

# ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ НА ПОВЕРХНІ РОТОРА ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМА

**Циганкова Ганна Анатоліївна,**

кандидат технічних наук,

доцент кафедри вищої математики ім. проф. В.І. Можара  
Національний університет харчових технологій, Україна

[tsgk.anna@gmail.com](mailto:tsgk.anna@gmail.com)

Однією із задач експериментального дослідження електромагнітного поля в робочій зоні електродинамічного гальма є дослідження розподілу осьової компоненти вектора магнітної індукції в напрямку кутової координати на поверхні ротора [1].

В системі координат, нерухомій відносно індуктора, розподіл індукції  $B(x)$  магнітного поля вздовж тангенційної координати  $x$  на діаметрі  $D$  можна записати у вигляді ряду Фур'є [2]:

$$B(x) = \frac{B_0}{2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{\nu p} \cos \frac{\nu \pi x}{\tau} = \frac{B_0}{2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{\nu p} \cos \frac{2\nu p x}{D},$$

де  $B_{\nu p}$  - амплітуда гармонічної складової розподілу магнітної індукції з числом пар полюсів  $\nu p$ ;

$B_0$  - постійна (уніполярна) складова розподілу магнітної індукції;

$\nu = 1, 2, 3, \dots$  - порядок гармонічної складової;

$p$  - робоче число пар полюсів основної гармонічної складової, яке дорівнює числу зубців (пазів) індуктора.

Якщо, індуктор рухається відносно диска, з яким зв'язана система координат  $x_1$ , в напрямку відліку цієї координати зі швидкістю  $V$  на тому ж діаметрі  $D$ , то можна записати  $x_1 = x + Vt$ , відповідно  $x = x_1 - Vt$ .

Тоді розподіл індукції магнітного поля індуктора в системі координат, нерухомій відносно диска при швидкості  $V$ , набагато меншій від швидкості світла, запишеться

$$B(x) = B(x_1 - Vt) = \frac{B_0}{2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{\nu p} \cos \frac{2\nu p}{D} (x_1 - Vt).$$

В елементі провідника  $\Delta l$ , розміщеного перпендикулярно лініям магнітної індукції і напрямку її руху в точці  $x_1$ , наводиться електрорушійна сила

$$e(t) = B(x) \Delta l \cdot V = \frac{B_0 \cdot \Delta l \cdot V}{2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{\nu p} \Delta l V \cos \frac{2\nu p}{D} (x_1 - Vt) = \frac{B_0 \cdot \Delta l \cdot V}{2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{\nu p} \Delta l V \cos \left( \frac{2\nu p x_1}{D} - \frac{\nu p \pi n}{30} t \right) = \frac{B_0 \cdot \Delta l \cdot V}{2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{\nu p} \Delta l V \cos \left( \frac{2\nu p x_1}{D} - \omega_{\nu} t \right),$$

де враховано, що  $\frac{2\nu p}{D}V = \nu p \omega = \omega_\nu = \frac{\nu p \pi n}{30}$ , а  $\omega$  - кутова швидкість обертання індуктора.

Якщо розмістити в точках з координатами  $x_{11} = a; x_{12} = \pm \left( a + \frac{\pi D}{4p} \right); x_{13} = \pm \left( a + \frac{\pi D}{2p} \right);$

$x_{14} = \pm \left( a + \frac{3\pi D}{4p} \right)$  по два провідники та в  $x_{15} = \pm \left( a + \frac{\pi D}{p} \right)$  - по одному провіднику, то

в них будуть наводитись електрорушійні сили, які дорівнюють:

$$e = \frac{B_0 \Delta l V}{2} - \text{в провідниках для усіх точок};$$

$$e_{\nu p1} = B_{\nu p} \cdot \Delta l \cdot V \cdot \cos\left(\frac{2\nu p a}{D} - \nu p \omega t\right); \quad e_{\nu p2} = B_{\nu p} \cdot \Delta l \cdot V \cos\left(\frac{2\nu p a}{D} + \frac{\nu \pi}{2} - \nu p \omega t\right);$$

$$e_{\nu p3} = B_{\nu p} \cdot \Delta l \cdot V \cos\left(\frac{2\nu p a}{D} + \nu \pi - \nu p \omega t\right); \quad e_{\nu p4} = B_{\nu p} \cdot \Delta l \cdot V \cos\left(\frac{2\nu p a}{D} + \frac{3\nu \pi}{2} - \nu p \omega t\right);$$

$$e_{\nu p5} = B_{\nu p} \cdot \Delta l \cdot V \cos\left(\frac{2\nu p a}{D} + 2\nu \pi - \nu p \omega t\right) - \text{в провідниках для точок 1-5, відповідно.}$$

З наведеного видно, що для непарних гармонік  $\nu = (2n - 1), n = 1, 2, 3, \dots$  розподілу магнітної індукції електрорушійні сили в точках 1 і 5 співпадають по фазі, а в точках 3 знаходяться в протилежній фазі. Тому, якщо з'єднати провідники відповідно узгоджено в точках 1,5 та зустрічно їм в точках 3, то отримаємо електрорушійну силу пропорційну сумі непарних гармонік магнітної індукції

$$e'_{\nu p} = 2e'_{\nu p1} - 4e'_{\nu p3} + 2e'_{\nu p5} = 8 \sum_{\nu=2n-1}^{\infty} B_{\nu p} \cdot \Delta l \cdot V \cdot \cos\left(\frac{2\nu p a}{D} - \nu p \omega t\right)$$

Для парних гармонік  $\nu = 2(2n - 1)$  електрорушійні сили співпадають по фазі в точках 1,3,5, а в проти фазі з ними будуть електрорушійні сили в точках 2 і 4.

Тому, якщо з'єднати відповідно провідники в точках 1,3,5 узгоджено, а в точках 2,4 - зустрічно, то отримаємо електрорушійну силу, пропорційну сумі парних  $\nu = 2(2n - 1), n = 1, 2, 3, \dots$  гармонік розподілу магнітної індукції:

$$e''_{\nu p} = 2e''_{\nu p1} - 4e''_{\nu p2} + 4e''_{\nu p3} - 4e''_{\nu p4} + 2e''_{\nu p5} = 16 \sum_{\nu=2(2n-1)}^{\infty} B_{\nu p} \cdot \Delta l \nu \cos\left(\frac{2\nu p a}{D} - \nu p \omega t\right).$$

Для непарних гармонік розподілу магнітної індукції при другому з'єднанні:

$$2e'_{\nu p1} + 2e'_{\nu p5} + 4e'_{\nu p3} = 0$$

$$4e'_{\nu p2} + 4e'_{\nu p4} = 0, \text{ тобто, для другого з'єднання провідників електрорушійні сили}$$

від непарних гармонік магнітної індукції будуть відсутні. Електрорушійні сили від постійної складової розподілу магнітної індукції будуть відсутні при обох з'єднаннях провідників. Таким чином, за допомогою двох обмоток можна визначити наближений розподіл магнітної індукції, який враховує непарні гармоніки  $\nu = (2n - 1)$  і парні гармоніки  $\nu = 2(2n - 1)$  цього розподілу:  $\nu = 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, \dots$

При цьому не враховуються гармоніки порядку  $4(n-1); 8(2n-1); 16(2n-1), \dots$ , сума електрорушійних сил від цих гармонік для наведених з'єднань провідників дорівнює нулю. Щоб врахувати гармоніки чотирикратні, восьмикратні і т.д. непарним гармонікам необхідно розмістити додаткові провідники.

Вимірювальні витки розташовувались на нерухомому диску на трьох діаметрах активної зони (рис.1). Повітряний зазор між зубцем і диском становив 0,7 мм з кожної сторони. Після розміщення додаткових вимірювальних витків для врахування чотирикратних непарних гармонік магнітної індукції повітряний зазор зі сторони додаткових витків збільшено до 1,7 мм.

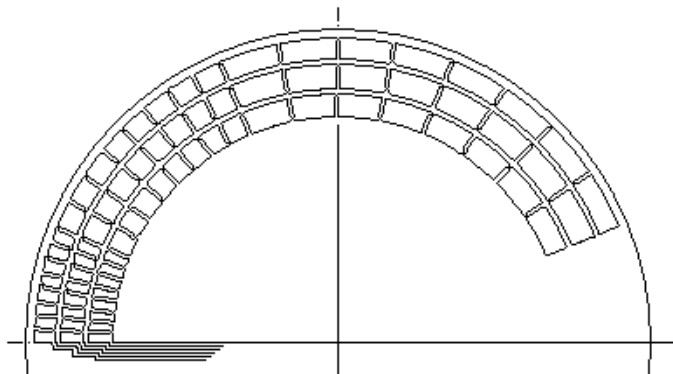
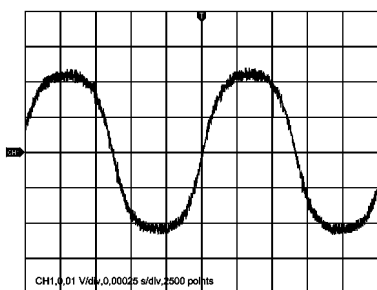
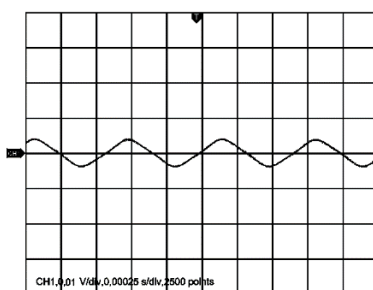


Рис.1. Схема розташування та з'єднання вимірювальних витків для врахування непарних, двократних та чотирикратних непарних гармонічних складових магнітної індукції

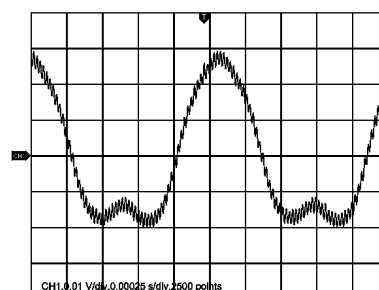
ЕРС вимірювальних витків записувались цифровим запам'ятовуючим осцилографом. Осцилограми електрорушійних сил вимірювальних витків, розміщених на найменшому діаметрі, наведені на рис. 2.



Осцилограма суми електрорушійних сил від непарних гармонік магнітної індукції.



Осцилограма суми електрорушійних сил від подвоєних непарних гармонік магнітної індукції



Осцилограма сум електрорушійних сил від непарних гармонік та подвоєних непарних гармонік магнітної індукції, приведених до однакового числа витків.

Рис. 2. Осцилограми електрорушійних сил вимірювальних витків, розміщених на найменшому діаметрі

Тривалість періоду на різних діаграмах дещо не співпадає за рахунок нестабільності швидкості обертання індуктора, тому сума електрорушійних сил першої і другої осцилограм дещо відрізняється від третьої осцилограми. Третя осцилограма відображає розподіл магнітної індукції в зазорі магнітопроводу без

врахування чотирикратних, восьмикратних і т.д. непарних гармонік магнітної індукції.

Таким чином, по результатах осцилографування електрорушійної сили вимірювальних витків на поверхні диску визначено розподіл гармонічних складових магнітної індукції.

### **Список літератури**

1. Циганкова Г. А. Експериментальне дослідження магнітного поля в дископодібному електродинамічному гальмі. Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2007. – №2(17). – С.112 - 116.

2. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолуб Ю.Ф., Курило І.А., Шеховцов В.І., Шидловська Н.А. Теоретичні основи електротехніки, т.3, Київ, 2013. 244 с.