

УДК 621.313.3

**ПЕРЕВАГИ ШЕСТИФАЗНИХ ОБМОТОК ДЛЯ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ****В. Д. Лущик, С. Ю. Полезін**

Донбаський державний технічний університет

пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, 94204, Україна. E-mail: v.d.luschik@yandex.ua; news4xander@mail.ru

Описані переваги шестифазних обмоток над звичайними трифазними обмотками асинхронних двигунів. Показано, що при правильному з'єднанні шестифазні обмотки мають на 3,5 % більший обмотковий коефіцієнт за основною гармонікою; п'ята та сьома гармоніки в кривій магніторушійної сили, що створюється цією обмоткою, повністю відсутні. Завдяки шестифазним обмоткам зменшуються додаткові втрати, шум, вібрації, усуваються провали в кривій електромагнітного моменту і збільшується пусковий момент, підвищується надійність обмотки. Надані рекомендації щодо перез'єднання трикуткової обмотки при помилковому її розміщенні відносно обмотки, з'єднаної в зірку. Розглянуто можливість реверсу в асинхронних двигунах із шестифазними обмотками. Показано, що при реверсі позитивні властивості шестифазної обмотки зберігаються.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, шестифазна обмотка, обмотковий коефіцієнт, магніторушійна сила, вищі гармоніки, реверс.

**ПРЕИМУЩЕСТВА ШЕСТИФАЗНЫХ ОБМОТОК  
ДЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ****В. Д. Лущик, С. Ю. Полезин**

Донбасский государственный технический университет

пр. Ленина, 16, г. Алчевск, 94204, Украина. E-mail: v.d.luschik@yandex.ua; news4xander@mail.ru

Описаны преимущества шестифазных обмоток перед обычными трехфазными обмотками асинхронных двигателей. Показано, что при правильном соединении шестифазные обмотки имеют на 3,5 % больший обмоточный коэффициент по основной гармонике, пятая и седьмая гармоники в кривой магнитодвижущей силы, создаваемой этой обмоткой, полностью отсутствуют. Благодаря шестифазным обмоткам снижаются добавочные потери, шум, вибрации, устраняются провалы в кривой электромагнитного момента и увеличивается пусковой момент, повышается надёжность обмотки. Выданы рекомендации по пересоединению обмотки треугольника при ошибочном её расположении относительно обмотки, соединенной в звезду. Рассмотрена возможность реверса в асинхронных двигателях с шестифазными обмотками. Показано, что при реверсе позитивные свойства шестифазной обмотки сохраняются.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, шестифазная обмотка, обмоточный коэффициент, магнитодвижущая сила, высшие гармоники, реверс.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Шестифазні обмотки трифазних асинхронних двигунів є поєднанням на загальному магнітопроводі двох обмоток трифазного струму. Одна обмотка ввімкнена зіркою, інша обмотка вмикається трикутником. Ці обмотки повинні бути зміщені взаємно на 1/6 полюсного ділення, а струми в них повинні бути зсунуті на 1/12 періоду, причому фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, повинні бути зсунуті по фазі в той же бік, в який просторово зсунута обмотка трикутника. Шестифазні обмотки мають на 3,5 % більший обмотковий коефіцієнт за основною гармонікою порівняно з трифазними обмотками та абсолютну відсутність в кривій магніторушійної сили (МРС) п'ятої та сьомої гармонік [1]. Коефіцієнт корисної дії збільшується, вібрації зменшуються на 30 % [2], що призводить до підвищення надійності роботи асинхронних двигунів з шестифазними обмотками.

Мета роботи – встановлення переваг шестифазних обмоток для трифазних асинхронних двигунів.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Останнім часом спостерігається активне впровадження шестифазних обмоток, 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 вико-

нання. Тому розгляд усіх можливих схем вмикання фаз шестифазних обмоток має важливе практичне значення.

При правильному з'єднанні фаз шестифазної обмотки коефіцієнт розподілу обмотки за основною гармонікою обчислюється за формулою, що аналогічна для трифазних обмоток, тільки при вирахованні числа пазів на полюс і фазу  $q$  замість числа фаз  $m=3$  необхідно підставляти  $m=6$  [2]. Але знаходження коефіцієнтів розподілу по вищим гармонікам за допомогою цих формул дає неправильні результати. При неправильному з'єднанні фаз коефіцієнт розподілу за основною гармонікою також неможливо вирахувати.

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

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

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

$$F_{ku} = \sum_{n=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin p_n(T_0/T)}{p_n} \cos n \frac{2p}{T} x, \quad (1)$$

де  $T_0$  – крок котушки;  $T$  – просторова координата, дорівнює подвійному полюсному діленню;  $\nu$  – 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:

$$F_{A1} = \sum_{n=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \frac{p}{2} n}{pn} \cos n \left( \frac{2p}{T} x \right),$$

$$F_{B3} = \sum_{n=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left( \omega t - \frac{2p}{3} \right) \times \frac{\sin \frac{p}{2} n}{pn} \cos n \left( \frac{2p}{T} x - \frac{2p}{3} \right),$$

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

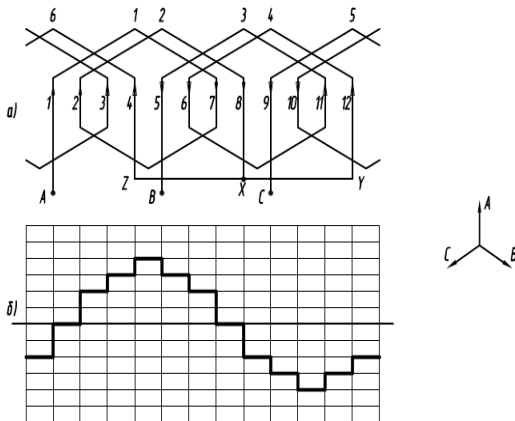


Рисунок 1 – Трифазна обмотка ( $z=12, 2p=2$ )

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

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_1 = \frac{3}{p} I_m w \sin \left( \omega t - \frac{2p}{T} x \right). \quad (3)$$

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

Для п'ятої та сьомої гармонік:

$$F_5 = \frac{3}{5p} I_m w \sin \left( \omega t + \frac{10p}{T} x \right), \quad (4)$$

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

МРС котушок 2, 4, 6, оскільки ці котушки живляться тим же струмом, що і котушки 1, 3, 5, і зсунуті в просторі на кут  $30^\circ$ :

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

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

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

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F'_1 = \frac{3}{p} I_m w \sin \left( \omega t - \frac{2p}{T} x + \frac{p}{6} \right). \quad (7)$$

Для п'ятої та сьомої гармонік:

$$F'_5 = \frac{3}{5p} I_m w \sin \left( \omega t + \frac{10p}{T} x - \frac{5p}{6} \right), \quad (8)$$

$$F'_7 = -\frac{3}{7p} I_m w \sin \left( \omega t - \frac{14p}{T} x - \frac{5p}{6} \right). \quad (9)$$

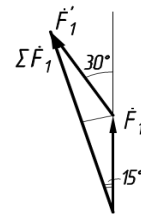


Рисунок 2 – Векторна діаграма МРС

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  $30^\circ$  (рис. 2).

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:

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

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

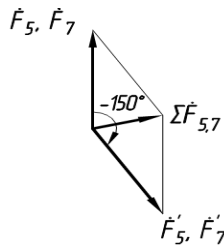


Рисунок 3 – Векторна діаграма МРС

МРС для п'ятої та сьомої гармонік, створені котушками 2, 4, 6, зсунуті в просторі відносно МРС котушок 1, 3, 5 на кут  $-150^\circ$  – формули (4) і (8), (5) і (9) (рис. 3).

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:

$$k_{p5} = \frac{\sin qn \frac{\delta}{2}}{q \sin n \frac{\delta}{2}} = \frac{\sin 2 \cdot 5 \cdot \frac{30^\circ}{2}}{2 \sin 5 \cdot \frac{30^\circ}{2}} = 0,2588; \quad (15)$$

$$k_{p7} = \frac{\sin qn \frac{\delta}{2}}{q \sin n \frac{\delta}{2}} = \frac{\sin 2 \cdot 7 \cdot \frac{30^\circ}{2}}{2 \sin 7 \cdot \frac{30^\circ}{2}} = -0,2588. \quad (16)$$

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

На рис. 4,а приведена схема шестифазної дво-полюсної обмотки, виконаної в 12-ти пазах ( $z = 12, 2p = 2$ ) із діаметральним кроком  $y = 6$ .

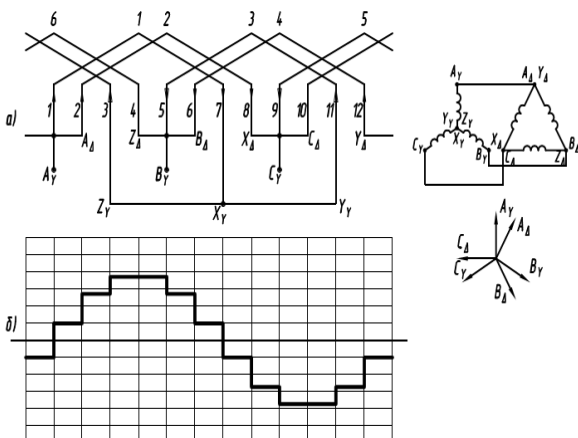


Рисунок 4 – Шестифазна обмотка ( $z=12, 2p=2$ )

Число пазів на полюс і фаза 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 усіх фаз для миті часу,

коли МРС фази А обмотки, з'єднаної в зірку, максимальна.

Фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, зсунуті по фазі у той же бік, в який просторово зсунута обмотка трикутника.

Оскільки котушки 1, 3, 5, що з'єднані в зірку, знаходяться в тих же пазах, що і котушки 1, 3, 5 трифазної обмотки на рис. 1,а, 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:

$$F_{1Y} = \frac{3}{p} I_m w \sin(\omega t - \frac{2p}{T} x),$$

$$F_{5Y} = \frac{3}{5p} I_m w \sin(\omega t + \frac{10p}{T} x), \quad (17)$$

$$F_{7Y} = -\frac{3}{7p} I_m w \sin(\omega t - \frac{14p}{T} x).$$

Складуючи МРС котушок, що з'єднані в трикутник, для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1D} = \frac{3}{p} I_m w \sin(\omega t - \frac{2p}{T} x). \quad (18)$$

Для п'ятої та сьомої гармонік:

$$F_{5D} = \frac{3}{5p} I_m w \sin(\omega t + \frac{10p}{T} x - p), \quad (19)$$

$$F_{7D} = -\frac{3}{7p} I_m w \sin(\omega t - \frac{14p}{T} x + p). \quad (20)$$

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

$$\Sigma F_{1Y,D} = \frac{6}{p} I_m w \sin(\omega t - \frac{2p}{T} x), \quad (21)$$

Для п'ятої та сьомої гармонік –

$$\Sigma F_{5Y,D} = 0; \quad \Sigma F_{7Y,D} = 0. \quad (22)$$

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

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

Спостерігається при виконанні шестифазних обмоток неправильне розміщення початків фаз трикуткової обмотки відносно початків фаз обмотки, з'єднаної в зірку. Така помилкова схема показана на рис. 5,а.

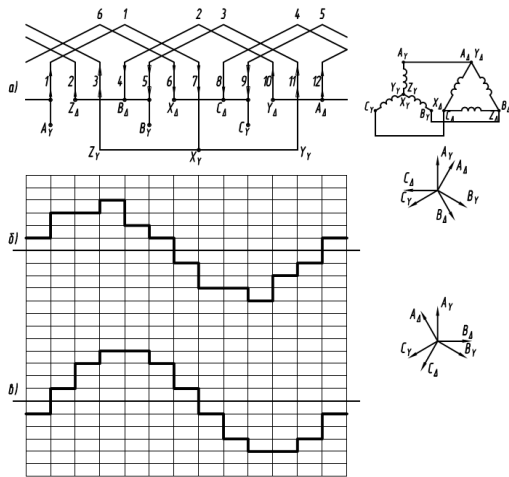


Рисунок 5 – Шестифазна обмотка ( $z=12, 2p=2$ )

Складуючи МРС котушок трикутника, для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1Д} = \frac{3}{p} I_m w \sin(\omega t - \frac{2p}{T} x - \frac{p}{3}). \quad (23)$$

Для п'ятої та сьомої гармонік:

$$F_{5Д} = \frac{3}{5p} I_m w \sin(\omega t + \frac{10p}{T} x + \frac{2p}{3}), \quad (24)$$

$$F_{7Д} = -\frac{3}{7p} I_m w \sin(\omega t - \frac{14p}{T} x + \frac{2p}{3}), \quad (25)$$

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

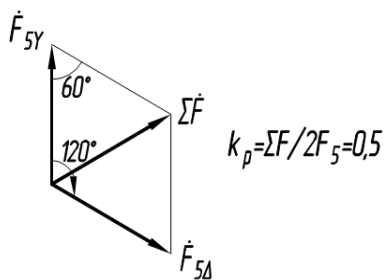


Рисунок 6 – Векторна діаграма МРС

Графік МРС шестифазної обмотки (рис. 5,а) для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 5,б.

Поряд із рис. 5 розміщена принципова електрична схема, а також вектори МРС усіх 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 (рис. 4,б).

Проте, якщо фази трикуткової обмотки перез'єднати так, як це показано на рис. 7, обмотка

набуває всіх позитивних властивостей шестифазної обмотки.

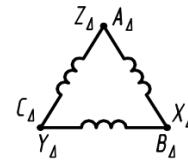


Рисунок 7 – Правильне з'єднання фаз обмотки трикутника

Деякі двигуни повинні мати можливість бути реверсивними, тобто мати можливість зміни напрямку обертання ротора. Відносно асинхронних двигунів із шестифазними обмотками це питання слід розглянути окремо, тому що, наприклад, зсув фазних струмів трикуткової обмотки по фазі в протилежному напрямі, в якому просторово зсунута обмотка трикутника, призведе до зменшення обмоткового коефіцієнта по основній гармоніці на 13,4 %, появлення в кривій МРС п'ятої та сьомої гармонік.

На рис. 8,а приведена схема шестифазної двополусної обмотки, виконаної на  $z=12$  пазах, в якій фазні струми обмотки, з'єднаної трикутником, зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника.

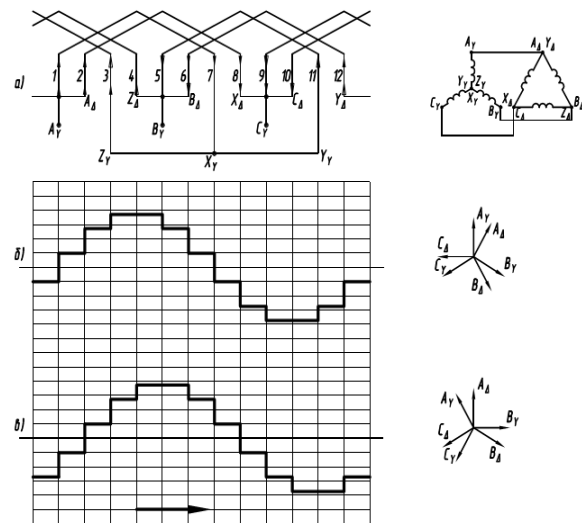


Рисунок 8 – Шестифазна обмотка ( $z=12, 2p=2$ )

Використовуючи (1) та складуючи відповідні гармоніки двох трифазних обмоток, одержуємо для першої гармоніки:

$$\sum F_{1Y,Д} = \frac{6}{p} I_m w \sin(\omega t - \frac{2p}{T} x). \quad (26)$$

Отже, перша гармоніка рухається вправо.

Для п'ятої і сьомої гармонік:

$$\sum F_{5Y,Д} = 0; \quad \sum F_{7Y,Д} = 0, \quad (27)$$

Графік МРС шестифазної обмотки для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 8,б. Відповідні напрями струмів показані у верхній частині пазів на рис. 8,а.

При повороті векторів МРС усіх фаз на кут  $30^\circ$  у напрямі проти годинникової стрілки (у позитивному напрямі) графік МРС зміщується вправо (рис. 8,в).

Відповідні напрями струмів показані у нижній частині пазів на рис. 8,а.

На рис. 9,а показана шестифазна обмотка, в якій до фази В обмотки на рис. 8,а приєднується провід мережі, що живив попередню фазу С, а до фази С (рис. 8,а) приєднаний провід, що живив фазу В.

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

$$\sum F_{1Y,D} = \frac{6}{p} I_m w \sin(\omega t + \frac{2p}{T} x). \quad (28)$$

Для п'ятої і сьомої гармонік:

$$\sum F_{5Y,D} = 0; \quad \sum F_{7Y,D} = 0, \quad (29)$$

Графік МРС обмотки для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 9,б. Напрями струмів показані у верхній частині пазів на рис. 9а.

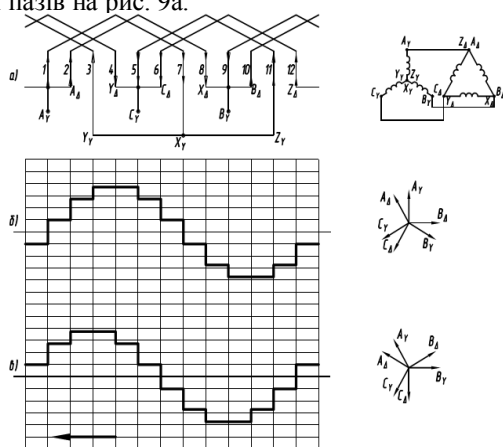


Рисунок 9 – Шестифазна обмотка під час реверсу ( $z=12, 2p=2$ )

При повороті векторів МРС усіх фаз на кут  $30^\circ$  у напрямі проти годинникової стрілки графік МРС зміщується вліво. Відповідні напрями струмів показані в нижній частині пазів на рис. 9,а.

Отже, реверс в асинхронних двигунах із шести-фазними обмотками, як і в трифазних двигунах, досягається зміною чергування фаз статорних обмоток. При цьому позитивні властивості шестифазної обмотки зберігаються.

**ВИСНОВКИ.** 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 в електричних машинах п'ята та сьома гармоніки, тим самим зменшуючи додаткові втрати, шум, вібрації, усуваючи провали в кривій електромагнітного моменту і збільшуючи пусковий момент.

#### ЛІТЕРАТУРА

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

### ADVANTAGES OF HEXAPHASE WINDINGS FOR THREE-PHASE INDUCTION MOTORS

V. Lushchik, S. Polezin

Donbass State Technical University

pr. Lenina, 16, Alchevsk, 94204, Ukraine. E-mail: v.d.luschik@yandex.ua; news4xander@mail.ru

The authors have described Advantages of hexaphase windings over the commonplace three-phase windings of asynchronous motors. It is shown that, if the connection is correct, hexaphase windings have 3,5 % bigger winding factor for the main harmonica, and there are no the 5th and 7th harmonics in the MMF curve created by this winding. Hexaphase windings usage results in cut of such negative aspects as additional losses, noise and vibrations, eradicates failures in a curve of the electromagnetic torque and increases starting torque, enhances winding reliability. Recommendations on the reconnection of the delta-connected winding if its wrong arrangement in relation to the winding wye-connected are given. The possibility of reverse of induction motors with hexaphase windings is considered. It is shown that advantages of a hexaphase winding considered are preserved for the reverse mode.

**Key words:** induction motor, hexaphase winding, winding factor, MMF, higher harmonics, reverse.

#### REFERENCES

1. Lushchik, V.D. (2012), «Hexaphase winding of asynchronous engines», *Elektrotehnika i elektromehanika*, no 2, pp. 42–44.

2. Lushchik, V.D., Kiryanov, V.V. and Polezin, S.Yu. (2013), «Electromagnetic calculation of three-phase asynchronous engines with a hexaphase winding», *Elektrotehnika i elektromehanika*, no 1, pp. 35–37.

Стаття надійшла 04.06.2013.