

## СИНХРОННИЙ КАСКАДНИЙ ДВИГУН З СУМІЩЕНИМИ ОБМОТКАМИ

*Розглянутий синхронний каскадний двигун з суміщеними обмотками. Приводяться результати експериментальних досліджень. Обґрунтовуються його переваги перед тихохідними синхронними двигунами.*

*Рассмотрен синхронный каскадный двигатель с совмещенными обмотками. Приведены результаты экспериментальных исследований. Обосновываются его преимущества по сравнению с тихоходными синхронными двигателями.*

Синхронні каскадні двигуни (СКД) відомі давно [1, 2]. Основна перевага їх – безконтактність. Однак із-за наявності двох магнітопроводів і чотирьох обмоток, по дві на кожний магнітопровід, масогабаритні та енергетичні показники цих двигунів значно гірші, ніж в традиційних синхронних машинах з контактними кільцями.

Розроблені останнім часом суміщені обмотки [3] 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. Додаткові переваги – відсутність контактних кілець і багато кращі пускові властивості.

Відомо, що при зменшенні швидкості обертання синхронного чи асинхронного двигуна приблизно пропорційно зменшується корисна потужність на валу двигуна. Це пояснюється тим, що при збільшенні числа пар полюсів  $p_1$  в тих же габаритах зменшується пропорційно магнітний потік  $\Phi$  на пару полюсів, тому збільшується кількість витків  $w_1$  для забезпечення необхідної величини  $E_1$  і відповідно  $U_1$ , що подається на двигун. Так як пазовий простір залишається приблизно незмінним, пропорційно зменшується поперечний переріз мідного проводу, і, відповідно, споживаний струм  $I_{1н}$ . Погіршуються енергетичні показники.

Так як в розглядуваній каскадній машині швидкість обертання магнітного поля  $2p_1$ -полюсної статорної обмотки в три рази більша швидкості обертання ротора, ця обставина виявляється додатковим позитивним фактором, що сприяє покращенню масогабаритних і енергетичних показників. Приблизно в 1,5 рази число витків фази статорної  $2p_1$ -полюсної обмотки каскадного двигуна менше порівняно з серійним синхронним двигуном однакової потужності і швидкості обертання [4].

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. Принципова електрична схема такої суміщеної обмотки показана на рис. 1.

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  $2p_2=8$ . При  $2p_1=2$  і  $2p_2=4$  в машині будуть виникати магнітні вібрації.

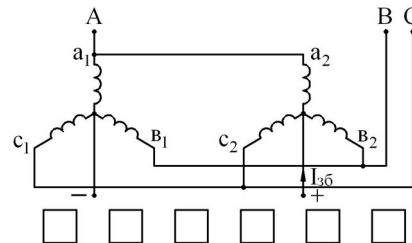


Рис. 1. Принципова електрична схема статорної обмотки

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. Для  $2p_1=4$   $p_1+p_2=6$  (рис. 1).

При швидкості обертання, яка називається каскадною

$$n_k = \frac{60f_1}{p_1 + p_2}. \quad (1)$$

$2p_2$ -полюсне поле, створене роторною обмоткою, буде нерухомим відносно статора. При подачі струму збудження  $I_{\delta}$  в обмотку статора виникає синхронний електромагнітний обертовий момент.

Експериментальний синхронний каскадний двигун був виконаний на магнітопроводі довжиною  $l_s = 107$  мм, внутрішній діаметр статора  $D = 154$  мм, зовнішній діаметр статора  $D = 228$  мм,  $Z_1 = 36$ ,  $Z_2 = 54$ .

Статорна обмотка показана на рис. 2

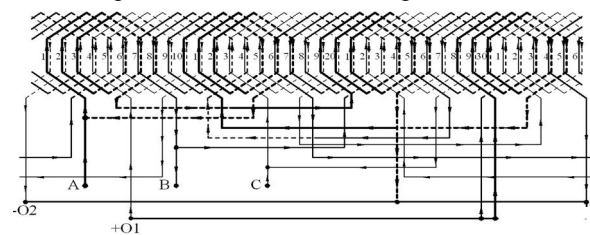


Рис. 2. Обмотка статора

Обмотковий коефіцієнт обмотки відносно  $2p_1$ -полюсного поля

$$K_{об1} = K_{p1} \cdot K_{ck.1} = \frac{\sin q_1}{q_1} \cdot \frac{\alpha_1}{2} \cdot \sin \frac{y_1}{\tau_1} 90^\circ = \quad (2)$$

$$= \frac{\sin 3 \cdot 10^\circ}{3 \sin 10^\circ} \cdot \sin \frac{5}{9} 90^\circ = 0,7392.$$

Для вирахування обмоткового коефіцієнту  $k_{об.2}$  для  $2p_2$ -полюсного поля, створеного струмом збу-

дження, потрібно позначити напрям струму  $I_{36}$  на подвійному  $2p_2$ -полюсному діленні. Кут

$$\alpha_2 = \frac{360^\circ \cdot p_2}{Z_1} = \frac{360^\circ \cdot 4}{36} = 40^\circ,$$

пази, в яких струм направлений вгору  $n = 3, 4, 5$ , пази, в яких струм направлений вниз,  $\kappa = 7, 8, 9$ . Загальне число активних провідників на подвійному  $2p_2$ -полюсному діленні  $N = 6$ . В результаті обчислень, використовуючи універсальну методику обчислення обмоткових коефіцієнтів [3], одержуємо  $k_{об.2} = 0,844$ .

Роторна обмотка (рис. 3) виконана із  $p_1+p_2 = 6$  короткозамкнених котушок, кожна із яких має три секції.

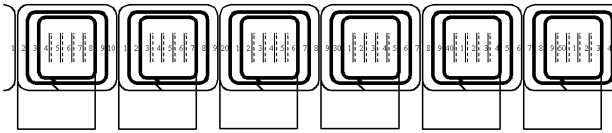


Рис.3. Схема обмотки ротора

Обмоткові коефіцієнти для  $2p_1$ -полюсного поля

$$(\alpha_1 = \frac{360^\circ \cdot p_1}{Z_2} = \frac{360^\circ \cdot 2}{54} = 13,33^\circ),$$

і для  $2p_2$ -полюсного поля

$$(\alpha_2 = \frac{360^\circ \cdot p_2}{Z_1} = \frac{360^\circ \cdot 4}{54} = 26,66^\circ),$$

вираховуються теж з допомогою універсальної методики розрахунку обмоткових коефіцієнтів, як для  $2p_1=4$ , так і для  $2p_2=8$   $n = 1, 2, 2, 3, 3$ ;  $\kappa = 8, 8, 9, 9, 10$ . Загальне число активних провідників однієї котушки  $N = 10$ . В результаті обчислень одержуємо

$$K'_{об.1} = 0,684, K'_{об.2} = 0,94.$$

Розкладаючи в ряд Фур'є МРС роторної обмотки, яка утворюється під дією статорного  $2p_1$ -полюсного поля, одержуємо співвідношення амплітуд  $2p_1$ -полюсного поля роторної обмотки  $F_1$  та  $2p_2$ -полюсного поля роторної обмотки  $F_2$ :  $F_1/F_2 = 1,455$ .

Роторна обмотка виконана проводом  $d_{гол} = 1,18$  мм, кількість витків у кожній котушці по секційно  $w_k = 8, 16, 16$ .

Статорна обмотка виконана проводом  $d_{гол} = 1,0$  мм, кількість витків в фазі  $w_\phi = 222$ , число витків в котушці  $w_k = 37$ .

В результаті експериментальних досліджень одержано:  $U_{1\phi} = 132$  В;  $I_{1л} = I_{1\phi} = 4,1$  А;  $P_1 = 755$  Вт;  $I_{36} = 9,6$  А; втрати в обмотці статора від струму збудження  $p_{36} = I_{36}^2 R_{00} = 9,6^2 \cdot 1,6 = 147$  Вт; сумарна споживана потужність  $\Sigma P = P_1 + p_{36} = 902$  Вт; корисна потужність  $P_2 = 740$  Вт; ККД  $\eta = 0,82$ .

Індукція в повітряному зазорі від  $2p_1$ -полюсного поля  $B_{\delta 1} = 0,43$  Тл. Ефективне значення струму в провідниках статорної обмотки

$$I_e = \sqrt{\left(\frac{I_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{I_{36}}{\alpha_2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{4,1}{2}\right)^2 + \left(\frac{9,6}{3}\right)^2} = 3,8 \text{ А},$$

де  $\alpha_1$  – число паралельних віток фази  $2p_1$ -полюсної обмотки;  $\alpha_2$  – число паралельних віток відносно нульових виводів 01, 02.

Базовий асинхронний двигун, з магнітопроводу якого був виготовлений СКД, має номінальний струм  $I_{1н} = 6$  А. Обмотка його виготовлена із проводу  $d_{гол} = 1,18$  мм, паралельні вітки відсутні, щільність струму

$$j_1 = \frac{I_1}{S_1} = \frac{6}{1,093} = 5,49 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

В СКД щільність струму

$$j_1 = \frac{I_1}{S_1} = \frac{3,8}{0,785} = 4,84 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Синхронний 12-полюсний двигун ( $n = 500$  об./хв.) явнопольосного виконання в габаритах даного магнітопроводу має потужність  $P_2 = 1000$  Вт. Недостатня корисна потужність СКД пояснюється тим, що в роторі використано мідного проводу в 2,2 рази менше, ніж в синхронному двигуні. На теперішній час планується виготовити секції роторної обмотки із мідних шин, щоб збільшити поперечний переріз міді в пази в 1,64 рази. Секції із шин матимуть значно менший виліт лобових частин. В СКД крім обмотки, показаної на рис. 3, існує трифазна обмотка, виведена на контактні кільця, для дослідження двигуна в асинхронному режимі, тому суміщена обмотка має великий виліт лобових частин. В результаті секції із шин матимуть в 1,8 рази менший опір порівняно із секціями, виготовленими із мідного проводу.

Як показують розрахунки, при виготовленні обмотки із мідних шин буде досягнута корисна потужність  $P_2 = 1000$  Вт.

Крім статорної обмотки з відношенням чисел полюсів  $2p_1:2p_2 = 1:2$ , розроблена обмотка із співвідношенням чисел полюсів  $2p_1:2p_2 = 2:3$ , яка має кращі обмоткові коефіцієнти. Суміщена роторна обмотка для співвідношення  $2p_1:2p_2 = 2:3$  теж має більш високі обмоткові коефіцієнти порівняно з роторною обмоткою із співвідношенням  $2p_1:2p_2 = 1:2$ .

## ВИСНОВКИ

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

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. II. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
2. Красношарпа М.М. Асинхронно-синхронные машины каскадного типа // Тр. Третьей Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. Т. 2. – Рига: Знание. – 1966. – С. 237-244.
3. Луцик В.Д. Совмещенные электрические машины и аппараты. – К.: Техника, 1993. – 203 с.
4. Луцик В.Д., Семенов В.В. Новый тип тихоходного асинхронно-синхронного двигателя // Уголь України. – 2008. – №9. – С. 39-41.

Надійшла 09.09.2010

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

Іваненко Володимир Сергійович

Борзик Валерій Леонідович, м.н.с.

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

V.D. Luschik, V.S. Ivanenko, V.L. Borzik

### Synchronous cascade engine with combined winding.

A synchronous cascade engine with combined windings is considered. The results of experimental researches are resulted. Advantages of synchronous cascade engine with combined windings are grounded as compared to slow synchronous engines.

Key words – winding, synchronous cascade engine.