рівень напруги, що дозволяє повторно розрахувати активний опір фази статора з наступним усередненням величини (див. рис. 3).

Для практичного здійснення розглянутої послідовності визначення параметрів схеми заміщення з точки зору розрахунків складових провідності за рівнянням (5) крім діючої величини струму статора I_s , яку вимірюємо, необхідно знати також величину напруги U_{ms} та кута φ_m . Ці величини розраховуємо на підставі вимірних величин I_s , U_s та визначеного фазового кута φ за формулами:

$$U_{ms} = |\tilde{U}_s - R_s \tilde{I}_s| = \sqrt{U_s^2 + R_s^2 I_s^2 - 2U_s I_s R_s \cos \varphi}; \quad \varphi_{ms} = \varphi + \arctg \left(\frac{I_s R_s \sin \varphi}{U_s - I_s R_s \cos \varphi} \right) \quad (7)$$

Практичну реалізацію ідентифікації параметрів характеризує функціональна схема, зображена на рис. 4.

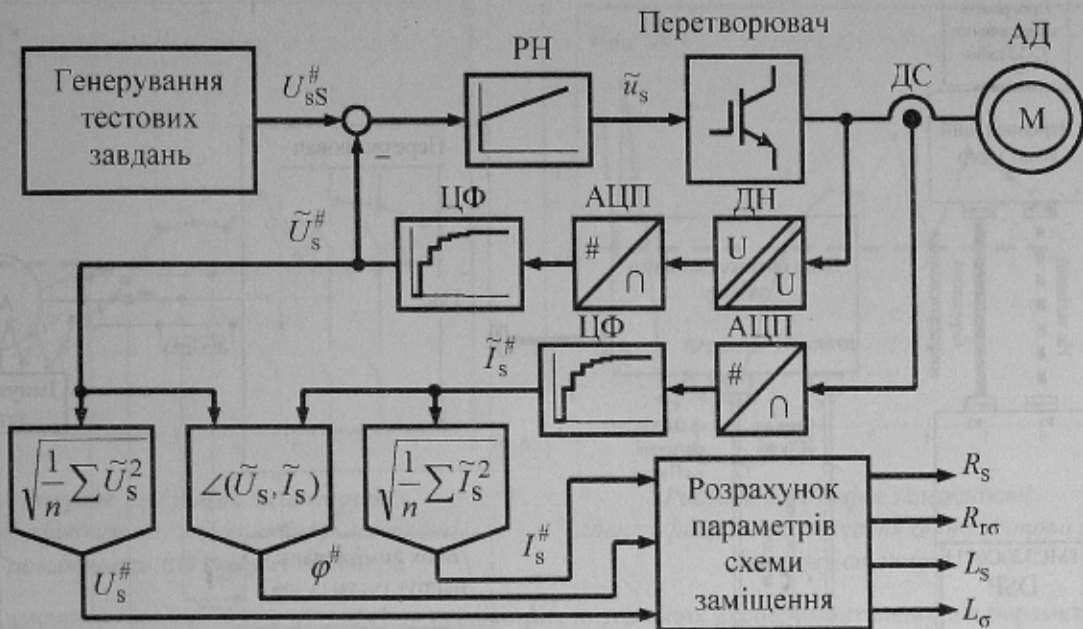


Рисунок 4 - Функціональна схема ідентифікації параметрів

Тестові сигнали на асинхронний двигун формуюємо за допомогою перетворювача частоти. Для зменшення впливу нелінійності перетворювача реалізовано контур регулювання напруги, до складу якого входять регулятор РН та датчик напруги ДН. Сигнал ДН через аналого-цифровий перетворювач АЦП та цифровий фільтр ЦФ подаємо в якості зворотного зв'язку на регулятор напруги, а також використовуємо в процесі ідентифікації параметрів асинхронного двигуна. Крім того, для ідентифікації вимірюємо струм завдяки датчику струму ДС. На основі цифрової інформації щодо значень напруги $\tilde{U}_s^\#$ та струму $\tilde{I}_s^\#$ статора двигуна визначаємо їхні діючі величини $U_s^\#$ та $I_s^\#$, а також фазовий зсув $\varphi^\#$ між напругою та струмом. Для визначення фазового зсуву застосовуємо дискретне перетворення Фур'є. На підставі визначених величин розраховуємо параметри асинхронного двигуна, виходячи з формул (5) - (7).

При практичній реалізації розглянутого методу передумовою проведення експериментів є визначення частот ω_m та ω_σ . Це приблизно можна здійснити на підставі паспортних даних асинхронного двигуна: номінальних частоти обертання n_n , напруги U_n , струму I_n , частоти f_n , числа пар полюсів N_p та величини $\cos(\varphi)$.

За паспортними даними з урахуванням $\omega_n = 2\pi f_n$, $\omega_p = \pi n_n / 30$ визначаємо [7]:

$$\sigma = \frac{1 - \cos(\varphi)}{1 + \cos(\varphi)}; I_s = \frac{U_n}{\omega_{sn} \sqrt{\sigma} I_n}; I_{s\sigma} = \frac{\sigma}{1 - \sigma} I_s; R_r = (\omega_{sn} - N_p \omega_n) \sqrt{\sigma} I_s; \sigma_s = -1 + \sqrt{\frac{1}{1 - \sigma}}; R_{r\sigma} = R_r (1 + \sigma_s)^2, \quad (8)$$

що дає змогу на підставі формул (3) розрахувати значення частот ω_m та ω_σ і врахувати отримані величини при проведенні експериментів (див. рис. 3).

Практичну апробацію розглянутого методу ідентифікації параметрів асинхронного двигуна здійснено за допомогою експериментального стенду, склад якого характеризує рис. 5. До складу стенду входить асинхронний двигун АД з наступними паспортними даними:

- ◆ номінальна потужність $P = 3,3$ кВт;
- ◆ номінальна напруга $U = 400$ В;
- ◆ номінальний струм двигуна $I = 6,6$ А;
- ◆ номінальна частота напруги $f = 50$ Гц;
- ◆ номінальна частота обертання $n = 1415$ об/хв.;
- ◆ число пар полюсів $N_p = 2$;
- ◆ $\cos(\varphi) = 0,81$.

Застосований в стенді електропривода сигнальний мікропроцесор TMC320C6711 програмується на мові C++ за допомогою програмного пакету Code Composer Studio.

З урахуванням наданих номінальних величин маємо наступні результати розрахунків:

$$\sigma = 0,105; I_s = 0,595 \text{ Гн}; L_\sigma = 0,07 \text{ Гн}; R_r = 3,434 \text{ Ом}; \sigma_s = 0,057; R_{r\sigma} = 3,837 \text{ Ом}; \omega_m = 5,768 \text{ с}^{-1}; \omega_\sigma = 54,95 \text{ с}^{-1}.$$

Для проведення експериментів обрано $\omega_1 = 3 \text{ с}^{-1}$ та $\omega_2 = 60 \text{ с}^{-1}$.

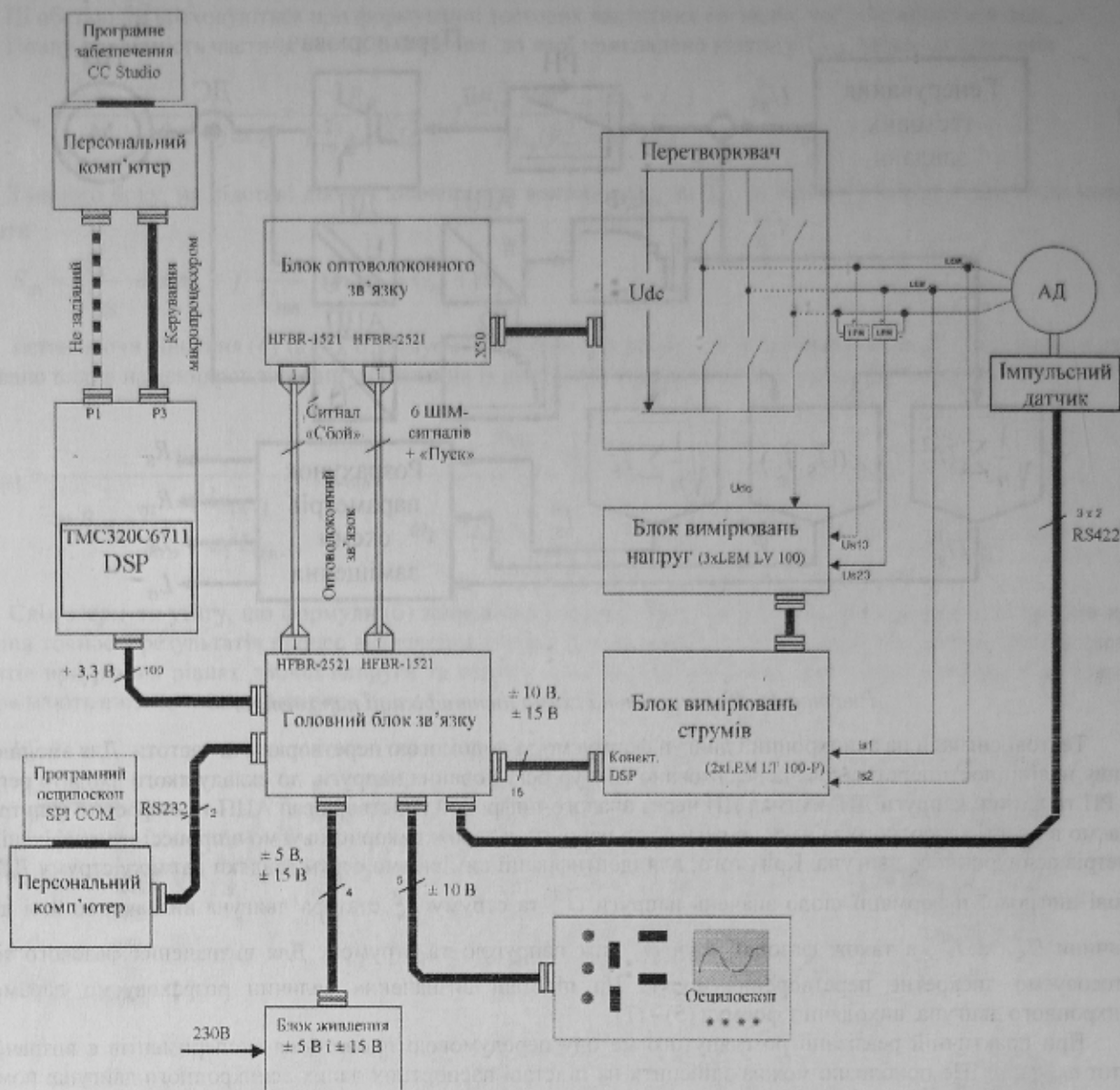


Рисунок 5 - Схема лабораторного стенду електропривода

Отримані результати ідентифікації параметрів асинхронного двигуна представлено на рис. 6 - рис. 8 у вигляді графіків залежностей від величини струму статора.

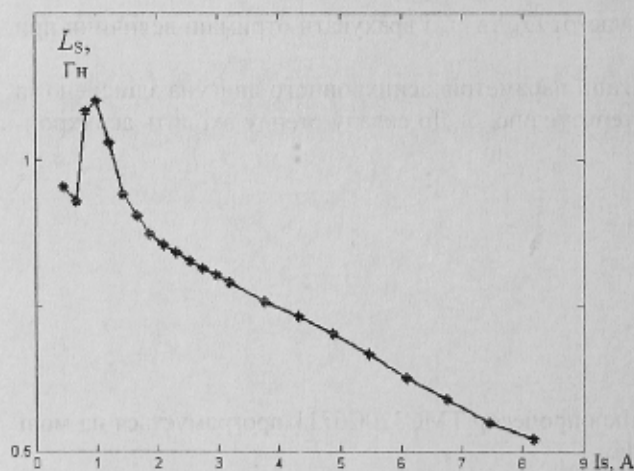


Рисунок 6 - Графік залежності ідентифікованого значення індуктивності статора від струму статора

Із графіка на рис. 6 видно, що визначене значення індуктивності статора зменшується більш ніж у два рази з ростом діючої величини струму статора. Це є наслідком насичення у магнітній системі двигуна.

Отримані значення індуктивності L_{σ} та активного опору ротора $R_{r\sigma}$ не мають явної залежності від струму статора (рис.7 та рис.8). Різниця в визначених величинах знаходиться в межах 3% і є наслідком похибок вимірювань та змінення температури двигуна. Середні значення цих параметрів дорівнюють: $L_{\sigma} = 0,0137$ Гн, $R_{r\sigma} = 4,52$ Ом.

Величина активного опору фази статора R_s , визначеного в ході експерименту, як і слід було очікувати, не залежить від величини струму статора і у ненагрітому стані двигуна дорівнює $R_s = 2,11$ Ом.

З отриманих результатів видно, що при струмі статора меншому за 0,8 А маємо підвищену погрішність визначення параметрів. Це пов'язано з погрішностями датчиків лабораторного стенду.

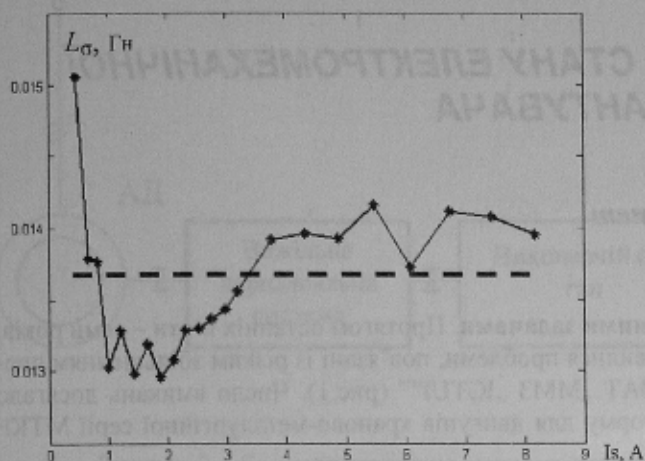


Рисунок 7 - Графік залежності ідентифікованого значення індуктивності розсіювання від струму статора

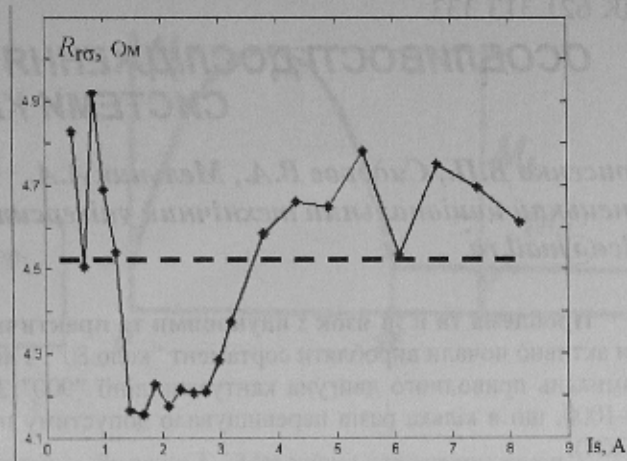


Рисунок 8 - Графік залежності ідентифікованого значення опору ротора від струму статора

Слід відзначити, що має місце відхилення параметрів, визначених експериментально, від параметрів, розрахованих за паспортними даними двигуна. Особливо значна розбіжність є в значеннях індуктивності L_{σ} . Хоча в [7] підкреслено, що розрахунки за формулами (8) є досить приблизними, така обставина викликає питання, яке потребує подальшого розгляду.

Висновки. Узагальнюючи проведені дослідження, можна підсумувати, що розглянутий метод ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна дає позитивні результати.

До вад методу можна віднести підвищену тривалість ідентифікації та необхідність реалізації особливого режиму роботи двигуна. Останнє потребує повторного здійснення ідентифікації при нагрітому стані двигуна для врахування змін у величинах параметрів у робочому режимі двигуна.

На підставі ітеративного принципу визначення параметрів можна зробити припущення щодо підвищеної точності визначення параметрів. Але це потребує додаткових досліджень з точки зору порівняння з іншими методами ідентифікації та перевірки відповідності математичної моделі реальному асинхронному двигуну.

ЛІТЕРАТУРА

1. Leonhard W. Regelung elektrischer Antriebe. - Berlin: Springer, 2000. - 462 S.
2. Khambadkone A.M., Holtz J. Vector-controlled induction motor drive with a self-commissioning scheme // IEEE Transactions on Industrial Electronics, October 1991, Vol. 38, NO. 5. - Pp.322 - 327.
3. Clerc G., Chouiter D.R. et al. Comparative study of identification methods for induction machines // 7th European Conference on Power Electronics and Applications (Trondheim, Norway, September 8-10, 1997). - Pp.524 - 529.
4. Proca A.B., Keyhani A. Identification of variable frequency induction motor models from operating data // IEEE Transactions on Energy Conversion, March 2002. - Vol. 17, NO. 1. - Pp.24 - 31.
5. Пересада С.М., Серета А.Н. Оценка параметров асинхронного двигателя при известном активном сопротивлении статора // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2004, №43. - С.28 - 31.
6. Сивокобыленко В.Ф., Харченко П.А. Идентификация параметров асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, 2007. - №3(44). - Кременчук: КДПУ, 2007. - Частина 1. - С.113 - 116.
7. Klaasen H. Selbsteinstellende, feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine und geberlose Drehzahlregelung / Dissertation. - Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, 1998. - 118 S