

## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НОВОЮ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Лущик В.Д., д.т.н., проф.

Донбаський державний технічний університет, кафедра "Електричні машини і апарати"

Україна, 94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16

*Розглянута нова система електромагнітного збудження машин постійного струму. Приводяться дані експериментальних досліджень.*

*Рассмотрена новая система электромагнитного возбуждения машин постоянного тока. Приводятся данные экспериментальных исследований.*

Відомо, що реакція якоря машини постійного струму негативно впливає на її роботу. Реакція якоря створює магнітне поле в повітряному зазорі, що приводить до погіршення потенціальної кривої на колекторі, а також діє розмагнічуючим способом на основний магнітний потік. Для зменшення розмагнічуючого впливу реакції якоря збільшують повітряний зазор, а це приводить до необхідності збільшення МРС основних полюсів, тобто до збільшення витрати міді основних полюсів. МРС додаткових полюсів направлена зустрічно МРС якоря і повинна дещо перевершувати її, тому міді додаткових полюсів витрачається стільки ж, скільки і міді якірної обмотки. В машинах, що працюють при різко змінних навантаженнях, в полюсових накінчиках розміщують компенсаційну обмотку, що конструктивно ускладнює машину і здорожує її виготовлення. Велика кількість міді основних і додаткових полюсів приводить до збільшення втрат електричної енергії і до зменшення коефіцієнту корисної дії.

Відомі машини з повною компенсацією реакції якоря (1). Статор виконують аналогічно статору асинхронної машини, тобто шихтованим із сталевих листів з рівномірно розміщеними по колу пазами. У всіх пазах статора рівномірно розміщують провідники компенсаційної обмотки і обмотки збудження. Компенсаційна обмотка повністю компенсує реакцію якоря, тому повітряний зазор рівномірний і мінімально можливий з умови механічної надійності обертання якоря.

В двигунах (2) також здійснена повна компенсація реакції якоря, але компенсаційна обмотка займає половину пазів кожного полюсного ділення. Обмотка збудження, яка може бути як незалежного, так, так і змішаного збудження, займає іншу половину полюсного ділення. Вісь МРС компенсаційної обмотки співпадає з вісю МРС якірної обмотки і направлена зустрічно. Така ідея реалізована в серіях фірми 1G3, 1H3, 1H4.

Значно більш ефективно несиметричне розміщення компенсаційної обмотки відносно поздовжньої вісі (3, 4). Компенсаційну обмотку розміщують на половині кожного полюсного ділення між поздовжньою та поперечною вісю і вмикають послідовно з якірною обмоткою; напрям струму в компенсаційній обмотці протилежний напрямку струму в поряд розміщених пазах якірної обмотки (рис. 1).

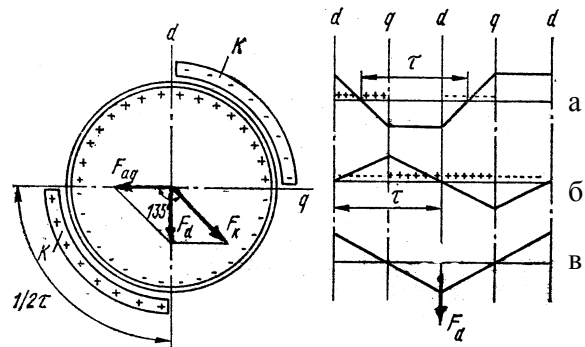


Рис. 1. Двигун послідовного збудження з неявнополюсним статором:

- а – розподілення МРС компенсаційної обмотки;  
б – розподілення МРС якірної обмотки;  
в – розподілення результуючої МРС

Амплітудне значення МРС компенсаційної обмотки

$$F_{km} = A_k \cdot \frac{\tau}{4} = \frac{N_k I_k}{2p} \cdot \frac{\tau}{4} = \frac{N_k I_a}{4p} \quad (1)$$

повинно дорівнювати амплітудному значенню МРС якірної обмотки

$$F_{am} = A_a \cdot \frac{\tau}{2} = \frac{N_a I_a}{2a \cdot 2p} \cdot \frac{\tau}{2} = \frac{N_a I_a}{2a \cdot 2p \cdot 2}, \quad (2)$$

де  $N_k$  - число активних провідників компенсаційної обмотки,  $N_a$  - число активних провідників обмотки якоря.

Середнє значення МРС визначається, використовуючи рис. 1:

$$F_{k\text{ср}} = \frac{\int_0^{\tau} F_k(x) dx}{\tau} = \frac{3}{4} F_{km}, \quad (3)$$

$$F_{a\text{ср}} = \frac{\int_0^{\tau} F_a(x) dx}{\tau} = \frac{1}{2} F_{am}, \quad (4)$$

де  $F_k(x)$ ,  $F_a(x)$  - змінні значення МРС в функції просторової координати  $x$ .

Діюче значення МРС першої гармонічної одного витка компенсаційної обмотки з діаметральним кроком, використовуючи закон повного струму і розклад в ряд Фур'є прямокутної форми кривої МРС витка

$$F'_{k1} = H_{\delta} = \frac{2}{\pi} I_a. \quad (5)$$

Діюче значення МРС першої гармонічної  $w_k/p$  витків однієї пари полюсів компенсаційної обмотки, враховуючи, що  $w_k/p = N_k/2p$  і використовуючи (1),

$$F_{k1} = \frac{2}{\pi} I_a \frac{N_k}{2p} K_{об.к} = \frac{4}{\pi} F_{km} k_{об.к} = \frac{8\sqrt{2}}{\pi^2} F_{km}, \quad (6)$$

де обмотковий коефіцієнт для компенсаційної обмотки

$$K_{об.к} = \frac{\sin \frac{\pi}{4}}{\frac{\pi}{4}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}$$

Діюче значення МРС першої гармонічної одного витка обмотки якоря з діаметральним кроком

$$F'_{a1} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{I_a}{2a}. \quad (7)$$

Діюче значення МРС першої гармонічної  $w_a/p$  витків однієї пари полюсів обмотки якоря, враховуючи, що  $w_a/p = N_a/2p$  і використовуючи формулу (2),

$$F_{a1} = \frac{2}{\pi} \frac{I_a}{2a} \frac{N_a}{2p} K_{об.а} = \frac{4}{\pi} F_{am} k_{об.а} = \frac{8\sqrt{2}}{\pi^2} F_{am}, \quad (8)$$

де обмотковий коефіцієнт для якірної обмотки

$$K_{об.а} = \frac{\sin \left( \frac{\pi}{2} \right)}{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi}$$

Як видно із порівняння формул (6) та (8), перші гармонічні МРС обмоток при рівності амплітудних значень  $F_{km}$  і  $F_{am}$  відрізняються в  $\sqrt{2}$  раз. Вектори МРС  $F_{k1}$  та  $F_{a1}$ , які визначають просторове розміщення обмоток, направлені під кутом  $135^\circ$  (рис. 1). При складанні цих векторів одержуємо вектор результуючої МРС  $F_d$ , який направлений по поздовжній вісі. Розподілення МРС обмоток в повітряному зазорі вздовж кола якоря показано на рис. 1.

В результаті спільної дії МРС обмотки якоря і компенсаційної обмотки створюється рівномірно розподілений вздовж кола якоря основний магнітний потік, направлений по поздовжній вісі  $d$ . Рівномірність основного магнітного потоку виключає можливість появи кругового вогню по колектору.

При виготовленні експериментального зразка двигуна був використаний якір генератора ПН-5,  $P_{2н}=1$  кВт,  $U_n=115$  В,  $n=2930$  об/хв.,  $I_{ан}=8,65$  А,  $2a=2p=2$ ,  $N_a=504$ . Для статора використаний пакет асинхронного двигуна АОЛ2-22-6.

Із умови рівності  $F_{km}$  та  $F_{am}$  (формули (1) і (2))  $N_k = N_a/2 = 252$ . Число пазів статора  $Z_1=24$ . Заповнено провідниками компенсаційної обмотки  $Z_{1к} = Z_1/2 = 12$  пазів. Число провідників в пазу і, отже

число витків в котушці одношарової компенсаційної обмотки

$$w_k = \frac{N_k}{Z_{1к}} = \frac{252}{12} = 21.$$

Враховуючи напівзакритість пазів статора та існуючі потоки розсіювання, приймаємо  $n_k = 6$ . Число котушок  $n_k = 6$ .

Для покращення комутації по поперечній вісі  $q$  розміщено по одній котушці додаткової обмотки з числом витків  $w_d = 12$ , які охоплюють по два зубці статора. Діаметр проводу компенсаційної та додаткової обмоток  $d_{гол}=1,35$  мм.

Опір якірної обмотки  $R_{a75}=1,127$  Ом, опір компенсаційної та додаткової обмоток  $R_k + R_{дод} = 1,73$  Ом. Вага міді всіх обмоток – 2,5 кг. В серійній машині ПН-5 вага міді – 3,6 кг.

Одержані експериментальні дані при номінальному струмі якоря  $I_{ан}=8,65$  А:

підведена напруга  $U_1=196$  В, споживана потужність  $P_1=1695$  Вт, частота обертання  $n=2941$  об/хв., втрати в міді якоря  $p_{ма}=84$  Вт, втрати в міді компенсаційної та додаткової обмоток  $P_{мк} + P_{мд} = 130$  Вт (обмотки якоря, компенсаційна та додаткова ввімкнені послідовно), втрати в сталі і механічні  $P_{ст} + P_{мех} = 260$  Вт, втрати додаткові  $P_{дод} = 8$  Вт, корисна потужність  $P_2=1212$  Вт, ККД = 71,7%.

Як витикає із експериментальних даних, двигун нової конструкції має на 30% менші втрати мідного проводу при більшій на 17% потужності в порівнянні з серійним двигуном з таким же якорем при однаковому струмовому навантаженні якоря. Збільшення потужності відбулось за рахунок збільшення ККД, так як тут втрати в міді додаткових полюсів практично відсутні, а також із-за збільшення основного магнітного потоку, і, отже, із-за кращого використання електромагнітних матеріалів. Основний магнітний потік збільшується за рахунок меншого повітряного зазору ( $\delta=0,3$  мм, замість  $\delta=1$  мм), із-за відсутності розмагнічуючої дії реакції якоря, а також із-за відсутності міжполюсного простору, в якому потік в машинах з явно вираженими полюсами дорівнює нулю.

На московському електромеханічному заводі "Динамо" був виготовлений і досліджений експериментальний двигун на базі троллейбусного двигуна ДК-210А3. На статорі використані пластини заліза асинхронного двигуна з внутрішнім діаметром  $D=280$  мм і зовнішнім  $D=480$  мм. Число пазів на статорі  $Z_1=60$ . Двигун ДК-210А3 з неявнополюсним статором має на 20% меншу витрату мідного проводу і на 10% більшу потужність при безіскровій комутації порівняно з серійним двигуном ДК-210А3. Двигун має підвищену перевагу з точки зору здібності із-за відсутності розмагнічуючого ефекту реакції якоря, а також має розширену зону безіскрової комутації.

Такі ж приблизно характеристики показав і троллейбусний двигун, виготовлений на заводі "Електроважмаш", м. Харків, в 1992 році з використанням їхнього серійного якоря. Однак тодішній спад виробництва не стимулював зацікавленості в модернізації

машин постійного струму.

Тепер така зацікавленість з'явилась. Як показують оптимізаційні електромагнітні розрахунки, більш ефективно не використовувати готовий серійний якір, а виготовляти нове залізо з оптимальною геометрією і з новими обмотковими даними, щоб максимально корисно використати позитивні властивості нової системи електромагнітного збудження.

Так, були проведені оптимізаційні розрахунки сучасного тролейбусного електродвигуна ЕД139АУ2, який має такі дані:  $P_2 = 140$  кВт,  $U = 550$  В,  $I_a = 280$  А,  $n = 1650$ -3540 об/хв.,  $\eta = 91\%$ ,  $M_2 = 810$  Нм,  $2p = 4$ , довжина пакета якоря  $l_6 = 355$  мм, діаметр якоря  $D = 294$  мм, число пазів якоря  $Z_2 = 45$ , паз  $8,2 \times 27,2$ , колекторних пластин  $k = 135$ , обмотка хвильова,  $2a = 2$ , повітряний зазор  $\delta = 2/3,5$  мм, обмотка послідовного збудження,  $R_{20} = 0,0386$  Ом,  $w_k = 20$ , опір обмотки додаткових полюсів  $F_{\text{дод}} = 0,02$  Ом,  $w_k = 19$ , опір обмотки якоря  $R_a = 0,04$  Ом. Регулювання здійснюється шунтуванням обмотки послідовного збудження.

Максимально можлива індукція в повітряному зазорі при навантаженні і при максимальному збудженні досягає всього лише  $B_\delta = 0,64$  Тл. (Магнітний потік вираховується або із ф-ли  $E_a = \frac{pn}{60} \frac{N}{a} \Phi$ , або із

$$\text{ф-ли } M_2 \approx M = \frac{p}{2p} \frac{N}{a} I_a \Phi, \quad n = 1650 \text{ об/хв.}).$$

В двигуні з неявнополюсним статором для регулювання швидкості потрібна обмотка незалежного збудження. Максимальна швидкість досягається без струму збудження за рахунок спільної дії якірної обмотки і компенсаційної обмотки, які створюють МРС  $F_d$ .  $F_d$  повинна бути достатня, щоб при номінальному навантаженні ( $I_a = 280$  А) мати максимальні оберти. Необхідної величини  $F_d$  можна досягти, зменшивши лінійне навантаження обмотки якоря. Для цього замість хвильової обмотки приймаємо петльову,  $2a = 4$ , струм в провідниках якоря зменшується в два рази, відповідно в два рази зменшується поперечний переріз міді, розмір паза стає меншим, паз  $6,9 \times 21$ .

При незмінності зовнішнього діаметру станини ( $D_{\text{ст}} = 500$  мм) діаметр якоря можна збільшити до  $D = 325$  мм, що дозволяє одержувати індукцію в зазорі  $B_\delta = 1,25$  Тл, повітряний зазор  $\delta = 1,7$  мм (при менших значеннях  $\delta$  зменшується максимально необхідна швидкість обертання). Опір обмотки якоря  $R_a = 0,02$  Ом, компенсаційної обмотки  $R_k = 0,02$  Ом. Сумарні втрати в обмотці якоря, в компенсаційній обмотці і в обмотці збудження при максимальному збудженні – 4480 Вт. вага провідникової міді в статорі і в якорі – 45 кг, а з врахуванням додаткової компенсаційної обмотки для реверсу – 50 кг.

В серійній машині сумарні втрати в обмотці якоря, в обмотці головних полюсів і додаткових полюсів – 7730 Вт. Вага провідникової міді в статорі і в якорі – 100 кг.

Коефіцієнт корисної дії неявнополюсної машини на 2-2,5% більший.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Пат. №51 – 516 Японія, кл. 55А23, М. кл. Н02К 23/22. Машина постійного тока.
2. Заявка № 2628334. ФРГ, М. кл. Н02К 1/16. Машина постійного тока.
3. Луцик В.Д. Двигатели постоянного тока с неявнополюсным статором //Электротехника. – 1992. - №8 – 9. С. 14 – 17.
4. Луцик В. Д. Суміщені електричні машини та апарати. – К.: Техніка, 1993. – 203 с. Мова рос.

Надійшла 03.09.2007