

*Доктор техн. наук, професор Лущик В.Д.,  
студентка Чернікова Г.О.  
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

## **КАСКАДНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ З СУМІЩЕНИМИ ОБМОТКАМИ**

*Описаний принцип дії каскадних асинхронних двигунів класичної конструкції та двигунів з суміщеними обмотками. Показана перспективність цього напряму електромашинобудування.*

**Проблема і її зв'язок з науковими та практичними задачами.** Скільки небудь помітне покращення енергетичних та масогабаритних показників асинхронних двигунів припинилось. За рахунок оптимального використання сучасних електротехнічних сталей, провідників, ізоляційних матеріалів та оптимізаційних розрахунків подальшого суттєвого прогресу досягти практично неможливо. Потрібно вишукувати нові принципово відмінні можливості. Одна з таких можливостей криється у використанні каскадних асинхронних двигунів з суміщеними обмотками.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Каскадні асинхронні двигуни для покращення пускових властивостей і для безконтактного реостатного регулювання швидкості відомі давно [1,2,3,4,5]. Асинхронний каскадний двигун – це дві асинхронні машини, зв'язані між собою. Прогрес, досягнутий в останні десятиліття в теорії і практиці суміщення різнополюсних та різнополюсних електрических машин [6,7], дозволяє створити принципово новий каскадний асинхронний двигун з покращеними властивостями.

**Постановка задачі.** Потрібно показати принцип суміщення обмоток  $2p_1/2p_2$  - полюсного каскадного асинхронного двигуна з суміщеними магнітопроводами, нові позитивні властивості, які з'являються в такому двигуні, і провести його порівняльний аналіз із асинхронним двигуном серійної конструкції такої ж швидкості обертання.

**Виклад матеріалу і його результати.** Каскадний асинхронний двигун складається із двох асинхронних двигунів з фазовими роторами, які механічно зв'язані між собою, а обмотки роторів електрично з'єднані з перехрещенням фаз. Перший каскад має число полюсів  $2p_1$ , другий каскад -  $2p_2$ , яке може як дорівнювати  $2p_1$ , так і відрізнятись.

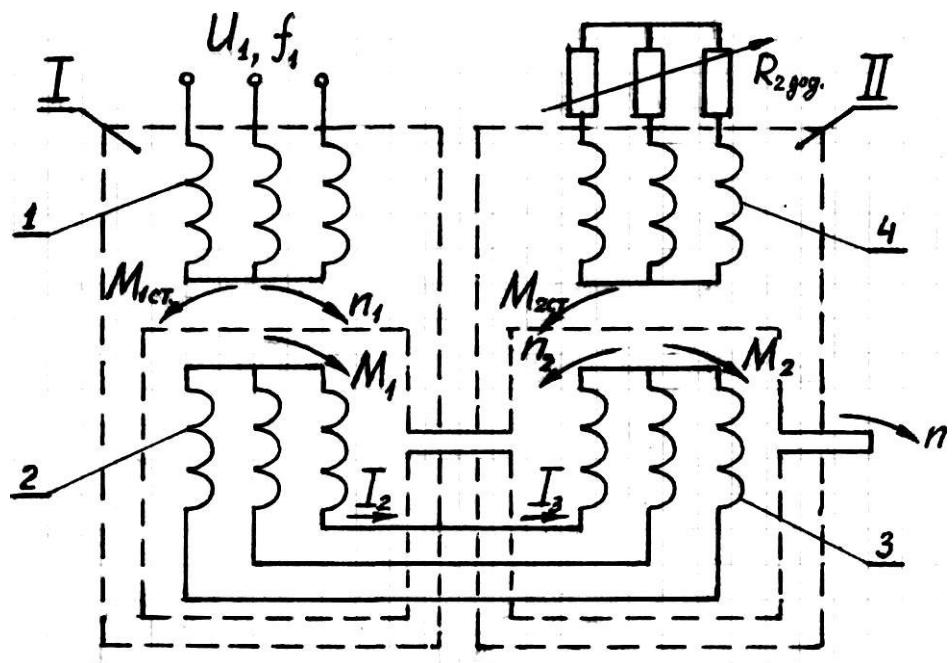


Рисунок 1 – Принципова електрична схема каскадного асинхронного двигуна.

Статорна обмотка першого каскаду 1 під'єднується до електричної мережі напругою  $U_1$  і створює магнітне поле  $\Phi_1$  із швидкістю обертання  $n_1 = f_1 / p_1$ . Струм  $I_2$  в роторній обмотці 2, викликаний магнітним полем  $\Phi_1$ , взаємодіючи з цим полем, утворює електромагнітний момент  $M_1$ , який діє на ротор першого каскаду в напрямі обертання магнітного поля  $\Phi_1$  і приводить в рух із швидкістю  $n$  як ротор першого каскаду, так і ротор другого каскаду, так як вони механічно зв'язані. Частота струму  $I_2$  в роторі

$$f_2 = f_1 \cdot s, \quad (1)$$

де ковзання

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2)$$

По роторній обмотці 3 другого каскаду протікає струм  $I_3$ , який дорівнює струму  $I_2$  в роторній обмотці 2. Струм  $I_3$  в роторній обмотці 3 створює магнітне поле  $\Phi_2$ , яке обертається відносно другого каскаду зі швидкістю

$$n_2 = f_2 \neq f_1 \cdot s / p_2 \quad (3)$$

При  $n_2 > n$  напрям обертання магнітного поля  $\Phi_2$  відносно статорної обмотки 4 другого каскаду такий, як показано на рис.1. Струм  $I_4$  в статорній обмотці 4, викликаний магнітним полем  $\Phi_2$ , взаємодіючи з цим полем, утворює електромагнітний момент  $M_{2\text{ст.}}$ , який діє на статор в напрямі обертання магнітного поля  $\Phi_2$  відносно статора.

На ротор другого каскаду діє в протилежному напрямі такий же по величині електромагнітний момент  $M_2$ , який направлений узгоджено з електромагнітним моментом  $M_1$  першого каскаду. Швидкість  $n$  каскадного двигуна, яка дорівнює  $n_2$ , називається каскадною швидкістю і позначається  $n_{\text{кд}}$ . Знайдем  $n_{\text{кд}}$  із рівності  $n_2 = n_{\text{кд}}$

$$n_2 = \frac{f_1 s}{p_2} - \frac{f_1}{p_2} \left( \frac{n_1 - n_{\text{кд}}}{n_1} \right) - \frac{f_1}{p_2} \left( \frac{\frac{f_1}{p_1} - n_{\text{кд}}}{\frac{f_1}{p_1}} \right) n_{\text{кд}} =$$

Звідки

$$n_{\text{кд}} = \frac{f_1}{p_1 + p_2} \quad (4)$$

Магнітне поле  $\Phi_2$  відносно статора обертається із швидкістю

$$n_3 = n_2 - n \quad (5)$$

При швидкості  $n = n_{\text{кд}}$  швидкість  $n_3$  дорівнює нулю, магнітне поле  $\Phi_2$  нерухоме відносно статора, електромагнітний момент  $M_2$  дорівнює нулю. Це режим холостого ходу каскадного асинхронного двигуна. При  $n > n_{\text{кд}}$  момент  $M_2$  змінює свій напрям, діє зустрічно  $M_1$  і стає гальмівним моментом. Тому каскадні асинхронні двигуни працюють в межах від  $n = 0$  до  $n = n_{\text{кд}}$

Розглянемо електромагнітні процеси в каскадному асинхронному двигуні з суміщеними магнітопроводами і двома окремими обмотками на статорі і двома обмотками на роторі. При суміщенні магнітопроводів числа полюсів обмоток каскадів повинні відрізнятись. Приймемо число полюсів першого каскаду  $2p_1 = 4$ , число полюсів другого каскаду -  $2p_2 = 2$ . На рис.2 показані роторні обмотки, розміщені в одних і тих же позах ротора і зображені одна над другою. Обмотка 2 –  $2p_1$  – полюсна,  $2p_1 = 4$  (рис. 2а), обмотка 3 –  $2p_2$  - полюсна,  $2p_2 = 2$  (рис. 2б), виконана такими ж котушками, як і обмотка 2, тобто виконана із скороченням кроку  $y = 0,5\tau_2 = \tau_1$ .

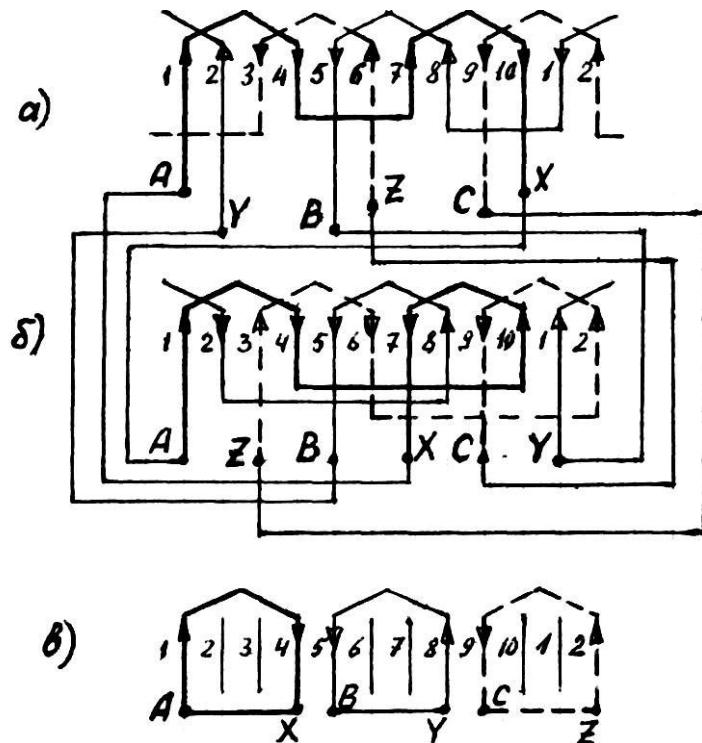


Рисунок 2- Роторні обмотки каскадного асинхронного двигуна.

Обидві обмотки виконані одинаковим числом витків в котушках і одинаковим проводом. Кожна обмотка займає половину пазового простору. Початки фаз обмотки 2 зміщені один відносно другого на  $240^\circ$ ел. в  $2p_1$  - полюсному полі, початки фаз обмотки 3 зміщені на кут  $120^\circ$ ел. в  $2p_2$  - полюсному полі, тому струм  $I_2=I_3$ , яким протікає по обом послідовно ввімкненим обмоткам, буде створювати магнітні поля, що обертаються в протилежних напрямках.

Частота ЕРС  $E_4$ , що наводиться в статорній обмотці 4,

$$f_4 = p_2 n_{\overline{3}} \quad p_2(n_2 - n) = p_2 \left[ \frac{f_1 s}{p_2} - \frac{f_1}{p_1}(1-s) \right] = \\ = f_1 - n(p_1 + p_2) \quad (6)$$

При каскадній швидкості  $n_{k\partial} = \frac{f_1}{p_1 + p_2}$  частота  $f_4 = 0$ , струм  $I_4$  не

виникає і електромагнітний момент  $M_2$ , як було зазначено вище, дорівнює нулю.

Щоб визначити струми в обмотках, скористаємося схемою заміщення (рис. 3), яка розглянута для безконтактного асинхронного перетворювача частоти в [7,8], генераторна частина якого має таку ж принципову електричну схему, як і в каскадному асинхронному двигуні.

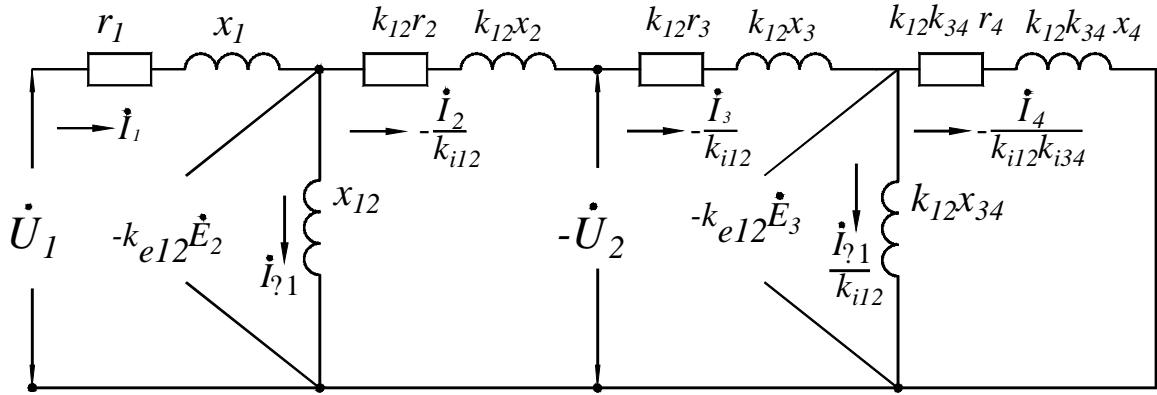


Рисунок 3- Схема заміщення каскадного асинхронного двигуна

Якщо знехтувати намагнічуючими струмами, тобто прийняти  $I_{m1}=I_{m3}=0$ , то струми  $I_2$  і  $I_3$ , які потрібні для визначення електромагнітних моментів  $M_1$  і  $M_2$ , знаходять так:

$$I_2 = I_3 = \frac{\dot{U}_1}{r_1 k_{i21} + (r_2 + r_3) k_{e12} + r_4 k_{e14} k_{i34} + j [x_1 k_{i21} + (x_2 + x_3) k_{e12} + x_4 k_{e14} k_{i34}]}, \quad (7)$$

$$\text{де } k_{i21} = \frac{w_2 k_{ob.2}}{w_1 k_{ob.1}}, \quad k_{i34} = \frac{w_3 k_{ob.3}}{w_4 k_{ob.4}}, \quad k_{e12} = \frac{f_1 w_1 k_{ob.1}}{f_2 w_2 k_{ob.2}}, \quad k_{e14} = \frac{f_1 w_1 k_{ob.1} k_{ob.3}}{f_4 w_4 k_{ob.4} k_{ob.2}};$$

$w$  і  $k_{ob.}$  – число витків і обмоткові коефіцієнти відповідних обмоток

Не врахування намагнічуючих струмів призводить до виникнення похибки величиною до 10%.

Роторні обмотки 2 і 3, показані на рис. 2а,б, можна об'єднати і створити одну суміщену обмотку. Це можливо зробити завдяки тому, що обмотки виконані одинаковими по величині котушками. Фази кожної із обмоток складаються із двох послідовно ввімкнених котушок. В перших котушках всіх фаз обох обмоток струми направлені в одному напрямі, в других котушках – в протилежному. Тому МРС, створювана другими котушками всіх фаз обох обмоток, дорівнює нулю, і другі котушки виявляються зайвими. Залишаються послідовно ввімкнені тільки перші котушки, другі котушки всі зникають. Суміщенна обмотка, показана на рис. 2в, виконує такі ж функції, як і дві обмотки, обмотка 2 і обмотка 3, тобто при однаковому струмі  $I_2$  створює такі ж по величині магнітні поля  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$ . В кожній котушці суміщеної обмотки в два рази більше витків (при незмінному діаметрі проводу), ніж в окремій котушці кожної із обмоток. В половині пазів мідь відсутня, витрата міді зменшується в два рази. Відповідно там, де нема міді, па-

зи можна не штампувати. Так як ЕРС  $E_2$   $2p_1$ -полюсного поля наводиться тільки в обмотці 2, із якої залишилось три котушки зі збільшеним в два рази числом витків, то ЕРС  $E_2$ , яка буде наводитись в котушках суміщеної обмотки, не зменшується. Враховуючи, що повний опір  $Z_2+Z_3$  суміщеної обмотки в два рази зменшується, так як зменшується в два рази число послідовно ввімкнених витків, то при незмінному ковзанні з струмом  $I_2$  в суміщенні обмотці суттєво зростає і відповідно зростає електромагнітний момент і потужність.

Взагалі ж роторні короткозамкнені котушки доцільно виготовлять із неізольованої мідної шини, яка на кінцях або зварюється, або з'єднується з допомогою болтів.

Дві статорні обмотки 1 і 4 теж можна виконати суміщеними в двох варіантах, в залежності від функціональних задач, які ставляться перед каскадними асинхронними двигунами: 1) каскадні асинхронні двигуни короткозамкнені, не призначені для регулювання швидкості; 2) каскадні асинхронні двигуни короткозамкнені для регулювання швидкості.

Для короткозамкнених двигунів кожна фаза статорної обмотки виконується із паралельних віток, які утворюються так, щоб паралельні віткиожної фази утворювали короткозамкнені контури для ЕРС, що наводиться в цих вітках  $2p_2$ - полюсним полем. На рис. 4 показана фаза

$2p_1$  – полюсної ( $2p_1=4$ ) двошарової статорної обмотки в двох варіантах. ЕРС, яка наводиться в обмотці  $2p_2$  – полюсним ( $2p_2=2$ ) полем (рис. 4а), показана в обмотці стрілками. Обмотка на рис. 4б короткозамкнена відносно  $2p_2$  - полюсного поля, в ній виникає струм від дії  $2p_2$  - полюсного поля. В обмотці на рис. 4в струм не виникає; ЕРС, що наводиться в котушках від  $2p_2$  - полюсного поля, направлена зустрічно в короткозамкненому контурі, утвореному паралельними вітками.

Однак для регулювання швидкості обмотки з відношенням  $2p_1/2p_2=2$  або  $2p_1/2p_2=0,5$  не придатні, тому що між нульовими виводами обмотки, з'єднаної в подвійну зірку,  $2p_2$  - полюсне поле не утворює різниці потенціалів. В цих обмотках нульові виводи, між якими можна вмикати регулювальний реостат для регулювання швидкості, є еквіпотенціальні.

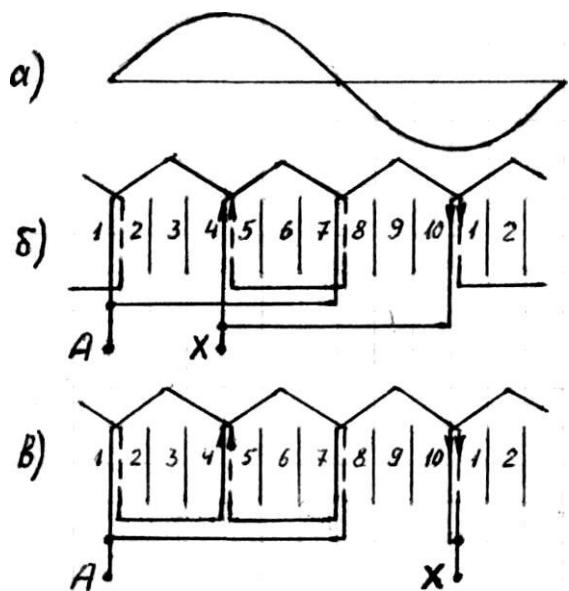


Рисунок 4 – Фаза 4-полюсної обмотки в двох варіантах

Регулювальну статорну обмотку можна створити при суміщенні обмоток з числом полюсів  $2p_1=4$  і  $2p_2=6$ . На рис.5а показана  $2p_1$  – полюсна ( $2p_1=4$ ) одношарова обмотка, на рис. 5б -  $2p_2$  - полюсне поле,  $2p_2=6$ . В обмотці, яка з'єднана в дві паралельні зірки, показана ЕРС від  $2p_2$ -полюсного поля. З рис. 5а видно, що між нульовими виводами виникає ЕРС під дією  $2p_2$ -полюсного поля. Під'єднуючи регулювальний реостат до нульових виводів, можливо безконтактним способом регулювати швидкість обертання каскадного асинхронного двигуна.

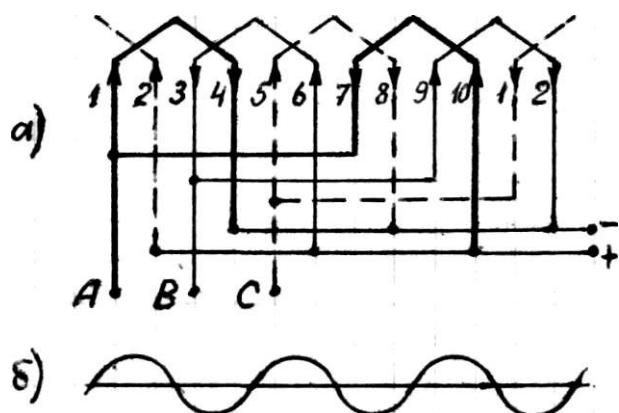


Рисунок 5 – Суміщена 4/6 – полюсна обмотка

**Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку.** Каскадні асинхронні двигуни з суміщеними магнітопроводами і суміщеними  $2p_1/2p_2$  – полюсними обмотками будуть мати кращі масо-габаритні показники порівняно з  $2p_1$  – полюсними асинхронними двигу-

нами серійної конструкції. Додаткові переваги: 1) кращі пускові властивості, пусковий момент більший при менших пускових струмах; 2) можливості безконтактного регулювання швидкості обертання; 3) роторні котушки виготовляються із мідних шин, така технологія більш проста порівняно з заливкою пазів розплавленою міддю.

*Описан принцип действия каскадных асинхронных двигателей классической конструкции и двигателей с совмещенными обмотками. Показана перспективность этого направления в электромашиностроении.*

*The principle of operation of cascade asynchronous production engines and engines with adjusted windings is described. This avenue shows promise for electric machine engineering.*

### **Бібліографічний список.**

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины.- Л.: Энергия. – 1973.- Ч II. – 648 с.
2. Красношапка М.М. Асинхронно-синхронные машины каскадного типа // Тр. Третьей Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам.- Рига : Зинатне.- 1966.-Т. 2.- С. 237-244.
3. Просужих Р.П. Некоторые вопросы исследования асинхронного электродвигателя с внутренним каскадом // Тр. Третьей Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам.- Рига : Зинатне.- 1966.-Т. 2.- С. 245-252.
4. Адаменко А.П., Антоненко А.И. Перспективы применения машин с внутренним каскадом // Проблемы техн. электродинамики. – 1974. – Вып. 46.- С. 105-109.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов.- М.: Енергия, 1980.- 928 с.
6. Попов В.П. Электромашинные совмещенные преобразователи частоты.- М.: Энергия, 1980.- 176 с.
7. Лущик В.Д. Совмещенные электрические машины и аппараты. – К.: Техника, 1993. – 203 с.
8. Лущик В.Д. Токи короткого замыкания асинхронных преобразователей частоты // Электротехника. – 1966. - №7. – С. 61-63.