

АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБЧИСЛЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ НАМАГНІЧУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОРТОГОНАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Істоміна Н.М., асист., Конох І.С., ст. викл.

*Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського
39600, м. Кременчук Полтавської обл., вул. Першотравнева, 20*

E-mail: noriel-lomion@yandex.ru

Была разработана система автоматического определения значения индуктивности намагничивания, которое обеспечивает максимальное совпадение на рабочем участке статической механической характеристики и динамической, полученной с помощью ортогональной модели асинхронного двигателя.

Ключевые слова: динамическая механическая характеристика, рабочий участок, индуктивность намагничивания, автоматизация.

The automatic system of induction motor magnetizing inductance definition were developed. Obtained magnetizing inductance value is providing work area of static speed-torque characteristic for work area of dynamic one. Dynamic speed-torque characteristic were received by orthogonal model of induction motor.

Key words: dynamic speed-torque characteristic, work area, magnetizing inductance, automation.

Вступ. На сьогоднішній день значна частка досліджень асинхронного двигуна (АД) пов'язана з математичним моделюванням.

Існує декілька способів складення математичної моделі АД:

- лінеаризовані моделі АД [1, 2], що базуються на математичному описі робочої ділянки механічної характеристики двигуна);
- моделі АД у ортогональних системах координат [3, 4], що базуються на розкладанні векторів напруг, струмів і потокозчеплень на ортогональні проєкції,
- моделі АД у фазній системі координат [5, 6].

Найбільш поширеними у практиці моделювання залишаються ортогональні моделі АД. Вхідними даними для таких моделей є параметри схеми заміщення (СЗ).

Тому актуальною задачею є визначення впливу параметрів схеми заміщення на математичні моделі АД в ортогональних системах координат.

Аналіз попередніх досліджень. У роботі [7] було проведено дослідження впливу електромагнітних параметрів СЗ на результати моделювання АД у ортогональних системах координат.

Параметри СЗ розраховувалися за Г-подібною схемою [8], Т-подібною схемою [9] і за балансом потужностей [10].

За результатами розрахунку СЗ було проведено моделювання АД в ортогональних системах координат згідно наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dy_s}{dt} = \bar{U}_s - \bar{i}_s R_s - j\omega_k \bar{y}_s \\ \frac{dy_r}{dt} = \bar{U}_r - \bar{i}_r R_r - j(\omega_k - \omega) \bar{y}_r \end{cases} \quad (1)$$

За результатами моделювання були побудовані динамічні механічні характеристики (рис. 1).

Згідно теорії вони повинні збігатися на робочій ділянці зі статичною механічною характеристикою, що знаходиться у протиріччі з результатами моделювання.

Дослідним шляхом було з'ясовано, що знаковим параметром у цьому плані є індуктивність намагнічування, тобто динамічні механічні характеристики у порівнянні зі статичною доводять, що L_m , розраховане за схемами заміщення згідно формули (2), не припустимо використовувати для ортогональних моделей АД:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_0} = \frac{U_n}{I_{mн}} \cdot \frac{1}{\omega_0} \quad (2)$$

Дослідним шляхом були визначенні такі значення індуктивності намагнічування $L_{mр}$, що забезпечують збіг статичної та динамічної механічних характеристик на робочій ділянці (табл. 1, де за еталонні взято параметри з [11]).

Таблиця 1 – Значення розрахованих індуктивностей кола намагнічування L_m та визначених $L_{mр}$ за адекватними динамічними механічними характеристиками

Метод розрахунку	$L_m, Гн$	$L_{mр}, Гн$
Г-подібна СЗ	0,64618	0,01024
Т-подібна СЗ	0,6462	0,0146
СЗ за БП	0,6496	0,0268
Еталонні параметри	0,6483	0,0166

Динамічні механічні характеристики, що відповідають значенню індуктивності намагнічування $L_{mр}$, наведено на рис. 2.

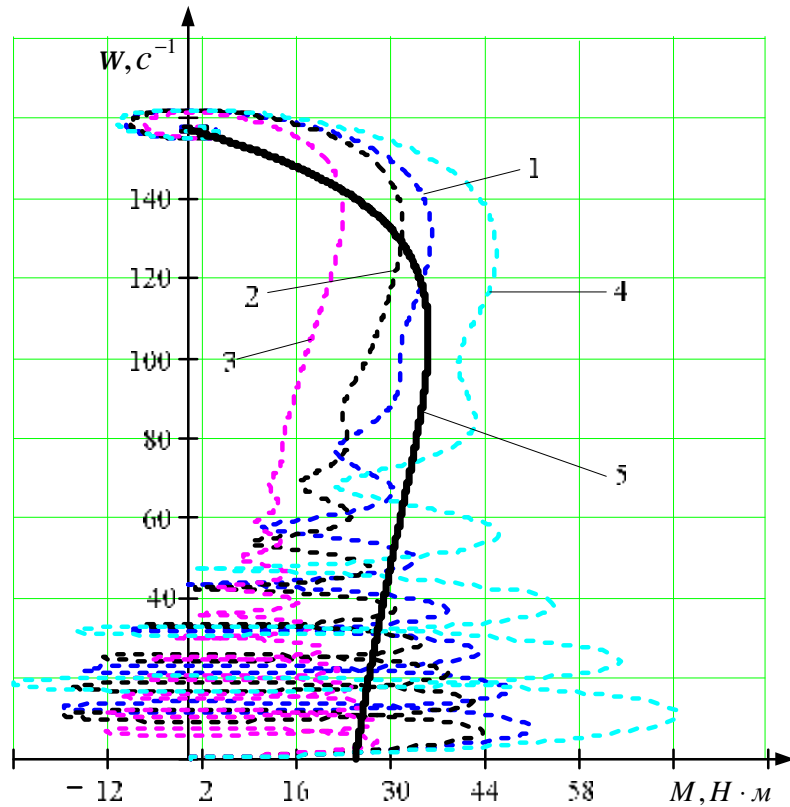


Рисунок 1 – Механічні динамічні характеристики у відповідності до СЗ:
за Т-схемою – 1; за еталонними параметрами – 2; за балансом потужностей – 3; за Г-схемою – 4;
статична механічна характеристика за формулою Клоса – 5

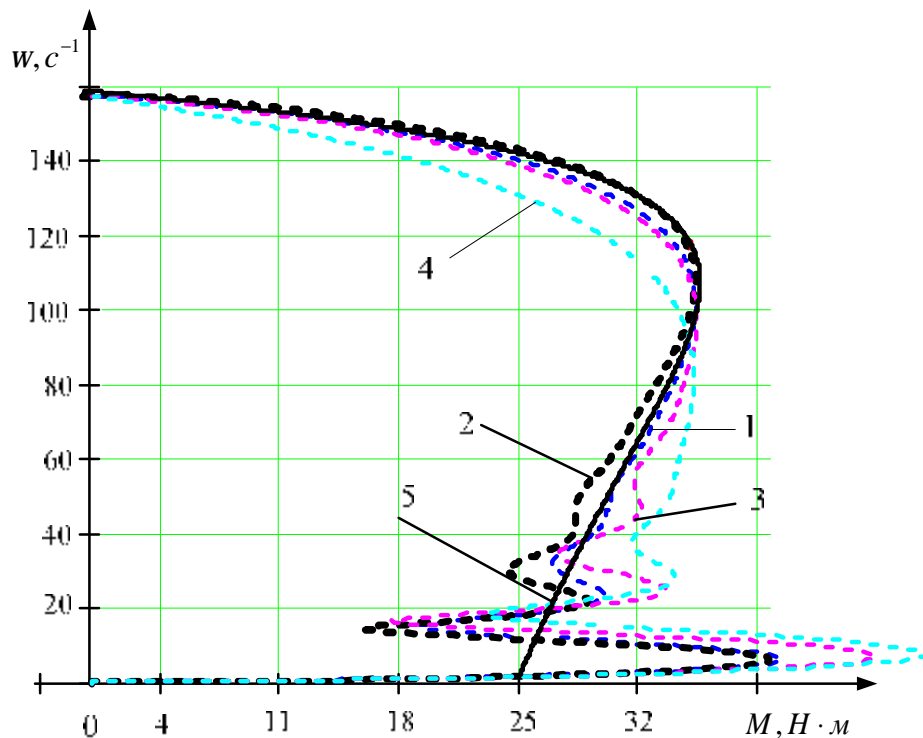


Рисунок 2 – Механічні динамічні характеристики, що відповідають визначеним значенням $L_{m\pi}$:
розрахована за Т-подібною схемою заміщення – 1; за еталонними даними – 2;
розрахована за балансом потужностей – 3; розрахована за Г-подібною схемою заміщення – 4;
статична механічна характеристика за формулою Клоса – 5

Для визначення значень $L_{m\pi}$ досліджуваного двигуна моделювання проводилося багато разів. Тому актуальною задачею є створення автоматизованого апарату для обчислення

Згідно [11] параметри СЗ для того двигуна мають значення як показано у табл. 3.

Таблиця 3 – Еталонні параметри СЗ АД

Назва, позначення	Значення
-------------------	----------

індуктивності намагнічування.

Мета роботи. Підвищення точності математичного моделювання АД в ортогональних системах координат шляхом визначення значення індуктивності намагнічування, що забезпечує збіг на робочій ділянці динамічної та статичної механічних характеристик.

Матеріал і результати дослідження. У подальшому динамічну механічну характеристику, що збігається зі статичною на робочій ділянці, будемо називати «адекватною».

Розрахунки проводилися для двигуна з паспортними даними, приведеними у табл. 2.

Таблиця 2 – Паспортні дані двигуна 4A90L4УЗ

Назва, одиниці вимірювання	Позначення	Значення
Номінальна потужність двигуна, кВт	P_n	2,2
Синхронна швидкість обертання, об/хв	n_0	1500
Номінальне ковзання, %	S_n	5,1
Критичне ковзання, %	S_k	33
Номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД)	h	0,8
Коефіцієнт потужності	$\cos j$	0,83
Відношення пускового моменту до номінального	I_n	2,1
Відношення мінімального моменту до номінального	I_{\min}	1,6
Відношення критичного моменту до номінального	I_{kp}	2,4
Кратність пускового струму	k_i	6,0
Момент інерції двигуна, кг·м ²	J_{∂}	0,0087

Активний опір статора $R_s, \text{ Ом}$	4,29
Активний опір ротора $R'_r, \text{ Ом}$	2,63
Індуктивний опір статора $X_s, \text{ Ом}$	3,33
Індуктивний опір ротора $X'_r, \text{ Ом}$	5,7
Індуктивний опір магнітного зазору $X_m, \text{ Ом}$	102,041

Для розробки автоматизованої системи визначення індуктивності намагнічування, що забезпечує адекватну динамічну механічну характеристику, необхідно у моделі АД прийняти L_m як зовнішній вплив.

Тоді за умови сталості амплітуди і частоти напруги живлення під час пуску модель представляється, як наведено на рис. 3. Тобто зовнішніми величинами є лише момент опору M_c і шукана індуктивність L_m . У підсистемі реалізована модель АД в ортогональній системі координат (рис. 4)

У цій моделі через блоки функцій реалізоване обчислення проєкцій напруги живлення на ортогональні осі

$$\begin{aligned} U_x &= U_m \cos((w_0 - w_k) \cdot t + j) \\ U_y &= U_m \sin((w_0 - w_k) \cdot t + j) \end{aligned} \quad (3)$$

і штучного коефіцієнту, введеного для спрощення запису системи диференціальних рівнянь (СДР), що також залежить від шуканої індуктивності L_m ,

$$A = \frac{1}{L_s \cdot L'_r - L_m^2}, \quad (4)$$

де U_m – амплітудне значення напруги живлення, w_0 – синхронна частота обертання поля статора, рад/с;

w_k – частота обертання ортогональної координатної системи, рад/с;

j – початковий кут, рад.

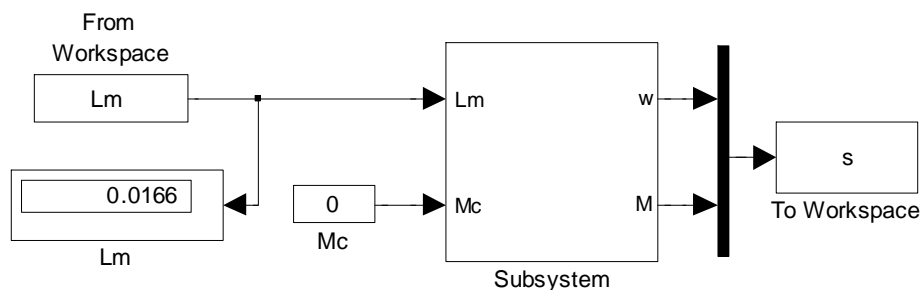


Рисунок 3 – Реалізація у пакеті Matlab математичної моделі АД в ортогональній системі координат з автоматичним обчисленням індуктивності намагнічування, що відповідає адекватній динамічній механічній характеристиці

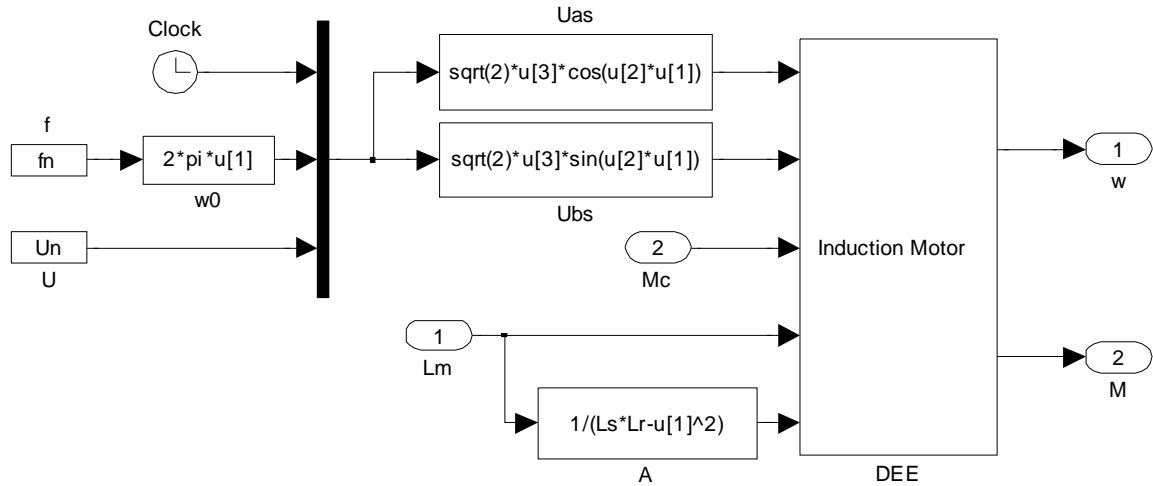


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд математичної моделі АД у ортогональній системі координат a, b за умови $j = 0$

За допомогою редактора диференціальних рівнянь (DEE) реалізовано розв'язок СДР, що описує математичну модель АД у ортогональній системі координат,

$$\begin{cases} \frac{dy_{xs}}{dt} = U_{xs} - AR_s(y_{xs}L_r' - y_{xr}L_m) + w_k y_{ys} \\ \frac{dy_{ys}}{dt} = U_{ys} - AR_s(y_{ys}L_r' - y_{yr}L_m) - w_k y_{xs} \\ \frac{dy_{xr}}{dt} = -AR_r'(y_{xr}L_s - y_{xs}L_m) + (w_k - w)y_{yr} \\ \frac{dy_{yr}}{dt} = -AR_r'(y_{yr}L_s - y_{ys}L_m) - (w_k - w)y_{xr} \\ M = \frac{3}{2} p_n L_m A (y_{ys}y_{xr} - y_{xs}y_{yr}) \\ \frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c) \end{cases} \quad (5)$$

Вихідними параметрами для даної моделі є:

- номінальна амплітуда напруги живлення U_n, B ;
- номінальна частота напруги живлення $f_n, \tilde{A}\tilde{\omega}$;
- кількість пар полюсів p_n ;
- активний опір статора, $R_s, Ом$;
- активний опір ротора $R_r', Ом$;
- індуктивність розсіювання статора $L_s, Гн$;
- індуктивність розсіювання ротора $L_r', Гн$;
- момент інерції АД, $J, кг \cdot м^2$.

Основною задачею автоматизованого розрахунку є забезпечення збігу на робочій ділянці динамічної механічної характеристики та статичної.

Відстежити цей збіг можна за трьома точками з наступними координатами:

- неробочій хід, (w_0, M_0) ;
- номінальний режим роботи, (w_n, M_n) ;
- максимальне навантаження, (w_k, M_k) .

Для зручності зведемо ці контрольні точки до загальної матриці f_c

$$f_c = \begin{bmatrix} w_0 & M_0 \\ w_n & M_n \\ w_k & M_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

За результатами моделювання також створюється матриця, що складається зі значень частоти обертання $w(t)$ та моменту $M(t)$,

$$f_\partial = [w_i \quad M_i] \quad (7)$$

Потім у цій матриці шукається рядок, що містить значення w_0 , й обчислюється відхилення моменту даного рядку від M_0

$$\Delta_0 = \left| (f_c)_{i0}^{(2)} - (f_\partial)_{i0}^{(2)} \right|, \quad (8)$$

де $i0$ – номер знайденого рядка.

Так само обчислюються відхилення для номінального Δ_n і максимального навантаження Δ_k .

Вони утворюють матрицю відхилень

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_0 \\ \Delta_n \\ \Delta_k \end{bmatrix} \quad (9)$$

Суму елементів матриці Δ прийmemo як інтегральний показник неузгодженості на робочій ділянці заданої статичної та отриманої динамічної механічних характеристик

$$\Delta K = \sum_{e=0}^{n_\Delta} (\Delta_e)^2 \quad (10)$$

Згідно виразу (4) межі існування шуканої індуктивності L_μ

$$0 < L_\mu < \sqrt{L_s \cdot L_r'} \quad (11)$$

За цих умов був створений m -файл пакету Matlab, який містить програмну реалізацію пошуку значення індуктивності намагнічування, що забезпечує адекватну динамічну механічну характеристику.

Спочатку за вибором користувача задається крок зміни шуканої індуктивності dL . Початкове

ЛІТЕРАТУРА

1. Дунаевский С.Я., Крылов О.А., Мазин Л.В.

значення L_{μ} приймається рівним кроку.

У циклі за умови (11) для кожного кроку проводиться моделювання АД в ортогональній системі координат, обчислюється матриця f_{∂} , знаходяться всі відхилення Δ й інтегральний показник неузгодженості ΔK .

У результаті проходження всього циклу створюється загальна матриця інтегральних показників неузгодженості та відповідних значень індуктивності L_m

$$M_{zag} = [\Delta K_z \quad L_{m_z}], \quad (12)$$

де z змінюється від 1, що відповідає $L_{\mu} = dL$, до n_z , що відповідає $L_{\mu} = \sqrt{L_s \cdot L_r} - dL$, і знаходиться наступним чином

$$n_z = \frac{\sqrt{L_s \cdot L_r}}{dL} - 2. \quad (13)$$

Серед елементів матриці M_{zag} знаходиться мінімум інтегрального показнику неузгодженості

$$\Delta K_r = \min \left((M_{zag})_z^{(1)} \right), \quad (14)$$

і відповідне значення індуктивності намагнічування L_{mr} .

В кінці виконання програми виконуються наступні операції, для перевірки та наочності відображення результатів автоматичного обчислення індуктивності намагнічування:

– на екран виводиться шукане значення індуктивності намагнічування L_{mr} ;

– виводиться відповідний йому інтегральний показник неузгодженості ΔK_r та номер рядка матриці M_{zag} ;

– проводиться контрольне моделювання АД;

– за результатами моделювання будується адекватна динамічна механічна характеристика, що максимально збігається на робочій ділянці зі статичною.

Також у програмі передбачено створення файлу даних, що містить точки матриці f_{∂} , яка відповідає адекватній механічній характеристиці. Цей файл користувач може застосовувати для подальшої математичної обробки відповідної механічної характеристики.

Висновки. За результатами роботи створені математичний опис та програмна реалізація автоматичного обчислення значення індуктивності намагнічування, що забезпечує максимальний збіг динамічної механічної характеристики, отриманої для ортогональної моделі АД, і заданої статичної механічної характеристики.

Моделирование элементов электромеханических систем. – М: Энергия, 1966. – 304 с.

2. Костинюк Л.Д., Мороз В.І., Паранчук Я.С. Моделювання електроприводів: Навчальний посібник. – Львів: Вид-во Нац. Універ. «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.

3. Мещеряков В.Н., Петунин А.А. Структурно-топологический анализ моделей вентильного индукторного и асинхронного двигателей // «Электротехника». – М.: ЗАО «Знак», 2005. – №7/05. – С. 9–14.

4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. – СПб: «Корона принт», 2001. – 320 с.

5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов по специальности «Электрические машины». – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.

6. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й. Моделювання електромеханічних систем: Підручник. – Кременчук, 2001. – 376 с.

7. Істоміна Н.М., Ноженко В.Ю. Аналіз впливу точності визначення параметрів асинхронного двигуна на динамічну механічну характеристику // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 1 (52). – С. 37–40.

8. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Электромеханика: Учебник для студентов вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 512 с.

9. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

10. Усольцев А.А. Определение параметров схемы замещения АД по справочным данным. – Электронный ресурс: http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf (Санкт-Петербургский гос. Универ. информационных технологий, механики и оптики: каф. электротехники и прецизионных электромеханических систем). – 4 с.

11. Піцан Р., Бардачевський В., Бойчук Б. Збірник задач до курсу "Електропривод": Навчальний посібник. – Львів: Вид-во Нац. Універ. «Львівська політехніка», 1999. – 426 с.

Стаття надійшла 07.04.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.