

д.т.н. Луцик В. Д.,  
Полезін С. Ю.  
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

## ШЕСТИФАЗНІ ОБМОТКИ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

*Описані переваги шестифазних обмоток над звичайними трифазними обмотками асинхронних двигунів. Показано, що при правильному з'єднанні шестифазної обмотки п'ята та сьома гармоніки в кривій МРС, створюваній цією обмоткою, повністю відсутні. Надані рекомендації щодо перез'єднання трикутничкової обмотки при помилковому її розміщенні відносно обмотки, з'єднаної в зірку.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, шестифазна обмотка, вищі гармоніки, МРС, обмотковий коефіцієнт.

*Описаны преимущества шестифазных обмоток перед обычными трехфазными обмотками асинхронных двигателей. Показано, что при правильном соединении шестифазной обмотки пятая и седьмая гармоники в кривой МДС, создаваемой этой обмоткой, полностью отсутствуют. Выданы рекомендации по пересоединению обмотки треугольника при ошибочном её расположении относительно обмотки, соединенной в звезду.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, шестифазная обмотка, высшие гармоники, МДС, обмоточный коэффициент.

Шестифазні обмотки трифазних асинхронних двигунів мають на 3,5 % більший обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці та абсолютну відсутність в кривій МРС п'ятої та сьомої гармонік [1]. Коефіцієнт корисної дії збільшується, вібрації зменшуються на 36 % [2], що призводить до збільшення надійності роботи асинхронних двигунів з шестифазними обмотками. Спостерігається останнім часом активне впровадження шестифазних обмоток на таких заводах як «Донецький електротехнічний завод», «Луганський енергозавод», але при цьому були виявлені в деяких двигунах помилкове вмикання фаз шестифазних обмоток, що призводить не до покращення показників, а, навпаки, до погіршення порівняно з трифазними обмотками серійного виконання. Тому розгляд всіх можливих схем вмикання фаз шестифазних обмоток має важливе практичне значення.

При правильному з'єднанні фаз шестифазної обмотки коефіцієнт розподілу обмотки по основній гармоніці обчислюється по формулі, аналогічній для трифазних обмоток, тільки при вирахованні числа па-

зів на полюс і фазу  $q$  замість числа фаз  $m=3$  потрібно підставляти  $m=6$  [2]. Але знаходження коефіцієнтів розподілу по вищим гармонікам з допомогою цих формул дає неправильні результати. При неправильному з'єднанні фаз коефіцієнт розподілу по основній гармоніці також неможливо вирахувати.

Щоб вирахувати обмоткові коефіцієнти і визначити правильність з'єднання фаз, потрібно розкласти в ряд Фур'є МРС кожної котушки з послідовним складанням відповідних гармонік всіх шести фаз.

Розгляд почнемо з трифазної двопольної обмотки, виконаної в 12-ти пазах ( $z=12$ ,  $2p=2$ ) з діаметральним кроком  $y=6$  (рисунком 1а). Обмотка складається з котушок 1 і 2 фази А, котушок 3, 4 фази В і котушок 5, 6 фази С.

Використовуючи розклад в ряд Фур'є для прямокутної форми кривої МРС окремої котушки:

$$F_{kv} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \pi v (T_0/T)}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x, (1)$$

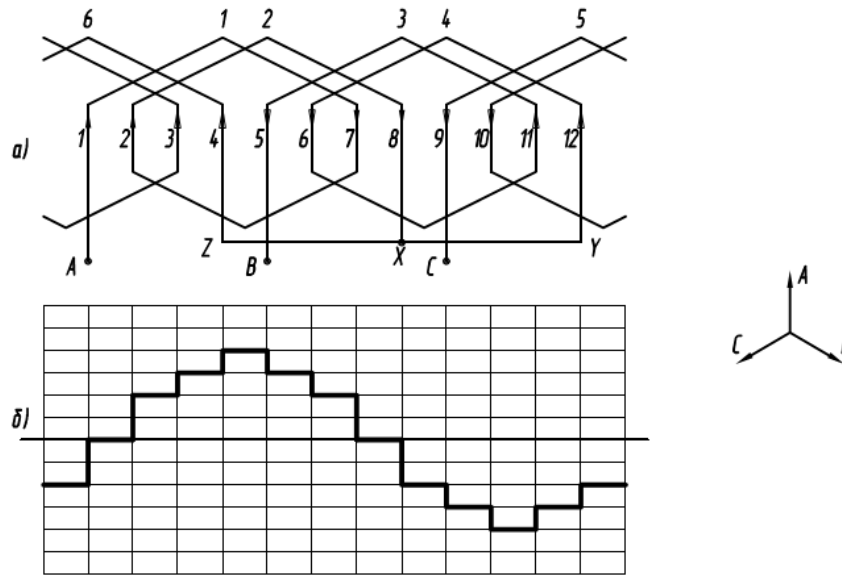


Рисунок 1 – Трифазна обмотка ( $z=12, 2p=2$ )

де  $T_0$  – крок котушки;  
 $T$  – просторова координата, дорівнює подвійному полюсному діленню;  
 $v$  – порядок гармоніки;  
 $x$  – змінна просторова координата;  
та вибравши початок координат по вісі котушки 1 фази А, а також враховуючи просторовий зсув котушок 3 і 5 відповідно на кут  $120^\circ$  та  $240^\circ$ , одержимо значення МРС котушок 1, 3, 5:

$$F_{A1} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x,$$

$$F_{B3} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v (\frac{2\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3}), \quad (2)$$

$$F_{C5} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v (\frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3}).$$

Для визначення результуючої МРС кожної гармоніки потрібно скласти відповідні гармоніки всіх трьох котушок.

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_1 = \frac{1}{\pi} I_m w \left[ \begin{aligned} &\sin(\omega t + \frac{2\pi}{T} x) + \\ &+ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x) + \\ &+ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3}) + \\ &+ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x) + \\ &+ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{8\pi}{3}) + \\ &+ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x) \end{aligned} \right] = \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x). \quad (3)$$

Лівобігучі МРС, як зміщені одна відносно іншої на кут  $120^\circ$ , взаємно знищуються.

Для п'ятої гармоніки:

$$F_5 = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x). \quad (4)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_7 = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x). \quad (5)$$

МРС котушок 2, 4, 6, оскільки ці котушки живляться тим же струмом, що і ко-

тушки 1, 3, 5, і зсунуті в просторі на кут 30°:

$$F_{A2} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left( \frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6} \right),$$

$$F_{B4} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left( \frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6} \right), \quad (6)$$

$$F_{C6} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left( \frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6} \right).$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_1' = \frac{1}{\pi} I_m w \left[ \begin{array}{l} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{T} x + \frac{\pi}{6} \right) + \\ + \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{T} x + \frac{\pi}{6} \right) + \\ + \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{T} x + \frac{\pi}{6} \right) \end{array} \right] = \frac{3}{\pi} I_m w \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{T} x + \frac{\pi}{6} \right). \quad (7)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$F_5' = \frac{1}{5\pi} I_m w \left[ \begin{array}{l} \sin \left( \omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6} \right) + \\ + \sin \left( \omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{29\pi}{6} \right) + \\ + \sin \left( \omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{53\pi}{6} \right) \end{array} \right] = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin \left( \omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6} \right). \quad (8)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_7' = -\frac{1}{7\pi} I_m w \left[ \begin{array}{l} \sin \left( \omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{7\pi}{6} \right) + \\ + \sin \left( \omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{31\pi}{6} \right) + \\ + \sin \left( \omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{55\pi}{6} \right) \end{array} \right] = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin \left( \omega t - \frac{14\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6} \right). \quad (9)$$

Як видно із формул (3) і (7), МРС для першої гармоніки, створена котушками 2, 4, 6, зсунута в просторі відносно МРС котушок 1, 3, 5 на кут 30° (рисунок 2).

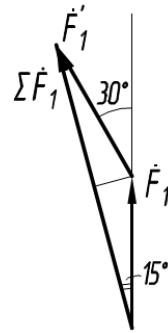


Рисунок 2 – Векторна діаграма МРС

Результуюча МРС  $\Sigma F_1$  дорівнює:

$$\Sigma F_1 = 2F_1 \cos 15^\circ. \quad (10)$$

Коефіцієнт розподілу по першій гармоніці:

$$k_{p1} = \frac{\Sigma F_1}{2F_1} = \cos 15^\circ = 0,9659, \quad (11)$$

що співпадає з результатами, одержаними по відомій формулі:

$$k_{p1} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{0,5}{2 \sin 15^\circ} = 0,9659, \quad (12)$$

$$\text{де } q = \frac{z}{2pm} = \frac{12}{2 \cdot 3} = 2, \quad \alpha = \frac{360^\circ \cdot p}{z} = 30^\circ.$$

МРС для п'ятої і сьомої гармонік, створені котушками 2, 4, 6, зсунуті в просторі відносно МРС котушок 1, 3, 5 на кут -150° (формули 4 і 8, 5 і 9), рисунок 3.

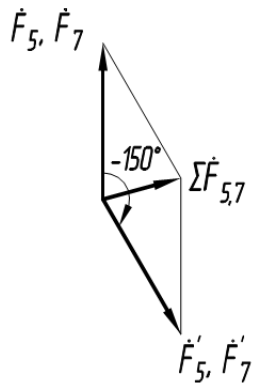


Рисунок 3 – Векторна діаграма МРС

Результуюча МРС  $\Sigma F_{5,7}$  дорівнює:

$$\Sigma F_{5,7} = 2F_5 \sin 15^\circ. \quad (13)$$

Коефіцієнт розподілу по п'ятій та сьомій гармонікам:

$$k_{p5,7} = \frac{\Sigma F_{5,7}}{2F_5} = \sin 15^\circ = 0,2588. \quad (14)$$

По відомим формулам:

$$k_{p5} = \frac{\sin qv \frac{\alpha}{2}}{q \sin v \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 2 \cdot 5 \cdot \frac{30^\circ}{2}}{2 \sin 5 \cdot \frac{30^\circ}{2}} = \frac{\sin 150^\circ}{2 \sin 75^\circ} = 0,2588, \quad (15)$$

$$k_{p7} = \frac{\sin qv \frac{\alpha}{2}}{q \sin v \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 2 \cdot 7 \cdot \frac{30^\circ}{2}}{2 \sin 7 \cdot \frac{30^\circ}{2}} = \frac{\sin 210^\circ}{2 \sin 105^\circ} = -0,2588. \quad (16)$$

На рисунку 1б показаний графік МРС трифазної обмотки для миті часу, коли МРС фази А максимальна. Поряд показані вектори МРС всіх фаз.

На рисунку 4а приведена схема шести-фазної двополюсної обмотки, виконаної в 12-ти пазах ( $z=12, 2p=2$ ) з діаметральним кроком  $y=6$ .

Число пазів на полюс і фазу кожної окремої трифазної обмотки  $q=1$ , тому кожна фаза складається з одної котушки. Поряд показана принципова електрична схема, дві трифазні обмотки включені паралельно, а також вектори МРС всіх фаз для миті часу, коли МРС фази А обмотки, з'єднаної в зірку, максимальна.

Фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника.

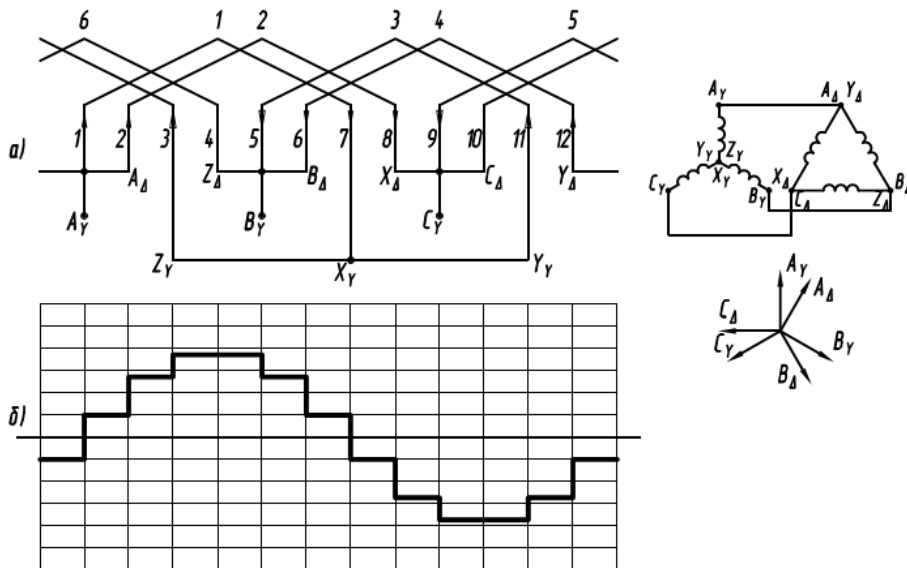


Рисунок 4 – Шестифазна обмотка ( $z=12, 2p=2$ )

Оскільки котушки 1, 3, 5, що з'єднані в зірку, знаходяться в тих же пазах, що і котушки 1, 3, 5 трифазної обмотки на рисунку 1а, і обтікаються тими ж струмами, то відповідно МРС першої, п'ятої і сьомої гармонік будуть такими ж, як і МРС котушок 1, 3, 5 трифазної обмотки:

$$\begin{aligned} F_{1Y} &= \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x), \\ F_{5Y} &= \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x), \\ F_{7Y} &= -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x). \end{aligned} \quad (17)$$

МРС котушок 2, 4, 6, що з'єднані в трикутник:

$$\begin{aligned} F_{A\Delta} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \times \\ &\times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6}), \\ F_{B\Delta} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{5\pi}{6}) \times \\ &\times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6}), \\ F_{C\Delta} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{9\pi}{6}) \times \\ &\times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6}). \end{aligned} \quad (18)$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1\Delta} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x). \quad (19)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$\begin{aligned} F_{5\Delta} &= \frac{1}{5\pi} I_m w \left[ \begin{aligned} &\sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi) + \\ &+ \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - 5\pi) + \\ &+ \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - 9\pi) \end{aligned} \right] = \\ &= \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi). \end{aligned} \quad (20)$$

Для сьомої гармоніки:

$$\begin{aligned} F_{7\Delta} &= -\frac{1}{7\pi} I_m w \left[ \begin{aligned} &\sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi) + \\ &+ \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + 5\pi) + \\ &+ \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + 9\pi) \end{aligned} \right] = \\ &= -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi). \end{aligned} \quad (21)$$

Складуючи відповідні гармоніки двох трифазних обмоток, одержуємо для першої гармоніки:

$$\sum F_{1Y,\Delta} = \frac{6}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x). \quad (22)$$

Для п'ятої і сьомої гармонік:

$$\sum F_{5Y,\Delta} = \frac{6}{5\pi} I_m w \left[ \begin{aligned} &\sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x) + \\ &+ \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi) \end{aligned} \right] = 0, \quad (23)$$

$$\sum F_{7Y,\Delta} = -\frac{6}{7\pi} I_m w \left[ \begin{aligned} &\sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x) + \\ &+ \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi) \end{aligned} \right] = 0. \quad (24)$$

Як бачимо, в кривій МРС, створеній шестифазною обмоткою, відсутні п'ята і сьома гармоніки, що є ще однією дуже важливою перевагою цієї обмотки перед звичайною трифазною обмоткою. Обмотковий коефіцієнт обмотки на рисунку 4а по основній гармоніці  $k_{об,1}=1$ . Обмотковий коефіцієнт трифазної дво полюсної обмотки з діаметральним кроком і числом пазів  $z=12$   $k_{об,1}=0,966$ .

Графік МРС шестифазної обмотки на рисунку 4а для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рисунку 4б.

Спостерігається при виконанні шести-фазних обмоток неправильне розміщення початків фаз трикуткової обмотки відносно початків фаз обмотки, з'єднаної в зірку. Така схема показана на рисунку 5а.

Для котушок 1, 3, 5, що з'єднані в зірку, МРС першої, п'ятої і сьомої гармонік:

$$\begin{aligned}
 F_{1Y} &= \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x), \\
 F_{5Y} &= \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x), \\
 F_{7Y} &= -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x).
 \end{aligned}
 \quad (25)$$

МРС котушок 2, 4, 6, з'єднаних в трикутник:

$$\begin{aligned}
 F_{A6} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \times \\
 &\times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x + \frac{\pi}{6}), \\
 F_{B2} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{5\pi}{6}) \times \\
 &\times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{3\pi}{6}), \\
 F_{C4} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{9\pi}{6}) \times \\
 &\times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{7\pi}{6}).
 \end{aligned}
 \quad (26)$$

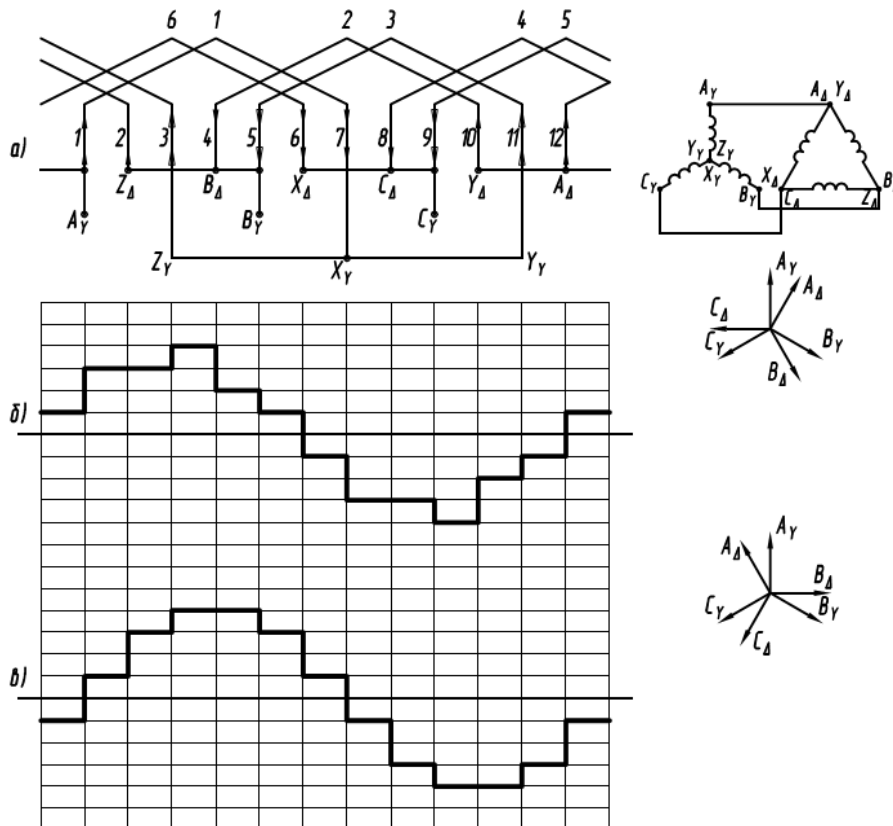


Рисунок 5 – Шестифазна обмотка ( $z=12, 2p=2$ )

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1\Delta} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{3}). \quad (27)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5\Delta} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x + \frac{2\pi}{3}). \quad (28)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7\Delta} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{2\pi}{3}). \quad (29)$$

Тобто 5-а і 7-а гармоніки не зникають, як це має місце в обмотці на рисунку 4а. П'яті гармоніки МРС, створювані двома трифазними обмотками на рисунку 5а, як і сьомі гармоніки, направлені одна відносно іншої під кутом  $120^\circ$ . Коефіцієнт розподілу по п'ятій та сьомій гармонікам  $k_{p5, 7}=0,5$  (рисунок 6).

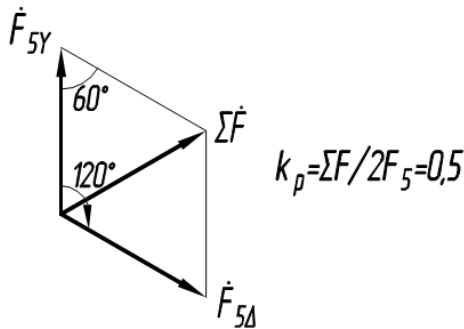


Рисунок 6 – Векторна діаграма МРС

Графік МРС шестифазної обмотки по рисунку 5а для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рисунку 5б. Поряд з рисунком 5 розміщена принципова електрична схема, а також вектори МРС всіх фаз для миті часу, коли МРС фази А обмотки, з'єднаної в зірку, максимальна. Графік відрізняється від синусоїдної форми, що свідчить про наявність вищих гармонік. Площа, охопчена графіком МРС і лінією симетрії, на 13,4 % менша порівняно з графіком МРС по рисунку 4б.

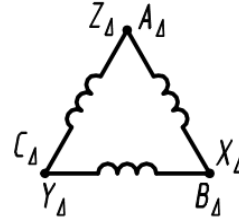


Рисунок 7 – Правильне з'єднання фаз обмотки трикутника

Проте, якщо фази трикуткової обмотки перез'єднати так, як це показано на рисунку 7, МРС котушок 2, 4, 6, з'єднаних в трикутник:

$$F_{A6} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x + \frac{\pi}{6}),$$

$$F_{B2} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{3\pi}{6}) \times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{3\pi}{6}), \quad (30)$$

$$F_{C4} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{7\pi}{6}) \times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{7\pi}{6}).$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1\Delta} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x). \quad (31)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5\Delta} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x). \quad (32)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7\Delta} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x). \quad (33)$$

В такому випадку обмотка набуває всіх позитивних властивостей шестифазної обмотки.

Отже, переваги шестифазних обмоток над звичайними трифазними обмотками асинхронних двигунів вже очевидні: шестифазні обмотки мають на 3,5 % більший обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці, при правильному з'єднанні завдяки шестифазності повністю ліквідуються найбільш шкідливі п'ята та сьома гармоніки, тим самим зменшуючи додаткові втра-

ти, шум, вібрації, усуваючи провали в кривій електромагнітного моменту і збільшуючи пусковий момент. А при розповсюдженому помилковому розміщенні початків фаз обмотки, з'єднаної в трикутник, відносно початків фаз обмотки, з'єднаної в зірку, достатньо лише перез'єднання фаз трикутничкової обмотки.

#### **Бібліографічний список**

1. Луцик В. Д. Шестифазна обмотка асинхронних двигунів / В. Д. Луцик // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 2. – С. 42–44.
2. Луцик В. Д. Електромагнітний розрахунок трифазних асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою / В. Д. Луцик, В. В. Кирьянов, С. Ю. Полезін // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2013. – № 1. – С. 35-37.

*Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Заблодським М.М.*