

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

## **АСИНХРОННІ ДВИГУНИ З ПАЗАМИ РІЗНОЇ ВИСОТИ В КОРОТКОЗАМКНЕНОМУ РОТОРІ**

*Показано, що різної висоти пази в короткозамкненому роторі покращують масогабаритні та енергетичні показники асинхронних двигунів.*

**Ключові слова:** *асинхронний двигун, короткозамкнений ротор, пази ротора, ярмо ротора, втрати електричні, потужність, коефіцієнт корисної дії.*

*Показано, что пазы различной высоты в короткозамкнутом роторе улучшают массогабаритные и энергетические показатели асинхронных двигателей.*

**Ключевые слова:** *асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, пазы ротора, ярмо ротора, электрические потери, мощность, коэффициент полезного действия.*

Асинхронні двигуни продовжують домінувати в електроприводі. 90% всіх електричних двигунів – це асинхронні двигуни. Асинхронні двигуни споживають більше половини всієї електричної енергії, що виробляється в світі. Тому покращення масогабаритних та енергетичних показників асинхронних двигунів являється актуальною і важливою проблемою.

Завдяки науково розробленим програмам оптимального проектування [1,2] асинхронні двигуни досягли високої ступені досконалості. Вважають, що подальше покращення асинхронних двигунів можливе лише завдяки покращенню магнітних та ізоляційних матеріалів. Але, як виявилось, є ще можливості для покращення характеристик асинхронних двигунів [3,4].

З урахуванням того, що частина магнітного потоку в номінальному режимі проходить через вал, всі розрахункові методики [5,6] враховують цю обставину слідуючою формулою для розрахунку висоти ярма ротора:

$$h_{\text{я}} = \frac{2+p}{3,2p} \left( \frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) - \frac{2}{3} d_k, \quad (1)$$

де  $p$  – число пар полюсів;

$D_2$  – діаметр ротора;

$h_{п2}$  – висота паза ротора;

$d_k$  – діаметр вентиляційних каналів в роторі.

Але як показує аналіз всіх серійних двигунів як з трапецеїдальними пазами під мідні стрижні, так і з овальними пазами під заливку пазів розплавленим алюмінієм чи міддю, висота ярма ротора  $h_y$  виявляється завищеною, індукція в ярмі ротора не перевищує  $B_y=1Тл$ , що свідчить про недовикористання активних матеріалів ротора і потенційну заниженість потужності всіх серійних асинхронних двигунів. Збільшення висоти пазів ротора, щоб збільшити провідниковий матеріал обмотки і повноцінно завантажити ярмо ротора, неможливе із-за критичного зменшення ширини паза в нижній його частині (рисунок 1), яка по технологічним умовам не повинна бути менша трьох міліметрів.

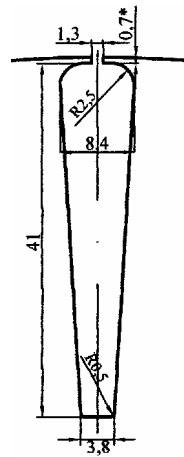


Рисунок 1 – Паз під трапецеїдальні мідні стрижні

Оптимальну висоту ярма ротора, яка визначається із врахуванням оптимальної індукції в ярмі ротора  $B_y$ , що рекомендується для даної полюсності, знаходять так:

Магнітний потік одного полюса в повітряному зазорі

$$\Phi_\delta = B_\delta \frac{D_2}{p} l_\delta, \quad (2)$$

де  $B_\delta$  - індукція в повітряному зазорі,  $B_\delta \approx 0,8Тл$  ;

$l_\delta$  - довжина магнітопроводу.

В спинці ротора потік  $\Phi_\delta$  розгалужується на дві половини

$$\Phi_{\text{я}} = \frac{\Phi_{\delta}}{2} = B_{\text{я}} h_{\text{я}} l_{\delta} k_c, \quad (3)$$

де  $k_c$  – коефіцієнт заповнення сталі.

Використовуючи (2) і (3), одержуємо оптимальну висоту ярма статора

$$h_{\text{я}} = \frac{B_{\delta} D_2}{2 p B_{\text{я}} k_c}. \quad (4)$$

Приймаємо індукцію  $B_{\text{я}}$  дещо меншу середніх значень, що рекомендуються. Для двополюсних машин ( $2p=2$ ) приймаємо  $B_{\text{я}}=1,4\text{Тл}$ , для  $2p=4$  –  $B_{\text{я}}=1,2\text{Тл}$ , для  $2p=6$  –  $B_{\text{я}}=1,2\text{Тл}$ , для  $2p=8$  –  $B_{\text{я}}=1\text{Тл}$ . Використовуючи ці значення індукцій і підставляючи (4) в (1), знаходимо висоту паза ротора  $h_{\text{п}2}$ , при якій будуть забезпечуватись індукції в ярмі ротора, що рекомендуються.

Для двополюсної машини ( $2p=2$ )  $h_{\text{п}2} = 0,2D_2 - 0,7d_k$ , для чотириполюсної ( $2p=4$ )  $h_{\text{п}2} = 0,24D_2 - 1,1d_k$ , для шестиполюсної ( $2p=6$ )  $h_{\text{п}2} = 0,29D_2 - 1,3d_k$ , для восьмиполюсної ( $2p=8$ )  $h_{\text{п}2} = 0,29D_2 - 1,4d_k$ .

Щоб можна було здійснити пази з такими висотами, потрібно їх виконувати в роторах через паз, як показано на рисунку 2.

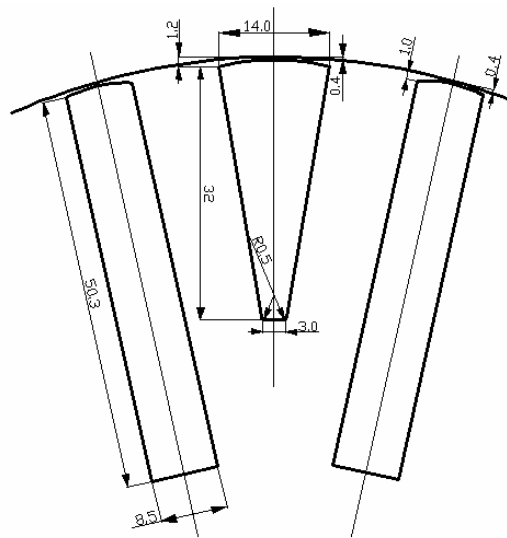


Рисунок 2 – Пази різної висоти під мідні стрижні

Для двигунів з трапецеїдальними пазами під мідні стрижні раціонально пази з великою висотою виконувати прямокутної форми, а між ними розміщувати пази трапецеїдальної форми. Висота пазів трапецеїдальної форми залежить від ширини паза в нижній його частині, яка не повинна бути менша трьох міліметрів, і становить приблизно 60% висоти прямокутного паза.

Для двигунів з овальними пазами під заливку пазів розплавленим алюмінієм чи міддю пази з великою висотою в нижній частині розширюють до ширини верхньої частини і розміщують між короткими пазами в поперемінній послідовності (рисунок 3).

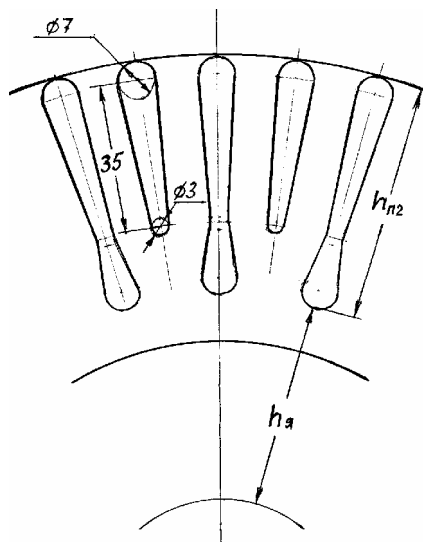


Рисунок 3 – Пази різної висоти під алюмінієву заливку ротора

Проблема збільшення корисної потужності асинхронних двигунів вугільних комбайнів особливо актуальна. Збільшення потужності комбайнових двигунів пропорційно збільшує продуктивність праці вугільних комбайнів, але габаритні розміри комбайнових двигунів збільшувати неможливо із-за обмеженості габаритних розмірів вугільних комбайнів.

Тому розглянемо ефективність збільшення висоти пазів ротора в асинхронних двигунах вугільних комбайнів, що виготовляють ВАТ «Донецький електротехнічний завод» та ВАТ «Первомайський електро-механічний завод».

Для двигуна ЕКВК4-220 (ВАТ ДЕТЗ) із обмоткової записки маємо:  $P_{2н} = 220кВт$ ;  $U_1 = 1140/660В$ ;  $I_{л} = 142/ 246А$ ;  $n_{синхр.} = 1500об/ хв.$ ;  $S_n = 1,5\%$ ;  $\eta = 92\%$ ;  $\cos \varphi_1 = 0,85$ ; діаметр ротора  $D_2 = 231,4мм$ ; довжина магнітопроводів статора і ротора  $l_{\delta} = 630мм$ ;  $Z_1 = 48$ ;  $Z_2 = 38$ ;  $W_{1\phi} = 56$ ;  $r_{1\phi 20^{\circ}} = 0,0767Ом$ ; магнітний потік  $\Phi = 0,0573Вб$ ; розміри трапецеїдального стержня ротора 7,9; 3,3; 40,5; розміри короткозамикаючого кільця 18×50; матеріал стержнів і кілець – мідь.

Приймаємо за базові величини:  $P_{2н} = 220кВт$ ;  $U_{1\phi} = 660В$ ;  $I_{1\phi} = 142А$ ;  $\cos \varphi_1 = 0,85$ . Споживана потужність

$P_1 = 3U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cos \varphi_1 = 3 \cdot 660 \cdot 142 \cdot 0,85 = 238986 \text{ Вт}$ . Уточнюємо ККД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{220000}{238986} = 92,055\%.$$

В серійному двигуні висота паза ротора  $h_{n2} = 41,7 \text{ мм}$  (рисунок 1). Знаходимо висоту ярма ротора, через яку проходить магнітний потік  $\Phi_{\text{я}}$ , використовуючи (1)

$$h_{\text{я}} = \frac{2 + p}{3,2p} \left( \frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) = \frac{2 + 2}{3,2 \cdot 2} \left( \frac{231,4}{2} - 41,7 \right) = 46,25 \text{ мм}.$$

Індукція в ярмі ротора, використовуючи формулу (3):

$$B_{\text{я}} = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot h_{\text{я}} \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{0,0573}{2 \cdot 0,04625 \cdot 0,63 \cdot 0,97} = 1,0135 \text{ Тл}.$$

В таблиці 1 приведені дані електромагнітних розрахунків згідно з рекомендаціями [3].

Таблиця 1 – Дані електромагнітних розрахунків серійного двигуна

$P_{M1_{115^\circ}}$	$P_{ст.1}$	$P_{см}$	$I_2$	$r_c$	$q_c$	$r_{кл.}$	$r_2$	$P_{M2}$	$P_{доод}$	$P_{мех}$	$S$
Вт	Вт	Вт	А	Ом	мм <sup>2</sup>	Ом	Ом	Вт	Вт	Вт	%
6403	3929	228654	1033,655	$6,666 \cdot 10^{-5}$	226,8	$0,0399 \cdot 10^{-5}$	$7,402 \cdot 10^{-5}$	3005	1195	4454	1,314

З переходом до пазів неоднакової висоти (рисунок 2) висота ярма ротора

$$h_{\text{я}} = \frac{2 + p}{3,2p} \left( \frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) = \frac{2 + 2}{3,2 \cdot 2} \left( \frac{231,4}{2} - 51,3 \right) = 40,25 \text{ мм}.$$

Індукція в ярмі ротора

$$B_{\text{я}} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{\text{я}} \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = 1,165 \text{ Тл}$$

збільшується незначно, тому  $\cos \varphi_1$  залишається незмінним.

Площа поперечного перерізу трапецеїдального стрижня

$$q_{c1} = \frac{b_{c1} + b_{c2}}{2} \cdot h_{c1} = \frac{13,7 + 2,7}{2} \cdot 31,5 = 258,3 \text{ мм}^2$$

площа поперечного перерізу прямокутного стрижня

$$q_{c2} = b_{c2} \cdot h_{c2} = 8 \cdot 50 = 400 \text{ мм}^2.$$

Середнє значення поперечного перерізу стрижня ротора нової конструкції

$$q_{к.сер} = \frac{q_{c1} + q_{c2}}{2} = \frac{258,3 + 400}{2} = 329,15 \text{ мм}^2.$$

Активний опір стрижня ротора нової конструкції

$$r_c = \rho_{115^\circ} \frac{l_c}{q_{c/сер}} = 0,024 \cdot \frac{0,63}{329,15} = 4,5932 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

Опір  $r_{кл.}$  залишається без зміни.

В результаті опір  $r_2$

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{кл.}}{\Delta^2} = 4,5932 \cdot 10^{-5} + 0,736 \cdot 10^{-5} = 5,3292 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

Втрати в обмотці ротора нової конструкції

$$p_{m2} = Z_2 I_2^2 \cdot r_2 = 38 \cdot 1033,655^2 \cdot 5,3292 \cdot 10^{-5} = 2163 \text{ Вт},$$

що на 842 Вт менше порівняно з ротором серійної конструкції.

Визначаємо струм  $I_{1\phi}$ , при якому сумарні втрати в двигуні залишаться практично незмінними. В результаті відповідних розрахунків знаходимо цей струм:

$$I_{1\phi} = 148 \text{ А},$$

відповідно струм в роторі

$$I_2 = 1078 \text{ А}.$$

В таблиці 2 приведені дані електромагнітних розрахунків для ротора нової конструкції.

Таблиця 2 - Дані електромагнітних розрахунків модернізованого двигуна

$P_{m1}$	$P_m$	$P_1$	$P_{\text{дод}}$	$\sum p$	$P_2$	$\eta$	$S$
Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	%	%
6963	2353	249084	1245	18944	230140	92,3945	0,9878

Корисна потужність збільшилась на 4,6%, сумарні втрати залишились практично незмінними (на 42 Вт зменшились), коефіцієнт корисної дії збільшився на 0,36%.

Незважаючи на збільшення ваги міді в роторі, загальна вартість міді в роторі зменшилась, так як профільна трапецеїдальна мідь в 1,5 рази дорожча за прямокутну мідь.

Пускові властивості не погіршуються. В прямокутних стрижнях висотою 50мм діє значний ефект витіснення струму, активний опір ротора при пуску такий же, як і в серійному роторі.

Для двигуна ЕКВ4-140 (ВАТ ПЕМЗ) є дані типових випробувань, що полегшує розрахунки:  $U_{1л} = 660В$ ;  $I_{1л} = I_{1\phi} = 152,6А$ ;  $P_1 = 153119Вм$ ;  $p_{m1} = 4390Вм$ ;  $p_{см.1} = 1830Вм$ ;  $p_{m2} = 4554Вм$ ;  $p_{mех} = 1580Вм$ ;  $p_{\text{дод.}} = 765Вм$ ;  $\sum p = 13119Вм$ ;  $P_2 = 140000Вм$ ;  $\eta = 91,43$ ;  $\cos\phi_1 = 0,88$ ;  $s = 3,1\%$ ;  $r_{1\phi 115^\circ} = 0,06285$ . Необхідні для розрахунків дані із обмоткової записки:  $w_{1\phi} = 40$ ;  $\kappa_{об.1} = 0,925$ ; діаметр ротора 227,8мм; довжина пакетів статора і ротора  $l_\delta = 510мм$ ; магнітний потік  $\Phi = 0,0457Вб$ ; число пазів ротора  $Z_2 = 45$ ; висота пазів ротора  $h_{n2} = 35мм$ ; площа поперечного перерізу паза ротора  $q_{n2} = 172,8мм^2$ ; площа поперечного перерізу кільця  $q_k = 26 \times 37 = 962мм^2$ ; ротор залитий алюмінієм.

Індукція в спинці ротора, використовуючи формулу (3),

$$B_\gamma = 0,9426Тл.$$

При збільшенні в половини пазів ротора їх висоти до  $h_{n2} = 48мм$  індукція в спинці ротора підвищується до  $B_\gamma = 1,12Тл$ , середнє значення поперечного перерізу паза в роторі збільшується до  $q'_{n2} = 207,4мм^2$ ; пропорційно збільшується площа поперечного перерізу короткозамикаючого кільця. В результаті пропорційно зменшуються втрати в обмотці ротора:

$$p'_{m2} = p_{m2} \cdot \frac{q_{n2}}{q'_{n2}} = 4554 \cdot \frac{172,8}{207,4} = 3794 \text{Вт},$$

що на  $\Delta p = 760 \text{Вт}$  менше, ніж в роторі з рівновеликими пазами.

Струм  $I'_{1\phi}$ , при якому сумарні втрати в двигуні залишаються незмінними,

$$I'_{1\phi} = 159,4 \text{А}.$$

Втрати в міді статора при струмі  $I'_{1\phi} = 159,4 \text{А}$

$$p'_{m1} = 3I'^2_{1\phi} \cdot r_{1\phi 115^\circ} = 3 \cdot 159,4^2 \cdot 0,06285 = 4790 \text{Вт}.$$

Втрати в обмотці ротора при струмі статора  $I'_{1\phi} = 159,4 \text{А}$

$$p''_{m2} = p'_{m2} \left( \frac{I'_{1\phi}}{I_{1\phi}} \right)^2 = 3794 \left( \frac{159,4}{152,6} \right)^2 = 4139 \text{Вт}.$$

Сумарні втрати в двигуні

$$\begin{aligned} \sum p' &= p'_{m1} + p_{cm.1} + p''_{m2} + p_{mex.} + p'_{\text{дод.}} = \\ &= 4790 + 1830 + 4139 + 1580 + 800 = 13139 \text{Вт}. \end{aligned}$$

Споживана потужність

$$P'_1 = 3U_{1\phi} \cdot I'_{1\phi} \cos \varphi_1 = 3 \cdot 380 \cdot 159,4 \cdot 0,88 = 159910 \text{Вт}.$$

Корисна потужність

$$P'_2 = P'_1 - \sum p' = 159910 - 13139 = 146771.$$

Корисна потужність збільшилась на 4,836% при практично незмінних втратах в двигуні.

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta' = \frac{P'_2}{P'_1} = \frac{146771}{159910} = 91,7835\% \text{ (на } 0,3866\% \text{ збільшився)}.$$



Ковзаня

$$S' = \frac{P_{m2}''}{P_{em}'} = \frac{4139}{159910 - 4790 - 1830} = 2,7\% \text{ (на 13\% зменшилось).}$$

Таким чином, виконання пазів в роторі різної висоти дозволяє збільшити поперечний переріз пазів ротора, що призводить до покращення масогабаритних та енергетичних показників асинхронних двигунів з короткозамкненими роторами.

В асинхронних двигунах з трапецеїдальними мідними стрижнями виготовлення двигунів здешевлюється.

### **Бібліографічний список**

1. *Асинхронные двигатели общего назначения. Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковалев Ю.М. и др. Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488с., ил.*

2. *Оптимальное проектирование асинхронных взрывозащищенных двигателей. Горягин В.Ф., Загрядцкий В.И., Сычева Т.А. и др. Кишинев, «Штиинца», 1980, 200с. Табл. 46, библиогр. 52, ил. 47.*

3. *Луцик В.Д. Асинхронний двигун з короткозамкненою обмоткою на роторі. Патент України на корисну модель №42184, Бюл. №12, 25.06.2009, ДонДТУ.*

4. *Луцик В.Д. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Патент України по заявці а 200810695, позитивне рішення від 26.01.10.*

5. *Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Ф.А. Горянов, Б.К. Клоков и др. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.*

6. *Гурин Я.С., Кузнецов Б.И, Проектирование серий электрических машин. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.*