

*Іваненко В.С.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна,
upf-bobka@yandex.ru)*

РОТОРНА СУМІЩЕНА ОБМОТКА

В статті розглядується роторна суміщена обмотка асинхронного двигуна з різними параметрами. Пояснюється їх вплив на енергетичні та масогабаритні показники обмотки. Визначається обмотка з оптимальними параметрами.

Ключові слова: *обмотка, ротор, суміщення, короткозамкнені катушки, гармоніки, обмотковий коефіцієнт, магніторушійна сила, ряд Фур'є.*

В статье рассматривается роторная совмещенная обмотка асинхронного двигателя с различными параметрами. Объясняется их влияние на энергетические и массогабаритные показатели обмотки. Определяется обмотка с оптимальными параметрами.

Ключевые слова: *обмотка, ротор, совмещение, короткозамкнутые катушки, гармоника, обмоточный коэффициент, магнитодвижущая сила, ряд Фурье.*

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Вже більше 400-та років минуло від введення терміну "електрика" англійським вченим Вільямом Гілбертом в його праці "Про магніт, магнітні тіла та про великий магніт – Землю". Всі ці роки вчені створювали нові електротехнічні пристрої, потім їх удосконалювали, а вже потім почали суміщувати декілька пристроїв в одному.

Суміщення – це спосіб поєднання в одному об'єкті властивостей двох, або більше, об'єктів. Це дозволяє зменшити використання матеріалів та розміри об'єкта.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій. Наукове товариство давно вже проводить наукові дослідження суміщених статорних та роторних обмоток [1-4, 7, 8], однак повної і узагальнюючої методики створення і розрахунку суміщених роторних обмоток не було створено.

Мета роботи. Дослідження різних варіантів роторної суміщеної обмотки та аналіз впливу змінення параметрів суміщеної обмотки на її енергетичні та масогабаритні показники, а також визначення оптимальних параметрів суміщення.

Матеріал і результати дослідження. Розглянемо перший варіант роторної обмотки. Потрібно сумістити в одній обмотці дві обмотки з числом полюсів $2p_1 = 2$ та $2p_2 = 4$, число пазів $Z_2 = 12$. Поліусне ділення в пазах: $\tau_1 = Z_2/2p_1 = 12/2 = 6$; $\tau_2 = Z_2/2p_2 = 12/4 = 3$. Число пазів на полюс і фазу: $q_1 = Z_2/(2p_1 \cdot m_2) = 12/(2 \cdot 3) = 2$; $q_2 = Z_2/(2p_2 \cdot m_2) = 12/(4 \cdot 3) = 1$. Діаметральний крок обмотки: $y_1 = \tau_1 = 6$; $y_2 = \tau_2 = 3$. Скорочений крок обмотки: $y_1 = 0,667 \cdot \tau_1 = 4$; $y_2 = 0,667 \cdot \tau_2 = 2$. Виходячи з таких параметрів, роторна суміщена обмотка повинна мати n короткозамкнених котушкових груп, де $n = p_1 + p_2 = 1 + 2 = 3$ [5]. Треба звернути увагу, що число пазів ротора Z_2 повинно бути кратним сумі пар полюсів, що суміщуються, тобто: $Z_2 / (p_1 + p_2) =$ ціле число. Інакше короткозамкнені котушки ротора будуть мати різний крок.

На рисунку 1 зображено перший варіант суміщеної роторної обмотки $2p_1/2p_2 = 2/4$. Число витків однакове і дорівнює W_k . Крок обмотки змінний: $y_1=3$; $y_2=1$.

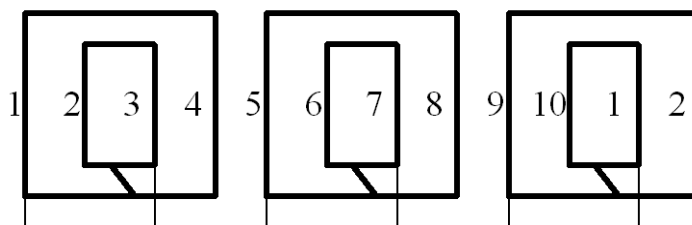


Рисунок 1 – Перший варіант роторної суміщеної обмотки

Розкладемо в ряд Фур'є МРС, що створюються цією обмоткою, та визначимо амплітуди гармонічних складових [4]:

$$F_\nu = \sum_{\nu=1}^{\infty} 2F_k \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot \nu \cdot T_0}{T}\right)}{\pi \cdot \nu} \cdot \cos \nu \left(\frac{2\pi}{T} \cdot x \right), \quad (1)$$

де F_k – МРС однієї котушки; T_0 – крок котушки; T – період; ν – номер гармоніки; x – змінна просторова координата.

Для першої гармоніки:

$$F_1 = 1,301 \cdot I_2 \cdot W_k \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} \cdot x\right), \quad (2)$$

тобто перша гармоніка представляє собою правобігуче поле, що обертається в прямому напрямі вісі x .

Для другої гармоніки:

$$F_2 = 1,014 \cdot I_2 \cdot W_k \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{T} \cdot x\right). \quad (3)$$

Друга гармоніка є лівобегуче поле, обертається в зворотному напрямі порівняно з першою гармонікою.

Відношення амплітуд першої та другої гармоніки дорівнює 1,283.

Розрахунок обмоткових коефіцієнтів та амплітуд гармонічних складових, використовуючи [6], представимо в таблиці 1.

Таблиця 1 – Обмоткові коефіцієнти та амплітуди гармонічних складових першого варіанта роторної суміщеної обмотки

Номер гармоніки, ν	Обмотковий коефіцієнт, $K_{об}$		Амплітуда
	$2p_1 = 2$	$2p_2 = 4$	
1	0,483	0,75	1,301
2	0,75	0,433	1,014
3	0,707	0	0,636
4	0,433	0,433	0,293
5	0,129	0,75	0,068
6	0	0	0
7	0,129	0,75	0,051

По даних таблиці 1 видно, що обмотковий коефіцієнт $2p_1$ -полюсного поля не дуже високий. Всі інші гармоніки присутні, окрім кратних 6-ти. Обмотка заповнює всі 100%-ів пазів ротора, витрата міді максимальна.

Розглянемо другий варіант суміщеної роторної обмотки $2p_1/2p_2 = 2/4$. Число витків в секціях різне: товстою лінією зображено W_c , тонкою – $0,5W_c$. Крок обмотки змінний: $y_1=4$; $y_2=2$.

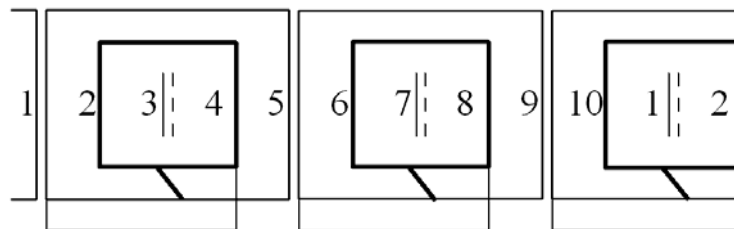


Рисунок 2 – Другий варіант роторної суміщеної обмотки

Перша гармоніка:

$$F_1 = 1,26 \cdot I_2 \cdot W_k \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} \cdot x\right). \quad (4)$$

Друга гармоніка:

$$F_2 = 0,878 \cdot I_2 \cdot W_k \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{T} \cdot x\right). \quad (5)$$

Відношення амплітуд першої та другої гармоніки дорівнює 1,435.

В таблиці 2 представлено обмоткові коефіцієнти та амплітуди гармонічних складових, що створюються такою обмоткою.

Таблиця 2 – Обмоткові коефіцієнти та амплітуди гармонічних складових другого варіанта роторної суміщеної обмотки

Номер гармоніки, ν	Обмотковий коефіцієнт, $K_{об2}$		Амплітуда
	$2p_1 = 2$	$2p_2 = 4$	
1	0,622	0,866	1,26
2	0,866	0,289	0,878
3	0,667	0	0,45
4	0,289	0,289	0,146
5	0,045	0,866	0,019
6	0	0	0
7	0,045	0,866	-0,015

МРС роторної обмотки, що створює $2p_1$ -полюсне поле, вираховується по формулі [4]:

$$F_{2(1)} = \frac{m_2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot I_2 \cdot \frac{W_k \cdot K_{об2(1)}}{p_1}. \quad (6)$$

МРС роторної обмотки, що створює $2p_2$ -полюсне поле:

$$F_{2(2)} = \frac{m_2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot I_2 \cdot \frac{W_k \cdot K_{об2(2)}}{p_1}. \quad (7)$$

Із (6) та (7) видно, що чим більший $K_{об2}$ – тим більша МРС по $2p_1$ - та $2p_2$ -полюсному полі створюється.

По даних таблиці 2 видно, що обмотковий коефіцієнт $2p_1$ -полюсного поля зріс порівняно з першим варіантом на 28,8%, а по $2p_2$ -полюсному – на 15,5%. Це означає, що обмотка створить більшу МРС ніж в першому варіанті, а також з огляду на те, що обмотка займає лише 75%-ів пазів (пази №3, 7 та 11 – вільні), витрата міді на 20%-ів менша. Отже другий варіант обмотки виявився кращим за перший. Також всі

інші гармоніки присутні, окрім кратних 6-ти.

Розглянемо третій варіант суміщеної роторної обмотки. Обмотка двошарова, число витків однакове і дорівнює $0,5 \cdot W_c$. Крок обмотки постійний $y=4$.

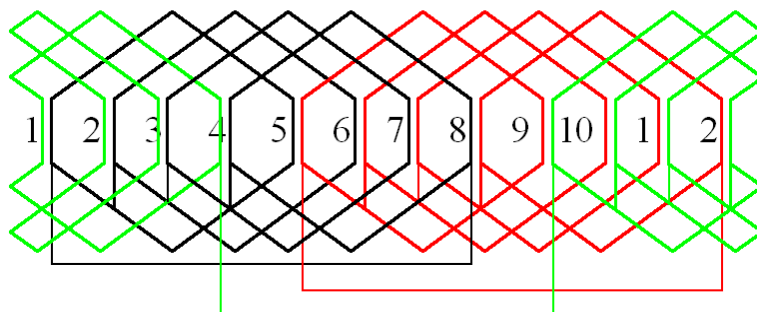


Рисунок 3 – Третій варіант роторної суміщеної обмотки

Перша гармоніка:

$$F_1 = 4,684 \cdot I_2 \cdot W_k \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} \cdot x\right). \quad (8)$$

Друга гармоніка:

$$F_2 = 2,342 \cdot I_2 \cdot W_k \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{T} \cdot x\right). \quad (9)$$

Відношення амплітуд першої та другої гармоніки дорівнює 2-ом.

В таблиці 3 представлено обмоткові коефіцієнти та амплітуди гармонічних складових.

Таблиця 3 – Обмоткові коефіцієнти та амплітуди гармонічних складових третього варіанта роторної суміщеної обмотки

Номер гармоніки, ν	Обмотковий коефіцієнт, $K_{об}$		Амплітуда
	$2p_1 = 2$	$2p_2 = 4$	
1	0,724	0,375	4,684
2	0,375	0,217	2,342
3	0	0	0
4	0,217	0,217	-1,171
5	0,194	0,375	-0,933
6	0	0	0
7	0,194	0,375	0,662

Обмотковий коефіцієнт $2p_1$ -полюсного поля дуже зріс порівняно з першим варіантом на 49,9%, а $2p_2$ -полюсного поля – дуже зменшився на 50%. Всі інші гармоніки присутні, окрім кратних 3-ом. Обмотка займає

всі 100% пазів. МРС від $2p_2$ -полюсного поля буде в два рази менша за МРС $2p_1$ -полюсного поля.

Розглянемо останній четвертий варіант суміщеної роторної обмотки. Число витків однакове і дорівнює W_k . Крок обмотки постійний $y=2$.

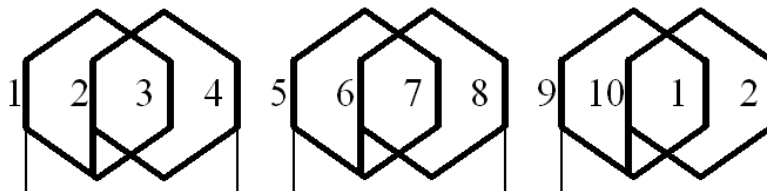


Рисунок 4 – Четвертий варіант роторної суміщеної обмотки

Перша гармоніка:

$$F_1 = 1,349 \cdot I_2 \cdot W_k \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} \cdot x\right). \quad (10)$$

Друга гармоніка:

$$F_2 = 1,171 \cdot I_2 \cdot W_k \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{T} \cdot x\right). \quad (11)$$

В таблиці 4 представлено обмоткові коефіцієнти та амплітуди гармонічних складових.

Таблиця 4 – Обмоткові коефіцієнти та амплітуди гармонічних складових четвертого варіанта роторної суміщеної обмотки

Номер гармоніки, ν	Обмотковий коефіцієнт, $K_{об}$		Амплітуда
	$2p_1 = 2$	$2p_2 = 4$	
1	0,483	0,75	1,349
2	0,75	0,433	1,171
3	0,707	0	0,899
4	0,433	0,433	0,585
5	0,129	0,75	0,272
6	0	0	0
7	0,129	0,75	-0,195

Відношення амплітуд першої та другої гармоніки дорівнює 1,152.

Розрахунок обмоткових коефіцієнтів показав, що обмотка має ідентичні обмоткові коефіцієнти, як і в першому варіанті. Амплітуда $2p_1$ -полюсного поля збільшилась на 3,7%, а амплітуда $2p_2$ -полюсного поля – збільшилась на 15,5%.

Висновки.

1. Бажано, щоб число пазів ротора Z_2 було кратним сумі пар полюсів, що суміщуються, тобто: $Z_2 / (p_1 + p_2) =$ ціле число. Інакше короткозамкнені котушки ротора будуть мати різний крок.

2. Крок секцій суміщеної роторної обмотки повинен наближатись до середнього кроку $y_{сер} = (y_1 + y_2) / 2$ від $2p_1$ - та $2p_2$ -полюсного поля, щоб обмоткові коефіцієнти були максимально можливими.

3. В третьому варіанті виявилась найбільша амплітуда $2p_1$ - та $2p_2$ -полюсного поля. Їх відношення дорівнює двом. Це пояснюється тим, що обмотка найбільш оптимально спроектована (крок обмотки y_1 майже дорівнює $y_{сер}$).

4. Найоптимальніші параметри суміщення показала обмотка №2. Вона має найбільші обмоткові коефіцієнти та меншу витрату міді.

Бібліографічний перелік

1. Заявка № 93005795 МПК НО2К 19/38, Безконтактна синхронна електрична машина / Л.И. Глухівський, В.С. Маляр, Ю.В. Осідач, М.В. Хай // Промислова власність. – 1994. – № 8-1. – 2 с.

2. Караваев В.Т. Бесконтактный совмещенный синхронный генератор / В.Т. Караваев // Электричество. – №11. – 1990. – С. 17-25.

3. Караваев В.Т. Специальные электрические машины с частичным совмещением (элементы теории, схемы и конструкции): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.09.01 «Електрические машины» / В.Т. Караваев. – Екатеринбург, 1998. – 40 с.

4. Луцук В.Д. Совмещенные электрические машины и аппараты / В.Д. Луцук. – К.: Техника, 1993. – 203 с.

5. Луцук В.Д. Каскадні асинхронні двигуни з суміщеними обмотками / В.Д. Луцук, О.С. Михайлова, Г.О. Чернікова // Збірник наук. праць Донату. – Вип. №23. – Алчевськ. – 2007. – С.389-396.

6. Луцук В.Д. Універсальна методика розрахунку обмоткових коефіцієнтів / В.Д. Луцук. – Електротехніка і електромеханіка. – Вип. №1. – 2011. – С. 28-30.

7. Пат. 2046504 Российская Федерация, МПК⁷ Совмещённая роторная обмотка / В.И. Попов (РФ), заявитель В.И. Попов (РФ), патентообладатель Волжский инженерно-педагогический институт (РФ) №5051118; заяв. 01.07.1992; опубл. 20.10.1995. – 3 с.

8. Babushanov A.V. Contact-free combined synchronous generators rotor windings electromagnetic analysis / A.V. Babushanov. – Електротехніка і електромеханіка. – Вип. №2. – 2011. – Р. 55-62.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Луцук В.Д.