

ШЕСТИФАЗНА ОБМОТКА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Описана шестифазна обмотка, яка складається з двох трифазних обмоток: одна обмотка з'єднана зіркою, інша – трикутником. Показано, що фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, повинні бути зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника.

Описана шестифазная обмотка, которая состоит из двух трехфазных обмоток: одна обмотка соединена звездой, вторая – треугольником. Показано, что фазные токи в обмотке, соединенной треугольником, должны быть сдвинуты по фазе в ту же сторону, в которую пространственно сдвинута обмотка треугольника.

Асинхронні двигуни складають 90 % всіх електро-двигунів та споживають більше половини всієї електроенергії. Тому навіть незначне покращення асинхронних двигунів може мати значний економічний ефект.

В [1] розглянута обмотка шестифазного струму, яка є поєднанням на загальному магнітопроводі двох однакових обмоток трифазного струму. Ці обмотки відрізняються від звичайних тільки тим, що на кожному полюсному діленні кожна фаза займає не 1/3, а тільки 1/6 загального об'єму пазів, тобто обмотки є більш зосередженими; в результаті коефіцієнти розподілу цих обмоток для основної гармоніки надзвичайно високі, що є немаловажним достоїнством. Дві такі обмотки зміщені взаємно на 1/6 полюсного ділення, а струми в них повинні бути зсунуті по фазі на 1/12 періоду.

Суттєвим недоліком шестифазної обмотки є необхідність в джерелі електричної енергії шестифазного струму і в шестипровідній лінії електропередачі.

Якщо фази однієї із трифазних обмоток ввімкнуті зіркою, а фази другої обмотки з'єднані в трикутник, то струми в цих обмотках будуть зсунуті по фазі на 1/12 періоду, як це було запропоновано в [2], тобто тим самим ліквідується основний недолік шестифазної обмотки. Звичайно, число витків фаз, що з'єднуються в трикутник, потрібно виконувати в $\sqrt{3}$ раз більшим, а поперечний переріз міді в $\sqrt{3}$ раз меншим порівняно з фазами, що з'єднуються в зірку.

Однак в [2] була допущена суттєва помилка, що нівелювала цю цікаву пропозицію. Вирішальне значення має правильне розміщення однієї трифазної обмотки відносно іншої. Фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, повинні бути зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника.

На рис. 1,а приведена схема шестифазної двополюсної обмотки, виконаної на $Z = 12$ паззах.

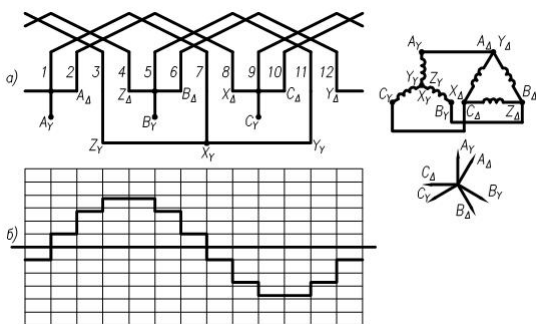


Рис. 1. Шестифазна обмотка

Число пазів на полюс і фазу кожної окремої трифазної обмотки $q = 1$, тому кожна фаза складається з однієї 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.

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

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

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 фази А, з'єднаної в зірку, а також враховуючи просторовий зсув фаз В і С відповідно на кут 120° та 240° , одержимо значення МРС фазних обмоток, з'єднаних в зірку:

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

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

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

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

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1Y} = \frac{1}{\pi} I_m w \left[\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) + \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) + \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{8\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) \right] = \frac{3}{\pi} I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) \quad (3)$$

Лівобігучі МРС, як зміщені одна відносно іншої на кут 120° , взаємно знищуються.

Для п'ятої гармоніки:

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

Для сьомої гармоніки:

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

МРС фазних обмоток, з'єднаних в трикутник:

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

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

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

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1\Delta} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right) \quad (7)$$

Для п'ятої гармоніки:

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

$$= \frac{3}{5\pi} I_m w \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi\right). \quad (8)$$

Для сьомої гармоніки:

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

$$= -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi\right). \quad (9)$$

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

$$\sum F_{1Y,\Delta} = \frac{6}{\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right). \quad (10)$$

Для п'ятої і сьомої гармонік:

$$\sum F_{5Y,\Delta} = \frac{6}{5\pi} I_m w \left[\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi\right) \right] = 0 \quad (11)$$

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

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 рис. 1,а по основній гармоніці $k_{об.1} = 1$. Обмотковий коефіцієнт трифазної двополюсної обмотки з діаметральним кроком і числом пазів $Z = 12 \cdot k_{об.1} = 0,966$.

Графік МРС шестифазної обмотки на рис. 1,а для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 1,б.

Зовсім інша картина спостерігається, якщо струм в обмотці, з'єднаній трикутником, буде зсунутий по фазі в протилежному напрямі (рис. 2,а).

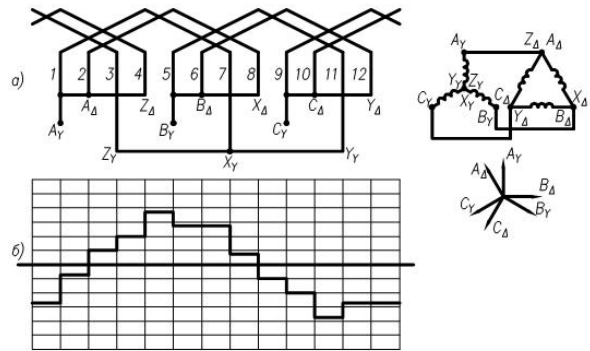


Рис. 2. Шестифазна обмотка

МРС фазних обмоток, з'єднаних в трикутник, для цього випадку:

$$F'_{A\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v\left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6}\right),$$

$$F'_{B\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v\left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6}\right), \quad (12)$$

$$F'_{C\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v\left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6}\right).$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F'_{1\Delta} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x + \frac{\pi}{3}\right). \quad (13)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$F'_{5\Delta} = \frac{1}{5\pi} I_m w \left[\begin{aligned} &\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ &\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{14\pi}{3}\right) + \\ &\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{26\pi}{3}\right) \end{aligned} \right] =$$

$$= \frac{3}{5\pi} I_m w \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (14)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F'_{7\Delta} = -\frac{1}{7\pi} I_m w \left[\begin{aligned} &\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{4\pi}{3}\right) + \\ &\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{16\pi}{3}\right) + \\ &\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{28\pi}{3}\right) \end{aligned} \right] =$$

$$= -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{4\pi}{3}\right). \quad (15)$$

Складуючи перші гармоніки МРС обмотки, з'єднаної в зірку, і обмотки, яка з'єднана в трикутник згідно з рис. 2,а, одержуємо:

$$\sum F'_{1Y,\Delta} = \frac{3}{5} I_m w \left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right) + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x + \frac{\pi}{3}\right) \right] \quad (16)$$

Із формули (16) видно, що МРС двох трифазних обмоток, зображених на рис. 2,а, направлені під кутом 60° ; сумарна МРС обмотки на рис. 2,а зменшується порівняно з сумарною МРС обмотки на рис. 1,а (формула (10)) на 13,4 %. Тобто з'являється обмотковий коефіцієнт по першій гармоніці, який дорівнює $k_{об.1} = \cos 30^\circ = 0,866$.

Відповідно п'ята і сьома гармоніки МРС обмотки на рис. 2,а

$$\begin{aligned} \sum F'_{5Y,\Delta} &= \frac{3}{5\pi} I_m w \times \\ &\times \left[\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3}\right) \right], \\ \sum F'_{7Y,\Delta} &= -\frac{3}{7\pi} I_m w \times \\ &\times \left[\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x\right) + \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{4\pi}{3}\right) \right], \end{aligned} \quad (17)$$

тобто 5-а і 7-а гармоніки не зникають, як це має місце в обмотці на рис. 1,а. П'яті гармоніки МРС, створювані двома трифазними обмотками на рис. 2,а, як і сьомі гармоніки, направлені одна відносно іншої під кутом 120° . Порівняно із серійною трифазною обмоткою обмоткові коефіцієнти 5-ої і 7-ої гармонік зменшуються лише наполовину.

Графік МРС шестифазної обмотки по рис. 2,а для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 2,б. Поряд з рис. 2 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, охоплена графіком МРС і лінією симетрії, на 13,4 % менша порівняно з графіком МРС по рис. 1,б.

ВИСНОВКИ

Шестифазна обмотка, представлена на рис. 1,а, збільшує обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці на 3,4 % та повністю ліквідує найбільш шкідливі в електричних машинах п'яту і сьому гармоніку, тим самим зменшуючи додаткові втрати, шум, вібрації, усуваючи провали в кривій електромагнітного моменту і збільшуючи пусковий момент. Ці висновки підтверджуються порівняльними випробуваннями двох кранових двигунів МТФ 311/6 серійного виконання і двох двигунів МТФ 311/6 з шестифазною обмоткою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1989. – 400 с.
2. А.с. № 79623 СССР, М. кл. 3/28. Трехфазный генератор. М.В. Липковский. Бюл. изобретений № 18, 1965.

Bibliography (transliterated): 1. Zherve G.K. Obmotki `elektricheskikh mashin. - L.: `Energoatomizdat. Lenigr. otd., 1989. - 400 s. 2. A.s. № 79623 SSSR, M. kl. 3/28. Trehfaznyj generator. M.V. Lipkovskij. Byul. izobretenij № 18, 1965.

Поступила 12.09.2011

Луцик В'ячеслав Данилович, д.т.н., проф.
Донбаський державний технічний університет
кафедра електричних машин та апаратів
94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16
тел.: (06442) 2-31-23, e-mail: info@dgmi.edu.ua

Luschik V.D.

A six-phase winding of induction motors.

A six-phase winding which consists of two three-phase windings, one of star connection and the other of delta connection, is described. It is shown that phase currents in the delta-connected coil must be phase-shifted in the direction in which the delta winding is spatially shifted.

Key words – induction motor, six-phase winding, star connection, delta connection, phase currents.