

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ШЕСТИФАЗНОЮ ОБМОТКОЮ

Приведені особливості електромагнітного розрахунку трифазних асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою в статорі, а також експериментальні дані конвеєрного двигуна з двома шестифазними обмотками.

Описаны особенности электромагнитных расчетов трехфазных асинхронных двигателей с шестифазной обмоткой в статоре, а также приведены экспериментальные данные конвейерного двигателя с двумя шестифазными обмотками.

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

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. В [1] розглянута обмотка шестифазного струму, яка складається з двох окремих обмоток трифазного струму. Обмотки зміщені взаємно на $1/6$ полюсного ділення, а струми в них зсунуті по фазі на $1/12$ періоду. Фази цих обмоток займають не $1/3$ полюсного ділення, а тільки $1/6$, тобто є більш зосередженими; в результаті коефіцієнти розподілу цих обмоток для основної гармоніки надзвичайно високі, що є немаловажним достоїнством. Але ще важливішим є те, що в кривій МРС шестифазної обмотки повністю зникають п'ята та сьома гармоніки. Однак такі обмотки можуть застосовуватись дуже обмежено, тільки там, де поряд розміщений синхронний генератор з шестифазною обмоткою [2].

В [3] показано, що можна створити ефективну шестифазну обмотку, що живиться трифазною напругою. Для цього фази однієї частини обмотки з'єднують зіркою, фази іншої частини обмотки – трикутником, при цьому фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, повинні бути зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника.

Мета роботи – подати основи електромагнітного розрахунку шестифазної обмотки трифазного струму.

Матеріал і результати досліджень. Електромагнітний розрахунок асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою в статорі має свої особливості.

На рис. 1 показана 6-фазна обмотка, що живиться трифазним струмом від трифазної мережі. Оскільки кожна фаза 6-фазної обмотки займає в два рази менше числа пазів на полюс і фазу порівняно з фазою трифазної обмотки

$$q' = \frac{Z}{12p}, \quad (1)$$

то коефіцієнт розподілу для 6-фазної обмотки

$$k_p^{m=6} = \frac{\sin \frac{Z}{12p} \cdot \frac{\alpha}{2}}{\frac{Z}{12p} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (2)$$

де α – кут для основної гармоніки в електричних градусах між поряд розміщеними пазами

$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot p}{Z}.$$

Коефіцієнт скорочення і обмотковий коефіцієнт вираховуються як і для трифазної обмотки.

Для шестифазної обмотки на рис. 1, використовуючи (2)

$$k_p^{m=6} = 1.$$

Для трифазної обмотки, розміщеної в тих же пазах

$$k_p^{m=3} = 0,965926.$$

Завдяки шестифазності обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці збільшується на 3,4 %.

Обмотки, що складають 6-фазну обмотку, можуть бути з'єднані між собою паралельно (рис. 1) і послідовно (рис. 2). У будь-якому випадку обидві складові 6-фазної обмотки утворюють спільний магнітний потік Φ . В подальшому складові 6-фазної обмотки будемо називати так: фаза обмотки, що з'єднана зіркою, і фаза обмотки, що з'єднана в трикутник.

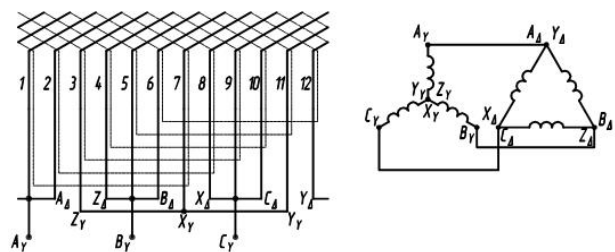


Рис. 1. Паралельне з'єднання складових 6-фазної обмотки

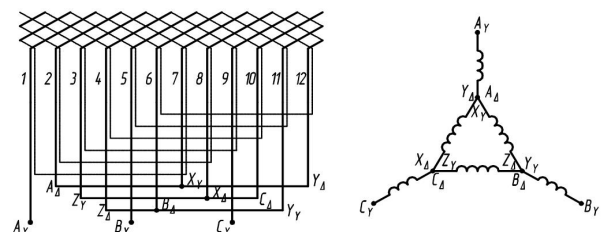


Рис. 2. Послідовне з'єднання складових 6-фазної обмотки

Попереднє значення величини магнітного потоку вираховується, як і в звичайних трифазних машинах, виходячи з оптимальної для даної машини величини індукції в повітряному зазорі

$$\Phi = B_\delta \cdot \frac{D \cdot l_\delta}{p},$$

де D – внутрішній діаметр статора; l_δ – активна довжина магнітопроводу статора.

При паралельному з'єднанні обмоток (рис. 1) попереднє число витків фази обмотки, що з'єднана трикутником

$$W'_\Delta = \frac{k_E \cdot U_1}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot k_{об}}, \quad (3)$$

де U_1 – лінійна напруга мережі.

Попереднє число витків 6-фазної обмотки, з'єднаної зіркою

$$W'_Y = \frac{k_E \cdot U_1}{4,44 \cdot f \cdot \sqrt{3} \cdot \Phi \cdot k_{об}}. \quad (4)$$

Для двошарової 6-фазної обмотки, з'єднаної зіркою

$$W'_Y = \frac{2p}{a} \cdot \frac{Z}{12p} \cdot W'_{KY} = \frac{Z}{6a} \cdot W'_{KY}, \quad (5)$$

звідки:

$$W'_{KY} = \frac{W'_Y \cdot 6a}{Z}, \quad (6)$$

де W'_{KY} – число витків котушки; a – число паралельних гілок у фазі.

Заокруглюємо W'_{KY} до цілого числа W_{KY} і вираховуємо остаточне значення числа витків W_Y фази обмотки, що з'єднана зіркою, використовуючи формулу (5).

Вираховуємо число витків котушки фази, з'єднаної в трикутник, і заокруглюємо до цілого числа

$$W_{\kappa\Delta} = \sqrt{3} \cdot W_{KY}. \quad (7)$$

Остаточне значення числа витків фази обмотки, з'єднаної в трикутник, вираховуємо за тією ж формулою (5), що і для зірки.

Використовуючи формули (3) або (4), в які підставляємо остаточні значення чисел витків фази W_Δ або W_Y , одержуємо уточнене значення магнітного потоку Φ .

При паралельному з'єднанні обмоток (рис. 1) рівність (7) повинна дотримуватись із майже 100% точністю. Цим вимогам відповідає обмежена кількість варіантів: $W_{KY} = 4$ і $W_{\kappa\Delta} = 7$; $W_{KY} = 7$ і $W_{\kappa\Delta} = 12$ – різниця 1%; $W_{KY} = 11$ і $W_{\kappa\Delta} = 19$ – різниця 0,26%; $W_{KY} = 15$ і $W_{\kappa\Delta} = 25$ – різниця 0,076%. При подальшому збільшенні W_{κ} кількість варіантів швидко зростає, тобто із зменшенням потужності двигуна легше здійснити паралельне з'єднання двох складових шестифазної обмотки.

При розходженні між W_{KY} і $\sqrt{3} \cdot W_{KY} = W_{\kappa\Delta}$ в контурі, утвореному двома фазами обмотки, з'єднаної зіркою, і фазою трикутника, наприклад $A_Y X_Y B_Y B_\Delta A_\Delta$ (рис. 1), або двома фазами зірки та двома фазами трикутника $A_Y X_Y B_Y B_\Delta X_\Delta A_\Delta$, виникають зрівняльні струми, обумовлені різницевою ЕРС, що утворюється при $W_{\kappa\Delta} \neq \sqrt{3} \cdot W_{KY}$.

Різницеву ЕРС вираховуємо, як геометричну суму ЕРС активних провідників обмотки, що входять в досліджуваній контур, з допомогою комплексних чисел [4].

Для прикладу розглянемо контур $A_Y X_Y B_Y B_\Delta A_\Delta$ (рис. 1). Пази, в яких розміщені провідники, що при обході контуру направлені знизу вгору, позначаємо n ,

пази, в яких лежать провідники, що при обході направлені зверху вниз – k . Тут потрібно додатково враховувати, що числа активних провідників в пазах 6-фазної обмотки не однакові, в пазах обмотки, з'єднаної зіркою – W_{KY} , в пазах обмотки, з'єднаної в трикутник – $W_{\kappa\Delta}$.

Тому

$$\begin{aligned} n &= 1_Y, 10_Y, 11_Y, 12_Y, 5_\Delta, 6_\Delta; \\ k &= 4_Y, 5_Y, 6_Y, 7_Y, 11_\Delta, 12_\Delta. \\ A_{(n,k)} &= \sum_{i=1}^{i=10,1,12} W_{KY} \cdot \cos(n_i \alpha) - \sum_{i=4}^{i=5,6,7} W_{KY} \cdot \cos(k_i \alpha) + \\ &+ \sum_{i=5}^{i=6} W_{\kappa\Delta} \cdot \cos(n_i \alpha) - \sum_{i=11}^{i=12} W_{\kappa\Delta} \cdot \cos(k_i \alpha); \\ B_{(n,k)} &= \sum_{i=1}^{i=10,1,12} W_{KY} \cdot \sin(n_i \alpha) - \sum_{i=4}^{i=5,6,7} W_{KY} \cdot \sin(k_i \alpha) + \\ &+ \sum_{i=5}^{i=6} W_{\kappa\Delta} \cdot \sin(n_i \alpha) - \sum_{i=11}^{i=12} W_{\kappa\Delta} \cdot \sin(k_i \alpha). \end{aligned} \quad (8)$$

Величина різницевої ЕРС у відносних одиницях в комплексній формі

$$\dot{E}_{(n,k)}^* = \text{Re}[A_{(n,k)}] + \text{Im}[B_{(n,k)}]. \quad (9)$$

Модуль різницевої ЕРС у відносних одиницях

$$E_{(n,k)}^* = \sqrt{A_{(n,k)}^2 + B_{(n,k)}^2}. \quad (10)$$

Різницева ЕРС

$$E_{(n,k)} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot E_{(n,k)}^*. \quad (11)$$

При $W_{\kappa\Delta} = \sqrt{3} \cdot W_{KY}$ різницева ЕРС $E_{(n,k)} = 0$.

Більш прийнятне послідовне з'єднання складових 6-фазної обмотки (рис. 2). При дотриманні точного співвідношення $W_{\kappa\Delta} = \sqrt{3} \cdot W_{KY}$ напруга між двома складовими 6-фазної обмотки розподіляється порівну. Визначаємо значення числа витків обмотки, з'єднаної в трикутник

$$W'_\Delta = \frac{k_E \cdot U_1}{2 \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot k_{об}}.$$

Знаходимо число витків котушки $W'_{\kappa\Delta}$, заокруглюємо до цілого числа $W_{\kappa\Delta}$ та вираховуємо число витків котушки фази, з'єднаної в зірку, також заокруглюючи до цілого числа

$$W_{KY} = \frac{W_{\kappa\Delta}}{\sqrt{3}}.$$

Використовуючи формулу (5), знаходимо остаточні значення чисел витків складових фаз 6-фазної обмотки.

Уточнене значення магнітного потоку знаходимо, використовуючи обмотку, з'єднану в трикутник

$$\Phi = \frac{k_B \cdot U_1 \cdot K}{2 \cdot 4,44 \cdot f \cdot W_\Delta \cdot k_{об}}, \quad (12)$$

де

$$K = \frac{\frac{W}{W_Y \cdot \sqrt{3}} + 1}{2}. \quad (13)$$

Сума лінійних напруг обмотки, з'єднаної трикутником, і обмотки, з'єднаної зіркою, повинна дорівнювати лінійній напрузі мережі

$$U_1 = \frac{1}{k_E} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot k_{об} \cdot (W_\Delta + W_Y \cdot \sqrt{3}).$$

Провідники обмотки, з'єднаної в трикутник, мають в $\sqrt{3}$ раз менший поперечний переріз, в результаті вага мідного проводу обох обмоток однакова. Опір фази обмотки, з'єднаної в трикутник, в 3 рази більший опору фази, що з'єднана зіркою, але втрати в міді обох обмоток однакові, тому що в обмотці, що з'єднана зіркою, протікає лінійний струм, а в обмотці, з'єднаній в трикутник – фазний струм.

Для підтвердження переваг шестифазної обмотки над трифазною було зроблено дослідний зразок конвеєрного двигуна для гірничорудної промисловості, що має дві обмотки на статорі числом полюсів $2p_1=12$ і $2p_2=4$ потужністю відповідно $P_2=85$ кВт і $P_2=250$ кВт, число пазів $Z_1=72$ і $Z_2=56$. Експериментальні дані конвеєрного двигуна з двома шестифазними обмотками у порівнянні з серійним двигуном представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Експериментальні дані

Двигун	2p	P ₂ , кВт	M _n , Нм	I _δ , мм	B _δ , Тл	M _n , Нм
Базовий	12	85	1667	445	0,86	3100
	4	250	1604	445	0,8	3171
Новий	12	100	1965	530	0,88	4520
	4	300	1929	530	0,7	2959
Двигун	2p	M _n [*]	M _{кр} , Нм	M _{кр} [*]	M _{мін} , Нм	M _{мін} [*]
Базовий	12	1,86	1495	0,90	1060	0,64
	4	1,98	3154	1,97	1700	1,06
Новий	12	2,30	2159	1,10	1650	0,84
	4	1,53	3560	1,85	1985	1,03

При майже однакових індукціях в 12-полюсному варіанті кратність пускового моменту збільшилась на 24%, максимального – на 22 %, мінімального – на 31 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд-ние. 1989. – 400 с.: ил.
2. Электрооборудование тепловозов: Справочник / В.С. Марченко, А.А. Сергеев, В.Т. Иванченко и др. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2003. – 248 с.: ил.
3. Луцки В.Д. Шестифазна обмотка асинхронних двигунів // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – С. 22-24.
4. Луцки В.Д. Універсальна методика розрахунку обмоткових коефіцієнтів // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №1. – С. 28-30.

Bibliography (transliterated): 1. Zherve G.K. Obmotki `elektricheskikh mashin. - L.: `Energoatomizdat. Lenigr. otd-nie. 1989. - 400 s.: il. 2. `Elektrooborudovanie teplovozzov: Spravochnik / V.S. Marchenko, A.A. Sergeev, V.T. Ivanchenko i dr. - M.: IKC "Akademkniga", 2003. - 248 s.: il. 3. Luschik V.D. Shestifazna obmotka asinhronnih dviguniv // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2012. - №2. - S. 22-24. 4. Luschik V.D. Universal'na metodika rozrahunku obmotkovih koefitsientiv // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2011. - №1. - S. 28-30.

Надійшла 18.09.2012

Луцки В'ячеслав Данилович, д.т.н., проф.

Полезін Сергій Юрійович

Донбаський державний технічний університет
кафедра електричних машин та апаратів,
94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16,
тел.: (06442) 23123, e-mail: v.d.luschik@yandex.ua

Кирьянов Володимир Валерійович, головний інженер

ВАТ "Донецький електротехнічний завод",
83030, Донецьк, вул. Таллінська, 1,
e-mail: kiryanov@detz.dn.ua

Lushchik V.D., Kiryanov V.V., Polezin S.Yu.

Electromagnetic calculation of three-phase asynchronous motors with a six-phase winding.

Features of electromagnetic computation of three-phase asynchronous motors with a six-phase winding in the stator are described. Experimental data on a conveyor motor with two six-phase windings are given.

Key words – three-phase asynchronous motor, six-phase winding, electromagnetic calculation, experimental data.