

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ НЕСИНУСОЇДНІЙ НАПРУЗІ ЖИВЛЕННЯ

Отримано математичну модель синхронного двигуна, який працює при несинусоїдній напрузі живлення, досліджено пускові режими синхронних двигунів з урахуванням впливу рівня вищих гармонік напруги та моменту інерції на пускові характеристики синхронного двигуна.

Вступ

Практика експлуатації електроприводів із синхронними двигунами показує, що необхідне глибоке всебічне вивчення їх взаємозв'язку і взаємного впливу з врахуванням непостійності різних параметрів і специфіки технологічного процесу. На промислових підприємствах використовуються різноманітні споживачі електроенергії. Їх робота призводить до погіршення показників якості напруги на затискачах електроприймачів, а саме, до появи вищих гармонік струму та напруги. Тому дослідження пускових режимів синхронних двигунів в електричній системі та їх аналіз доцільно виконувати при врахуванні впливу рівня вищих гармонік напруги на пускові характеристики синхронного двигуна, впливу моменту інерції на пускові режими синхронного двигуна.

Основна частина

Одним із способів поліпшення показників якості напруги на ввіді електроприймачів є використання автоматичних регуляторів збудження синхронних двигунів (СД). Для цього необхідно оцінити таке використання СД і оптимізувати сумісний режим роботи електроприводів в електричній системі. Таке завдання можна успішно вирішити лише на основі комплексного дослідження режимів роботи системи.

Для визначення показників режимів роботи СД необхідні досить точні методики розрахунку як перехідних, так і усталених процесів.

На практиці застосовується кілька методів теоретичного дослідження роботи машин в несиметричному режимі [1]. Найбільше розповсюдження в наш час одержали три з них. Це — метод двох реакцій, або метод поздовжнього й поперечного полів, який записується рівняннями Парка-Горева, метод обертових полів і метод симетричних складових.

Усі три методи однаково придатні для аналізу роботи машин змінного струму в несиметричному режимі. Кожний з них має свої переваги й недоліки.

Одним з основних припущень, прийнятих при побудові фізичних моделей чотириобмоткових узагальнених електричних машин є вимоги до напруги, яка прикладена до обмоток машини. Вона повинна мати постійну величину або синусоїдальний характер [2]. Метод двох реакцій особливо добре підходить для аналізу явнополюсних машин і машин із нерівномірним повітряним проміжком. За допомогою цього методу зручно розглядати перехідні процеси в електричних машинах, що є великою перевагою порівняно з іншими методами. За допомогою методу двох реакцій зручно аналізувати електричні машини на ЕОМ.

Недоліком цього методу є те, що він не дуже наочний, іноді важкий для фізичного представлення процесів, що протікають у машині. При його використанні ускладнюється врахування впливу вищих гармонік.

Метод обертових полів більш наочний, фізичний, але розрахунки за цим методом більш громіздкі, особливо якщо при розрахунках враховувати вищі гармоніки поля.

Метод симетричних складових відрізняється від попередніх простотою, фізичністю, наочністю, особливо якщо з його допомогою аналізуються асинхронні машини. При його використанні утворюються менш громіздкі вирази, ніж при використанні методу обертових полів, але в цілому ряді випадків більш громіздкі, ніж при використанні методу двох реакцій.

Недоліком цього методу, так само як і методу обертових полів, є труднощі застосування його для

аналізу перехідних процесів електричних машин у несиметричному режимі роботи.

Розгляд традиційних методів аналізу в роботах [3, 4] показує, що:

- перехідні процеси розраховуються шляхом інтегрування рівнянь стану у часовій області;
- усталені процеси розраховуються у позачасовій області, а тому методи не виправдано громіздкі та позбавлені точності, що зумовлено необхідністю втручання людини в обчислювальний процес;
- розрахунок статичної стійкості ґрунтується на математичному апараті цілком відмінному від того, що застосовується до розрахунку як перехідних, так і усталених процесів;
- розрахунок параметричної чутливості виявився поза увагою цих методів;
- математичний апарат, що застосовується на кожному з етапів аналізу, є розрізненим і унеможливає побудову єдиних алгоритмів, а тому вимагає створення окремих, невиправдано складних програм;
- математичні моделі електромеханічних пристроїв хоч і зорієнтовані на чисельні методи, але незручні для моделювання, вимагають невиправдано великого об'єму обчислень, а відтак, втрачають точність;
- аналітичними методами складно отримати бажану точність розрахунку перехідних процесів через неможливість отримання досить точних залежностей.

Використання загальної теорії диференціальних рівнянь і поєднання методів теорії електричних й електромагнітних кіл, електромагнітного й теплового полів, рівнянь механічного руху у звичайних і частинних похідних дало змогу побудувати математичні моделі складних електромагнітних й електромеханічних пристроїв і цілих систем [5]. В результаті отримана теорія єдиних алгоритмів, яка дає змогу на підставі ідентичного математичного апарата розраховувати в часовій області перехідних й усталених процесів, визначати статичну стійкість, а також параметричну чутливість як взаємопов'язані задачі аналізу.

Нові математичні моделі електричних машин вигідно відрізняються від традиційних тим, що, незважаючи на ступінь деталізації фізичного процесу, їх диференціальні рівняння розв'язані стосовно перших похідних невідомих за часом, що істотно спрощує їх інтегрування. Спільне інтегрування рівнянь електромагнітного і механічного станів дає змогу детально досліджувати реальні електромеханічні коливні процеси в системі. Рівняння електромагнітного стану формуються за методом вузлових напруг, оскільки такі системи містять обмежену кількість групових вузлів при безлічі контурів.

В явнопольосному СД просторове магнітне поле значно спотворене і його вищі просторові гармоніки починають проявляти помітну дію. В роботі [5] було доведено, що на рівні теорії електромеханічних кіл, вихід за межі першої просторової гармоніки магнітного поля не виправданий, оскільки, унеможливає використання методу координатних перетворень.

Розглянемо СД з демпферною обмоткою, яку еквівалентуємо двома ортогональними демпферними контурами по поздовжній d і поперечній q осях. Обмотку збудження розташуємо також по поздовжній осі. Оскільки ротор тепер не симетричний, то систему координат необхідно жорстко зв'язати з тілом ротора.

СД має більший повітряний проміжок, ніж асинхронний, а тому вплив насичення на поведінку значно менший, ніж в асинхронному двигуні. Тому цим ефектом можна нехтувати, що суттєво спрощує математичну модель.

Диференціальними рівняннями статора і ротора СД є

$$\frac{d\psi_S}{dt} = U_S - RI_S; \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_R}{dt} = U_R - RI_R, \quad (2)$$

де ψ_i , U_i , I_i ($i = S, R$) — колонки повних потокозчеплень, напруг і струмів обмотки статора ($i = S$) і ротора ($i = R$); R_i ($i = S, R$) — матриці резистивних опорів

$R_i = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 4R_{iA} - R_{iC} & R_{iB} - R_{iC} \\ R_{iA} - R_{iC} & 4R_{iB} - R_{iC} \end{bmatrix}$, причому R_{iA} , R_{iB} , R_{iC} — резистивні опори окремих фаз статора і ротора.

Рівняння стану магнітопроводу мають вигляд

$$T\psi = \Pi I_S + BI_R, \quad (3)$$

де $T = \text{diag}(\tau_d, \tau_q)$ — діагональна матриця питомих статичних магнітних опорів; $B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

— матриця коефіцієнтів $\Pi = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -\sin(\gamma - 120^\circ) \sin \gamma \\ \cos(\gamma - 120^\circ) \cos \gamma \end{bmatrix}$ — матриця перетворень до ортогональних осей d, q ;

Підставляючи рівняння струмів статора і ротора

$$I_S = \alpha_S (\psi_S - \Pi^{-1} \psi); \quad (4)$$

$$I_R = \Lambda_R (\psi_R - B_t \psi), \quad (5)$$

де α_S — обернені індуктивності розсіювання обмоток статора; $\Lambda_R = \text{diag}[\alpha_f, \alpha_D, \alpha_Q]$ — діагональна матриця обернених індуктивностей дисипації; Π^{-1} — обернена матриця перетворень; B_t — обернена матриця B , у рівняння стану магнітопроводу, одержимо

$$\psi = G_S \psi_S + G_R \psi_R, \quad (6)$$

де $G_S = \alpha_S + G\Pi$, $G_R = GB\Lambda_R$ — матриця зв'язку основних і повних потокозчеплень;

$$G = \text{diag} \left[\frac{1}{\alpha_d + \alpha_S + \alpha_f + \alpha_D} \quad \frac{1}{\alpha_q + \alpha_S + \alpha_Q} \right].$$

Приєднуючи до цих рівнянь, рівняння електромагнітного моменту

$$M_E = \sqrt{3} p_0 (\psi_{SA} i_{SB} - \psi_{SB} i_{SA}) \quad (7)$$

та рівняння руху ротора

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_0}{J} (M_E - M); \quad \frac{d\gamma}{dt} = \omega, \quad (8)$$

де γ — кут повороту ротора; M — механічний момент; J — момент інерції; p_0 — кількість пар полюсів машини, отримаємо математичну ψ -модель ненасиченого СД у фазних координатах.

Запишемо запропоновану математичну модель у розгорнутому вигляді у формі Коші

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{SA}}{dt} = u_{SA} - \frac{1}{3} [(4R_{SA} - R_{SC}) i_{SA} + (R_{SB} - R_{SC}) i_{SB}]; \\ \frac{d\psi_{SB}}{dt} = u_{SB} - \frac{1}{3} [(R_{SA} - R_{SC}) i_{SB} + (4R_{SB} - R_{SC}) i_{SA}]; \\ \frac{d\psi_f}{dt} = u_f - R_f i_f; \quad \frac{d\psi_D}{dt} = -R_D i_D; \quad \frac{d\psi_Q}{dt} = -R_Q i_Q; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p_0^2}{J} \sqrt{3} (\psi_{SA} i_{SB} - \psi_{SB} i_{SA}) - \frac{p_0 M}{J}; \quad \frac{d\gamma}{dt} = \omega, \end{cases} \quad (9)$$

де $\psi_d = \frac{1}{\alpha_d + \alpha_S + \alpha_f + \alpha_D} \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \alpha_S (\psi_{SB} \sin \gamma - \psi_{SA} \sin(\gamma - 120^\circ)) + \alpha_f \psi_f + \alpha_D \psi_D \right];$

$$\psi_q = \frac{1}{\alpha_q + \alpha_S + \alpha_Q} \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \alpha_S (\psi_{SB} \cos \gamma - \psi_{SA} \cos(\gamma - 120^\circ)) + \alpha_Q \psi_Q \right];$$

$$i_{SA} = \alpha_S (\psi_{SA} - \psi_d \cos \gamma + \psi_q \sin \gamma);$$

$$i_{SB} = \alpha_S (\psi_{SB} - \psi_d \cos(\gamma - 120^\circ) + \psi_q \sin(\gamma - 120^\circ));$$

$$i_f = \alpha_f (\psi_f - \psi_d); \quad i_D = \alpha_D (\psi_D - \psi_d); \quad i_Q = \alpha_Q (\psi_Q - \psi_q).$$

В наведеній математичній моделі параметри СД не залежать від частоти живильної напруги. Це спрощує дослідження режимів роботи синхронних двигунів в електричній системі та аналіз їх роботи при врахуванні впливу рівня вищих гармонік напруги.

Для математичної моделі, яка подана у формі Коші, доцільно застосовувати чисельні методи інтегрування типу Рунге-Куты, до яких можна віднести метод Ейлера, метод Рунге-Куты, метод Хойне, Рунге-Куты четвертого порядку [6]. Точність чисельного інтегрування за методом Ейлера-Коші найадекватніша запропонованій математичній моделі. Нами були розроблені програми розрахунку перехідних

процесів при пуску СД типу СДЗБ-13-52-8 та розрахунку його динамічних механічних характеристик. При цьому досліджувався вплив перших дев'яти гармонік напруги на пускові характеристики синхронного двигуна при різних моментах навантаження.

ГОСТ 13109-97 [7] нормує основні показники якості електроенергії в електричних мережах загального призначення. Згідно з вимогами цього ГОСТу коефіцієнт v -ї гармонічної складової напруги K_{vU} не повинен перевищувати 5 %, в межах яких проводились дослідження.

На рис. 1а, б, в, г показані часові діаграми пуску, динамічні характеристики та часові діаграми пускового струму за результатами комп'ютерного моделювання за зазначеними вище рівняннями.

На рис. 2 показано графік коливання швидкості в усталеному режимі, коли момент $M = 0$ Нм, а

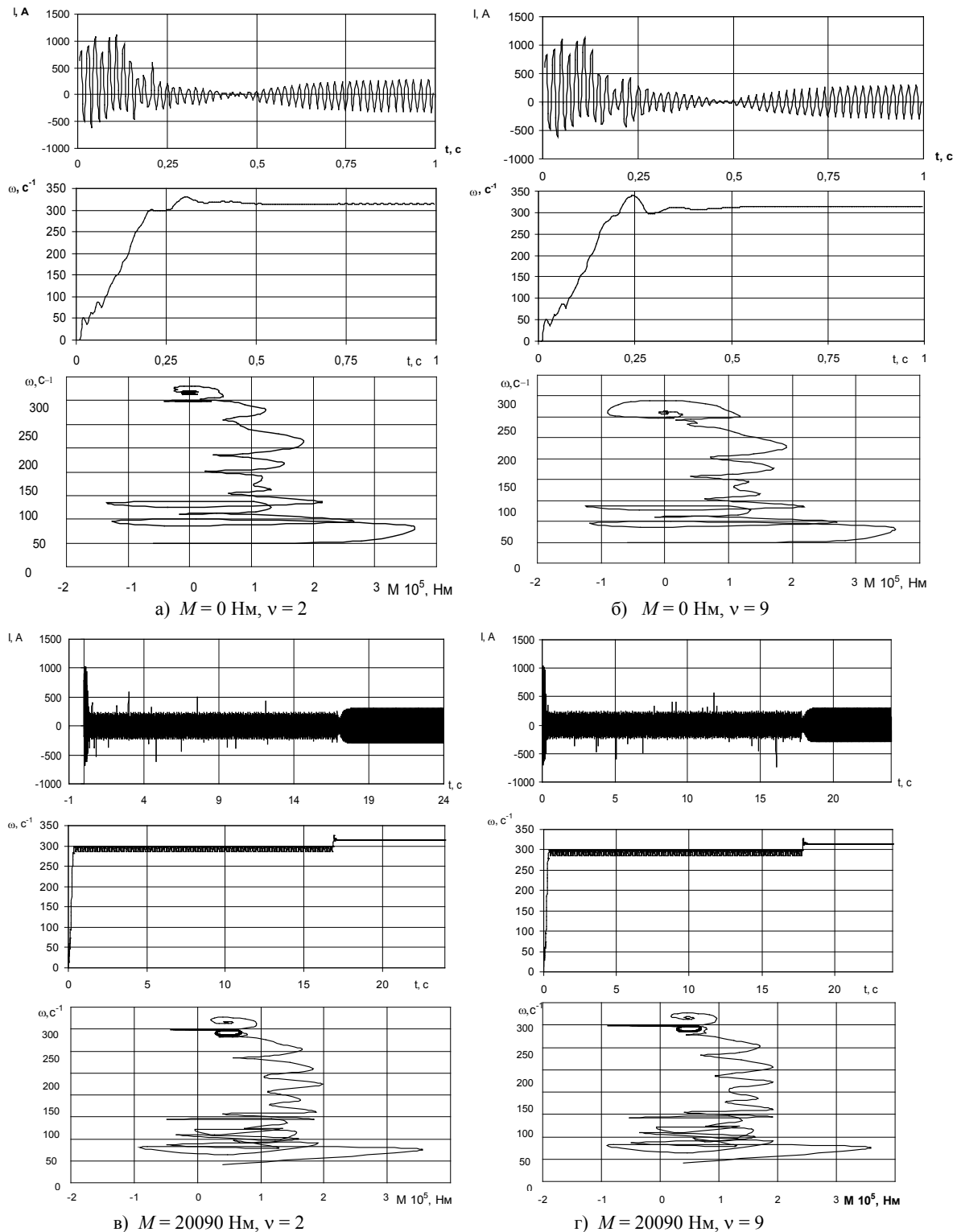


Рис. 1. Результати комп'ютерного моделювання синхронного двигуна

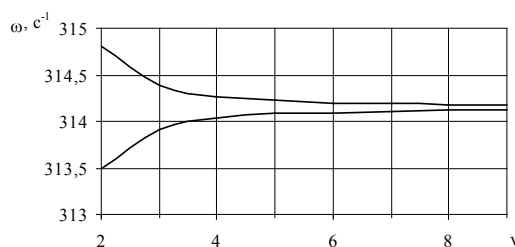
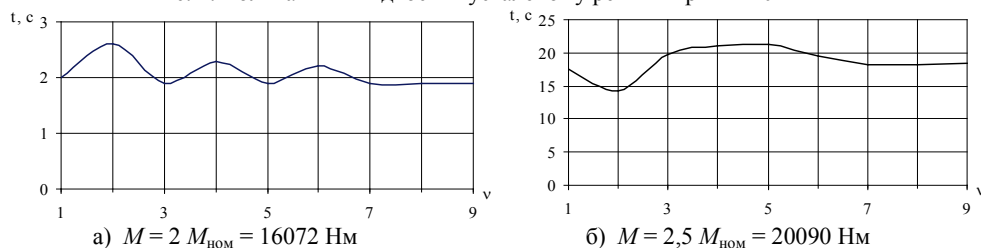
Рис. 2. Коливання швидкості в усталеному режимі при $M = 0$ Нм

Рис. 3. Тривалість розгону двигуна до синхронної швидкості при різних моментах навантаження

на рис. 3а, б показані графіки тривалості розгону двигуна до синхронної швидкості при моментах $M = 2 \cdot M_{\text{ном}}$ і $M = 2,5 \cdot M_{\text{ном}}$ в залежності від v -ї гармонічної складової напруги.

Дослідження показують, що коливання кутової швидкості двигуна в усталеному режимі зменшується від 313,5...314,81 рад/с при коефіцієнті $K_{2U} = 5\%$ до 314,12...314,17 рад/с при коефіцієнті $K_{9U} = 5\%$. Тривалість розгону двигуна зменшується від 2,6 с при коефіцієнті $K_{2U} = 5\%$ до 1,9 с при коефіцієнті $K_{9U} = 5\%$ (при моменті $M = 2 \cdot M_{\text{ном}}$), а при моменті $M = 2,5 \cdot M_{\text{ном}}$ збільшується від 14,3 с при коефіцієнті $K_{2U} = 5\%$ до 21,2 с при коефіцієнті $K_{9U} = 5\%$.

Проведені розрахунки показують, що наявність вищих гармонік напруги призводить до виникнення коливання швидкості в усталеному режимі, а отже, і до погіршення ефективності роботи електроприводу.

Висновки

Запропонована математична модель дозволяє легко виявити характерні особливості поведінки синхронних двигунів в різних динамічних режимах. Отримані залежності пускових режимів роботи синхронних двигунів можна використовувати для розроблення пристроїв регулювання струму збудження двигуна і поліпшення показників, які характеризують роботу електроприводів змінного струму (час перехідного процесу, максимальне відхилення і коливання навантаження на валу двигуна), напругу мережі, а також для ідентифікаційної оцінки стану синхронного двигуна без вимкнення від роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Электромеханика» — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1988.
2. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики: Учебник для вузов. — 2-изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
3. Математичні моделі електроенергетичних систем: Навч. посібник / В. П. Мельник. — К.: ІСДО, 1993. — 336 с.
4. Бернас С., Цек З. Математические модели элементов электроэнергетических систем. — М.: Энергоиздат, 1982.
5. Чабан В. Й. Математичне моделювання електромеханічних систем. — Львів: Вид-во Держ. ун-ту «Львівська політехніка», 1997.
6. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М.: Наука, 1986.
7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження

Надійшла до редакції 6.02.07
Рекомендована до друку 14.03.07

Гадай Андрій Валентинович — асистент кафедри електропостачання.

Луцький державний технічний університет