

*д.т.н. Лущик В. Д.  
(ДонДТУ, Алчевськ, Україна)*

## СИНХРОННИЙ КАСКАДНИЙ ДВИГУН

*Розглянутий синхронний каскадний двигун (СКД) з суміщеними обмотками, проведений аналіз експериментальних досліджень та визначені напрями подальшого удосконалення СКД.*

**Ключові слова:** синхронний каскадний двигун, суміщені статорна і роторна обмотки, магнітопровід, експериментальні дослідження.

*Рассмотрен синхронный каскадный двигатель (СКД) с совмещенными обмотками, выполнен анализ экспериментальных исследований и обозначены направления дальнейших усовершенствований СКД.*

**Ключевые слова:** синхронный каскадный двигатель, совмещенные статорная и роторная обмотки, магнитопровод, экспериментальные исследования.

Машини дробарно-подрібнювального циклу гірничої промисловості характеризуються важкими умовами запуску. Так, для потужних щеткових дробарок момент зрушення сягає 2...2,5 від номінального, що обумовлює підвищений коефіцієнт запасу встановленої потужності приводного двигуна і знижує його ККД у сталому режимі роботи. Тому для зниження встановленої потужності основного привода дробарок застосовують розгінний двигун, який використовується лише під час пуску. Відомі і труднощі запуску конусних дробарок при заклинюванні валків кусками руди при вмиканні під завалом. Проблему вирішують шляхом підвищення на 30...50% встановленої потужності привода [1].

Тому актуальним являється розробка і дослідження принципово нових синхронних двигунів з покращеними пусковими характеристиками, зокрема синхронних каскадних двигунів (СКД).

Відомі синхронні каскадні двигуни складаються із двох магнітопроводів, на статорі і роторі першого магнітопроводу розміщені трифазні  $2p_1$ -полюсні обмотки, на статорі другого магнітопроводу розміщена однофазна  $2p_2$ -полюсна обмотка, що живиться постійним струмом, на роторі – трифазна  $2p_2$ -полюсна обмотка, ротори двох магнітопроводів сполучені між собою механічно, а обмотки між собою з'єднані послідо-

вно із перехресчуванням двох фаз для зміни напрямку обертання  $2p_2$ -полюсного поля [2,3].

Перевагою цих СКД, крім гарних пускових характеристик, є ще й безконтактність, тобто відсутність контактних кілець і щіток.

Однак із-за наявності двох магнітопроводів і чотирьох обмоток (по дві на кожний магнітопровід) масогабаритні показники цих машин значно гірші порівняно з традиційними синхронними машинами з контактними кільцями.

Розроблені останнім часом суміщені обмотки [4] і удосконалені для застосування в СКД з одним суміщеним магнітопроводом дозволили одержати СКД зі швидкістю обертання  $n=500,333,250,200,166,143,125$  об/хв., які по масогабаритним та енергетичним показникам наближаються до синхронних двигунів з контактними кільцями такої ж частоти обертання. Статори каскадних двигунів технологічно не відрізняються від статорів серійних синхронних чи асинхронних двигунів, а ротор при виготовленні значно простіший.

Трифазну  $2p_1$ -полюсну обмотку статора першого каскаду, яка живиться від трифазної мережі, суміщують з однофазною  $2p_2$ -полюсною обмоткою статора другого каскаду, яка живиться постійним струмом, що є струмом збудження. Суміщена трифазно-однофазна  $2p_1/2p_2$ -полюсна обмотка в кожній фазі виконується із двох паралельних віток, які з'єднані в дві окремі паралельно з'єднані зірки з двома нульовими виводами з нейтральних точок.

При подачі струму збудження в нульові виводи утворюється нерухоме  $2p_2$ -полюсне поле. Розроблені суміщені  $2p_1/2p_2$ -полюсні обмотки, у яких співвідношення чисел полюсів  $2p_1:2p_2=1:2$ . Найменше можливе число полюсів  $2p_1=4$ . При цьому  $2p_2=8$ .

Роторна суміщена трифазна обмотка, що об'єднує дві трифазні роторні обмотки двох каскадів, повинна утворювати два магнітні поля числом полюсів  $2p_1$  і  $2p_2$ , які обертаються в протилежних напрямках. Така суміщена обмотка теж розроблена з оптимальним співвідношенням обмоткових коефіцієнтів для  $2p_1$  і  $2p_2$ -полюсного поля. Обмотка складається із окремих  $p_1+p_2$  короткозамкнених котушкових груп.

Виготовлений і досліджений на Первомайському електромеханічному заводі СКД [5] показав принципову можливість створення таких двигунів. Виявлені недоліки дозволили розробити більш досконалі суміщені обмотки статора (рисунок 1) і ротора (рисунок 2), де  $2p_1=4$ ,  $2p_2=8$ .

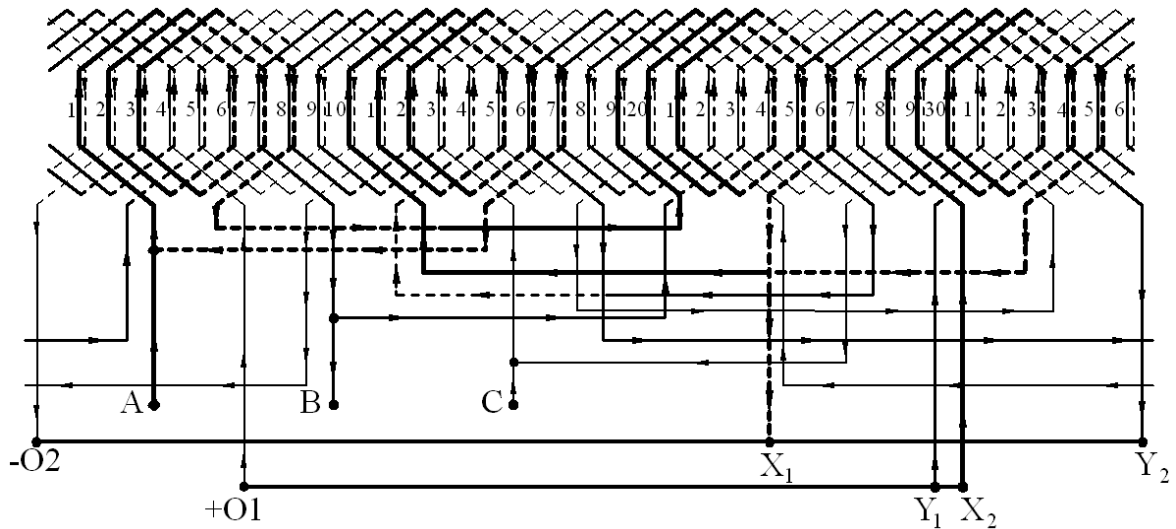


Рисунок 1- Статорна суміщена обмотка

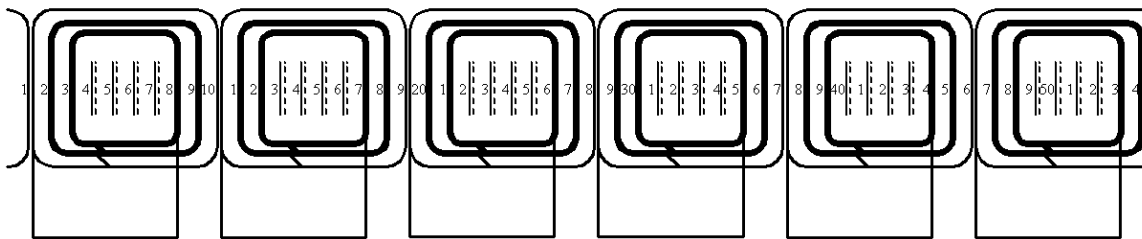


Рисунок 2 - Роторна суміщена обмотка

При швидкості обертання, яка називається каскадною, електричний двигун працює в синхронному режимі;  $2p_2$ –полюсне поле, створене роторною обмоткою, стає нерухомим відносно статора

$$n_k = \frac{60f_1}{p_1 + p_2} = \frac{60f_1}{2 + 4} = 500 \text{ об/хв.} \quad (1)$$

В результаті експериментальних досліджень на валу двигуна СКД одержана потужність  $P_2=740\text{Вт}$ , коефіцієнт корисної дії  $\eta=82\%$ . Синхронний 12-полюсний ( $2p_1=12$ ) двигун явнополюсного виконання в габаритах даного магнітопроводу при швидкості обертання  $n=500\text{об/хв.}$  має потужність 1000 Вт.

Недостатня корисна потужність СКД пояснюється тим, що в роторі використано мідного проводу в 2,2 рази менше, ніж в синхронному двигуні. Роторна обмотка в СКД виконана проводом  $d=1,18\text{мм}$ , числа витків в кожній котушці посеційно  $w_k=8,16,16$  (рисунок 2). Найбільші котушки двошарові, виконані числом витків в два рази меншим порів-

няно з рештою одношаровими котушками. Всі котушки в кожній котушковій групі з'єднані послідовно, а початок і кінець котушкової групи замкнутий накоротко.

Під кожною парою полюсів  $2p_1$ -полюсного поля, створеного статорною обмоткою, знаходяться три короткозамкнені каскадні котушкові групи. Щоб дізнатися, які гармоніки, їх амплітудне значення і напрям обертання будуть створюватись роторною каскадною обмоткою, достатньо розглянути спектр гармонік, що створюється трьома каскадними короткозамкненими котушковими групами.

В активних сторонах котушок наводяться ЕРС  $2p_1$ -полюсним полем, створеним статорною обмоткою. Для зручності подальших розрахунків розташовуємо  $2p_1$ -полюсне поле симетрично відносно котушкових груп. Це означає, що  $2p_1$ -полюсне поле починається з першого паза, і в першому пазу ЕРС активної сторони котушки дорівнюватиме нулю. Зважаючи на цю обставину, ЕРС кожної активної сторони вираховуємо по формулі:

$$e_{cm.t} = B_m \sin \omega t = B_m \sin \left( 2\pi \frac{t-1}{T} \right), \quad (2)$$

де  $T$ - просторова координата, що визначається величиною подвійного полюсного ділення, вираженого числом пазових поділок ротора:

$$T = \frac{Z_2}{p_1} = \frac{54}{2} = 27,$$

$t$  – змінна величина, що означає номер паза, в якому лежить розглядувана активна сторона:

$$t = 1, 2, 3, 10, 11, 12, 19, 20, 21$$

$B_m$ - амплітудне значення магнітної індукції, приймаємо  $B_m = 1$ .

ЕРС кожної котушки визначається, як різниця ЕРС активних сторін, котрі створюють цю котушку:

$$E_{K_{t,t+y}} = e_{cm.t} - e_{cm.t+y} = B_m \left[ \sin \left( 2\pi \frac{t-1}{T} \right) - \sin \left( 2\pi \frac{t-1+y}{T} \right) \right]. \quad (3)$$

З допомогою (3) знаходимо відносні значення ЕРС котушок (ЕРС двошарових котушок множимо на 0,5):

$$\begin{aligned} E_{k_{1,10}} &= -0,433; & E_{k_{2,9}} &= -0,7274; & E_{k_{3,8}} &= -0,5495; \\ E_{k_{10,19}} &= 0,866; & E_{k_{11,18}} &= 1,4548; & E_{k_{12,17}} &= 1,099; \\ E_{k_{19,28}} &= -0,433; & E_{k_{20,27}} &= -0,7274; & E_{k_{21,26}} &= -0,5495. \end{aligned} \quad (4)$$

Відносні значення ЕРС котушкових груп вираховуються як суми ЕРС окремих котушок:

$$\begin{aligned} E_{1к.зр.} &= E_{k_{1,10}} + E_{k_{2,9}} + E_{k_{3,8}} = -1,71; \\ E_{2к.зр.} &= E_{k_{10,19}} + E_{k_{11,18}} + E_{k_{12,17}} = 3,42; \\ E_{3к.зр.} &= E_{k_{19,28}} + E_{k_{20,27}} + E_{k_{21,26}} = -1,71. \end{aligned}$$

Відносні значення опорів котушок:

двошарової –  $R_1=0,6225$ ;

середньої –  $R_2=1,13$ ;

найменшої –  $R_3=1$ .

Відносні значення опору котушкових груп:

$$R_{к.зр.} = R_1 + R_2 + R_3 = 2,7525.$$

Відносне значення струмів:

першої і третьої котушкових груп –  $I_1 = I_3 = -\frac{E_{1к.зр.}}{R_{к.зр.}} = -0,621$ ;

середньої котушкової групи –  $I_2 = I_3 = -\frac{E_{2к.зр.}}{R_{к.зр.}} = 1,242$ .

Миттєві значення струмів котушкових груп зміщені одне відносно другого на кут  $120^\circ$ . Тому відносні значення МРС, створені котушками першої котушкової групи:

$$\begin{aligned} F_{k_{1,10}} &= 0,5I_1 \sin \omega t, \\ F_{k_{2,9}} &= F_{k_{3,8}} = I_1 \sin \omega t. \end{aligned} \tag{6}$$

МРС, створювані котушками другої котушкової групи:

$$\begin{aligned} F_{k_{10,19}} &= 0,5I_2 \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right); \\ F_{k_{11,18}} &= F_{k_{12,17}} = I_2 \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right). \end{aligned} \tag{7}$$

МРС, створювані котушками третьої котушкової групи:

$$F_{k_{19,28}} = 0,5I_3 \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right);$$

$$F_{k_{20,27}} = F_{k_{21,26}} = I_3 \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right).$$
(8)

На рисунку 3в показана результуюча МРС, створена котушками роторної обмотки для миті часу, що визначається розміщенням  $2p_1$ -полюсного поля (рисунок 3а) відносно ротора.

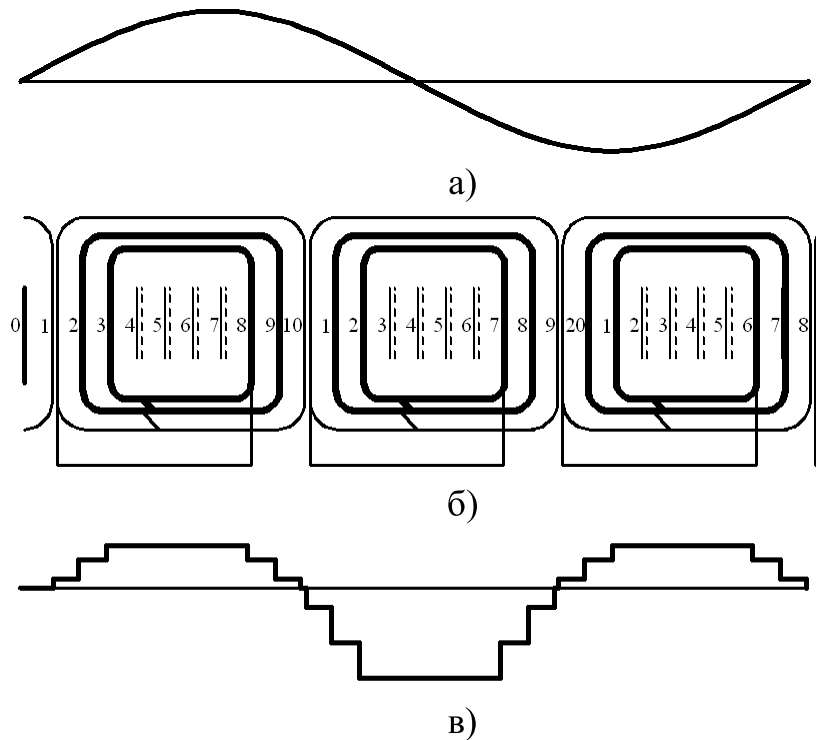


Рисунок 3 – Результуюча МРС роторної обмотки

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

$$F_{kv} = \sum_{v=1}^{\infty} 2F_{k_{t,t+y}} \frac{\sin \pi v(T_0/T)}{\pi v} \cos \frac{2\pi}{T} x,$$
(9)

де  $T_0$  - крок котушки;  
 $v$  – порядок гармоніки;  
 $x$  – змінна просторова координата,  
та вибравши початок координат по вісі першої котушкової групи, а також враховуючи просторовий зсув котушок другої і третьої котушкових

груп відповідно на кут  $120^\circ$  та  $240^\circ$  в  $2p_1$ -полюсному полі відповідно, одержимо формули для МРС кожної котушки

$$\begin{aligned}
 F_{kv_{1,10}} &= \sum_{v=1}^{\infty} I_1 \sin \omega t \cdot \frac{\sin\left(\frac{9}{27} \pi v\right)}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x, \\
 F_{kv_{2,9}} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_1 \sin \omega t \cdot \frac{\sin\left(\frac{7}{27} \pi v\right)}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x, \\
 F_{kv_{3,8}} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_1 \sin \omega t \cdot \frac{\sin\left(\frac{5}{27} \pi v\right)}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x, \\
 F_{kv_{10,19}} &= \sum_{v=1}^{\infty} I_2 \sin\left(\omega t - \frac{2}{3} \pi\right) \frac{\sin\left(\frac{9}{27} \pi v\right)}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{2}{3} \pi\right), \\
 F_{kv_{11,18}} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_2 \sin\left(\omega t - \frac{2}{3} \pi\right) \frac{\sin\left(\frac{7}{27} \pi v\right)}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{2}{3} \pi\right), \\
 F_{kv_{12,17}} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_2 \sin\left(\omega t - \frac{2}{3} \pi\right) \frac{\sin\left(\frac{5}{27} \pi v\right)}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{2}{3} \pi\right), \\
 F_{kv_{19,28}} &= \sum_{v=1}^{\infty} I_3 \sin\left(\omega t - \frac{4}{3} \pi\right) \frac{\sin\left(\frac{9}{27} \pi v\right)}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{4}{3} \pi\right), \\
 F_{kv_{20,27}} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_3 \sin\left(\omega t - \frac{4}{3} \pi\right) \frac{\sin\left(\frac{7}{27} \pi v\right)}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{4}{3} \pi\right), \\
 F_{kv_{21,26}} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_3 \sin\left(\omega t - \frac{4}{3} \pi\right) \frac{\sin\left(\frac{5}{27} \pi v\right)}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{4}{3} \pi\right).
 \end{aligned} \tag{10}$$

Для визначення результуючої МРС кожної гармоніки потрібно скласти відповідні гармоніки всіх дев'яти котушок.

Для першої гармоніки, тобто для  $2p_1$ -полюсного поля ( $2p_1=4$ ), одержуємо

$$F_1 = 0,932 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right). \quad (11)$$

Отже, перша гармонічна є правобігуче поле, що обертається в прямому напрямі вісі  $x$ .

Для другої гармоніки, тобто для  $2p_2$ -полюсного поля ( $2p_2=8$ ), одержуємо

$$F_2 = 0,64 \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{T} x\right). \quad (12)$$

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

Співвідношення амплітуд  $2p_1$ -полюсного поля роторної обмотки  $F_1$  та  $2p_2$ -полюсного поля  $F_2$

$$F_1 : F_2 = 1,455. \quad (13)$$

Для збільшення потужності СКД потрібно збільшити кількість міді роторної обмотки. Це можливо зробити за рахунок заміни провідникової міді на мідь прямокутного поперечного перерізу; величина поперечного перерізу збільшується в 1,6 рази, а резисторний опір обмотки ротора зменшується в 1,9 рази за рахунок зменшення довжини лобових частин котушок. Обмотку у випадку виконання із шинної міді нетехнологічно виконувати по схемі, показаній на рисунку 2. Кожну котушку слід виконувати короткозамкненою, ізольованою від інших котушок. В цьому випадку в кожній котушці буде свій струм. Для порівняльного аналізу амплітудного співвідношення гармонік приймаємо опори котушок незмінними і вираховуємо струми котушок, використовуючи формули [4] та [5]

$$\begin{aligned} I_{1,10} &= I_{3,19,28} = -0,6956; \\ I_{1,9} &= I_{3,20,27} = -0,6437; \\ I_{1,8} &= I_{3,21,26} = -0,5495; \\ I_{2,10,19} &= 1,391; \\ I_{2,11,18} &= 1,2874; \\ I_{2,12,17} &= 1,099. \end{aligned} \quad (14)$$



Результуюча МРС, створена окремими котушками роторної обмотки, практично нічим не відрізняється від результуючої МРС, показаної на рисунку 3в.

Отже, зміна схеми роторної обмотки не погіршує її електромагнітні властивості.

На теперішній час проводиться заміна провідникової міді в роторі на шинну мідь. Очікується одержати корисну потужність на валу такої ж величини, як і у синхронному дванадцятиполюсному двигуні з контактними кільцями.

**Висновки.** Розроблений і досліджений синхронний каскадний двигун з суміщеними магнітопроводами і обмотками, який по масогабаритним і енергетичним показникам наближається до показників багатополюсних синхронних двигунів з контактними кільцями. СКД більш простий при виготовленні, безконтактний, має набагато кращі пускові властивості.

#### **Бібліографічний список**

1. Пивняк Г.Г. *О рассеяниях расщепленной обмотки возбуждения синхронного двигателя* / Г.Г. Пивняк, В.И. Кириченко, В.А. Бородай // *Сборник научных трудов НГАУ.* – 2001. - №11. – С. 87-92.

2. Шенфер К.П. *Асинхронные машины* / К.П. Шенфер. - М.-Л.: Гос. Издат., 1929. – 457 с.

3. *Асинхронно-синхронные машины каскадного типа: труды третьей всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам* / М.М. Красношарка. – Рига: Зинатне. – 1966.-Т. 2. - С. 237-244.

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

5. Луцик В.Д. *Новий тип тихохідного асинхронно-синхронного двигуна* / В.Д. Луцик, В.В. Семенов. // *Уголь Украины.* – 2008. - №9. – С. 39-41.