

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 накінецьниках 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).

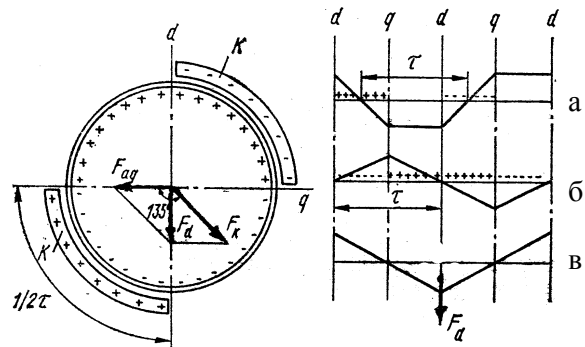


Рис. 1. Двигун послідовного збудження з неявнополюсним статором:

- 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° (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 тролейбусного 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 тролейбусний 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 8,2x27,2, 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 6,9x21.

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 δ 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. 55A23, М. кл. H02K 23/22. Машина постійного тока.
2. Заявка № 2628334. ФРГ, М. кл. H02K 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