

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ФОРМУВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ СТАТОРА

Вінницький національний аграрний університет

Анотація

Наведено математичні моделі формування вищих гармонік статора асинхронного двигуна, як реакцій на типові конструктивні особливості електричної машини. Показано, що гармонічний склад струму статора значною мірою визначається конструктивними особливостями АД та для штатного режиму роботи буде постійним у тій частині гармонічного спектру, що відноситься до власних складових. Тож є очевидним, що аналіз спотворення спектру статорного струму АД може бути використаний як діагностична ознака технологічного стану останнього.

Ключові слова: вищі гармоніки, асинхронний двигун, дефект, математична модель.

Abstract

Mathematical models of the formation of higher harmonics of the stator of an asynchronous motor as reactions to typical design features of an electric machine are given. It is shown that the harmonic composition of the stator current is largely determined by the design features of the AD and will be constant in the part of the harmonic spectrum that refers to its own components for the standard operating mode. So it is obvious that the analysis of the distortion of the AD stator current spectrum can be used as a diagnostic sign of the technological state of the latter.

Key words: higher harmonics, asynchronous motor, defect, mathematical model.

У повітряному зазорі асинхронних електричних машин поруч із основний гармонікою є нескінченне число гармонік поля. Зазначені гармоніки відносяться як до вищих так і до субгармонік. Вони відрізняються між собою амплітудами та частотами та поділяються на власні і примусові [1].

Примусовими гармоніками називають гармоніки, що виникають за рахунок впливу мережі, механічного валу тощо. Власні гармоніки обумовлені конструктивними особливостями та нелінійними параметрами самої машини [2].

Власні гармоніки поля індують в обмотці статора вищі гармоніки електрорушійних сил (ЕРС), для зниження яких і, як наслідок, поліпшення форми кривої ЕРС, застосовують скорочення кроку, скіс пазів і розподіл обмотки за пазами, щоб кількість котушок у котушкочивій групі було $q > 1$ і т. д. Проте повністю вилучити власні гармонічні складові, як показує досвід проектування та експлуатації зазначеного обладнання, неможливо [2, 3].

Власні гармоніки, що з'явилися через конструктивні особливості і нелінійність параметрів машини, значно впливають на процеси перетворення енергії в повітряному зазорі. При концентрично розташованому роторі в повітряному зазорі при відкритих пазах статора і ротора числом Z_s і Z_r та кількості пар полюсів p існують найбільш виражені гармоніки індукції поля наступних порядків [3, 4]:

- основна гармоніка, що має p періодів на кільці зазору, що утворює оберतालне поле з індукцією:

$$B_1 = \frac{4 \cdot F_1 \cdot \mu_0 \cdot \lambda_0}{\pi \cdot \delta} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{\tau} - \omega_1 \cdot t\right), \quad (1)$$

де F_1 – амплітуда намагнічуючої сили основної гармоніки, А; τ – полюсне ділення; δ – повітряний зазор між ротором і статором, мм; λ_0 – постійна складова повітряного зазору, Гн/м; ω_1 – циклічна частота мережі живлення, рад/с; x – проекція амплітуди гармоніки по осі абсцис.

- гармоніки зубчастості статора, що виникають внаслідок змінної магнітної провідності, що утворюють поля, що обертаються з індукцією:

$$B_{zs1} + B_{zs2} = \frac{4 \cdot F_1 \cdot \mu_0}{\pi \cdot \delta} \left[\begin{array}{l} \lambda_{zs1} \cdot \cos \left((2 \cdot m_1 \cdot q - 1) \cdot \frac{\pi \cdot x}{\tau} - \omega_1 \cdot t \right) + \\ + \lambda_{zs2} \cdot \cos \left((2 \cdot m_1 \cdot q + 1) \cdot \frac{\pi \cdot x}{\tau} - \omega_1 \cdot t \right) \end{array} \right], \quad (2)$$

де m_1 – кількість фаз обмотки статора; q – кількість пазів на полюс та фазу обмотки; λ_{zs1} , λ_{zs2} – відносні амплітуди зубцевих гармонік провідностей повітряного зазору статора, Гн/м².

- гармоніки фазних зон, які утворюють обертове поле виду:

$$B_{2k-1} + B_{2k+2} = \frac{4 \cdot F_1 \cdot \mu_0 \cdot \lambda_0}{\pi \cdot \delta} \left[\begin{array}{l} \frac{\cos \left((2 \cdot k - 1) \cdot \frac{\pi \cdot x}{\tau} + \omega_1 \cdot t \right) \cdot k_{об.2k-1}}{(2 \cdot k - 1) \cdot k_{об.1}} + \\ + \frac{\cos \left((2 \cdot k + 1) \cdot \frac{\pi \cdot x}{\tau} - \omega_1 \cdot t \right) \cdot k_{об.2k+1}}{(2 \cdot k + 1) \cdot k_{об.1}} \end{array} \right], \quad (3)$$

де $k_{об.1}$ – обмоточний коефіцієнт обмотки статора; k – ціле число.

- гармоніки зубчастості ротора, що виникають внаслідок змінної магнітної провідності ротора:

$$B_{zr1} + B_{zr2} = \frac{4 \cdot F_1 \cdot \mu_0}{\pi \cdot \delta} \left[\begin{array}{l} \lambda_{zr1} \cdot \cos \left(\left(\frac{z_r}{p} - 1 \right) \cdot \frac{\pi \cdot x}{\tau} + \omega_1 \cdot t \right) + \\ + \lambda_{zr2} \cdot \cos \left(\left(\frac{z_r}{p} + 1 \right) \cdot \frac{\pi \cdot x}{\tau} - \omega_1 \cdot t \right) \end{array} \right]. \quad (4)$$

де z_r – число пазів ротора; ω_r – циклічна частота обертання ротора, рад/с; λ_{zr1} , λ_{zr2} – відносні амплітуди зубцевих гармонік провідностей повітряного зазору ротора, Гн/м².

Крім того існують власні гармонічні складові, обумовлені іншими конструктивними особливостями машини, які у штатному режимі роботи (бездефектне обладнання) формують гармоніки істотно нижчої амплітуди.

Варто відзначити, що гармонічний склад реального спектру струму статора АД є результирующим електромагнітної складової, параметрів живлення та механічних особливостей електропривода. Зокрема можна виділити такі найбільш характерні гармонічні складові [3, 5]:

- вищі гармоніки, обумовлені відповідними гармоніками магніторушійних сил (МРС) обмотки статора:

$$f_{МРС} = f_1 \cdot (6 \cdot c \pm 1), \quad (5)$$

де $c = 1, 2, 3 \dots$ (дійсні цілі числа).

- зубцеві гармоніки статора, обумовлені пазами сердечника статора:

$$f_{ЗГС} = f_1 \cdot \left(1 \pm \frac{k \cdot z_s}{p} \right), \quad (6)$$

де $k=1, 2, 3 \dots$ (дійсні цілі числа); z_s – число пазів статора; p – кількість пар полюсів. Значне збільшення амплітуди зубцевих гармонік поля статора варто очікувати при роботі АД в режимі холостого ходу. При зростанні моменту навантаження її амплітуда буде зменшуватися [25].

- зубцеві гармоніки ротора, обумовлені пазами сердечника ротора:

$$f_{ЗРП} = \frac{k \cdot z_r}{p} \cdot f_r \pm f_1, \quad (7)$$

де z_r – число пазів ротора (кількість стрижнів білячої клітки); f_r – частота обертання ротора, Гц; f_1 – частота мережі живлення, Гц.

- гармоніки, викликані відносним зміщенням пазів ротора відносно пазів статора:

$$f_{ЗГС_ЗГР} = f_1 \cdot \left(1 \pm \frac{k \cdot z_s}{p} \pm \frac{k \cdot z_r}{p} \right). \quad (8)$$

- гармоніки, обумовлені насиченням сердечника:

$$f_{НАС} = f_1 \cdot (2 \cdot k - 1). \quad (9)$$

- гармоніки, обумовлені взаємодією гармонік насичення з обмоткою ротора, що характеризують кількість пар полюсів:

$$f_{нас_ОР} = f_1 \cdot (p \cdot (2 \cdot k - 1) \pm k \cdot z_r). \quad (10)$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гаврилюк В. В. Моделювання компенсованого асинхронного двигуна в програмному середовищі Matlab Simulink. Вісник КНУТД. 2013. № 3. С. 63-70
2. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. Москва: Высшая школа, 2001. 327 с.
3. Мілих В. І. Електричні машини і трансформатори. Київ: Каравела, 2018. 452 с.
4. Вольдек А. И. Электрические машины: учебник для вузов. Ленинград: Энергия, 1974. 840 с.
5. Купін А. І., Кузнецов Д. І. Інформаційна технологія для групової діагностики асинхронних електродвигунів на основі спектральних характеристик та інтелектуальної класифікації. Кривий Ріг: ФОП Чернявський Д.О, 2016. 200 с.

Граняк Валерій Федорович, к.т.н., доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету, e-mail: titanxp2000@ukr.net

Valerii Fedorovych Hranayak, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of the Vinnytsia National Agrarian University, e-mail: titanxp2000@ukr.net